

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

**Gallerie energetiche: ottimizzazione
termo-idraulica e studio del comportamento
stagionale**

Relatori:

Prof. Marco Barla

Ing. Alessandra Insana

Candidato:

Elisa Rosso

Luglio 2020

SOMMARIO

La diminuzione delle riserve di combustibili fossili, l'inquinamento associato al loro sfruttamento e la crescente domanda di energia hanno portato negli ultimi decenni alla ricerca di nuove tecnologie per lo sfruttamento delle energie rinnovabili. In questo contesto si collocano le geostrutture energetiche, elementi geotecnici in calcestruzzo armato che, oltre a svolgere il compito strutturale, inglobano scambiatori termici con lo scopo di utilizzare il sottosuolo per estrarre calore in inverno e disperdere calore in estate. Tali opere offrono il vantaggio di ottenere energia geotermica a costi competitivi e con un basso impatto ambientale; questa può essere impiegata per il riscaldamento ed il raffreddamento degli edifici sovrastanti e per il de-icing delle infrastrutture.

Nel presente lavoro di tesi è studiato il comportamento termo-idraulico di una galleria energetica, una particolare tipologia di geostruttura energetica, al fine di valutarne il potenziale termico e gli effetti dell'attivazione termica sul terreno, con particolare attenzione al lungo termine. Attualmente, infatti, le conoscenze relative alle gallerie energetiche, ottenute da analisi numeriche e sperimentali, sono ancora limitate e poco è noto per quanto riguarda il comportamento dopo più cicli stagionali di attivazione dell'impianto. Lo studio è condotto attraverso analisi numeriche agli elementi finiti svolte con il software FEFLOW, il quale consente di studiare il problema termo-idraulico accoppiato.

Nello specifico si considera una galleria realizzata con scavo meccanizzato e caratterizzata da conci energetici di tipo ENERTUN. Il caso studio preso in esame riguarda una tratta della Linea 2 della Metropolitana di Torino, attualmente in fase di progettazione; in particolare, sono analizzate due sezioni con proprietà termo-idrauliche più e meno favorevoli allo scambio termico. Si valuta per il caso in esame la configurazione ottimale dell'impianto, in termini di anelli collegati termicamente in serie, attraverso un'analisi costi-benefici, in cui i ricavi dipendono dalla potenza termica estraibile e sono determinati attraverso analisi numeriche, mentre i costi sono legati al funzionamento idraulico del sistema. Tale configurazione è utilizzata per lo studio del comportamento stagionale, per il quale sono

analizzate tre ipotesi di funzionamento dell'impianto: solo invernale, solo estivo e sia invernale che estivo.

I risultati evidenziano l'importanza di studiare la fattibilità energetica ed economica dell'impianto sulla base delle condizioni in sito, in quanto questa varia sensibilmente sulla base delle proprietà del terreno, e mostrano la convenienza del funzionamento combinato invernale ed estivo dell'impianto, rispetto al funzionamento solo invernale o solo estivo, in modo da prelevare calore in inverno e restituirlo in estate. Inoltre le temperature del terreno possono subire negli anni un raffreddamento o riscaldamento nell'intorno della galleria, ma le anomalie termiche sono contenute entro i 0,8 °C e si stabilizzano dopo i primi anni.

INDICE

SOMMARIO	I
INDICE DELLE FIGURE	V
INDICE DELLE TABELLE.....	XI
1 Introduzione	1
1.1 Struttura della tesi.....	2
2 Energia geotermica	4
2.1 Il calore terrestre.....	4
2.2 Sistemi geotermici.....	8
2.2.1 Classificazione dei sistemi geotermici.....	10
2.3 Sistemi geotermici a bassa entalpia	12
2.3.1 Pompa di calore.....	13
2.3.2 Sistemi a circuito aperto.....	17
2.3.3 Sistemi a circuito chiuso	18
2.4 Gallerie energetiche	22
2.4.1 Concio energetico ENERTUN	24
2.4.2 Influenza delle condizioni geotecniche sull'efficienza delle gallerie energetiche.....	27
3 Analisi numerica FEM termo-idraulica accoppiata.....	29
3.1 Analisi numerica e metodo agli elementi finiti	29
3.2 Analisi termo-idraulica accoppiata.....	31
3.2.1 Proprietà idrauliche del sottosuolo.....	34
3.2.2 Proprietà termiche del sottosuolo	34
3.2.3 Condizioni iniziali e al contorno.....	37
4 Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica	38
4.1 Caso studio: Linea 2 della Metropolitana di Torino	38
4.2 Realizzazione del modello	40

4.2.1	Impostazioni generali del modello	41
4.2.2	Geometria.....	41
4.2.3	Parametri dei materiali.....	45
4.2.4	Condizioni iniziali e al contorno.....	48
4.3	Risultati delle simulazioni.....	50
4.4	Potenza termica scambiabile	61
4.5	Stima dei costi dell’impianto	64
4.6	Analisi costi-benefici.....	71
4.6.1	Modello più favorevole	73
4.6.2	Modello meno favorevole	75
4.6.3	Considerazioni	78
5	Studio del comportamento stagionale.....	79
5.1	Realizzazione del modello	79
5.1.1	Condizioni iniziali e al contorno.....	80
5.2	Modello più favorevole	86
5.2.1	Funzionamento solo invernale	86
5.2.2	Funzionamento solo estivo	89
5.2.3	Funzionamento sia invernale che estivo	91
5.3	Modello meno favorevole	93
5.3.1	Funzionamento solo invernale	93
5.3.2	Funzionamento solo estivo	95
5.3.3	Funzionamento sia invernale che estivo	98
6	Conclusioni	102
	APPENDICE A: Analisi costi-benefici per la sezione in condizioni più sfavorevoli della ML2	106
	BIBLIOGRAFIA	113
	RINGRAZIAMENTI	116

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1. Curva delle variazioni di temperatura all'interno della Terra (Venzo, 2006)	5
Figura 2.2. Effetto del calore proveniente dal sole sulla temperatura del sottosuolo (Brandl, 2009) ...	5
Figura 2.3. Schema della struttura interna della Terra: crosta, mantello e nucleo (Dickson and Fanelli,2004)	6
Figura 2.4. Meccanismo della tettonica a zolle (Pregliasco,2013)	7
Figura 2.5. Rappresentazione schematica di un sistema geotermico (Dickson and Fanelli,2004)	8
Figura 2.6. Modello di un sistema geotermico. (Dickson and Fanelli,2004)	9
Figura 2.7. Diagramma di utilizzazione dei fluidi geotermici sulla base della temperatura (derivato da Lindal, 1973)	11
Figura 2.8. Componenti di un impianto geotermico a pompa di calore (Capodaglio et al., 2018).....	12
Figura 2.9. Principio di funzionamento di una pompa di calore (Casali, 2015).....	13
Figura 2.10. Schema funzionale della pompa di calore (Doninelli, 2007)	14
Figura 2.11. Schema funzionale della pompa di calore all'interno di un impianto geotermico (Capodaglio et al., 2018)	14
Figura 2.12. Diagramma pressione-entalpia del ciclo termodinamico del fluido frigorigeno in una pompa di calore (www.energyhunters.it).....	15
Figura 2.13. Sistema geotermico a circuito aperto (Capodaglio et al., 2018; Karytsas, 2017)	18
Figura 2.14. Sistemi a circuito chiuso: sonde geotermiche orizzontali (A), geostrutture energetiche (B) e sonde geotermiche verticali (C) (Capodaglio et al., 2018)	18
Figura 2.15. Sonde geotermiche orizzontali in serie (a) e in parallelo (b) (Karytsas, 2017).....	19
Figura 2.16. Sonde geotermiche orizzontali in trincea (a) e a spirale(b) (Karytsas, 2017).....	19
Figura 2.17. Sonde geotermiche verticali con due sondaggi (Karytsas, 2017).....	20
Figura 2.18. Sezioni trasversali di sonde geotermiche ad U singola (A), a U doppia (B), coassiale (C) (Capodaglio et al., 2018)	20
Figura 2.19. Palo di fondazione attivato termicamente (Laloui and Di Donna, 2011)	21
Figura 2.20. Esempio di tubi energetici fissati al geotessile non tessuto nella galleria Lainzer a Vienna (Adam and Markiewicz, 2009).....	22
Figura 2.21. Rappresentazione schematica del rivestimento prefabbricato di una galleria attivato termicamente (Barla and Perino, 2014)	23
Figura 2.22. Concio energetico sviluppato dalla Rehau AG & Co e dalla Zublin AG (Barla and Di Donna, 2016).....	24

Figura 2.23. Concio energetico ENERTUN (Barla and Di Donna, 2016).....	24
Figura 2.24. Confronto tra concio ENERTUN e conci precedenti in termini di scambio termico ottenuto da simulazioni numeriche (Barla, Di Donna, Insana, 2019).....	25
Figura 2.25. Configurazioni del concio energetico ENERTUN: (a) ground&air, (b) ground e (c) air (Barla and Di Donna, 2018).....	25
Figura 2.26. Esempio di progetto di uno dei conci ENERTUN utilizzati nel campo sperimentale della Linea 1 della Metropolitana di Torino (Barla et al., 2019)	26
Figura 2.27. Abachi di progetto riportanti il calore scambiato in W/m^2 per (a) inverno e (b) estate (Di Donna and Barla, 2015).....	28
Figura 3.1. Processi termo-idro-meccanici accoppiati in un ammasso roccioso fratturato (Jing, 2003)	32
Figura 3.2. Valori di conducibilità termica in funzione del contenuto d'acqua e della densità secca per terreni (a) a grana grossa, ghiacciati, (b) a grana grossa, non ghiacciati, (c) a grana fine, ghiacciati, (d) a grana fine, non ghiacciati (Brandl, 2006)	36
Figura 4.1. Planimetria con indicazione del tracciato complessivo della ML2 (Politecnico di Torino, 2020).....	39
Figura 4.2 Classificazione dei 5 parametri considerati per le porzioni scavate con metodo TBM (Politecnico di Torino, 2020)	40
Figura 4.3. Dimensioni della sezione del modello verticale e perpendicolare all'asse della galleria....	42
Figura 4.4. Divisione in layers e slices di un anello di rivestimento (quote in metri).....	42
Figura 4.5. Geometria del modello numerico 3D con 15 anelli su FEFLOW.....	43
Figura 4.6. Geometria del modello numerico 3D con 12 anelli su FEFLOW.....	43
Figura 4.7. Geometria delle serpentine per i casi di (a) 15 anelli indipendenti, (b) 6 gruppi di 2 anelli in serie, (c) 5 gruppi di 3 anelli in serie, (d) 3 gruppi di 4 anelli in serie, (e) 3 gruppi di 5 anelli in serie ..	44
Figura 4.8. Dettaglio dei materiali del modello più favorevole.....	45
Figura 4.9. Dettaglio dei materiali del modello meno favorevole	45
Figura 4.10. Elementi a conducibilità termica nulla in corrispondenza dei tratti di collegamento tra le tubazioni di due anelli	47
Figura 4.11. Condizioni iniziali idrauliche del modello più favorevole.....	49
Figura 4.12. Condizioni iniziali idrauliche del modello meno favorevole, nel caso di spessore di 22,5 m	49
Figura 4.13. Posizione degli "observational point"	50
Figura 4.14. Distribuzione delle temperature nell'intorno della galleria al termine della fase di inizializzazione per il modello più favorevole nel caso invernale	51

Figura 4.15. Distribuzione delle temperature nell'intorno della galleria al termine della fase di inizializzazione per il modello più favorevole nel caso estivo.....	52
Figura 4.16. Distribuzione delle temperature nell'intorno della galleria al termine della fase di inizializzazione per il modello meno favorevole nel caso invernale	52
Figura 4.17. Distribuzione delle temperature nell'intorno della galleria al termine della fase di inizializzazione per il modello meno favorevole nel caso estivo.....	52
Figura 4.18. Andamento delle temperature registrato in corrispondenza dei punti di osservazione per il modello più favorevole nella configurazione 1, caso invernale	54
Figura 4.19. Andamento delle temperature registrato in corrispondenza dei punti di osservazione per il modello più favorevole nella configurazione 1, caso estivo	54
Figura 4.20. Andamento delle temperature registrato in corrispondenza dei punti di osservazione per il modello meno favorevole nella configurazione 1, caso invernale.....	55
Figura 4.21. Andamento delle temperature registrato in corrispondenza dei punti di osservazione per il modello meno favorevole nella configurazione 1, caso estivo	55
Figura 4.22. Temperature in corrispondenza delle serpentine al trentesimo giorno di simulazione nel modello più favorevole nel caso (a) invernale e (b) estivo	56
Figura 4.23. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello più favorevole dopo attivazione termica per 30 giorni, caso invernale.....	56
Figura 4.24. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello più favorevole dopo attivazione termica per 30 giorni, caso estivo	57
Figura 4.25. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello meno favorevole dopo attivazione termica per 30 giorni, caso invernale.....	57
Figura 4.26. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello meno favorevole dopo attivazione termica per 30 giorni, caso estivo	58
Figura 4.27. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello più favorevole dopo attivazione termica per 180 giorni, caso invernale.....	59
Figura 4.28. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello più favorevole dopo attivazione termica per 180 giorni, caso estivo	59
Figura 4.29. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello meno favorevole dopo attivazione termica per 180 giorni, caso invernale.....	60
Figura 4.30. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello meno favorevole dopo attivazione termica per 180 giorni, caso estivo	60
Figura 4.31. Valori di temperatura in uscita dalle serpentine per le diverse configurazioni studiate..	61
Figura 4.32. Potenza termica scambiabile nei diversi casi studiati	64
Figura 4.33. Potenza termica scambiabile al metro lineare di galleria nei diversi casi studiati.....	64

Figura 4.34. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 365 d all'anno	67
Figura 4.35. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 180 d all'anno	68
Figura 4.36. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 12 h al giorno e 180 d all'anno	68
Figura 4.37. Costi giornalieri idraulici globali al metro lineare di galleria nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 365 d all'anno	69
Figura 4.38. Costi giornalieri idraulici globali al metro lineare di galleria nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 180 d all'anno	70
Figura 4.39. Costi giornalieri idraulici globali al metro lineare di galleria nel caso di funzionamento per 12 h al giorno e 180 d all'anno	70
Figura 4.40. Ricavi termici al metro lineare di galleria per le due sezioni studiate, per un funzionamento giornaliero di 24 h	72
Figura 4.41. Ricavi termici al metro lineare di galleria per le due sezioni studiate, per un funzionamento giornaliero di 12 h	72
Figura 4.42. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno, modello più favorevole	73
Figura 4.43. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello più favorevole	74
Figura 4.44. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 12 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello più favorevole	74
Figura 4.45. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno, modello meno favorevole	76
Figura 4.46. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello meno favorevole	76
Figura 4.47. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 12 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello meno favorevole	77

Figura 5.1. Indicazione dei pozzi in corrispondenza dei quali è stata misurata la temperatura in galleria per la ML1 (cortesia da GTT)	80
Figura 5.2. Dati di temperatura registrati all'interno della galleria della ML1 in corrispondenza di dieci pozzi di ventilazione e funzione sinusoidale interpolante (dati forniti da GTT).....	81
Figura 5.3. Condizioni al contorno termiche per 5 anni, funzionamento solo invernale, modello più favorevole.....	83
Figura 5.4. Condizioni al contorno termiche per 5 anni, funzionamento solo estivo, modello più favorevole.....	84
Figura 5.5. Condizioni al contorno termiche per 5 anni, funzionamento sia invernale che estivo, modello più favorevole.....	84
Figura 5.6. Condizioni al contorno idrauliche per 5 anni, funzionamento solo invernale	85
Figura 5.7. Condizioni al contorno idrauliche per 5 anni, funzionamento solo estivo.....	85
Figura 5.8. Condizioni al contorno idrauliche per 5 anni, funzionamento sia invernale che estivo	86
Figura 5.9. Temperature registrate nei punti di osservazione per 10 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello più favorevole	87
Figura 5.10. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 10 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello più favorevole	87
Figura 5.11. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 10 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello più favorevole.....	88
Figura 5.12. Temperature registrate nei punti di osservazione per 10 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello più favorevole.....	89
Figura 5.13. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 10 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello più favorevole.....	90
Figura 5.14. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 10 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello più favorevole	90
Figura 5.15. Temperature registrate nei punti di osservazione per 10 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello più favorevole	91
Figura 5.16. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 10 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello più favorevole	92
Figura 5.17. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 10 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello più favorevole	92
Figura 5.18. Temperature registrate nei punti di osservazione per 15 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello meno favorevole	93

Figura 5.19. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello meno favorevole	94
Figura 5.20. Andamento dei valori minimi di potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello meno favorevole	94
Figura 5.21. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 15 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello meno favorevole.....	95
Figura 5.22. Temperature registrate nei punti di osservazione per 15 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello meno favorevole	96
Figura 5.23. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello meno favorevole	97
Figura 5.24. Andamento dei valori minimi di potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello meno favorevole.....	97
Figura 5.25. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 15 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello meno favorevole.....	98
Figura 5.26. Temperature registrate nei punti di osservazione per 15 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello meno favorevole	99
Figura 5.27. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello meno favorevole	100
Figura 5.28. Andamento dei valori minimi di potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello meno favorevole .	100
Figura 5.29. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 15 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello meno favorevole.....	101
Figura A.1. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni dopo attivazione termica per 180 giorni, caso invernale	107
Figura A.2. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni dopo attivazione termica per 180 giorni, caso estivo	107
Figura A.3. Valori di temperatura in uscita dalle serpentine per le diverse configurazioni studiate [°C]	108
Figura A.4. Potenza termica scambiabile nei diversi casi studiati.....	109
Figura A.5. Potenza termica scambiabile al metro lineare di galleria nei diversi casi studiati	109
Figura A.6. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno, modello meno favorevole	110

Figura A.7. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello meno favorevole 111

Figura A.8. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 12 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello meno favorevole 111

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1. Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (Dickson-Fanelli,2004)	11
Tabella 4.1. Parametri termo-idraulici del terreno	46
Tabella 4.2. Parametri termo-idraulici del calcestruzzo e della malta	46
Tabella 4.3. Parametri del fluido termovettore in funzione della temperatura	47
Tabella 4.4. Parametri delle tubazioni.....	47
Tabella 4.5. Valori di T_{out} al sessantesimo giorno di simulazione per le diverse configurazioni studiate [°C].....	58
Tabella 4.6. Valori di temperatura in uscita dalle serpentine per le diverse configurazioni studiate [°C]	61
Tabella 4.7. Valori dei parametri necessari al calcolo della potenza estraibile dal sistema geotermico	62
Tabella 4.8. Potenza termica scambiabile per il modello più favorevole nel caso invernale	63
Tabella 4.9. Potenza termica scambiabile per il modello più favorevole nel caso estivo.....	63
Tabella 4.10. Potenza termica scambiabile per il modello meno favorevole nel caso invernale	63
Tabella 4.11. Potenza termica scambiabile per il modello meno favorevole nel caso estivo.....	63
Tabella 4.12. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 365 d all'anno (Candito, 2020).....	66
Tabella 4.13. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 180 d all'anno (Candito, 2020).....	66
Tabella 4.14. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 12 h al giorno e 180 d all'anno (Candito, 2020).....	67
Tabella 4.15. Ricavi termici giornalieri al metro lineare di galleria	71
Tabella 5.1. Confronto della potenza termica scambiabile per la configurazione caratterizzata da due anelli collegati termicamente in serie in funzione della tipologia di condizione al contorno termica applicata all'intradosso della galleria, per analisi di 210 giorni	82
Tabella A.1 Valori di temperatura in uscita dalle serpentine dopo 180 giorni di attivazione termica [°C]	107
Tabella A.2. Potenza termica scambiabile nel caso invernale.....	108
Tabella A.3. Potenza termica scambiabile nel caso estivo	108
Tabella A.4. Ricavi termici giornalieri al metro lineare di galleria.....	110

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni è stata registrata una diminuzione delle riserve di combustibile fossile ed una sempre più crescente domanda di energia. Inoltre la produzione ed il consumo di energia da combustibile fossile sono causa di gran parte dei gas serra e dell'inquinamento dell'aria ed implicano importanti conseguenze ambientali e climatiche. Questi motivi hanno portato ad un interesse crescente nei confronti delle energie rinnovabili ed a progressi tecnologici in tale campo. A partire dal 2009 tutti gli Stati membri dell'Unione Europea si sono impegnati, con la Direttiva 2009/28/CE, a raggiungere entro il 2020 una quota minima di energie rinnovabili utilizzate rispetto al totale dei consumi. In Italia l'obiettivo del 17%, fissato dal "Piano d'Azione Nazionale per le energie rinnovabili", è stato ampiamente superato ed ora l'obiettivo per il 2030, fissato nel "Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima", è di arrivare ad una quota di fonti energetiche rinnovabili sui consumi pari al 30%.

Tra le energie rinnovabili in sviluppo vi è la geotermia, che rappresenta una soluzione efficiente per il suo potenziale elevato, la costanza nei confronti delle condizioni atmosferiche variabili, il basso impatto ambientale ed i costi competitivi. Le strutture geotecniche sotterranee, quali ad esempio fondazioni, diaframmi e gallerie, possono essere utilizzate per scambiare calore con il terreno e fornire energia termica utilizzabile per il riscaldamento ed il raffreddamento degli edifici sovrastanti e per il de-icing delle infrastrutture. L'attivazione termica è ottenuta installando delle serpentine nelle geostrutture, all'interno delle quali circola un fluido che estrae o inietta calore da o nel terreno; l'estrazione del calore dal fluido termovettore viene eseguita dalle pompe di calore. Rispetto ai più tradizionali pozzi scambiatori di calore, questi sistemi permettono di utilizzare le strutture geotecniche come scambiatori geotermici, senza richiedere ulteriori lavori e aree di scavo. In particolare, le gallerie energetiche interessano una maggiore superficie di contatto con il terreno rispetto alle altre geostrutture e risultano molto efficienti se collocate in ambito urbano, come nel caso della

metropolitana, in quanto è possibile sfruttare l'energia direttamente sul luogo di produzione. In questo contesto si inserisce lo studio condotto dal Politecnico di Torino negli ultimi anni, che ha portato nel 2016 a brevettare un nuovo concio energetico, chiamato ENERTUN, un elemento strutturale prefabbricato di rivestimento della galleria che consente di scambiare calore con il terreno e può essere impiegato nella realizzazione di gallerie scavate con metodo meccanizzato tramite TBM.

La presente tesi si pone l'obiettivo di studiare il comportamento termo-idraulico di una galleria energetica caratterizzata da conci ENERTUN, in modo da valutarne la resa energetica ed economica. In particolare, viene effettuato uno studio preliminare considerando un breve periodo di attivazione termica per diverse configurazioni impiantistiche, in modo da individuare quella ottimale da un punto di vista del bilancio tra i costi ed i ricavi termici. Quest'ultima è utilizzata per il successivo studio del comportamento stagionale, nell'ambito del quale si indaga la potenza termica scambiabile con il terreno con il passare degli anni e l'impatto termico sul terreno nelle vicinanze dell'opera. Attualmente, infatti, le conoscenze relative alle gallerie energetiche, provenienti da analisi numeriche e sperimentali, sono ancora limitate e poco è noto per quanto riguarda il comportamento e gli effetti a lungo termine dell'attivazione termica delle gallerie.

Il caso studio preso in esame riguarda alcune tratte del progetto della Linea 2 della Metropolitana di Torino (ML2). L'attivazione termica di tale opera è particolarmente interessante, in quanto essa dovrebbe transitare in aree dove sono previsti nuovi insediamenti, che potrebbero beneficiare del calore del sottosuolo.

1.1 Struttura della tesi

Il corpo centrale della tesi è suddiviso in quattro capitoli, escludendo il presente capitolo di introduzione e quello relativo alle conclusioni. Di seguito si riassumono i contenuti e gli obiettivi di ogni capitolo.

Capitolo 2, "Energia geotermica": Sono descritti i principi generali della geotermia, con particolare attenzione ai sistemi geotermici a bassa entalpia ed al funzionamento della pompa di calore. Dopo una classificazione dei diversi sistemi geotermici, vengono descritte con maggiore dettaglio le gallerie energetiche ed il concio energetico ENERTUN.

Capitolo 3, "Analisi numerica FEM termo-idraulica accoppiata": Si introducono i principi generali della modellazione numerica alla base del funzionamento del software FEFLOW, usato per le analisi riportate nei capitoli successivi. In particolare, si pone attenzione all'approccio di modellazione termo-idraulica accoppiata che caratterizza tali analisi.

Capitolo 4, "Ottimizzazione termica dell'impianto": Si studia il potenziale termico estraibile per diverse configurazioni dell'impianto all'interno del rivestimento della galleria per due sezioni di progetto della Linea 2 della Metropolitana di Torino, con caratteristiche più o meno favorevoli allo scambio termico. Le analisi sono effettuate con il software FEFLOW e simulano 30 giorni di funzionamento dell'impianto (poi portati a 180 giorni per ottenere risultati maggiormente conservativi). I dati di potenza termica estraibile ottenuti dalle diverse analisi sono utilizzati per una valutazione economica che permette il confronto con i costi idraulici dell'impianto, nell'ambito di un'analisi costi-benefici dalla quale si evince la configurazione ottimale.

Capitolo 5, "Studio del comportamento stagionale": Si affronta lo studio del funzionamento pluriennale dell'impianto, per la configurazione che è risultata ottimale e per entrambe le sezioni della ML2 analizzate al capitolo precedente, considerando una variabilità stagionale della temperatura all'interno della galleria ed un'attivazione dell'impianto definita secondo tre ipotesi (funzionamento solo invernale, solo estivo e sia invernale che estivo). L'obiettivo di tali analisi è la valutazione dell'efficienza termica a lungo termine e degli effetti dell'attivazione dell'impianto sulla temperatura del terreno.

2 ENERGIA GEOTERMICA

L'energia geotermica è quella particolare forma di energia della Terra dovuta al calore immagazzinato all'interno della crosta (Sommaruga & Verdiani, 1995). La disciplina che si occupa dello studio e dello sfruttamento di tale calore è la geotermia.

L'energia geotermica è di tipo rinnovabile: la Terra contiene infatti un enorme potenziale energetico sotto forma di calore, che può essere usato per il riscaldamento o il raffreddamento.

2.1 Il calore terrestre

Al fine di sfruttare il calore terrestre è importante conoscerne l'origine, la distribuzione e la propagazione. Il calore terrestre è prevalentemente di origine radiogenica: esso è prodotto continuamente dal decadimento degli isotopi radioattivi a lunga vita dell'uranio, del torio e del potassio presenti all'interno della Terra. Una parte del calore si propaga attraverso le rocce del sottosuolo per conduzione (senza trasporto di materia) e per convezione (con trasporto di materia) ed arriva in superficie, dove si disperde verso lo spazio.

Il gradiente geotermico, ossia l'aumento di temperatura con la profondità, è stato valutato mediamente pari a 2,5 °C - 3 °C ogni 100 metri, fino alle profondità raggiungibili con le moderne tecniche di perforazione. Tuttavia si hanno variazioni importanti di gradiente geotermico (anomalie termiche) in base alla composizione della crosta terrestre: in alcune zone esso risulta inferiore ad 1 °C/100 m, in altre supera 10 °C/100 m. Ad alte profondità il gradiente geotermico diminuisce, in quanto se rimanesse costante si otterrebbero temperature troppo elevate al nucleo, che porterebbero l'intero pianeta ad essere allo stato fuso. In base ai dati sismologici e alle leggi della termodinamica valori verosimili delle temperature rispettivamente alla base del mantello e al centro del nucleo sono

3700 °C e 4300 °C. L'andamento approssimativo della temperatura in funzione della profondità è riportato in Figura 2.1.

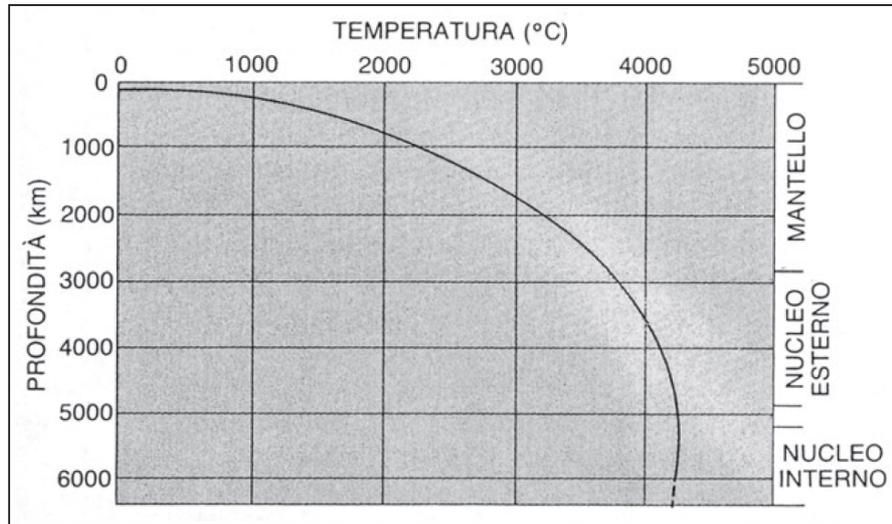


Figura 2.1. Curva delle variazioni di temperatura all'interno della Terra (Venzo, 2006)

Al calore proveniente dal centro della Terra, si aggiunge quello proveniente dal Sole: questo penetra poco in profondità; nel sottosuolo le variazioni stagionali della temperatura dell'atmosfera si attenuano fino allo "strato neutro", livello in corrispondenza del quale la temperatura è sempre la stessa, come si osserva in Figura 2.2. Lo strato neutro si trova a profondità variabili tra i 15 e i 20 metri in Italia, ma può assestarsi da pochi centimetri sotto la superficie, come in alcune regioni equatoriali, fino a 120 metri, come in Siberia.

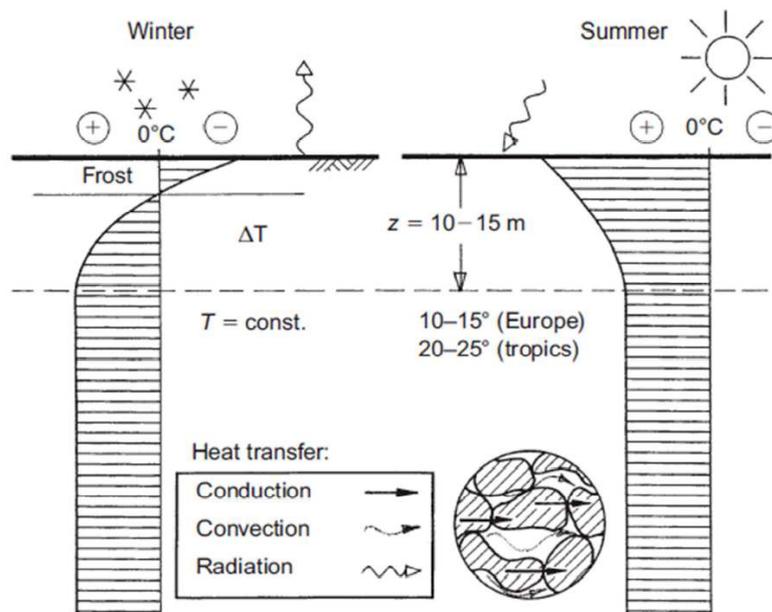


Figura 2.2. Effetto del calore proveniente dal sole sulla temperatura del sottosuolo (Brandl, 2009)

La differenza di temperatura tra le zone profonde e quelle superficiali genera un flusso di calore dall'interno verso l'esterno della Terra. Secondo lo studio di Pollack et al. (1993) il flusso di calore terrestre medio è pari a 65 mWm^{-2} nelle aree continentali e 101 mWm^{-2} in quelle oceaniche, con una media globale di 87 mWm^{-2} .

La conoscenza della struttura del globo terrestre è importante al fine di comprendere i fenomeni tettonici che avvengono sulla sua superficie e che sono responsabili delle anomalie termiche. La Terra è un ellissoide di rotazione schiacciato ai poli (geoide) il cui raggio medio misura 6370 km. Come si osserva in Figura 2.3, essa è costituita da strati concentrici di rocce di vario tipo: la parte più esterna è la crosta, spessa 20-65 km nelle aree continentali e 5-6 km in quelle oceaniche, a cui seguono il mantello, spesso circa 2900 km, e il nucleo, che ha un raggio di circa 3470 km. La crosta e la parte superiore del mantello formano la litosfera, il cui spessore va da meno di 80 km nelle aree oceaniche a più di 200 km in quelle continentali; essa si comporta come un corpo rigido ed è suddivisa in zolle dotate di mobilità. Al di sotto della litosfera si trova l'astenosfera, formata dalla parte profonda del mantello, che ha comportamento plastico a causa dell'enorme quantità di calore presente. All'interno di questa porzione si instaurano dei moti convettivi a causa delle differenze di temperatura tra le diverse profondità, che provocano il lento movimento (pochi centimetri l'anno) delle zolle che costituiscono la litosfera. Questo meccanismo è alla base della teoria della tettonica a zolle, illustrata in Figura 2.4.

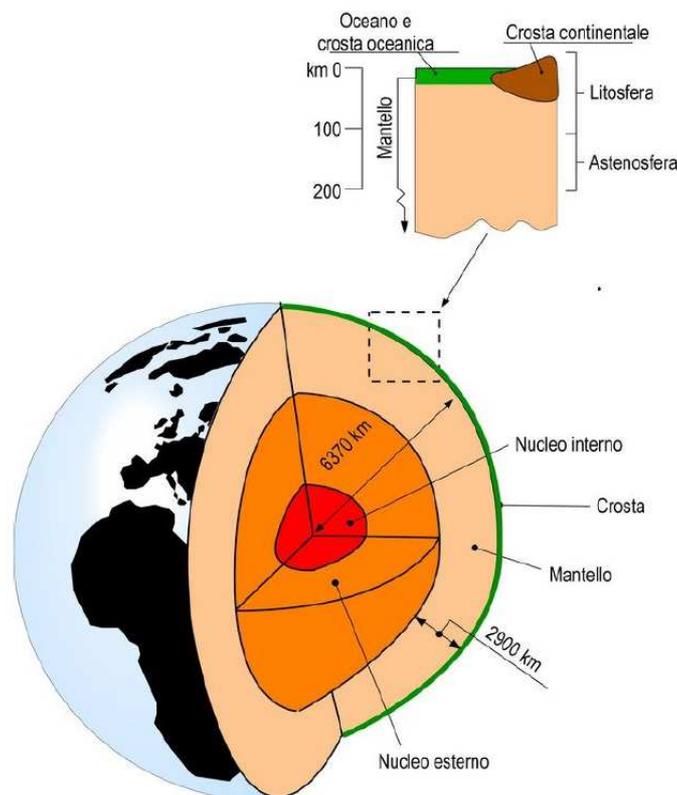


Figura 2.3. Schema della struttura interna della Terra: crosta, mantello e nucleo (Dickson and Fanelli, 2004)

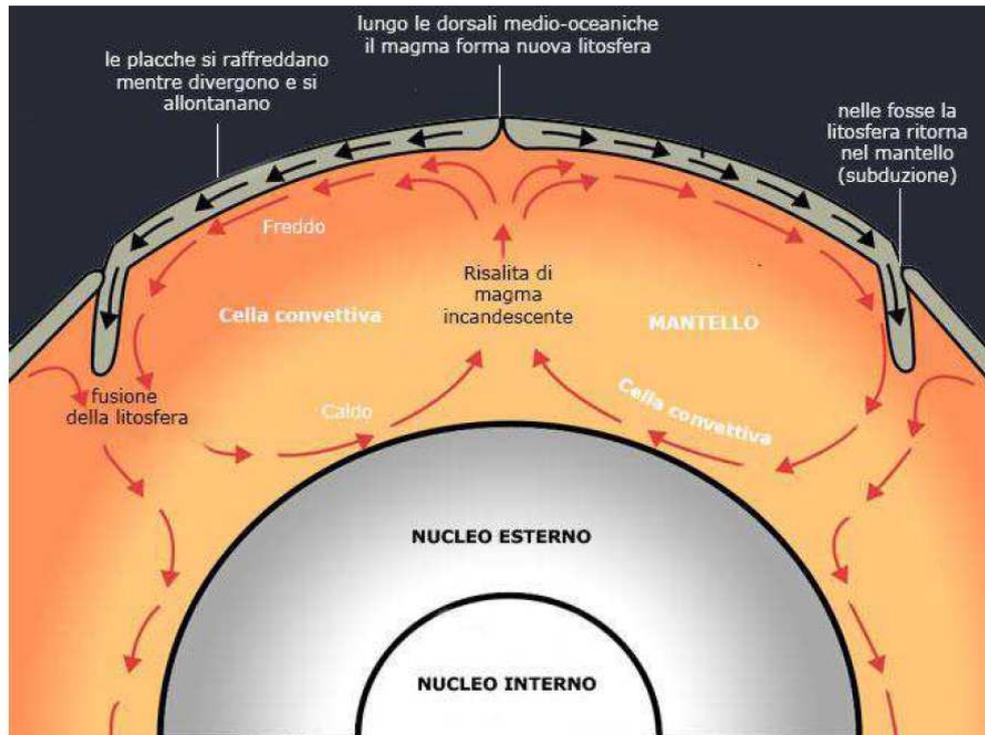


Figura 2.4. Meccanismo della tettonica a zolle (Pregliasco,2013)

I geologi hanno studiato i comportamenti delle placche osservando quello che accade lungo i loro margini: si hanno margini divergenti, convergenti o trasformati. Se due placche si allontanano, si ha la formazione di una **dorsale**: la litosfera si assottiglia fino al punto di lacerarsi, creando una fessura che, a causa del materiale ad alta temperatura risalente dall'astenosfera, presenta i bordi inarcati verso l'alto. Dalla cresta delle dorsali emerge una frazione di rocce fuse che solidifica a contatto con l'acqua marina, dando origine a nuova crosta oceanica. I fondali oceanici si allontanano di pochi centimetri l'anno, per effetto della continua produzione di nuova crosta e del trascinarsi dovuto ai moti convettivi dell'astenosfera. Quando due placche si avvicinano, si ha la formazione di una **zona di subduzione**: la litosfera di una placca si inflette verso il basso, immergendosi sotto la litosfera adiacente e scendendo verso l'astenosfera, dove viene in parte fusa e coinvolta nei moti convettivi. Parte del materiale che viene fuso durante la discesa all'astenosfera può risalire lungo fratture della crosta e dare origine ad archi magmatici con molti vulcani, parallelamente alla fossa e dal lato opposto rispetto a quello dove si trovano le dorsali. Infine, si hanno **margini trasformati** quando le placche scorrono l'una accanto all'altra: al contatto tra le due placche si ha in superficie la formazione di una frattura, o faglia.

I movimenti delle zolle portano quindi alla creazione di "fasce instabili", dove il magma arriva vicino alla superficie: queste aree sono termicamente molto calde ed il gradiente può essere 10-15 volte più alto di quello medio. Perciò le regioni che si trovano in corrispondenza dei margini tra le placche tettoniche costituiscono zone preferenziali per la ricerca geotermica.

2.2 Sistemi geotermici

Un sistema geotermico può essere definito come un “insieme di processi idrodinamici e termodinamici che interessano fluidi circolanti nel sottosuolo, in uno spazio definito, con possibilità di interazioni con l'esterno” (Sommaruga & Verdiani, 1995).

Gli elementi essenziali di un sistema geotermico, rappresentato in Figura 2.5, sono tre: la sorgente di calore, il serbatoio ed il fluido. La **sorgente di calore** può essere dispersa, quando viene sfruttato il normale calore della Terra, come in certi sistemi a bassa temperatura, oppure concentrata, quando si sfrutta la vicinanza alla superficie terrestre di intrusioni magmatiche ad alta temperatura ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$), come avviene in corrispondenza dei margini delle placche tettoniche. Il **serbatoio** è una massa rocciosa porosa e permeabile nella quale il fluido può circolare assorbendo il calore. Il serbatoio deve essere ricoperto da rocce impermeabili, che servono ad impedire o limitare la dispersione dei fluidi e del calore; esso generalmente fa parte di un sistema aperto, capace di essere rialimentato dall'esterno dalle acque meteoriche, ma in alcuni casi può essere confinato. Il **fluido** in genere è acqua e/o vapore, in dipendenza dalle condizioni di temperatura e pressione, nei quali sono presenti frazioni di sostanze chimiche, come CO_2 , H_2S ed altre.

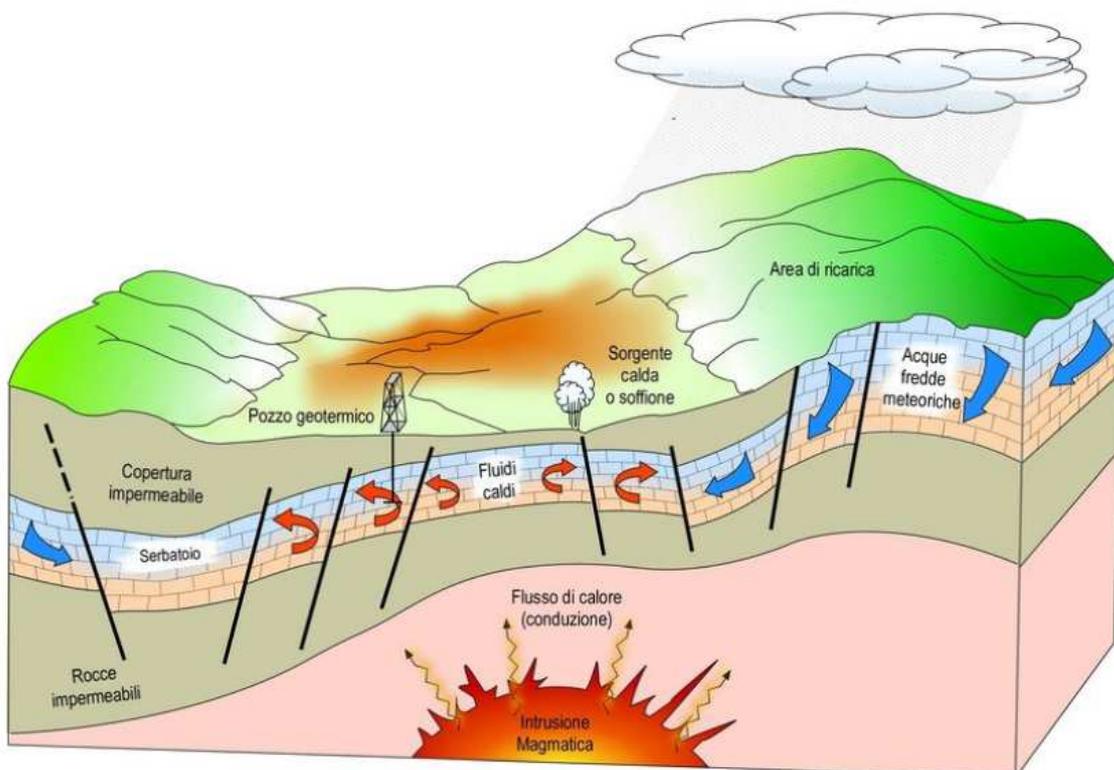


Figura 2.5. Rappresentazione schematica di un sistema geotermico (Dickson and Fanelli, 2004)

In un sistema aperto, l'alimentazione idrica proviene in genere dalle acque meteoriche, che controbilanciano la quantità di fluido estratto, mantenendo un livello di pressione adeguato. Se invece

il serbatoio è confinato, oppure il volume della massa estratta supera quella in entrata, possono verificarsi il declino della pressione dei fluidi e la subsidenza del territorio: per evitare il verificarsi di questi due fenomeni negativi occorre rialimentare il campo attraverso la reiniezione dei fluidi estratti e termicamente sfruttati.

In un sistema geotermico si attiva la convezione del fluido in seguito al riscaldamento dello stesso per effetto del calore contenuto nelle rocce: il fluido (acqua e/o vapore) raggiunge temperature anche di alcune centinaia di gradi e, diminuendo la sua densità, può risalire in superficie lungo faglie e fratture, dando luogo a manifestazioni geotermiche (sorgenti termali, fumarole, geyser, ecc.), mentre il fluido più freddo e di densità maggiore proveniente dai margini del sistema prende il suo posto. La risalita può anche essere indotta artificialmente tramite una perforazione meccanica (pozzo geotermico). In Figura 2.6 è rappresentato il funzionamento di un sistema geotermico: la curva 1 è la curva di ebollizione dell'acqua; la curva 2 mostra l'andamento della temperatura del fluido lungo il suo percorso dal punto di ingresso A a quello di uscita E.

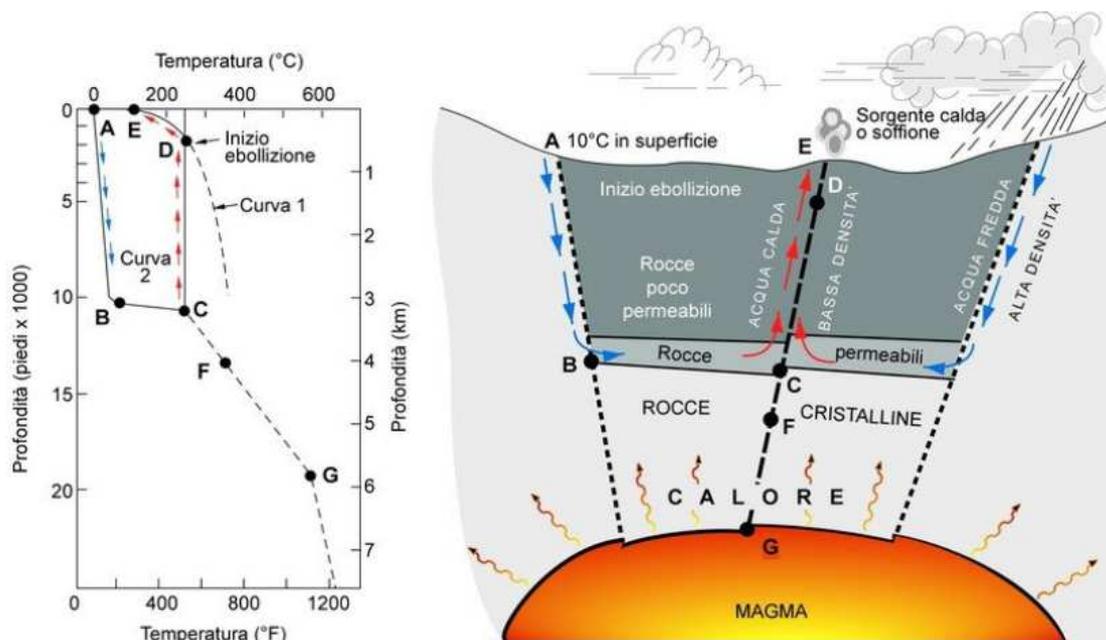


Figura 2.6. Modello di un sistema geotermico. (Dickson and Fanelli, 2004)

La sorgente di calore è l'unico dei tre elementi del sistema che deve essere naturale, mentre il serbatoio ed il fluido possono essere "artificiali". Per esempio, spesso il fluido viene immesso nuovamente nel serbatoio dopo lo sfruttamento dello stesso per la produzione di energia, attraverso appositi pozzi di reiniezione; in questo modo la ricarica naturale del serbatoio è integrata dalla ricarica artificiale e si riduce l'impatto ambientale degli impianti geotermici. Un esempio, invece, di serbatoio "artificiale" è rappresentato dal Progetto Rocce Calde Secche (HDR Project) in cui acqua ad alta pressione viene pompata, attraverso un pozzo appositamente perforato, in una formazione di roccia calda compatta, provocando la sua fratturazione idraulica; l'acqua penetra e circola nelle fratture

prodotte artificialmente ed estrae il calore delle rocce intorno, per poi risalire attraverso un secondo pozzo.

2.2.1 Classificazione dei sistemi geotermici

Le risorse geotermiche possono essere classificate sulla base di criteri diversi, di cui si riportano di seguito i più diffusi: fattibilità economica, tipologia di fluido, stato di equilibrio del serbatoio ed entalpia.

Considerando la **fattibilità economica**, si possono suddividere le risorse di base in accessibili ed inaccessibili: risulta accessibile l'energia termica contenuta tra la superficie terrestre ed una determinata profondità, in un'area definita e misurata partendo dalla temperatura media annua locale. Tra le risorse di base accessibili, solo una parte (risorse utili) può essere estratta, in accordo con la legislazione locale, entro un periodo di tempo definito (meno di 100 anni). Di queste, solo le risorse economiche individuate, cioè le risorse che possiedono un sufficiente grado di sicurezza geologica, possono essere legalmente estratte ad un costo competitivo con altre fonti commerciali di energia.

I sistemi geotermici vengono inoltre suddivisi tra **sistemi ad acqua dominante** e **sistemi a vapore dominante**, a seconda che la fase continua che controlla la pressione sia l'acqua liquida o il vapore secco. I sistemi geotermici più diffusi sono quelli ad acqua dominante, in cui la temperatura è in genere compresa tra 125 °C e 225 °C; essi possono produrre, in funzione della loro temperatura e pressione, acqua calda, una miscela di acqua e vapore o vapore umido. I sistemi geotermici a vapore dominante sono caratterizzati da temperature molto alte e producono vapore secco o surriscaldato.

La classificazione basata sullo **stato di equilibrio del serbatoio** tiene conto della circolazione dei fluidi e dello scambio termico nel serbatoio. Nei sistemi dinamici l'acqua ricarica in continuazione il serbatoio, si riscalda ed è poi scaricata in superficie o nelle formazioni rocciose permeabili circostanti; lo scambio termico avviene quindi per convezione e per conduzione. Nei sistemi statici, invece, la ricarica del serbatoio è molto ridotta o nulla e lo scambio termico avviene unicamente per conduzione; la mancanza di un'effettiva ricarica incide sulla rinnovabilità di tali sistemi geotermici.

L'**entalpia** è definita come una funzione di stato data dalla somma dell'energia interna U e del prodotto della pressione interna p per il volume V :

$$H = U + pV$$

Essa è usata per esprimere il contenuto di energia termica dei fluidi ed è circa proporzionale alla temperatura, perciò si tende a classificare le risorse geotermiche in bassa, media ed alta entalpia in funzione della temperatura del fluido sfruttato. Esistono diverse classificazioni (in Tabella 2.1 sono

riportati degli esempi), perciò è bene indicare comunque la temperatura dei fluidi geotermici, o almeno un intervallo di temperatura, per non incorrere in errori di interpretazione.

Tabella 2.1. Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (Dickson-Fanelli,2004)

	Muffler e Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter e Cormy (1990)	Nicholson (1993)	Axelsson e Gunnlaugsson (2000)
Risorse a bassa entalpia	<90 °C	<125 °C	<100 °C	≤150 °C	≤190 °C
Risorse a media entalpia	90 °C-150 °C	125 °C-225 °C	100 °C-200 °C	-	-
Risorse ad alta entalpia	>150 °C	>225 °C	>200 °C	>150 °C	>190 °C

I sistemi ad alta entalpia sono in genere a vapore dominante e sono utilizzati prevalentemente per la produzione di energia, mentre i sistemi a media e bassa entalpia sono ad acqua dominante e sono sfruttati per usi diretti, spesso con l'ausilio di pompe di calore. Con un utilizzo a cascata, ossia sfruttando più volte i fluidi geotermici prima di rilasciarli nuovamente nell'ambiente, è possibile aumentare l'efficienza del sistema: un fluido geotermico, infatti, dopo essere stato impiegato una prima volta ad alta temperatura, presenta ancora del calore residuo che può essere utilizzato da un altro impianto che opera in un intervallo di temperature più basso. Il diagramma di Lindal in Figura 2.7 mostra i possibili usi dei fluidi geotermici alle varie temperature.

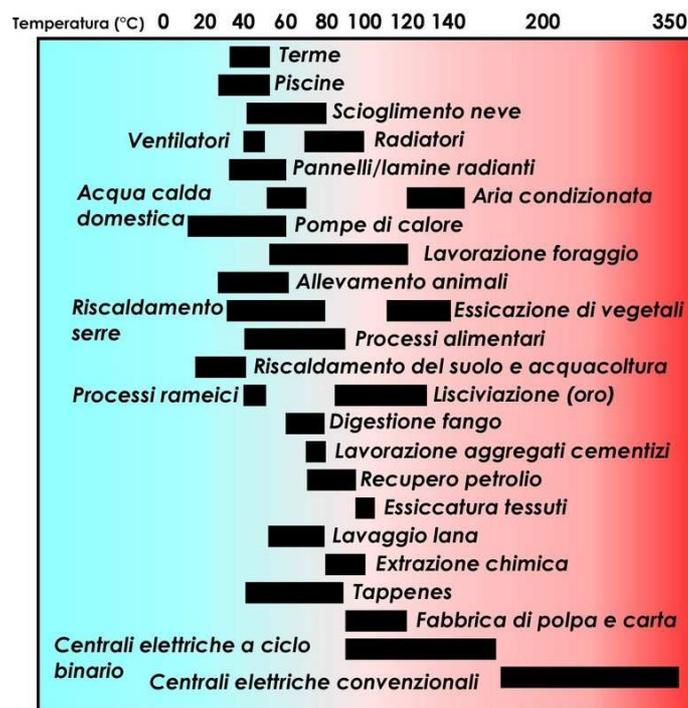


Figura 2.7. Diagramma di utilizzazione dei fluidi geotermici sulla base della temperatura (derivato da Lindal, 1973)

2.3 Sistemi geotermici a bassa entalpia

Le risorse geotermiche a bassa entalpia sono sfruttabili in condizioni geologiche “normali” e a profondità inferiori a 200 m, in quanto richiedono temperature inferiori a circa 100 °C. Il loro utilizzo è di tipo diretto: alcuni esempi di impiego sono il riscaldamento di ambienti, la refrigerazione, la produzione di acqua calda sanitaria, gli usi agricoli o alcuni processi industriali.

Come visto nel capitolo 2.1, il sottosuolo risente della temperatura dell’aria esterna e delle sue variazioni solo nei primi 15-20 metri circa di profondità, mentre al di sotto di questa fascia la temperatura subisce un incremento in funzione del gradiente geotermico, rimanendo pressoché costante tutto l’anno ad una data profondità. Tale comportamento rende il sottosuolo una sorgente adatta per lo scambio di calore: il terreno risulta più caldo dell’aria esterna durante l’inverno e più freddo durante l’estate.

Un impianto geotermico a bassa entalpia è costituito da tre componenti principali (Figura 2.8):

- lo **scambiatore geotermico** scambia energia termica con il sottosuolo utilizzando l’acqua di falda (sistemi a circuito aperto), o un fluido termovettore circolante in tubazioni chiuse orizzontali o verticali (sistemi a circuito chiuso);
- la **pompa di calore** è un dispositivo, alimentato da energia elettrica, in grado di trasferire calore da una sorgente a temperatura minore ad un ambiente a temperatura maggiore;
- il **sistema di climatizzazione** distribuisce il calore ai terminali di riscaldamento e/o raffrescamento (radiatori, ventilconvettori, pannelli radianti).

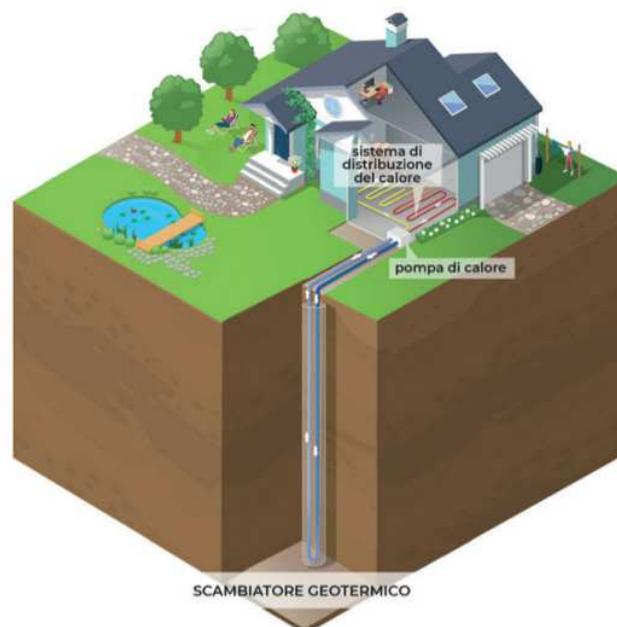


Figura 2.8. Componenti di un impianto geotermico a pompa di calore (Capodaglio et al., 2018)

In inverno viene estratto calore dalla sorgente termica (terreno o acqua) attraverso lo scambiatore geotermico: il fluido termovettore in entrata presenta temperature inferiori rispetto al terreno, acquisisce energia termica da esso e la cede alla pompa di calore. Al contrario, in estate il fluido termovettore preleva energia termica dall'ambiente esterno scaldandosi e la cede al sottosuolo attraverso lo scambiatore di calore, grazie all'attività della pompa di calore.

2.3.1 Pompa di calore

La pompa di calore è una macchina termica che compie un processo che, per il secondo principio della termodinamica, in natura non può avvenire spontaneamente: essa è infatti capace di trasferire il calore da un corpo più freddo ad uno più caldo. Il suo funzionamento avviene con una spesa di energia esterna, che può essere di natura elettrica, meccanica o addirittura geotermica.

Questa macchina, quindi, è in grado di mantenere caldo un ambiente, definito pozzo caldo, trasferendo ad esso il calore presente in un ambiente ad una temperatura inferiore, chiamato sorgente fredda, come illustrato in Figura 2.9.

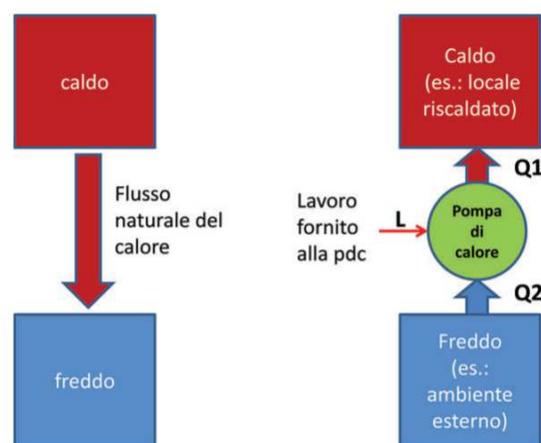


Figura 2.9. Principio di funzionamento di una pompa di calore (Casali, 2015)

Il funzionamento della pompa di calore è basato sulla circolazione di un fluido, detto intermedio o frigorigeno, continuamente compresso e fatto espandere entro un circuito chiuso. Ad ogni ciclo il fluido frigorigeno assorbe calore dal fluido freddo e lo cede al fluido caldo, sfruttando i passaggi di fase, rispettivamente, liquido-vapore e vapore-liquido, al fine di utilizzare vantaggiosamente il calore latente di condensazione e di evaporazione. Tali passaggi di stato fanno aumentare notevolmente la quantità di calore che ogni ciclo di lavoro è in grado di assorbire e di cedere, perciò il fluido intermedio è scelto appositamente in modo che evapori quando il calore viene assorbito e che condensi quando il calore viene ceduto.

Il ciclo termodinamico della pompa di calore è illustrato in Figura 2.10.

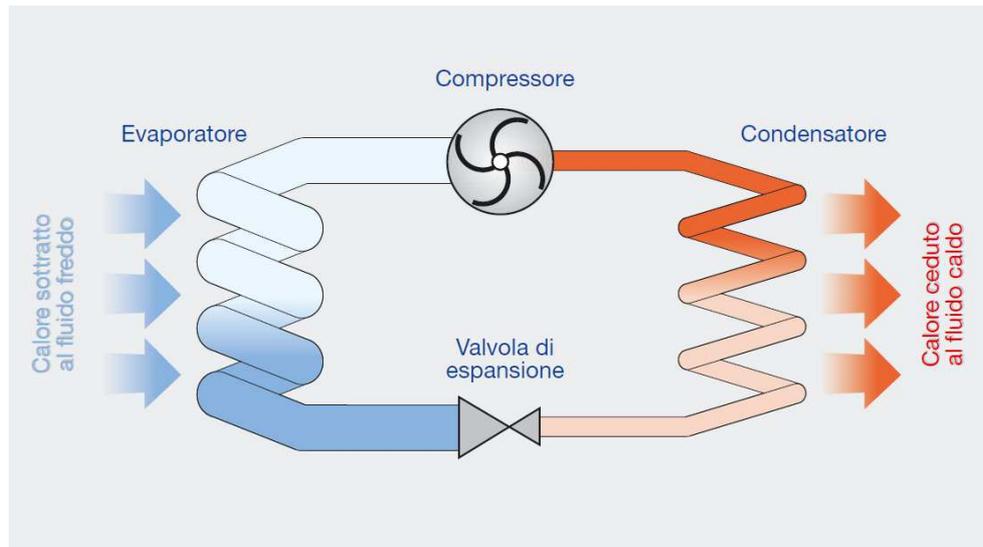


Figura 2.10. Schema funzionale della pompa di calore (Doninelli, 2007)

Il fluido intermedio passa, in fase vapore, in un **compressore** che provoca un notevole incremento della sua pressione e temperatura. Successivamente il fluido intermedio, diventato vapore caldo ad alta pressione, passa nel **condensatore** dove, trasformandosi in liquido, cede energia termica al fluido caldo: siccome il vapore è più caldo del fluido da riscaldare, esso rilascia calore a tale fluido, fino a condensare, trasformandosi in liquido. Il fluido frigorifero passa così in fase liquida alla **valvola di espansione**, dove subisce un brusco e repentino calo di pressione, che comporta come conseguenza un drastico calo della sua temperatura. Da qui il fluido intermedio viene mandato all'**evaporatore**, dove assorbe calore dal fluido esterno a bassa temperatura e passa da liquido a vapore.

In un impianto geotermico in funzione invernale, il fluido freddo, ossia la sorgente di calore, è il sottosuolo, mentre il fluido caldo al quale occorre trasferire calore è il sistema di climatizzazione, o di distribuzione del calore (Figura 2.11).

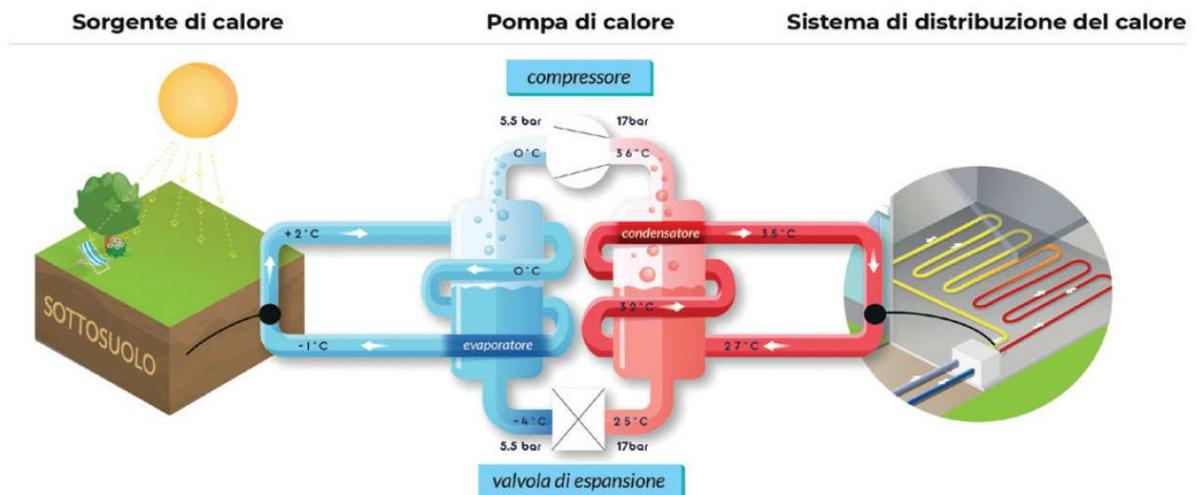


Figura 2.11. Schema funzionale della pompa di calore all'interno di un impianto geotermico (Capodaglio et al., 2018)

Nel periodo estivo il funzionamento della pompa di calore può essere invertito (in questo caso la pompa di calore viene definita *reversibile*): il calore viene sottratto all'edificio (che quindi si raffresca cedendo calore all'evaporatore) e reimmesso nel sottosuolo (il quale subisce quindi un riscaldamento, ricevendo calore dal condensatore tramite lo scambiatore geotermico).

Il ciclo termodinamico compiuto dal fluido frigorifero è il ciclo inverso di Carnot, rappresentato in Figura 2.12 attraverso il diagramma pressione-entalpia, che riproduce la classica forma a “campana” della curva di stato: il fluido è totalmente liquido a sinistra di questa, all'interno della campana è sempre più saturo di vapore da sinistra verso destra, a destra è totalmente sotto forma di vapore. Il ciclo è composto da quattro trasformazioni termodinamiche:

- trasformazione 1-2: evaporazione del fluido frigorifero a pressione e temperatura costante, con assorbimento di calore dall'esterno (Q_E);

$$Q_E = h_2 - h_1$$

- trasformazione 2-3: compressione del fluido, allo stato di vapore, grazie all'energia fornita dall'esterno (L_{comp}), con innalzamento della pressione e della temperatura;

$$L_{comp} = h_3 - h_2$$

- trasformazione 3-4: condensazione del fluido a pressione e temperatura costante, con produzione di calore (Q_C), fino al raggiungimento della fase liquida;

$$Q_C = h_3 - h_4$$

- trasformazione 4-1: espansione del fluido e passaggio da una fase liquida ad una fase mista gas-liquida.

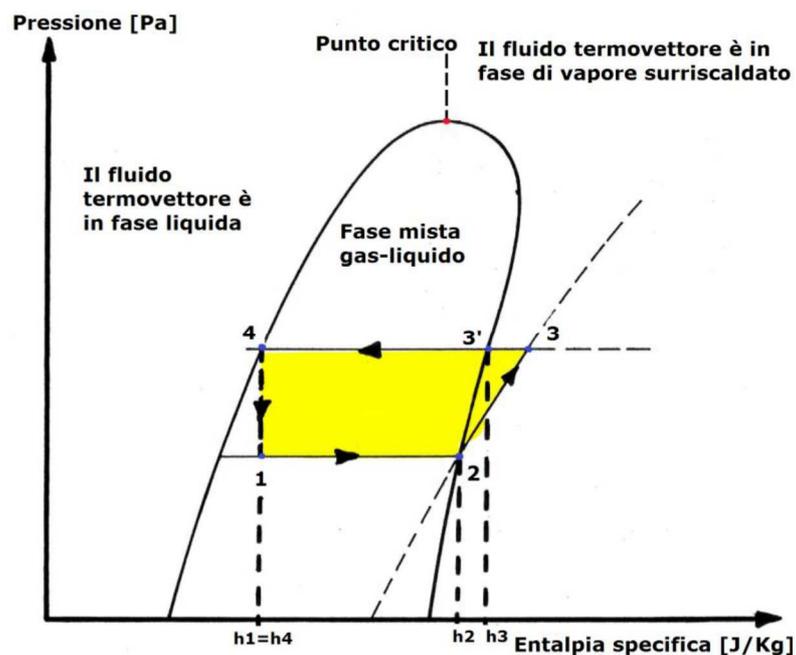


Figura 2.12. Diagramma pressione-entalpia del ciclo termodinamico del fluido frigorifero in una pompa di calore (www.energyhunters.it)

L'**efficienza termica** di una pompa di calore è definita come il rapporto tra l'energia termica prodotta dal dispositivo e l'energia fornita a questo. Essa può assumere un valore anche maggiore di 1, in quanto, oltre all'energia che entra nel ciclo sotto forma di energia elettrica o gas combustibile per alimentare il compressore della pompa di calore, entra anche il calore a bassa temperatura assorbito dalla sorgente: l'energia rinnovabile.

In riscaldamento, l'efficienza termica di una pompa di calore si può esprimere attraverso il **coefficiente di prestazione COP** (Coefficient of Performance):

$$COP = \frac{|Q_C|}{|L_{comp}|} = \frac{|Q_C|}{|Q_C| - |Q_E|}$$

Nel caso di una pompa di calore ideale reversibile, per un fluido frigorifero che segue un ciclo di Carnot inverso tra le temperature del pozzo caldo T_C e della sorgente fredda esterna T_E , il COP risulta essere il massimo ottenibile:

$$COP_{ideale} = \frac{|Q_C|}{|L_{comp}|} = \frac{|Q_C|}{|Q_C| - |Q_E|} = \frac{T_C}{T_C - T_E}$$

L'efficienza sarà tanto maggiore quanto minore sarà la differenza tra la sorgente fredda e il pozzo caldo, poiché l'energia necessaria per il trasferimento del calore sarà inferiore.

In una pompa di calore reale occorre tenere in conto delle perdite del ciclo di Carnot e dei processi irreversibili attraverso il coefficiente per l'efficienza tecnica η_{tech} :

$$COP_{reale} = \frac{|Q_C|}{|L_{comp}|} = \frac{|Q_C|}{|Q_C| - |Q_E|} = \eta_{tech} \frac{T_C}{T_C - T_E}$$

Per ragioni economiche un sistema efficiente è caratterizzato da un valore di COP maggiore di 4. Un valore di COP=4 significa che per produrre energia utilizzabile occorre investire $\frac{1}{4}$ di energia elettrica, mentre i $\frac{3}{4}$ dell'energia derivano dal calore del sottosuolo. Essendo l'efficienza inversamente proporzionale alla differenza di temperatura tra sorgente e pozzo caldo, al fine di ottenere un valore di COP sufficientemente elevato, è bene che le temperature non superino i 35-45 °C nel circuito di climatizzazione e non siano inferiori a 0-5 °C nel sottosuolo, alla profondità a cui avviene lo scambio termico.

In raffrescamento, il rapporto tra il calore estratto dall'edificio (tramite i terminali) e l'energia elettrica consumata si chiama **rapporto di efficienza energetica EER** (Energy Efficiency Ratio):

$$EER_{ideale} = \frac{|Q_E|}{|L_{comp}|} = \frac{|Q_E|}{|Q_C| - |Q_E|} = \frac{T_E}{T_C - T_E}$$

$$EER_{reale} = \frac{|Q_E|}{|L_{comp}|} = \frac{|Q_E|}{|Q_C| - |Q_E|} = \eta_{tech} \frac{T_E}{T_C - T_E}$$

2.3.2 Sistemi a circuito aperto

Nei sistemi a circuito aperto, come si osserva in Figura 2.13, lo scambio termico viene effettuato con l'acqua di falda circolante nel sottosuolo: l'acqua sotterranea è prelevata da un pozzo (pozzo di presa), inviata alla pompa di calore e successivamente scaricata ad una temperatura più fredda rispetto alla temperatura originaria in inverno (quando il calore viene sottratto al sottosuolo), più calda in estate (quando il calore viene immagazzinato nel sottosuolo). L'acqua può essere reintrodotta nuovamente in falda tramite un pozzo di resa, oppure scaricata in un adiacente corpo idrico superficiale. In alternativa possono essere sfruttate acque provenienti da laghi sotterranei o superficiali, piovane o reflue.

Per la movimentazione dell'acqua nel pozzo di presa sono necessarie pompe idrauliche; nel pozzo di resa, invece, la reiniezione viene effettuata a gravità. È importante che il tubo di reiniezione resti sotto il livello di falda per evitare che l'acqua prelevata incrementi il suo contenuto di ossigeno a contatto con l'aria, favorendo la crescita di ruggine e alghe.

In fase di progettazione dell'impianto, è necessario dimensionare il distanziamento tra il pozzo di presa ed il pozzo di resa in modo da evitare che l'acqua reiniettata in falda, con una temperatura alterata, possa essere recuperata dal pozzo di presa e nuovamente inviata alla pompa di calore. In questo modo la temperatura della sorgente termica (acqua di falda) si mantiene pressoché stabile nel tempo, a differenza dei sistemi a circuito chiuso, nei quali il terreno si raffredda durante l'utilizzo per riscaldamento e si riscalda durante l'utilizzo per raffrescamento: per questo motivo gli impianti a circuito aperto sono generalmente più energeticamente efficienti di quelli a circuito chiuso.

L'installazione di sistemi a circuito aperto è limitata a zone con adeguate caratteristiche di falda, portata e composizione chimica dell'acqua. Inoltre il loro impiego è limitato da un lungo iter autorizzativo, che comporta costi di progettazione elevati e difficilmente ammortizzabili su impianti di piccola taglia. Per queste ragioni gli impianti geotermici a circuito aperto non sono economicamente convenienti al di sotto di una certa taglia e sono in genere impiegati a servizio di edifici con fabbisogni termici importanti.

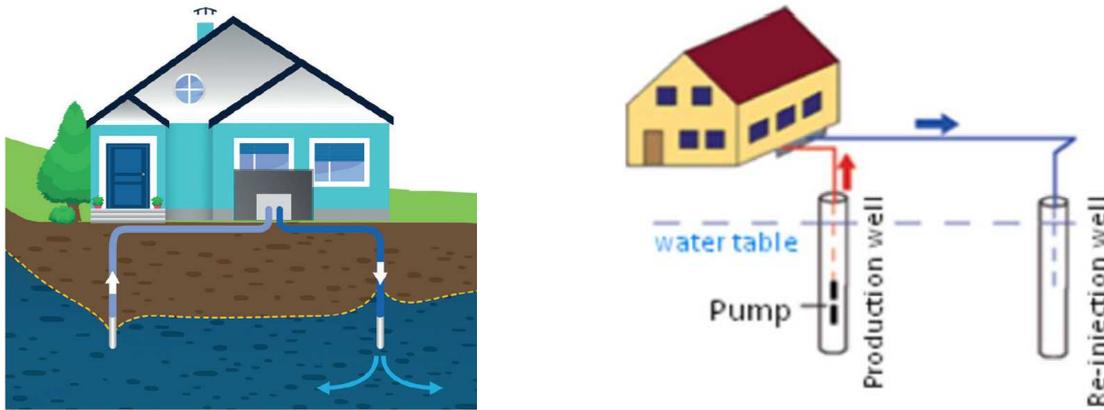


Figura 2.13. Sistema geotermico a circuito aperto (Capodaglio et al., 2018; Karytsas, 2017)

2.3.3 Sistemi a circuito chiuso

Nei sistemi a circuito chiuso un tubo, tipicamente in polietilene ad alta densità, è posizionato in verticale o in orizzontale nel sottosuolo ed in esso circola acqua o una miscela di acqua e liquido antigelo, con la funzione di raccogliere calore in inverno o cedere calore in estate.

I sistemi a circuito chiuso possono essere impiegati quasi ovunque in quanto, a differenza dei sistemi a circuito aperto, non richiedono requisiti particolari delle condizioni idrogeologiche, dal momento che il fluido nel circuito non entra in contatto con il terreno.

I sistemi a circuito chiuso si distinguono in sonde geotermiche orizzontali, sonde geotermiche verticali e geostrutture energetiche (Figura 2.14).

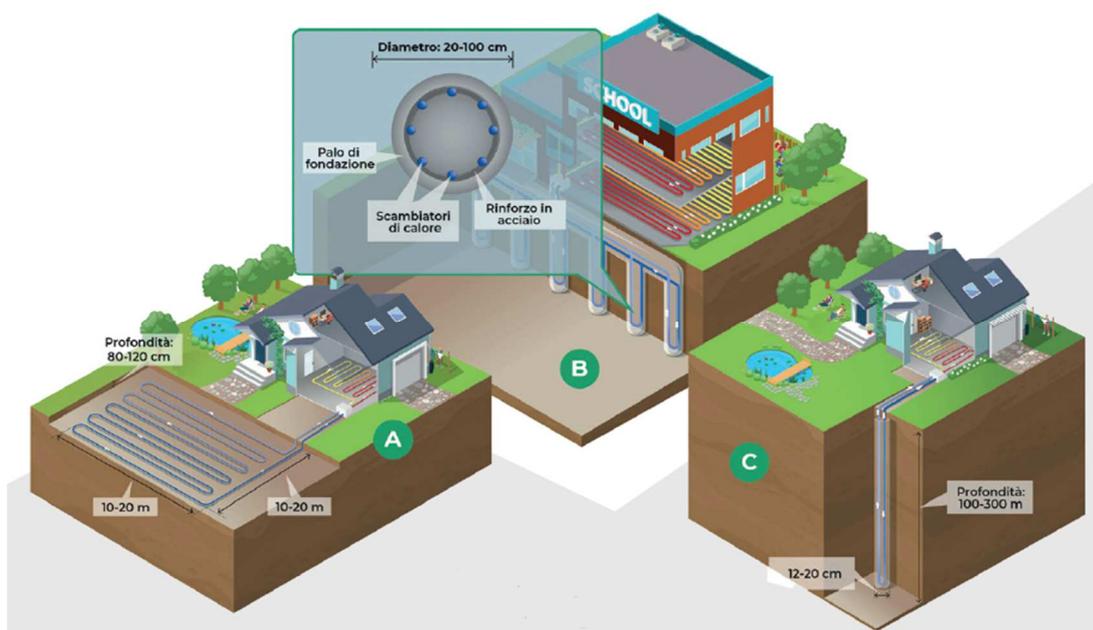


Figura 2.14. Sistemi a circuito chiuso: sonde geotermiche orizzontali (A), geostrutture energetiche (B) e sonde geotermiche verticali (C) (Capodaglio et al., 2018)

Nei **sistemi a sonde geotermiche orizzontali** i tubi sono interrati in fossi ad una profondità di 1-2 metri. Generalmente, i condotti sono posizionati in parallelo o in serie (Figura 2.15), ma sono possibili anche configurazioni più compatte (Figura 2.16). Le sonde orizzontali risentono dell'effetto stagionale sulla temperatura del terreno, in quanto si trovano in prossimità della superficie, dove la ricarica termica principale è dovuta alle radiazioni solari: per questo motivo è importante evitare di coprire la superficie al di sopra degli scambiatori di calore.

I sistemi orizzontali sono generalmente utilizzati per impianti di piccole dimensioni, dove è sufficiente lo spazio per l'installazione dei tubi, mentre spesso in ambienti urbani non sono adatti per limitazioni di spazio. Inoltre, trovandosi nella porzione più superficiale del sottosuolo, dove si ha un'influenza climatica e le temperature subiscono delle fluttuazioni, l'efficienza della pompa di calore è minore rispetto a sistemi in cui le sonde sono posizionate verticalmente. Tuttavia, i costi limitati e la facilità di installazione sono i vantaggi che rendono i sistemi orizzontali adatti in determinate condizioni.



Figura 2.15. Sonde geotermiche orizzontali in serie (a) e in parallelo (b) (Karytsas, 2017)

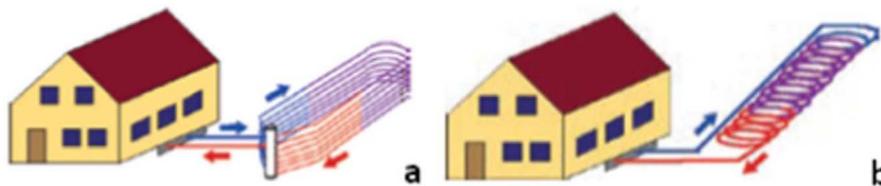


Figura 2.16. Sonde geotermiche orizzontali in trincea (a) e a spirale(b) (Karytsas, 2017)

Nei **sistemi a sonde geotermiche verticali** (Figura 2.17), il fluido termovettore circola all'interno di tubi cementati (diametro 100-200 mm) all'interno di sondaggi verticali. La cementazione è realizzata con apposite malte cementizie, che hanno una funzione di protezione meccanica, di isolamento dei diversi acquiferi eventualmente attraversati, e di garanzia della continuità fisica per lo scambio termico tra il terreno, i tubi ed il fluido termovettore circolante al loro interno. Le sonde sono profonde tra i 50 e i 250 metri, a seconda delle condizioni geologiche e idrogeologiche, perciò raggiungono profondità alle quali la temperatura del sottosuolo è costante durante l'anno. In molti casi sono necessari più sondaggi, distanti circa 5 metri l'uno dall'altro.

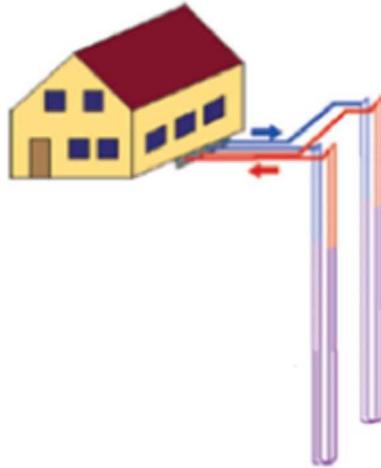


Figura 2.17. Sonde geotermiche verticali con due sondaggi (Karytsas, 2017)

Le tubazioni inserite nelle perforazioni possono avere diverse configurazioni (Figura 2.18):

- tubazione a U singola, costituita da una mandata ed un ritorno rettilinei collegati tra loro al piede della sonda con un tubo curvo a forma di U;
- doppia tubazione a U, costituita da due coppie di tubi di mandata e ritorno;
- tubazione coassiale, costituita da due tubi concentrici di diverso diametro, dei quali generalmente quello esterno è per la mandata e quello interno è per il ritorno.

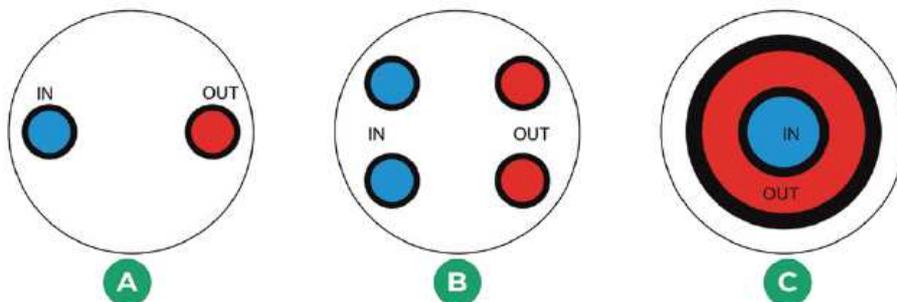


Figura 2.18. Sezioni trasversali di sonde geotermiche ad U singola (A), a U doppia (B), coassiale (C) (Capodaglio et al., 2018)

Le sonde geotermiche verticali sono più diffuse perché hanno una maggiore efficienza energetica e non necessitano, contrariamente agli scambiatori orizzontali, di un'ampia superficie per la loro installazione. Lo svantaggio è legato agli alti costi di perforazione.

Infine, le **geostrutture energetiche** sono elementi strutturali in cemento armato inseriti nel terreno e termicamente attivi, in quanto inglobano scambiatori termici con lo scopo di utilizzare il sottosuolo per estrarre calore in inverno e disperdere calore in estate. Questo sistema, seppur limitato alle nuove costruzioni, offre il vantaggio di sfruttare elementi strutturali per l'installazione degli impianti geotermici, senza richiedere ulteriori lavori di perforazione o scavi aggiuntivi per le sonde energetiche, con i rispettivi costi.

Molte tipologie di strutture geotecniche possono essere attivate termicamente: i pali di fondazione sono stati i primi ad essere utilizzati come geostrutture termiche a partire dagli anni '80 in Austria e Svizzera, seguiti dai diaframmi, fondazioni superficiali, muri di sostegno e, più recentemente, gallerie. A titolo esemplificativo, in Figura 2.19 è riportato uno schema di attivazione termica per un palo di fondazione.

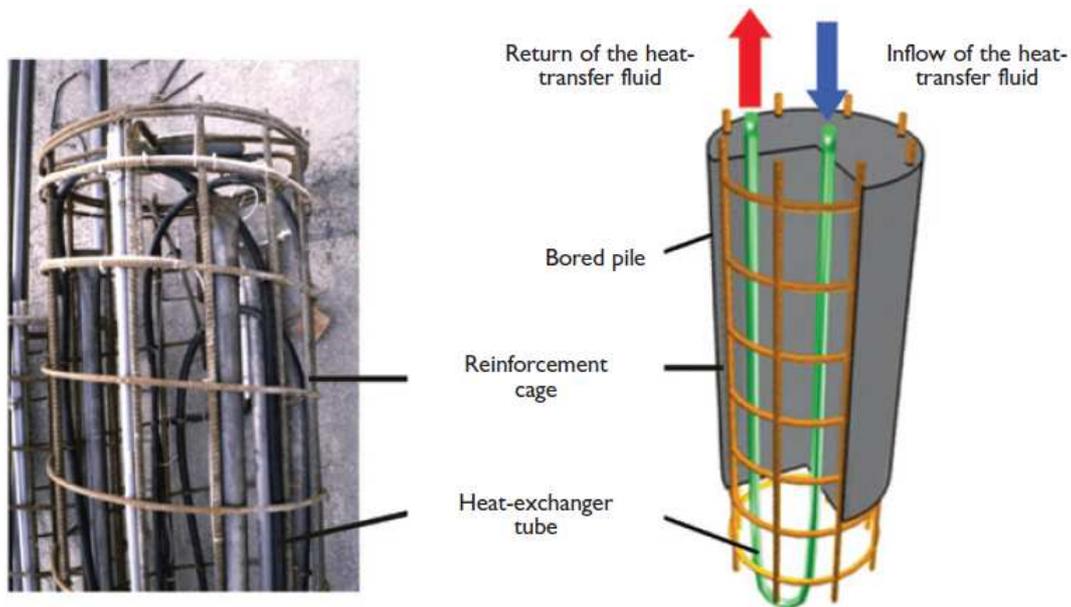


Figura 2.19. Palo di fondazione attivato termicamente (Laloui and Di Donna, 2011)

Le geostrutture energetiche sfruttano l'alta conducibilità termica ($\lambda = 1,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) e la capacità di accumulo termica del calcestruzzo, maggiori persino del sottosuolo, che le rende efficienti scambiatori di calore. Il potenziale termico aumenta all'aumentare della profondità delle strutture; la profondità minima che deve raggiungere un palo di fondazione o un diaframma affinché sia efficiente è 6 m (Brandl, 2006). La produzione di energia elettrica è teoricamente possibile, ma non economicamente conveniente: l'efficienza è alta (circa 85%) per l'utilizzo del calore per il riscaldamento ed il raffreddamento, mentre è molto bassa (circa 25%) per la produzione di energia elettrica.

In fase di progettazione occorre considerare la struttura soggetta ad una combinazione di carichi meccanici e termici: è necessario uno studio del suo comportamento in diverse condizioni di lavoro, al fine di ottenere un progetto ottimale dal punto di vista energetico, strutturale e geotecnico. I carichi possono indurre tensioni e spostamenti aggiuntivi nella struttura; inoltre anche le proprietà del terreno ed il comportamento all'interfaccia terreno-struttura possono risentire delle variazioni di temperatura. Questi effetti possono ridurre drasticamente i margini di sicurezza ricavati con una progettazione convenzionale, che non considera gli effetti termici. Per questo motivo, le variazioni tensionali e termiche della struttura e del sito devono essere studiate con modellazione numerica, validando il modello attraverso evidenze sperimentali.

2.4 Gallerie energetiche

Rispetto alle fondazioni, le gallerie energetiche hanno il vantaggio di interessare una maggiore superficie per lo scambio di calore. L'energia termica ricavata può essere utilizzata per il riscaldamento o il raffreddamento delle stazioni ferroviarie o di edifici, oppure per prevenire la formazione di ghiaccio su binari, ponti e passaggi. Tuttavia, ad oggi i casi di gallerie energetiche sono limitati, anche a causa della scarsa conoscenza riguardo l'efficienza del sistema, la quale è legata alle condizioni specifiche di ogni sito.

All'interno del rivestimento in calcestruzzo della galleria sono incorporati i tubi in polietilene, nei quali scorre il fluido che scambia calore con il sottosuolo. Il calore può successivamente essere trasferito in superficie con dei tubi posizionati nei condotti di aerazione, attraverso i portali, oppure in corrispondenza delle stazioni intermedie della metropolitana.

Un altro tipo di utilizzo dello scambio di calore è legato al raffreddamento delle gallerie "calde", cioè le gallerie in cui la temperatura dell'aria interna è maggiore di quella del sottosuolo a causa del passaggio della ferrovia o delle automobili. Nelle gallerie "fredde", invece, la temperatura dell'aria interna è minore e pressoché costante durante tutto l'anno (circa 15 °C).

Si possono distinguere due metodologie di applicazione della strumentazione per l'attivazione termica delle gallerie, sulla base della tecnica di scavo, che può essere convenzionale o meccanizzato.

Nel caso di **scavo convenzionale** il sistema di tubi è posizionato tra il rivestimento provvisorio e quello definitivo. I tubi dell'impianto geotermico possono essere preliminarmente fissati al geotessile non tessuto ed in seguito posizionati insieme ad esso in sito. Un esempio dell'utilizzo di tale tecnica è costituito dall'impianto sperimentale realizzato nella galleria Lainzer a Vienna nel 2003 (Figura 2.20).

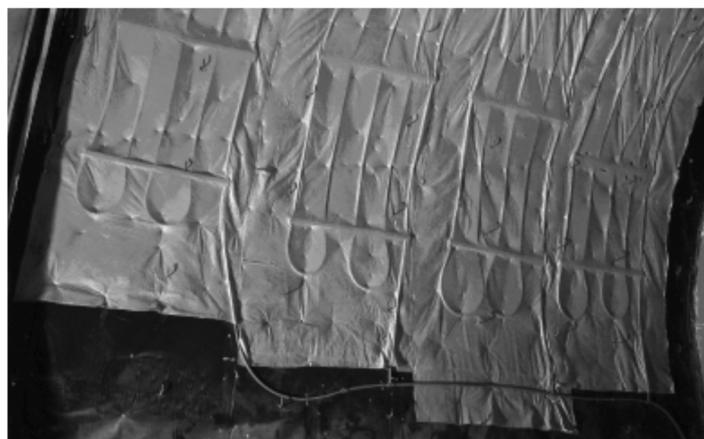


Figura 2.20. Esempio di tubi energetici fissati al geotessile non tessuto nella galleria Lainzer a Vienna (Adam and Markiewicz, 2009)

Nel caso di **scavo meccanizzato** il rivestimento è costituito da conci prefabbricati e posizionati in sito dalla TBM; questi includono i tubi dell'impianto geotermico per ottenere una attivazione termica della galleria. Il primo campo sperimentale di galleria energetica scavata con TBM è stato realizzato in Germania nel 2009 e comprende cinque conci, per una superficie totale di 60 m² ed un calore estratto pari a 10-20 W/m²; i conci sono stati trasformati in scambiatori di calore fissando i tubi alle gabbie di armatura prima di gettare il calcestruzzo.

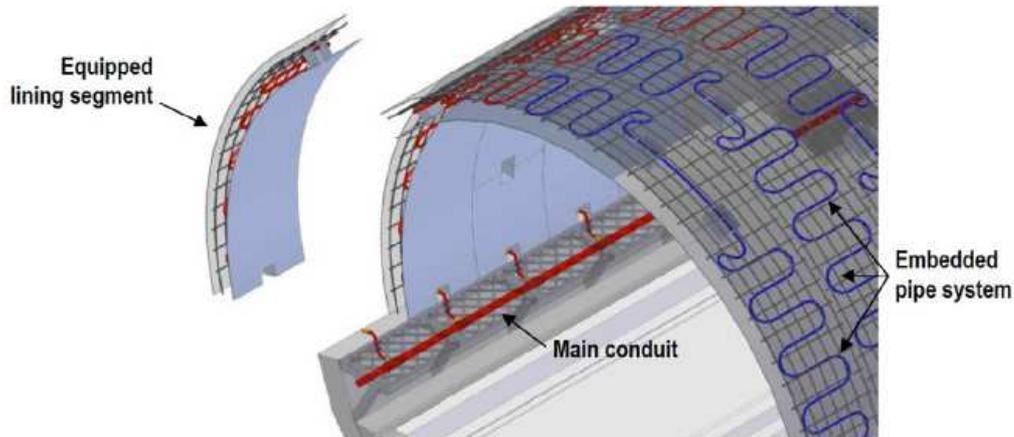


Figura 2.21. Rappresentazione schematica del rivestimento prefabbricato di una galleria attivata termicamente (Barla and Perino, 2014)

In Figura 2.21 è rappresentata la configurazione generica di una galleria attivata termicamente: la serpentina all'interno della quale circola il fluido scambiatore di calore si trova all'interno dell'anello di rivestimento prefabbricato ed è collegata al condotto principale, costituito dalle tubazioni di mandata e di ritorno, che indirizzano il fluido termovettore verso o dalla pompa di calore. I tubi per lo scambio termico sono, in genere, in polietilene reticolato (Pe-Xa) e sono costituiti da tre strati: uno interno in polietilene ad alta densità, uno intermedio in materiale polimerico ed uno esterno in alcool vinile etilene (EVOH), che impedisce la permeabilità dell'ossigeno. I tubi devono essere resistenti alle alte pressioni e temperature, resistenti alla corrosione e durabili. Il fluido termovettore è in genere acqua mista a glicole propilene e può lavorare a temperature maggiori di -20 °C.

In Figura 2.22 è riportato il sistema di conci energetici sviluppato dalla Rehau AG & Co e dalla Zublin AG: un anello di rivestimento è formato in genere da 6-7 conci, le tubazioni dei quali sono collegate tramite appositi manicotti in modo da formare un circuito continuo che può interessare anche più anelli. Questo sistema è adottato per ridurre il numero di connessioni del condotto principale, che implicano perdite di carico.



Figura 2.22. Concio energetico sviluppato dalla Rehau AG & Co e dalla Zublin AG (Barla and Di Donna, 2016)

Tale tipologia di concio energetico è stata utilizzata per la prima volta nel 2012 in un tratto lungo 54 m della galleria a Jenbach, in Austria, dopo essere stata testata in Germania nel 2009 con l'attivazione temporanea di quattro anelli di una galleria ferroviaria ad alta velocità, prima della sua apertura. Entrambi i casi hanno dato buoni risultati in termini di efficacia del sistema.

2.4.1 Concio energetico ENERTUN

Recentemente è stata sviluppata una nuova tipologia di concio energetico, denominato ENERTUN, al Politecnico di Torino (Barla and Di Donna, 2016). La posizione degli scambiatori termici è tale che la loro dimensione maggiore sia perpendicolare all'asse della galleria (Figura 2.23): in questo modo è possibile ridurre le perdite di carico e aumentare l'efficienza di scambio termico.



Figura 2.23. Concio energetico ENERTUN (Barla and Di Donna, 2016)

I risultati delle analisi numeriche agli elementi finiti (Barla et al., 2019), di tipo accoppiato termo-idraulico, evidenziano rispetto al concio energetico descritto in precedenza una diminuzione delle perdite di carico pari al 20-30% per ogni anello ed un aumento dello scambio termico fino al 5-10%, in particolare quando il flusso delle acque sotterranee è perpendicolare all'asse della galleria, come è possibile osservare in Figura 2.24. Tale situazione risulta maggiormente efficiente rispetto alla condizione di assenza di falda, perciò è conveniente realizzare gallerie geotermiche dove è presente un flusso di falda.

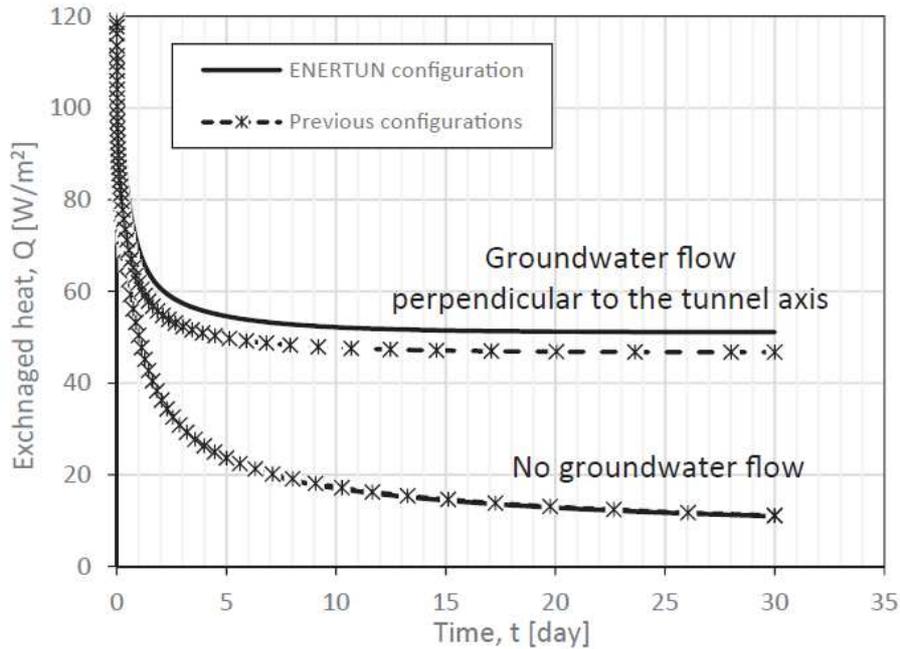


Figura 2.24. Confronto tra concio ENERTUN e concci precedenti in termini di scambio termico ottenuto da simulazioni numeriche (Barla, Di Donna, Insana, 2019)

Un altro vantaggio di questo nuovo conccio energetico è la sua adattabilità, in quanto può assumere tre diverse configurazioni in base alla posizione dei tubi scambiatori di calore, riportate in Figura 2.25:

- se si trova in prossimità dell'estradosso esterno (configurazione "ground") si ha scambio termico con il terreno;
- se si trova in prossimità dell'estradosso interno (configurazione "air") si ha scambio termico con l'ambiente interno della galleria;
- se esistono due reti, di cui una in prossimità dell'estradosso esterno e l'altra in prossimità dell'estradosso interno (configurazione "ground and air") lo scambio termico può avvenire sia con il terreno sia con l'ambiente interno della galleria.

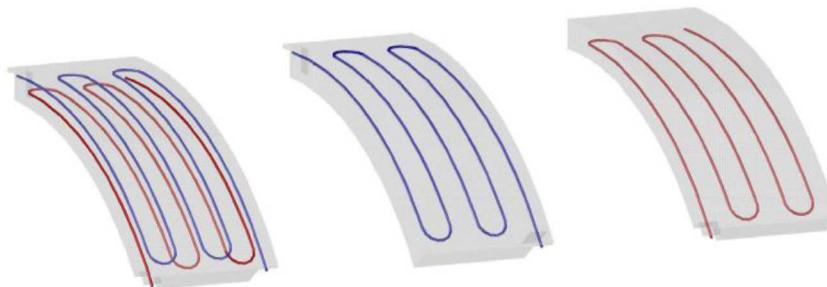


Figura 2.25. Configurazioni del conccio energetico ENERTUN: (a) ground&air, (b) ground e (c) air (Barla and Di Donna, 2018)

Di conseguenza, il conccio ENERTUN consente sia l'impiego dell'energia geotermica scambiata per la climatizzazione degli edifici, sia la limitazione del surriscaldamento interno della galleria dovuto al

traffico di esercizio e la riduzione della necessità di ventilazione forzata, grazie all'estrazione del calore dall'interno della galleria in modalità "air".

Il concio modulare prefabbricato ha uno spessore in generale compreso tra 30 e 50 cm, sulla base delle condizioni geotecniche del sito e geometriche della galleria. I tubi hanno un diametro esterno variabile tra 15 e 35 mm ed uno spessore di 1,5-3 mm; essi sono posizionati ad una distanza variabile tra 5 e 15 cm dalla superficie dell'estradosso esterno oppure dalla superficie dell'intradosso interno. I tratti lineari della rete di tubi sono mutuamente spazati di un intervallo variabile tra 20 e 40 cm.

Nel 2017 il concio ENERTUN è stato impiegato con fini sperimentali per la realizzazione di due anelli (per una lunghezza longitudinale di 2,80 m) del prolungamento della Linea 1 della Metropolitana di Torino, nella parte Sud-Est della città, tra le stazioni Lingotto e Bengasi. A tal fine sono stati impiegati 12 conci con tubi scambiatori di calore sia in prossimità dell'estradosso esterno che dell'estradosso interno, in modo da poter testare in momenti diversi tutte le tre configurazioni ("air", "ground" e "ground and air"); un esempio del progetto di uno dei conci utilizzati è rappresentato in Figura 2.26.

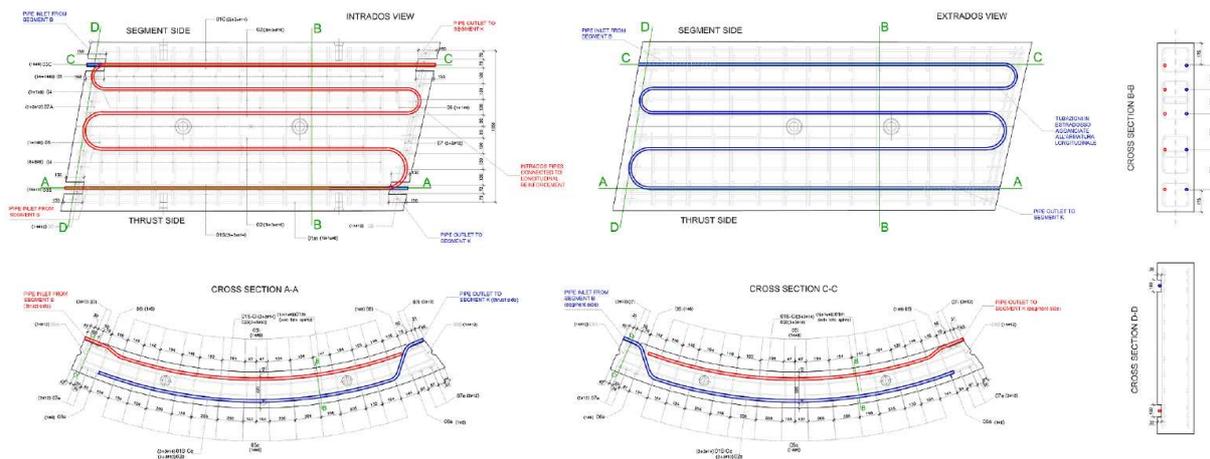


Figura 2.26. Esempio di progetto di uno dei conci ENERTUN utilizzati nel campo sperimentale della Linea 1 della Metropolitana di Torino (Barla et al., 2019)

I tubi sono in polietilene reticolato (PE-Xa) con barriera antiossidante, hanno un diametro esterno di 20 mm ed uno spessore di 2 mm. Le connessioni idrauliche tra i tubi dei conci adiacenti sono state gestite interponendo dei tubi connettori di raccordo e riempiendo le cavità che ospitano tali connessioni con un materiale isolante per evitare perdite termiche. Ogni anello ha all'interno due circuiti ("air" e "ground"), ciascuno dei quali è connesso in parallelo alla pompa di calore attraverso il condotto principale, costituito da due tubi di mandata e due tubi di ritorno. Tali tubi hanno un diametro esterno di 32 mm, uno spessore di 2,9 mm e sono posizionati al di fuori dei conci prefabbricati, per una lunghezza di circa 70 metri. Nell'intero impianto sperimentale circola un volume di circa 123 litri di fluido scambiatore di calore (acqua mista a glicole propilenico).

Per valutare l'efficienza dell'impianto sperimentale e il suo impatto sulla struttura, sono stati installati degli strumenti di monitoraggio per misurare le deformazioni, la temperatura e lo stato di tensione nei conci, oltre che la temperatura e la portata all'interno dei tubi: sono presenti estensimetri a corda vibrante dotati di un sensore di temperatura, celle di carico idrauliche, sensori in fibra ottica monomodale e multimodale, sonde di temperatura e misuratore di flusso.

Una prova sperimentale di attivazione dei due anelli condotta a marzo 2018, in modalità di riscaldamento e configurazione "ground", ha prodotto una potenza termica per metro quadro in linea con le previsioni ottenute dai modelli numerici riportate in Figura 2.24 e maggiore rispetto ai precedenti campi sperimentali. Inoltre, i dati relativi a tensioni e deformazioni registrati all'interno dei conci evidenziano un comportamento ancora in campo elastico, simile a quello dovuto ai normali cambi di temperatura stagionali.

Sia le analisi numeriche che i dati sperimentali mostrano come il sistema sia vantaggioso rispetto agli impianti tradizionali e alle altre tipologie di impianti geotermici, con l'eccezione dei sistemi geotermici a circuito aperto, che però presentano lo svantaggio di poter causare problemi ambientali.

2.4.2 Influenza delle condizioni geotecniche sull'efficienza delle gallerie energetiche

Un aspetto importante della progettazione delle gallerie energetiche è la differenza tra la temperatura del fluido termovettore in uscita T_{w0} e la temperatura del sottosuolo T_g : se questa è elevata l'impianto può avere dimensioni minori e risulta dunque più economico, ma vi è un effetto maggiore sull'equilibrio termico del terreno e l'efficienza della pompa di calore è ridotta. Inoltre la differenza tra la temperatura in entrata T_{wi} ed in uscita T_{w0} del fluido deve essere contenuta al fine di avere un regime di flusso turbolento all'interno dei condotti e minimizzare le perdite di portata. Di conseguenza, per ottimizzare il sistema è bene rispettare i seguenti limiti:

- $|T_{w0} - T_g| = 6 \div 11^\circ\text{C}$ in regime di riscaldamento
- $|T_{w0} - T_g| = 11 \div 17^\circ\text{C}$ in regime di raffreddamento
- $|T_{w0} - T_{wi}| = 3 \div 5^\circ\text{C}$

In mancanza di una larga base di dati sperimentali per la progettazione di gallerie energetiche e siccome la loro efficienza è funzione delle condizioni del sito, sono stati condotti alcuni studi per ottenere una procedura di dimensionamento preliminare basata su abachi di progetto. Un esempio di studio numerico parametrico è stato condotto da Di Donna e Barla (2015) per studiare l'efficienza del sistema in funzione delle condizioni geotecniche. I modelli utilizzati per lo studio parametrico sono tridimensionali e basati su una serie di assunzioni sulle condizioni del sito e del sistema: il flusso nel

sottosuolo è perpendicolare all'asse della galleria, la temperatura in ingresso del fluido termovettore è pari a 4 °C in inverno e 28 °C in estate e la sua velocità è pari a 0,4 m/s.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle analisi numeriche sono stati realizzati due abachi (uno per l'inverno ed uno per l'estate) che permettono di quantificare il calore che è possibile scambiare con il terreno a seconda delle condizioni del sito (Figura 2.27). Sull'asse delle ascisse è riportata la velocità del flusso di falda in metri al giorno, sull'asse delle ordinate la temperatura del terreno in gradi; il calore scambiato (W/m^2) è individuato da tre curve, ognuna delle quali rappresenta una conducibilità termica del terreno λ , misurata in W/mK .

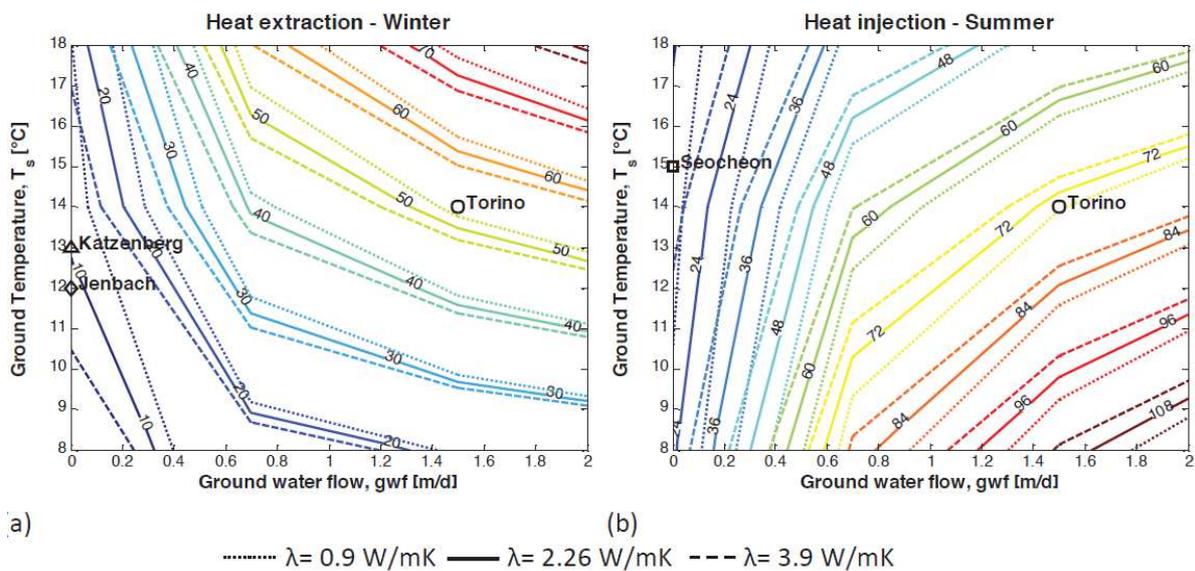


Figura 2.27. Abachi di progetto riportanti il calore scambiato in W/m^2 per (a) inverno e (b) estate (Di Donna and Barla, 2015)

Dall'osservazione dei due abachi è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- l'efficienza aumenta all'aumentare della differenza tra la temperatura del fluido in ingresso e quella del sottosuolo, perciò cresce con la temperatura del terreno in inverno e decresce con la temperatura del terreno in estate;
- l'efficienza aumenta al crescere della velocità del flusso di falda;
- l'efficienza aumenta al crescere della conducibilità termica del terreno e tale effetto è tanto più significativo quanto minore è la velocità di flusso di falda.

3 ANALISI NUMERICA FEM TERMO-IDRAULICA ACCOPPIATA

Il seguente capitolo si pone l'obiettivo di introdurre i principi generali della modellazione numerica, ed in particolare del codice di calcolo agli elementi finiti FEFLOW, il quale è stato utilizzato per le analisi numeriche riportate nei capitoli successivi. La modellazione è stata effettuata al fine di analizzare i flussi idraulici e di calore in mezzi porosi multifase, utilizzando un approccio termo-idraulico accoppiato in tre dimensioni ed in regime transitorio.

FEFLOW (acronimo di "Finite Element subsurface FLOW simulation system") consente di studiare i processi di flusso, trasporto di massa e di calore in mezzi porosi e fratturati, sia in condizioni sature che insature. Il software è in grado di risolvere l'equazione del flusso delle acque sotterranee per una grande varietà di applicazioni geotecniche, in quanto è possibile considerare condizioni complesse, quali ad esempio condizioni al contorno dinamiche.

3.1 Analisi numerica e metodo agli elementi finiti

L'analisi numerica permette di risolvere problemi governati da equazioni differenziali alle derivate parziali la cui complessità matematica rende difficile la risoluzione analitica.

Nell'ambito della geotecnica, essendo la roccia o il terreno un materiale naturale con comportamento spesso discontinuo, anisotropo, non omogeneo e non elastico, occorre tenere in conto un elevato numero di parametri, caratterizzati da un'incertezza non trascurabile, oltre al fatto che spesso le condizioni al contorno sono difficili da descrivere. Di conseguenza sono pochi i problemi geotecnici per i quali si può ottenere una soluzione analitica esatta, perciò si ricorre in genere ai metodi numerici, che forniscono una soluzione approssimata.

L'analisi numerica ha alla base la costruzione di un modello matematico che rappresenta schematicamente il problema reale, in modo da descriverne i principali aspetti. A tal fine, occorre individuare i parametri rappresentativi, ottenuti attraverso indagini e raccolte dati, da inglobare nel modello; essi cambiano a seconda del suo scopo e del metodo di analisi usato. A causa delle incertezze legate alla caratterizzazione geotecnica, è bene valutare i risultati ottenuti con un approccio critico e confrontarli con eventuali dati di monitoraggio o soluzioni note.

Tra i diversi metodi di analisi numerica vi è il metodo agli elementi finiti (FEM), che è alla base del funzionamento del codice di calcolo FEFLOW. Si tratta di un metodo del continuo differenziale, cioè prevede una modellazione del sottosuolo come un mezzo continuo equivalente ed un'approssimazione su tutto il dominio. Il metodo agli elementi finiti è il metodo numerico più diffuso in ambito ingegneristico, grazie alla sua flessibilità nel considerare materiali eterogenei e non lineari e condizioni al contorno complesse, utilizzando numerosi codici di calcolo consolidati.

Il metodo FEM parte dalla discretizzazione del modello, cioè la suddivisione del dominio in un numero finito di sottodomini, detti elementi, di forma elementare (triangolare, quadrilatera, tetraedrica, ecc.) con un numero fisso di nodi ai vertici o ai lati; l'insieme di elementi e nodi è definito mesh. L'ipotesi di base è l'approssimazione dell'andamento della variabile incognita (spostamento, pressione, temperatura, velocità, ecc.) attraverso la funzione di forma H , in genere polinomiale, oppure trigonometrica o esponenziale, che lega la soluzione all'interno di ogni elemento ai valori che la variabile assume ai nodi. Nel settore geotecnico, la variabile primaria utilizzata è spesso lo spostamento. In un modello tridimensionale, possiamo quindi scrivere gli spostamenti $[u(x, y, z)]$ all'interno di ogni elemento in funzione dei valori discreti ai nodi $[u]_e$:

$$[u(x, y, z)] = [H(x, y, z)]^T [u]_e$$

Al diminuire della dimensione degli elementi che compongono la mesh del modello aumenta la precisione dell'approssimazione, ma cresce anche l'onere computazionale, perciò è utile infittire i nodi solo nelle zone in cui ci si aspetta un gradiente elevato piuttosto che in tutto il dominio.

Considerando le equazioni di compatibilità e le equazioni costitutive, si possono scrivere le relazioni che esprimono le deformazioni $[\varepsilon]$ e le tensioni $[\sigma]$ dell'elemento:

$$[\varepsilon] = [B][u]_e$$

$$[\sigma] = [C][\varepsilon]$$

$[B]$ e $[C]$ sono rispettivamente la matrice di deformazione, contenente le derivate della matrice di forma $[H]$, e la matrice elastica dell'elemento.

Una volta definito il campo tenso-deformativo di ogni elemento a partire dagli spostamenti nodali, si calcola la matrice di rigidezza dell'elemento $[K]_e$ utilizzando il principio dei lavori virtuali:

$$[k]_e = \int_{V_e} [B]_e^T [C]_e [B]_e dV_e$$

La matrice di rigidezza così ottenuta permette di scrivere la relazione tra le forze $[X]_e$ e gli spostamenti $[u]_e$ ai nodi dell'elemento:

$$[X]_e = [k]_e [u]_e$$

Le equazioni ottenute per ciascun elemento sono poi assemblate in un sistema globale di equazioni:

$$[X] = [K][u]$$

$[K]$ è la matrice di rigidezza globale, ricavata per combinazione delle matrici di rigidezza degli elementi; $[X]$ ed $[u]$ sono rispettivamente le forze e gli spostamenti nodali dell'intero dominio.

La risoluzione del sistema porta alla definizione di $[X]$ ed $[u]$ dopo aver imposto le condizioni al contorno, che permettono di superare l'indeterminazione dovuta alla maggiore quantità di incognite rispetto alle equazioni risolutive. E' così possibile ricostruire il campo tenso-deformativo dell'intero dominio utilizzando le relazioni descritte in precedenza.

Il metodo agli elementi finiti permette di ridurre le incognite del problema ai soli valori nodali. Tuttavia, a causa della discretizzazione dell'intero dominio, non è adatto a simulare problemi di dimensione infinita, come semipiani o semispazi, e risulta poco efficiente per problemi con un numero elevato di nodi, poiché questo porterebbe ad un onere computazionale molto elevato. Un altro limite è l'impossibilità di riprodurre fratture e separazioni tra gli elementi, in quanto è imposta la condizione di compatibilità degli spostamenti per i nodi comuni a più elementi.

3.2 Analisi termo-idraulica accoppiata

In geotecnica, spesso ci si trova a studiare diversi aspetti dello stesso problema, in particolare termico, idraulico e meccanico. In questo caso si parla di analisi accoppiate THM (thermo-hydro-mechanical), in quanto i vari processi (flusso idraulico, trasferimento termico e deformazioni) influiscono l'uno sull'altro, come è schematizzato in Figura 3.1.

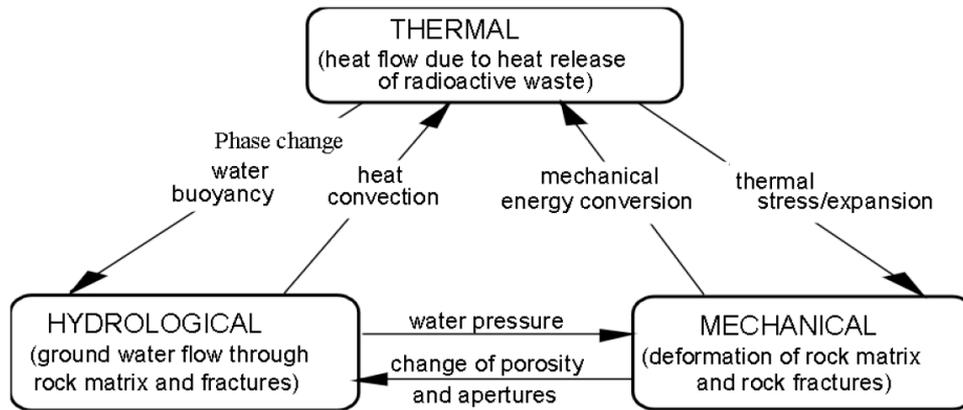


Figura 3.1. Processi termo-idro-meccanici accoppiati in un ammasso roccioso fratturato (Jing, 2003)

Ai fini del lavoro della tesi, è considerato un approccio accoppiato termo-idraulico (TH), che permette di studiare contemporaneamente i flussi idraulici ed i flussi di calore. Lo scopo delle simulazioni è infatti quello di studiare l'efficienza dell'impianto al variare di diverse condizioni progettuali. Per studiare gli effetti di tensioni e deformazioni indotti dai processi termo-idraulici, invece, occorrerebbe effettuare analisi accoppiate complete THM, ma ciò aumenterebbe la complessità e l'onere computazionale.

Da un punto di vista matematico, il problema accoppiato TH è descritto dall'equazione di conservazione della massa, dalla legge di Darcy e dall'equazione di conservazione dell'energia. Il terreno è considerato come un materiale bifase saturo, costituito da uno scheletro solido e da una fase liquida.

- **Equazione di conservazione della massa**

La differenza tra fluido entrante ed uscente da un elemento di terreno produce consolidazione o rigonfiamento:

$$-\nabla(\mathbf{v}) = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$$

Dove:

- \mathbf{v} : velocità del fluido rispetto allo scheletro solido;
- ε_v : deformazione volumetrica dello scheletro solido;
- t : tempo.

- **Legge di Darcy**

La legge di Darcy descrive il flusso del fluido attraverso il mezzo poroso:

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K} \cdot \nabla h$$

Dove:

- \mathbf{v} : velocità del fluido rispetto allo scheletro solido;

- K : conducibilità idraulica del mezzo poroso;
- h : carico idraulico.

- **Equazione di conservazione dell'energia**

Come approfondito nel paragrafo 3.2.2, l'energia, sotto forma di calore, può essere scambiata attraverso processi diversi, i più importanti dei quali sono conduzione e convezione. L'equazione di conservazione dell'energia tiene conto dei contributi dovuti a tali due processi e all'accumulo di calore, essendo il regime transitorio:

$$\lambda \nabla^2 T + c_w \rho_w v_i \Delta T - c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Dove:

- λ : conducibilità termica del terreno;
- T : temperatura;
- c_w, c : calori specifici rispettivamente del fluido e del terreno;
- ρ_w, ρ : densità rispettivamente del fluido e del terreno;
- v_i : velocità del fluido rispetto allo scheletro solido;
- t : tempo.

La conducibilità termica e la capacità termica del terreno possono essere espresse in funzione delle proprietà della fase solida (λ_s e $c_s \rho_s$) e della fase liquida (λ_w e $c_w \rho_w$):

$$\begin{aligned} \lambda &= n \lambda_w + (1 - n) \lambda_s \\ c \rho &= n c_w \rho_w + (1 - n) c_s \rho_s \end{aligned}$$

Dove:

- n : porosità del terreno.

Inoltre nella modellazione vengono utilizzati elementi monodimensionali ad alta conduttività per simulare i tubi scambiatori di calore; per tali elementi valgono le leggi di conservazione della massa e dell'energia, mentre il flusso del fluido al loro interno è descritto dalla legge di Hagen-Poiseuille, secondo la quale il fluido si muove in pura traslazione a velocità costante. Nel caso di sezione circolare, la velocità del fluido è data dalla seguente espressione:

$$v_z = -\frac{r_{hydr}^2}{2\mu} \left(\frac{dp}{dz} - \rho g \right)$$

Dove:

- r_{hydr} : raggio idraulico, definito come rapporto tra area interessata dal flusso e perimetro bagnato (nel caso di tubo circolare pari alla metà del raggio dell'elemento);
- μ : viscosità dinamica del fluido;
- p : pressione del fluido;
- z : coordinata assiale;
- ρ : densità del fluido;
- g : accelerazione di gravità.

3.2.1 Proprietà idrauliche del sottosuolo

La **conducibilità idraulica K** (m/s) rappresenta l'attitudine del terreno ad essere attraversato da un fluido e dipende dalle caratteristiche sia del terreno che del fluido. Questa si differenzia quindi dalla permeabilità k , che dipende solamente dalle caratteristiche del terreno, ovvero dalla dimensione e dalla disposizione dei pori nel terreno. La conducibilità idraulica K e la permeabilità k sono legate dalla seguente relazione:

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

dove ρ e, μ sono rispettivamente la densità e la viscosità e g è l'accelerazione gravitazionale.

La conducibilità idraulica può assumere valori diversi a seconda della direzione del flusso: in genere si distingue il valore assunto dal parametro in direzione orizzontale da quello in direzione verticale.

Un altro parametro importante è il **coefficiente di immagazzinamento S** (m^{-1}) che descrive la capacità di un acquifero di immagazzinare acqua nei pori tra loro interconnessi. Quando in un acquifero si hanno variazioni del carico idraulico, l'acqua viene accumulata o rilasciata dai pori, per cui si ha un trasferimento di acqua nel tempo. Quando la pressione dell'acqua nella falda confinata viene ridotta di Δh , i granuli che compongono l'acquifero, non più tenuti lontani dalla pressione, tendono ad avvicinarsi riducendo il volume disponibile per l'acqua; una piccola percentuale dell'acqua contenuta nel terreno acquifero viene quindi espulsa. Misurando la portata dell'acqua rilasciata da un prisma di acquifero di base pari a un metro quadrato per una differenza di pressione di un metro, si ottiene il valore di immagazzinamento totale.

3.2.2 Proprietà termiche del sottosuolo

Il trasferimento del calore attraverso il suolo è un processo fisico complesso composto da diversi fenomeni, tra cui principalmente conduzione e convezione, ed in misura minore vaporizzazione, condensazione, scambio ionico, congelamento e scongelamento.

La conduzione è un meccanismo di trasferimento di energia termica che avviene sia nella componente solida che nella componente fluida del sottosuolo e non comporta un movimento macroscopico del mezzo conduttore. Il processo di conduzione è descritto dalla legge di Fourier:

$$\dot{q}_{cond} = -\lambda \cdot grad(T)$$

dove \dot{q}_{cond} è la densità di flusso di calore dovuto a conduzione, cioè la quantità di calore scambiata per unità di volume, λ è la conducibilità termica e $T(x, y, z, \tau)$ è il campo scalare delle temperature, variabile sia nello spazio che nel tempo, all'interno di un volume V del corpo in cui avviene conduzione.

La convezione è un meccanismo di trasporto di energia termica dovuto al movimento macroscopico delle particelle di fluido all'interno del sottosuolo. Tale processo può essere descritto dalla seguente equazione:

$$\dot{q}_{conv} = c \cdot \rho \cdot v \cdot \Delta T$$

dove \dot{q}_{conv} è la densità di flusso di calore dovuto a convezione, c è la capacità termica specifica del fluido, ρ è la densità del fluido, v è la velocità del fluido, ΔT è la variazione di temperatura.

Le leggi che regolano la conduzione e la convezione mettono in luce la dipendenza del comportamento geotermico dai parametri termici del sottosuolo, insieme ad altre proprietà fisiche, quali ad esempio la densità ed il contenuto d'acqua.

La **conducibilità termica** λ (W/m·K), definita dalla legge di Fourier riportata in precedenza, misura l'attitudine del mezzo a trasmettere il calore; essa dipende dal contenuto d'acqua, dalla densità e dalle proprietà mineralogiche e chimiche del terreno.

La **capacità termica specifica** c (J/kg·K) definisce la quantità di energia termica che occorre fornire o sottrarre ad una unità di massa del materiale per ottenere una variazione unitaria di temperatura. Spesso è possibile calcolare la capacità termica di un terreno a partire dai valori di capacità termica dei suoi componenti:

$$c = c_s \cdot x_s + c_w \cdot x_w + c_a \cdot x_a$$

dove x è il volume specifico ed i pedici s , w e a indicano rispettivamente la fase solida, la fase liquida e la fase gassosa. Le capacità termiche delle componenti solida e liquida possono essere considerate costanti, mentre il volume specifico della componente gassosa è in genere trascurabile.

Essendo la capacità termica specifica dell'acqua maggiore rispetto a quella della fase solida ($c_w = 4186$ J/kg·K, $c_s \approx 1000$ J/kg·K) la capacità termica specifica globale aumenta all'aumentare del contenuto

d'acqua. Inoltre in caso di congelamento del terreno c diminuisce, in quanto la capacità specifica del ghiaccio è minore di quella dell'acqua ($c_g = 1884 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$).

Un altro parametro che descrive le proprietà termiche del terreno è la **diffusività** (o dispersività) **termica** α (m^2/s), la quale indica la rapidità nel seguire le variazioni di temperatura a fronte di una somministrazione di energia termica:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

I suddetti parametri vengono determinati attraverso prove in sito ed in laboratorio, durante le quali un certo volume di terreno è sottoposto ad un gradiente di temperatura.

Tuttavia, per la progettazione preliminare di sistemi geotermici complessi o per progetti minori standard, è possibile considerare con sufficiente accuratezza valori delle proprietà termiche tabellati, derivanti da studi parametrici. Ad esempio, per la conducibilità termica possono essere utilizzati i diagrammi in Figura 3.2, i quali considerano λ dipendente dal contenuto d'acqua, dalla densità secca e dalla composizione del terreno.

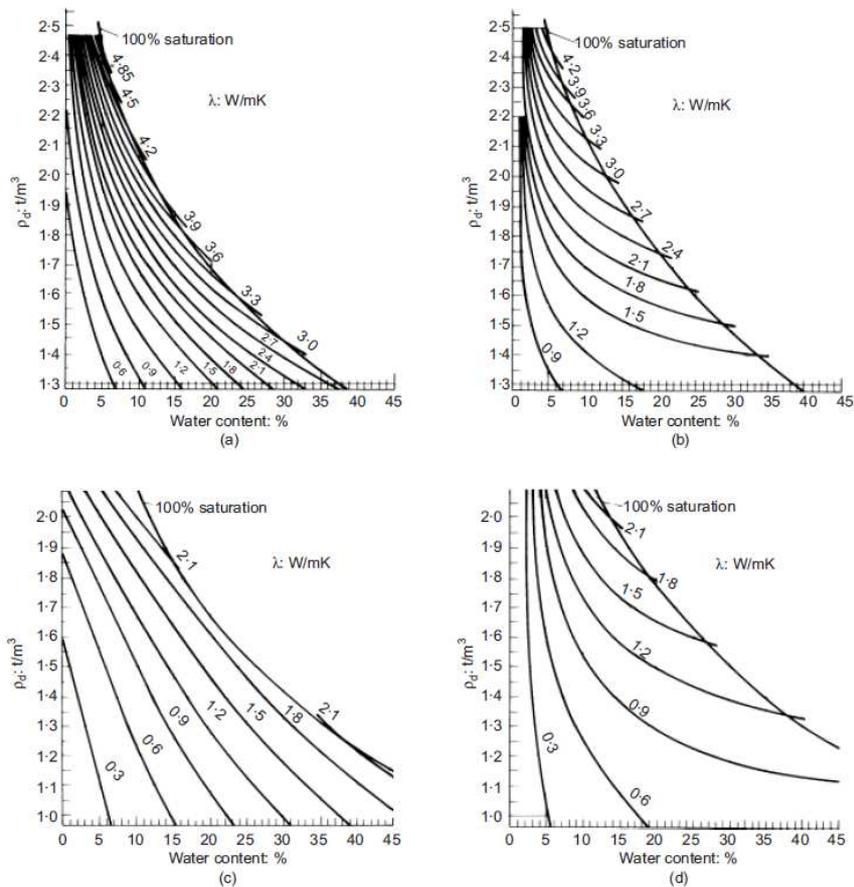


Figura 3.2. Valori di conducibilità termica in funzione del contenuto d'acqua e della densità secca per terreni (a) a grana grossa, ghiacciati, (b) a grana grossa, non ghiacciati, (c) a grana fine, ghiacciati, (d) a grana fine, non ghiacciati (Brandl, 2006)

3.2.3 Condizioni iniziali e al contorno

Le condizioni iniziali di un modello termoidraulico rappresentano l'andamento dei carichi idraulici e delle temperature all'interno del dominio del modello all'inizio della simulazione (tempo zero).

Le condizioni al contorno, invece, rappresentano una condizione fissata nel tempo sulla soluzione e possono essere di tre tipi:

1. Le condizioni al contorno di Dirichlet (o di 1° tipo) specificano i valori che la soluzione assume in determinati nodi; nel caso di problemi termici e idraulici si traducono in zone rispettivamente a temperatura e carico idraulico noti.

$$T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t)$$

$$h(x, y, z, t) = f(x, y, z, t)$$

2. Le condizioni al contorno di Neumann (o di 2° tipo) specificano i valori che la derivata della soluzione assume in determinati nodi; nel caso di problemi termici e idraulici si traducono in zone rispettivamente a flusso termico e flusso idraulico noti.

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} = f(x, y, z, t)$$

$$\frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial n} = f(x, y, z, t)$$

3. Le condizioni al contorno di Cauchy (o di 3° tipo) specificano i valori della soluzione e della sua derivata in determinati nodi, perciò corrispondono alla somma degli effetti delle condizioni di Dirichlet e di Neumann.

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} + sT(x, y, z, t) = f(x, y, z, t)$$

$$\frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial n} + rh(x, y, z, t) = f(x, y, z, t)$$

Nelle formulazioni precedenti n rappresenta un vettore direzionale perpendicolare uscente dal confine, s ed r sono costanti generiche.

4 OTTIMIZZAZIONE TERMO-IDRAULICA DI UNA GALLERIA ENERGETICA

Nel seguente capitolo è affrontato lo studio del calore scambiabile con il terreno dall'impianto geotermico collocato all'interno dei conci prefabbricati di una galleria realizzata mediante scavo meccanizzato con TBM, considerando diverse configurazioni di progetto dei collegamenti tra le serpentine degli anelli ed una durata di attivazione dell'impianto di 30 giorni (estesa in un secondo momento a 180 giorni). Il caso studio preso in esame riguarda alcune tratte del progetto della Linea 2 della Metropolitana di Torino.

L'analisi è stata condotta attraverso simulazioni realizzate sul software FEFLOW, dai risultati delle quali è stato possibile ottenere il potenziale geotermico dell'impianto per i diversi casi studiati. Questo è stato utilizzato, insieme ai costi definiti attraverso un'analisi idraulica (Candito, 2020), al fine di scegliere l'impianto più efficiente confrontando i costi ed i benefici.

4.1 Caso studio: Linea 2 della Metropolitana di Torino

Nel progetto di fattibilità tecnico-economica il tracciato della Linea 2 della Metropolitana di Torino (ML2) collega la zona a Sud-Ovest e la zona a Nord-Est della città; esso è composto da una tratta centrale lunga 15,7 km tra le stazioni Anselmetti e Rebaudengo, un prolungamento di 5,7 km a NE tra le stazioni Cimarosa-Tabacchi e Autoporto Pescarito ed un prolungamento di 6,5 km a SO tra le stazioni Anselmetti ed Orbassano centro (Figura 4.1).

Per quanto riguarda la tratta centrale, la galleria sarà scavata con metodo meccanizzato attraverso TBM tra le stazioni Anselmetti e Bologna, per una lunghezza di 12 km, e con metodo Cut & Cover tra le stazioni Bologna e Rebaudengo, per una lunghezza di 3 km. La profondità della galleria varia tra 20 e 38 m per i tratti scavati con TBM e tra 6,5 e 15 m per i tratti scavati con metodo Cut & Cover.

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

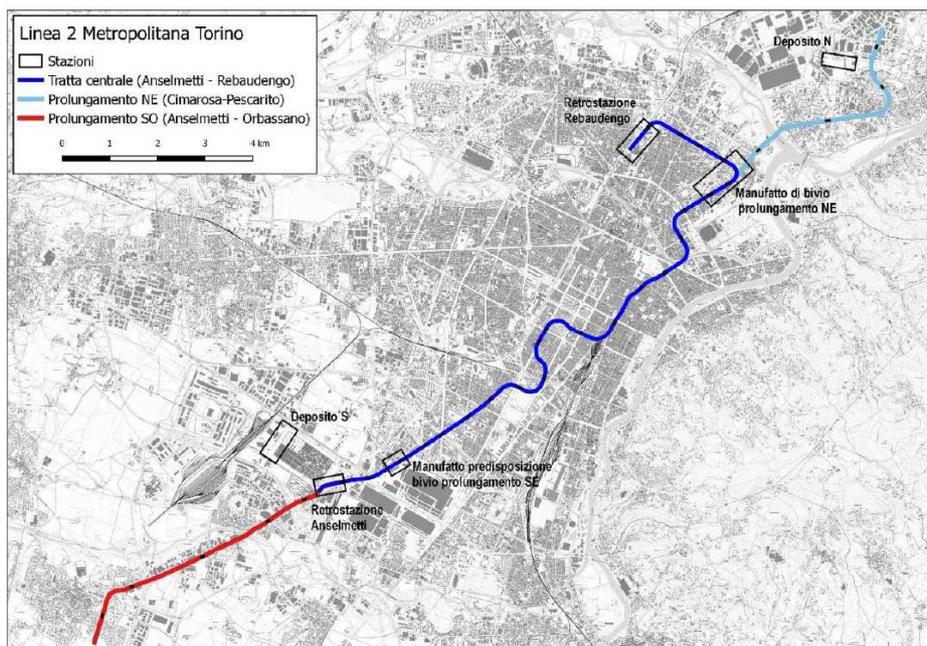


Figura 4.1. Planimetria con indicazione del tracciato complessivo della ML2 (Politecnico di Torino, 2020)

Da progetto, per ogni sezione sono note le caratteristiche geometriche della galleria (forma, diametro, profondità dell'asse, ecc.) e le metodologie di scavo e realizzazione. Al fine delle analisi vengono considerati solamente i tratti scavati con metodo TBM, per i quali la galleria ha un diametro interno di 8,8 m ed il rivestimento è costituito da 6 conci tutti uguali lunghi 1,5 m e spessi 40 cm.

Per quanto riguarda le caratteristiche del terreno attraversato dall'opera, è stata condotta una parametrizzazione a classi a partire dalle informazioni note riguardanti la distribuzione plano-altimetrica di cinque parametri:

- Posizione della superficie piezometrica rispetto alla galleria (F);
- Temperatura dell'acqua di falda (T);
- Direzione del flusso principale della falda rispetto alla direzione della galleria (DF);
- Gradiente del flusso della falda (I);
- Stratigrafia del terreno attorno alla galleria (Geo).

La divisione in classi per i suddetti parametri è riportata in Figura 4.2; per ogni classe di ogni parametro è stato utilizzato ai fini delle analisi un valore medio, riportato tra parentesi. Le principali unità geologiche presenti sono AFR (ciottoli e ghiaie eterometriche in matrice sabbiosa-debolmente limosa poco alterate, con grado di cementazione da nullo a moderato), SFR (sabbie grossolane) e FAA (limi argillosi e argille limose silt con livelli sottili sabbioso-limosi e ghiaioso-limosi). Le classi 2 e 3 del parametro "Geo" presentano una stratigrafia caratterizzata da una parte superiore ed una inferiore costituite da terreni diversi, la cui divisione è assunta alla profondità dell'asse della galleria.

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

	F	T	DF	I	Geo	Str
	Posizione galleria rispetto falda [m]	Temperatura media acqua di falda [°C]	Direzione flusso falda [°]	Gradiente di flusso [%]	Unità geologico stratigrafiche	Tipologia galleria
CLASSE 1	Livello falda > Calotta	$T < 15.0$ (14.9)	Ortagonale tracciato $\pm 30^\circ$ (90°)	$I \geq 0.40$ (0.65)	Interamente in AFR/INS/BEN ₂ ($k_h = 1.93 \cdot 10^{-3}$ m/s; $k_w/k_h = 0.05$; $\lambda = 2.7$ W/(m K); $\rho c = 2.6$ MJ/(m ³ K); $n_e = 0.175$)	Rivestimento a conci (scavo con TBM)
CLASSE 2	Calotta \leq Livello falda \leq Arco rovescio	$15.0 \leq T \leq 16.0$ (15.5)	Situazione Intermedia ($\pm 30^\circ < DF < \pm 60^\circ$)	$0.40 < I \leq 0.25$ (0.30)	Al contatto tra AFR/INS/BEN ₂ ($k_h = 1.93 \cdot 10^{-3}$ m/s; $k_w/k_h = 0.05$; $\lambda = 2.7$ W/(m K); $\rho c = 2.6$ MJ/(m ³ K); $n_e = 0.175$) e SFR/BEN ₁ ($k_h = 4.2 \cdot 10^{-4}$ m/s; $k_w/k_h = 0.05$; $\lambda = 3.3$ W/(m K); $\rho c = 2.5$ MJ/(m ³ K); $n_e = 0.125$)	
CLASSE 3	Livello falda < arco rovescio	$T > 16$ (16.1)	Parallelo tracciato $\pm 30^\circ$ (0°)	$I < 0.25$ (0.23)	Al contatto tra AFR/INS/BEN ₂ ($k_h = 1.93 \cdot 10^{-3}$ m/s; $k_w/k_h = 0.05$; $\lambda = 2.7$ W/(m K); $\rho c = 2.6$ MJ/(m ³ K); $n_e = 0.175$) e FAA/SAF ($k_h = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s; $k_w/k_h = 0.05$; $\lambda = 1.7$ W/(m K); $\rho c = 2.3$ MJ/(m ³ K); $n_e = 0.05$)	
CLASSE 4	-	-	-	-	Interamente in SFR/BEN ₁ ($k_h = 4.2 \cdot 10^{-4}$ m/s; $k_w/k_h = 0.05$; $\lambda = 3.3$ W/(m K); $\rho c = 2.5$ MJ/(m ³ K); $n_e = 0.125$)	
CLASSE 5	-	-	-	-	Interamente in FAA/SAF ($k_h = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s; $k_w/k_h = 0.05$; $\lambda = 1.7$ W/(m K); $\rho c = 2.3$ MJ/(m ³ K); $n_e = 0.05$)	

Figura 4.2 Classificazione dei 5 parametri considerati per le porzioni scavate con metodo TBM (Politecnico di Torino, 2020)

La porzione della ML2 presa in esame è quella compresa tra le stazioni Verona e Novara, a Nord della tratta centrale, lunga 658 m. Si è scelto di studiare due sezioni, appartenenti alle porzioni di tracciato in cui le condizioni sono più favorevoli e meno favorevoli all'estrazione di calore. Considerando l'influenza delle condizioni geotecniche sull'efficienza dell'impianto (paragrafo 2.4.2), le sezioni scelte presentano le seguenti caratteristiche:

- **Modello più favorevole:** tutti i parametri ricadono in classe 1, perciò la galleria è interamente sotto il livello di falda, il flusso di falda è notevole ed ortogonale all'asse della galleria ed il terreno presenta buone capacità di scambio termico;
- **Modello meno favorevole:** la galleria si trova interamente al di sotto del livello di falda (F: classe 1), la temperatura è compresa tra 15 e 16 °C (T: classe 2), il flusso di falda è parallelo all'asse della galleria (DF: classe 3), il gradiente di flusso è maggiore di 0,4 (I: classe 1) ed il terreno presenta capacità di scambio termico buone nella parte superiore, scarse nella parte inferiore (Geo: classe 3).

4.2 Realizzazione del modello

Il modello è stato costruito sul software FEFLOW; lo scopo del modello è quello di ottenere la potenza termica estraibile, perciò si usa un modello tridimensionale termo-idraulico agli elementi finiti, come descritto nel Capitolo 3, per riprodurre un numero limitato di anelli costituiti da conci energetici ENERTUN in configurazione "ground". Per ogni sezione del tracciato considerata, vengono studiate 5 configurazioni dell'impianto geotermico, corrispondenti ad 1, 2, 3, 4 e 5 anelli collegati in serie.

Sono stati studiati il caso estivo ed il caso invernale, considerando una durata di attivazione dell'impianto di 30 giorni.

4.2.1 Impostazioni generali del modello

Il modello è definito di tipo saturo, cioè il flusso di falda è studiato applicando la legge di Darcy, ed include il trasporto di calore. Sia il flusso di falda che il trasporto di calore sono simulati in regime transitorio, che prevede la dipendenza dal tempo.

Il tempo della simulazione è imposto di 60 giorni:

- Durante i primi 30 giorni si ha l'inizializzazione del modello, al fine di ricreare le condizioni iniziali di temperatura all'interno del dominio e ricondursi in tal modo alla situazione di applicazione reale, per la quale si ha l'attivazione dell'impianto in un momento successivo alla costruzione della galleria;
- Durante i successivi 30 giorni è prevista l'attivazione termica dell'impianto.

4.2.2 Geometria

Il modello è costruito considerando la galleria profonda, in quanto la copertura minima della galleria è superiore alla profondità a cui si risentono le fluttuazioni termiche stagionali. Le dimensioni della sezione del modello verticale e perpendicolare all'asse della galleria sono riportate in Figura 4.3 e sono scelte in modo che i fenomeni simulati nell'intorno della galleria non influenzino i contorni del modello, che devono rimanere indisturbati. Lo spessore del modello varia sulla base della configurazione dell'impianto, in quanto il numero di anelli, ognuno dei quali è spesso 1,5 m, deve essere multiplo del numero degli anelli collegati in serie. Considerando il minimo comune multiplo tra 1, 2, 3, 4 e 5, se si volesse utilizzare lo stesso spessore per tutti i modelli si dovrebbero considerare 60 anelli, ma ciò porterebbe ad un ingiustificato aumento dell'onere computazionale, perciò si è scelto di considerare due dimensioni diverse:

- Nel caso di 1,3 e 5 anelli in serie lo spessore è pari a 22,5 m, corrispondente a 15 anelli;
- Nel caso di 2 e 4 anelli in serie lo spessore è pari a 18 m, corrispondente a 12 anelli.

La realizzazione della geometria del modello ha inizio dalla creazione della "supermesh", che rappresenta lo spazio contenente le informazioni geometriche necessarie alla generazione della mesh: oltre ai contorni del dominio (Figura 4.3), sono realizzate due circonferenze centrate nel centro della galleria di diametro 9,6 m e 9,5 m, corrispondenti rispettivamente al contorno del rivestimento ed alla posizione delle serpentine all'interno dei conci, alcuni punti di riferimento per la modellazione delle serpentine ed una linea orizzontale che divide il dominio in due parti uguali, per assegnare diverse

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

proprietà al terreno nella parte superiore ed in quella inferiore nel caso del modello meno favorevole. Il sistema di riferimento è centrato nel centro della galleria ed è orientato con asse orizzontale x positivo verso destra e asse verticale y positivo verso l'alto.

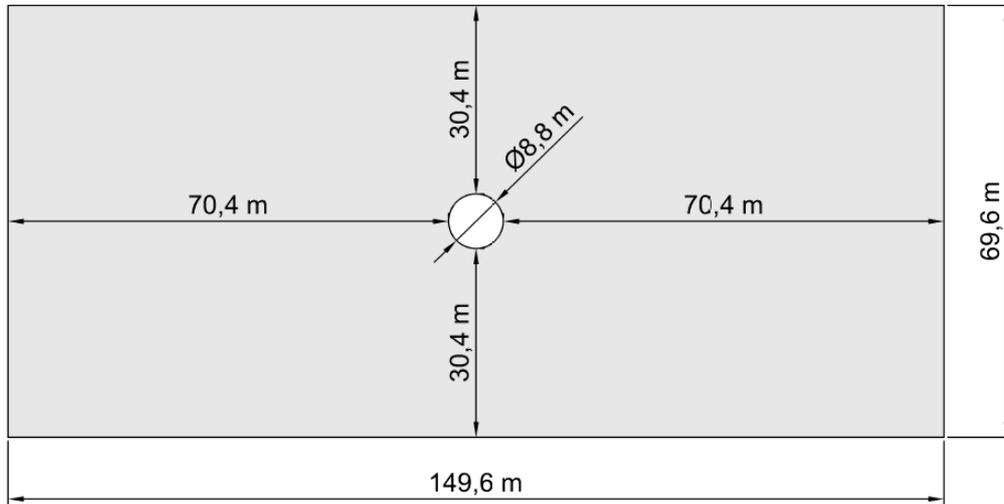


Figura 4.3. Dimensioni della sezione del modello verticale e perpendicolare all'asse della galleria

Definiti i vincoli geometrici, la discretizzazione del modello (mesh) è realizzata utilizzando l'algoritmo "Triangle", che produce elementi finiti triangolari a tre nodi ed è adatta a geometrie complesse. Per aumentare la qualità della discretizzazione, è fissato un angolo minimo di 20° e la mesh è infittita in prossimità della galleria.

Successivamente è stato generato il modello tridimensionale estraendo la sezione verticale e generando i "layers" e gli "slices". All'interno di un anello le serpentine sono disposte su 5 livelli distanti 30 cm l'uno dall'altro e 15 cm dall'inizio e dalla fine dell'anello di rivestimento. Di conseguenza, nel modello ogni anello è diviso in 6 layers e 7 slices, con una spaziatura che viene riportata in Figura 4.4.

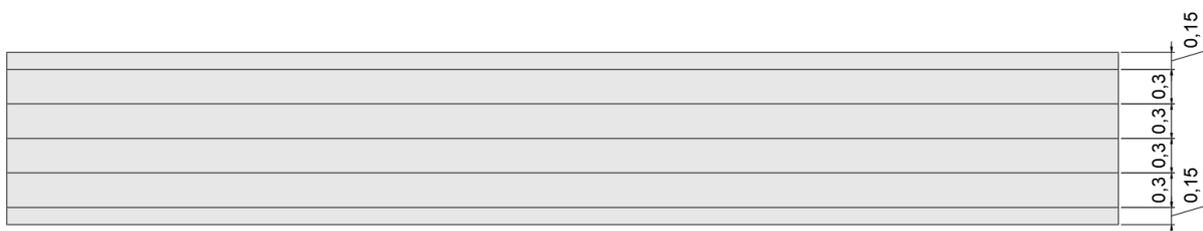


Figura 4.4. Divisione in layers e slices di un anello di rivestimento (quote in metri)

Il modello con 15 anelli (Figura 4.5) presenta 91 slices e 90 layers e la discretizzazione porta ad avere 4827420 elementi prismatici triangolari a 6 nodi; il modello con 12 anelli (Figura 4.6) presenta 73 slices e 72 layers e la discretizzazione porta ad avere 3861936 elementi prismatici triangolari a 6 nodi.

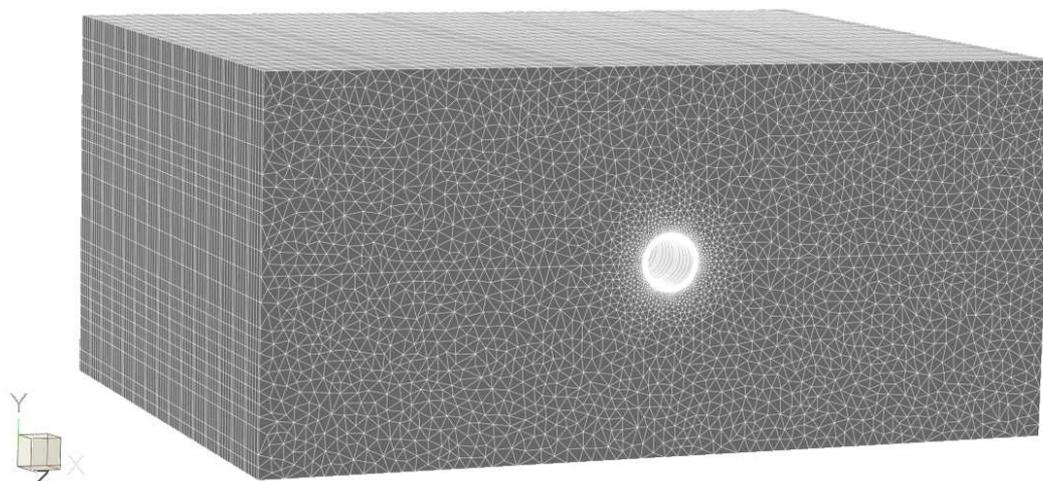


Figura 4.5. Geometria del modello numerico 3D con 15 anelli su FEFLOW

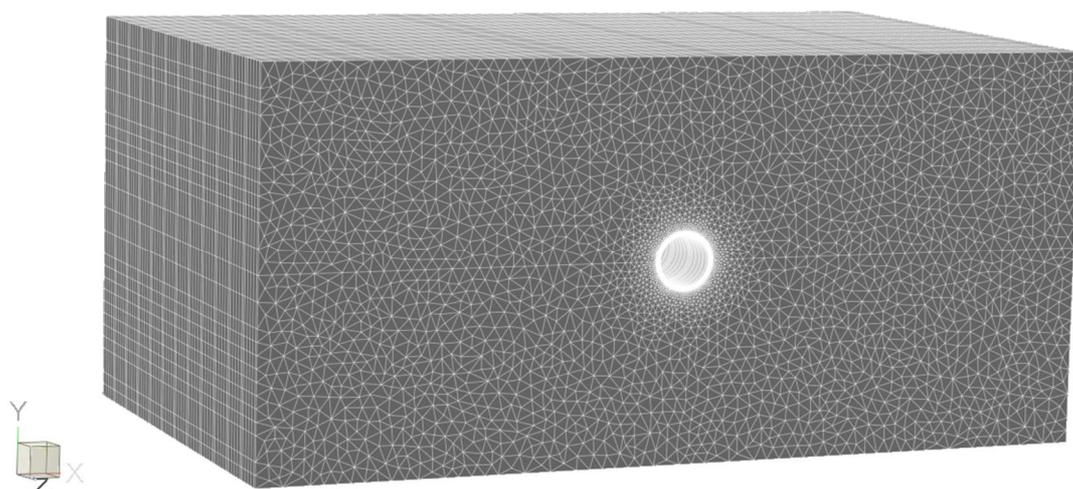


Figura 4.6. Geometria del modello numerico 3D con 12 anelli su FEFLOW

Successivamente, sono state generate le serpentine del sistema geotermico, le quali sono disposte secondo la configurazione ENERTUN (paragrafo 2.4.1) lungo 5 spire ad una distanza di 5 cm dalla superficie dell'estradosso esterno, distanziate di 30 cm tra loro e di 15 cm dal bordo del concio. Le tubazioni presentano un diametro esterno di 20 mm ed uno spessore di 2 mm, perciò la loro dimensione ridotta permette di modellarle come "discrete features", cioè elementi monodimensionali. E' stata imposta come legge che regola il flusso del fluido all'interno delle serpentine quella di Hagen-Poiseuille (paragrafo 3.3). Per ogni sezione in esame, è stato effettuato uno studio parametrico relativo al collegamento in serie delle tubazioni degli anelli, considerando cinque configurazioni, la cui geometria è illustrata in Figura 4.7:

- 1) Attivazione termica di 15 anelli indipendenti;
- 2) Attivazione termica di 6 gruppi di 2 anelli in serie;
- 3) Attivazione termica di 5 gruppi di 3 anelli in serie;

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

- 4) Attivazione termica di 3 gruppi di 4 anelli in serie;
- 5) Attivazione termica di 3 gruppi di 5 anelli in serie.

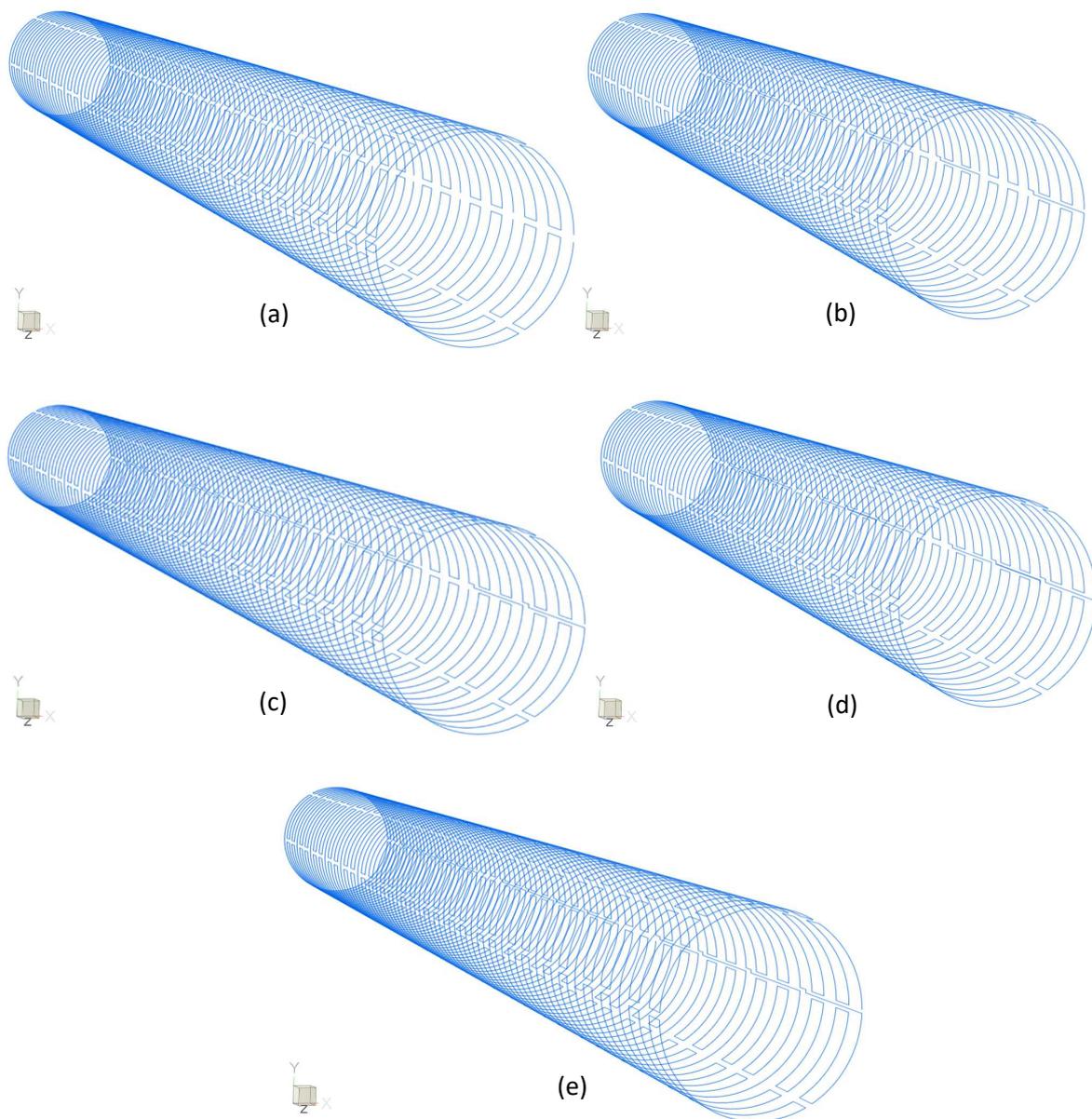


Figura 4.7. Geometria delle serpentine per i casi di (a) 15 anelli indipendenti, (b) 6 gruppi di 2 anelli in serie, (c) 5 gruppi di 3 anelli in serie, (d) 3 gruppi di 4 anelli in serie, (e) 3 gruppi di 5 anelli in serie

I punti di ingresso e di uscita di ogni serpentina corrispondono rispettivamente ai collegamenti con le tubazioni di mandata e ritorno, che trasferiscono il fluido termovettore da e verso la pompa di calore.

Nel seguito verrà indicato attraverso il numero della configurazione il numero di anelli collegati termicamente in serie (ad es. configurazione 1 per indicare i 15 anelli collegati in parallelo).

4.2.3 Parametri dei materiali

Una volta definita la geometria, occorre assegnare agli elementi del modello le proprietà dei materiali. In particolare, occorre definire i parametri del terreno e del rivestimento della galleria, oltre che delle serpentine, modellate come elementi unidimensionali. In Figura 4.8 e Figura 4.9 sono riportati i dettagli della divisione in materiali degli elementi finiti in prossimità della galleria per i due casi analizzati.

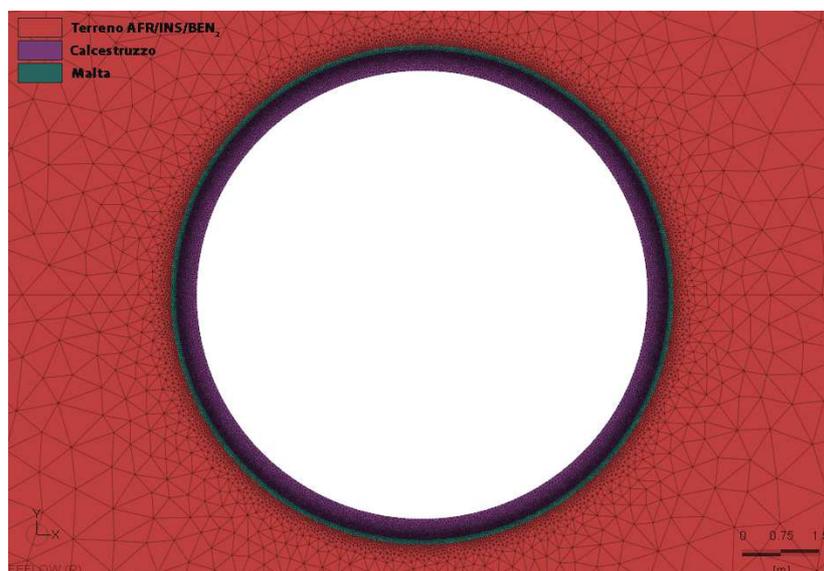


Figura 4.8. Dettaglio dei materiali del modello più favorevole

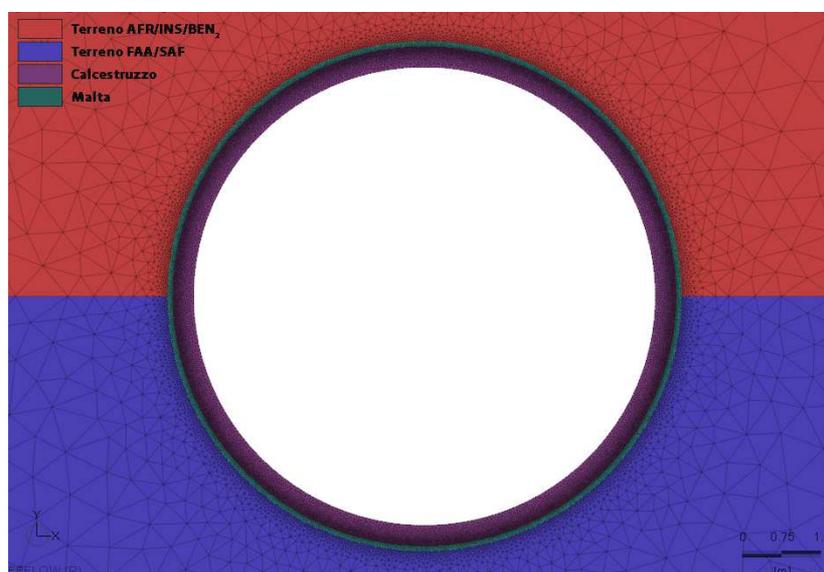


Figura 4.9. Dettaglio dei materiali del modello meno favorevole

I parametri del terreno variano sulla base della sezione in esame: il modello più favorevole prevede sull'intera altezza un terreno grossolano (AFR/INS/BEN₂), caratterizzato da elevate caratteristiche di conducibilità termo-idraulica, mentre il modello meno favorevole prevede nella parte più profonda un terreno limoso-argilloso (FAA/SAF), con scarse proprietà di conducibilità termo-idraulica. I parametri usati per le due tipologie di terreno sono riportati in Tabella 4.1.

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

Tabella 4.1. Parametri termo-idraulici del terreno

Proprietà		Unità di misura	Terreno AFR/INS/BEN ₂	Terreno FAA/SAF
Conducibilità idraulica orizzontale	$k_{xx} = k_{zz}$	m/s	$1,93 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$
Conducibilità idraulica verticale	k_{yy}	m/s	$9,65 \cdot 10^{-5}$	$5,00 \cdot 10^{-10}$
Coefficiente di immagazzinamento	S	m^{-1}	0,0001	0,0001
Porosità	n	-	0,175	0,05
Capacità termica del fluido	$\rho_w c_w$	MJ/(m ³ K)	4,2	4,2
Capacità termica del solido	$\rho_s c_s$	MJ/(m ³ K)	2,6	2,3
Conducibilità termica del fluido	λ_w	W/(m·K)	0,65	0,65
Conducibilità termica del solido	λ_s	W/(m·K)	2,7	1,7
Dispersività longitudinale	α_L	m	3,1	3,1
Dispersività trasversale	α_T	m	0,31	0,31

Il rivestimento della galleria è costituito da conci prefabbricati in calcestruzzo, all'estradosso dei quali è presente uno strato di malta cementizia spesso circa 10 cm. I parametri termo-idraulici del calcestruzzo e della malta sono riportati in Tabella 4.2.

Tabella 4.2. Parametri termo-idraulici del calcestruzzo e della malta

Proprietà		Unità di misura	Calcestruzzo	Malta
Conducibilità idraulica orizzontale	$k_{xx} = k_{zz}$	m/s	1,00E-16	1,00E-16
Conducibilità idraulica verticale	k_{yy}	m/s	1,00E-16	1,00E-16
Coefficiente di immagazzinamento	S	m^{-1}	0,0001	0,0001
Porosità	n	-	0	0
Capacità termica del solido	$\rho_s c_s$	MJ/(m ³ K)	2,19	2,19
Conducibilità termica del solido	λ_s	W/(m·K)	1,5	2
Dispersività longitudinale	α_L	m	3,1	3,1
Dispersività trasversale	α_T	m	0,31	0,31

Il punto di uscita della serpentina di ogni anello si trova allo stesso livello del punto di ingresso, perciò, al fine di collegare gli anelli in serie, nel modello le tubazioni attraversano l'anello in direzione longitudinale, per ricondursi al punto di ingresso della serpentina dell'anello successivo. Nell'impianto reale questo collegamento avviene in galleria ed è adeguatamente isolato, perciò per ottenere nel modello lo stesso effetto si assegna una conducibilità termica nulla agli elementi in corrispondenza dei tratti di collegamento (elementi colorati in Figura 4.10).

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

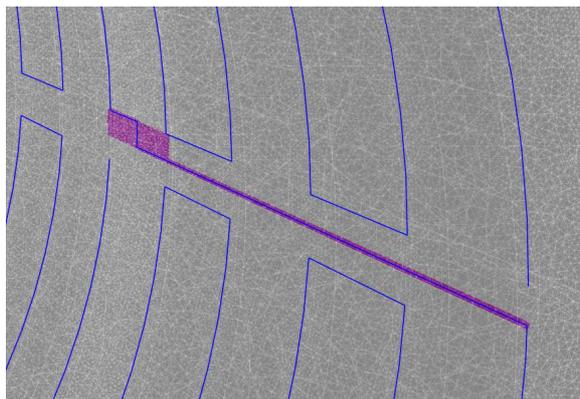


Figura 4.10. Elementi a conducibilità termica nulla in corrispondenza dei tratti di collegamento tra le tubazioni di due anelli

Il fluido termovettore che scorre all'interno delle tubazioni è costituito da acqua miscelata al 10% di glicole propilenico, in modo da garantire una certa resistenza al congelamento. I parametri termici di tale fluido variano in funzione della sua temperatura e sono stati individuati tramite il software Coolpack, considerando per semplicità la temperatura in ingresso nelle serpentine (Tabella 4.3). All'interno del circuito idraulico vi è una variazione di temperatura dovuta allo scambio termico con il terreno, ma questa non viene considerata nell'individuazione dei parametri termici del fluido in quanto non comporta effetti notevoli sui risultati. Si distinguono quindi due situazioni per le analisi numeriche: caso invernale (temperatura di ingresso del fluido pari a 4 °C) e caso estivo (temperatura di ingresso del fluido pari a 28 °C). I parametri delle tubazioni dipendono dalle proprietà del fluido che le attraversa e sono definiti in Tabella 4.4.

Tabella 4.3. Parametri del fluido termovettore in funzione della temperatura

Proprietà		Unità di misura	T = 4 °C	T = 28 °C
Densità	ρ_w	kg/m ³	1014,60	1006,56
Calore specifico	c_w	kJ/(kg·K)	4,043	4,084
Conducibilità termica	λ_w	W/(m·K)	0,517	0,554

Tabella 4.4. Parametri delle tubazioni

Proprietà		Unità di misura	Serpentina (T = 4 °C)	Serpentina (T = 28 °C)
Coefficiente di immagazzinamento	S	m ⁻¹	0,0001	0,0001
Capacità termica del fluido	$\rho_w c_w$	MJ/(m ³ K)	4,1020278	4,11079104
Conducibilità termica del fluido	λ_w	W/(m·K)	0,517	0,554
Dispersività longitudinale	α_L	m	5	5
Dispersività trasversale	α_T	m	0,5	0,5
Area trasversale	A	m ²	0,00020106	0,00020106
Raggio idraulico	r_{hyd}	m	0,008	0,008

4.2.4 Condizioni iniziali e al contorno

Le condizioni iniziali termiche consistono nel definire la temperatura iniziale di tutti i punti del modello: essa in assenza di perturbazioni è costante sia spazialmente sia temporalmente, in quanto non risente dell'effetto delle variazioni stagionali termiche, essendo la galleria profonda. Perciò la temperatura del terreno è assunta come condizione termica iniziale per tutti i nodi del modello ed è uguale in condizioni estive ed invernali; facendo riferimento alla Figura 4.2, si assume una temperatura iniziale di 14,9 °C per il modello più favorevole e di 15,5 °C per il modello meno favorevole. Inoltre la stessa temperatura è stata fissata costante per tutta la durata della simulazione, utilizzando una condizione al contorno di Dirichlet ("Temperature BC"), sulle facce superiore ed inferiore del modello, in quanto queste si trovano ad una distanza tale dalla galleria da non subire effetti dovuti all'attivazione termica.

All'interno della galleria la temperatura dell'aria subisce variazioni stagionali; considerando un tempo di attivazione dell'impianto di 30 giorni è possibile considerare una condizione al contorno di Dirichlet costante, assumendo una temperatura pari a 13 °C in inverno e a 26,7 °C in estate, sulla base dei valori di temperatura registrati lungo la Linea 1 della Metropolitana di Torino.

Le condizioni iniziali idrauliche consistono nell'imporre il carico idraulico iniziale a tutti i nodi del modello: si applica un carico idraulico variabile spazialmente in modo da riprodurre il gradiente di flusso caratteristico della sezione analizzata. Facendo riferimento alla Figura 4.2, a partire dal gradiente i si calcola la differenza di carico idraulico Δh da applicare ai due lati del modello, i quali si trovano ad una distanza L nella direzione del flusso di falda:

$$\Delta h = i \cdot L$$

Il modello più favorevole prevede un flusso di falda ortogonale all'asse della galleria con gradiente pari a 0,65%, perciò, considerando che il modello è largo 149,60 m, si impone un Δh pari a 97,2 cm. L'altezza del flusso di falda in corrispondenza del lato sinistro è assunta pari all'altezza del modello, 69,60 m, perciò in corrispondenza del lato destro è imposta pari a 68,628 m e la sua variazione in funzione della coordinata x ($x=0$ in mezzeria del modello) è data dalla seguente espressione:

$$h(x) = 69,60 - \frac{0,972}{149,60} \cdot \left(x + \frac{149,60}{2} \right)$$

Il modello meno favorevole prevede un flusso di falda parallelo all'asse della galleria con gradiente pari a 0,65%. Perciò, nel caso di modello spesso 22,5 m (configurazioni 1,3 e 5) si impone un Δh pari a 14,6 cm e l'altezza del flusso di falda sulle facce anteriore e posteriore è assunta pari a 69,60 m e 69,454 m, la sua variazione in funzione della coordinata z è data dalla seguente espressione:

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

$$h(x) = 69,60 - \frac{0,146}{22,5} \cdot (22,5 - z)$$

Nel caso di modello spesso 18 m (configurazioni 2 e 4) si impone un Δh pari a 11,7 cm e l'altezza del flusso di falda sulle facce anteriore e posteriore è assunta pari a 69,60 m e 69,483 m, la sua variazione in funzione della coordinata z è data dalla seguente espressione:

$$h(x) = 69,60 - \frac{0,117}{18} \cdot (18 - z)$$

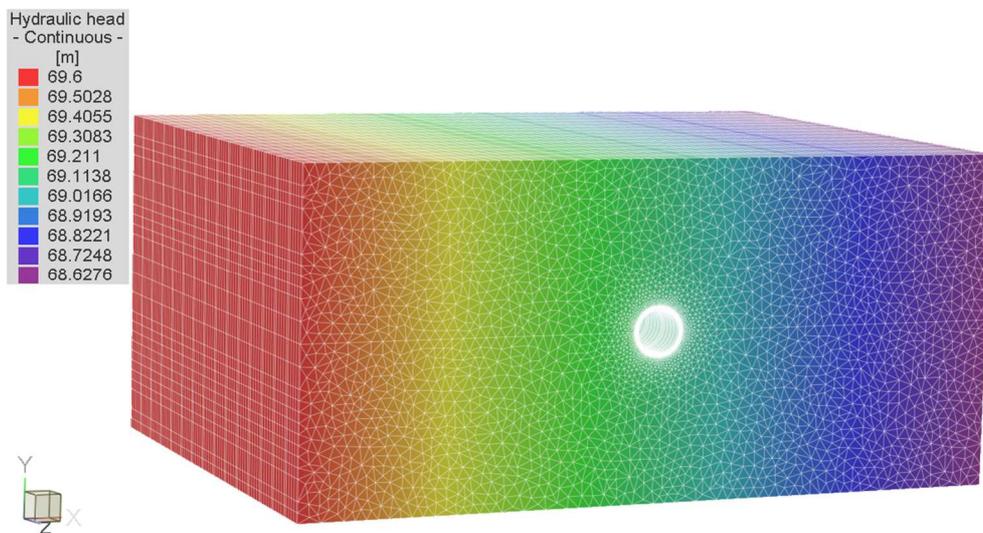


Figura 4.11. Condizioni iniziali idrauliche del modello più favorevole

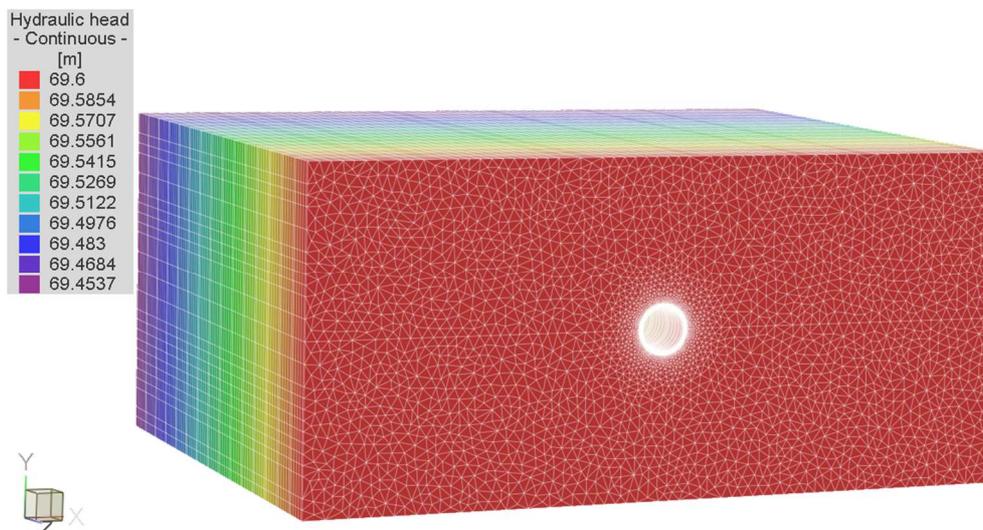


Figura 4.12. Condizioni iniziali idrauliche del modello meno favorevole, nel caso di spessore di 22,5 m

Le altezze del carico idraulico ai lati sinistro e destro del modello più favorevole e sulle facce anteriore e posteriore del modello meno favorevole sono fissate come costanti per tutta la durata delle analisi, utilizzando la condizione al contorno di Dirichlet (“Hydraulic-head BC”).

Infine, l’attivazione dell’impianto è simulata imponendo condizioni al contorno idrauliche e termiche alle tubazioni. Dal punto di vista termico, si impongono condizioni al contorno di Dirichlet (“Temperature BC”) ai nodi di ingresso delle serpentine per ogni gruppo di anelli collegati in serie, fissando una temperatura di 4 °C nel caso invernale e di 28 °C nel caso estivo. Dal punto di vista idraulico, si impone una velocità del fluido costante pari a 0,9 m/s utilizzando la condizione al contorno di Neumann (“Fluid-flux BC”) e fissando, per convenzione, la velocità negativa al nodo di ingresso e positiva al nodo di uscita delle serpentine. Tali condizioni sono state applicate solo per la durata di attivazione termica dell’impianto: a questo scopo sono state utilizzate le “Times Series”, che permettono di applicare una variazione temporale delle condizioni al contorno.

4.3 Risultati delle simulazioni

Per ogni analisi è stato osservato l’andamento delle temperature in alcuni punti, detti “observational points”, in corrispondenza dell’ingresso e dell’uscita delle serpentine degli anelli e lungo la direzione orizzontale, alla profondità dell’asse della galleria ed a valle rispetto alla direzione del flusso di falda. In Figura 4.13 si osserva la posizione di tali punti nel modello che presenta tutti gli anelli separati termicamente (configurazione 1); nelle altre configurazioni cambia la posizione dei punti di osservazione relativi alle serpentine, mentre i punti di osservazione del terreno rimangono gli stessi. Il monitoraggio delle temperature in entrata ed uscita dalle tubazioni di un gruppo di anelli attivati termicamente e delle temperature del terreno viene effettuato al centro dello spessore del modello, in modo da evitare gli effetti di bordo.

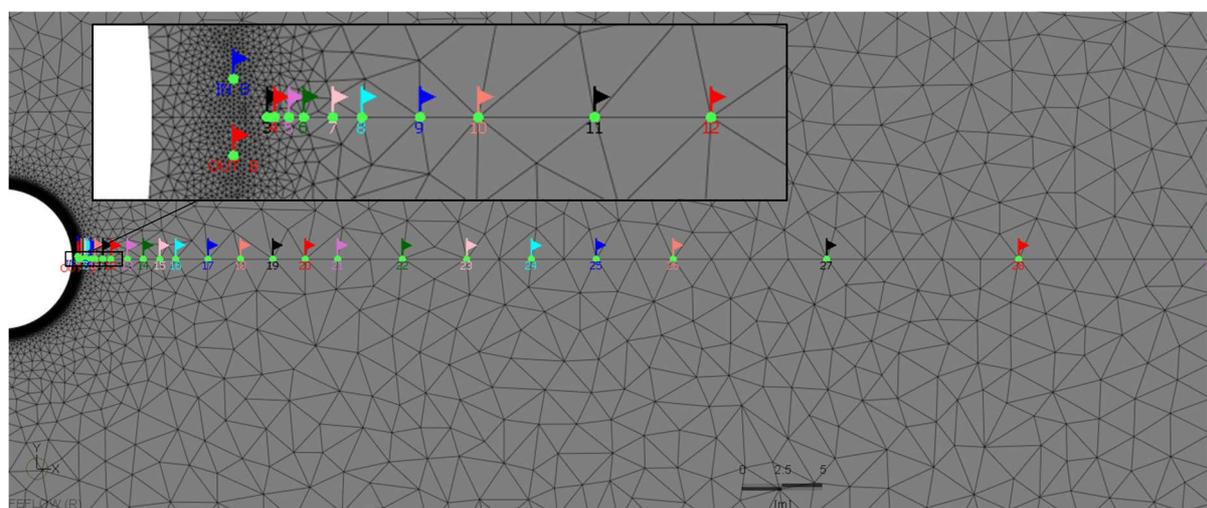


Figura 4.13. Posizione degli “observational point”

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

Durante l'inizializzazione del modello (primi 30 giorni della simulazione) viene calcolata la distribuzione della temperatura all'interno del dominio in presenza della galleria, ma senza attivazione dell'impianto geotermico:

- le temperature diminuiscono nell'intorno della galleria nel caso invernale, a causa della minore temperatura dell'aria interna (13 °C) rispetto al terreno (14,9 °C nel caso più favorevole e 15,5 °C nel caso meno favorevole);
- le temperature aumentano nell'intorno della galleria nel caso estivo, a causa della maggiore temperatura dell'aria interna (26,7 °C) rispetto al terreno.

Nelle Figure 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 sono riportati i particolari della distribuzione di temperatura nell'intorno della galleria al termine dei 30 giorni di inizializzazione del modello, nel caso invernale ed estivo. Dalle immagini è possibile osservare l'effetto di "plume" nel modello più favorevole, dovuto al flusso di falda diretto verso destra; nel modello meno favorevole tale effetto non si verifica, in quanto il flusso è parallelo all'asse della galleria. Inoltre nel modello meno favorevole si osserva che l'influenza della temperatura interna sul terreno è concentrata vicino alla galleria nella parte inferiore, caratterizzata da scarse proprietà di conducibilità termica e idraulica, mentre nella parte superiore tale influenza è diffusa a distanze maggiori dall'opera, sottolineando il diverso comportamento dei due terreni.

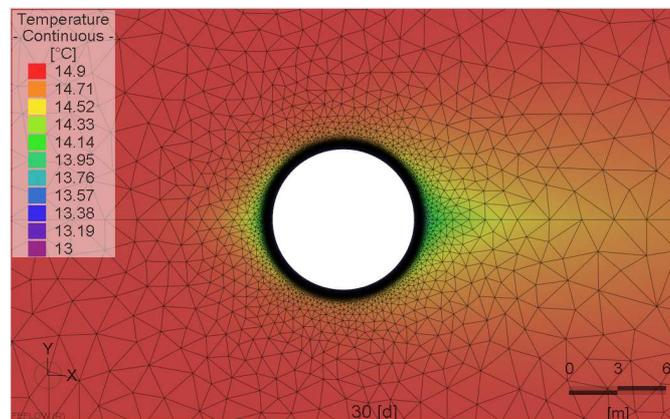


Figura 4.14. Distribuzione delle temperature nell'intorno della galleria al termine della fase di inizializzazione per il modello più favorevole nel caso invernale

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

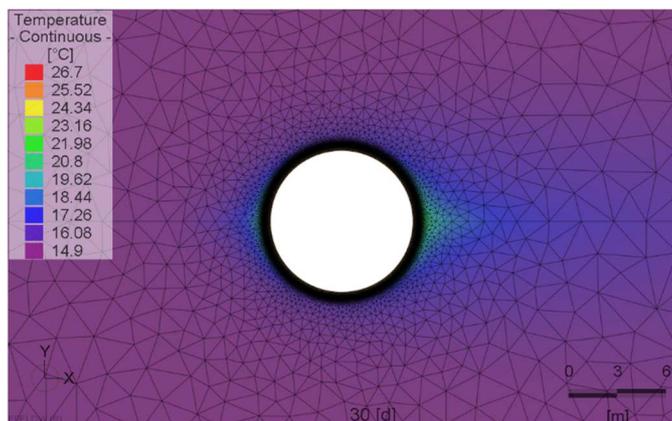


Figura 4.15. Distribuzione delle temperature nell'intorno della galleria al termine della fase di inizializzazione per il modello più favorevole nel caso estivo

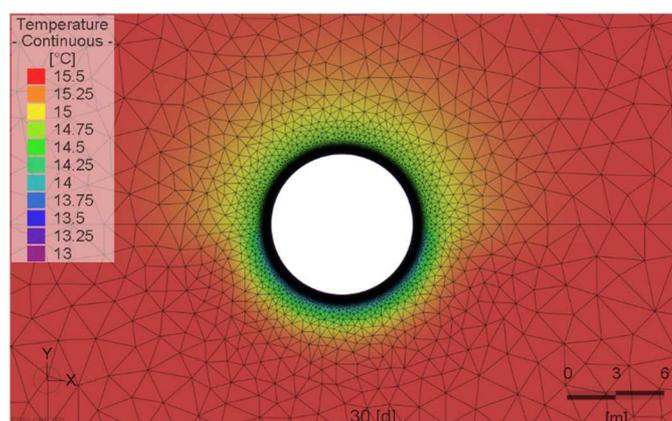


Figura 4.16. Distribuzione delle temperature nell'intorno della galleria al termine della fase di inizializzazione per il modello meno favorevole nel caso invernale

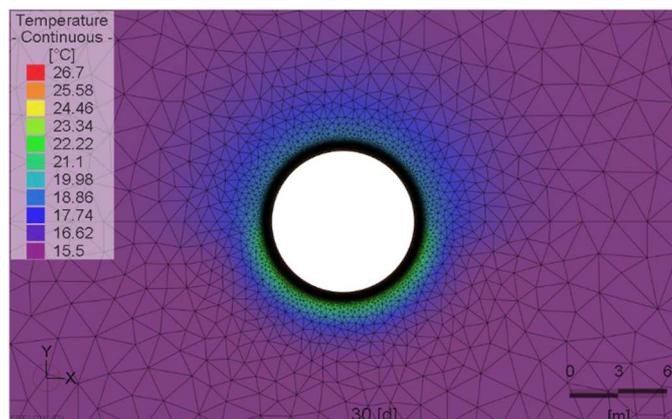


Figura 4.17. Distribuzione delle temperature nell'intorno della galleria al termine della fase di inizializzazione per il modello meno favorevole nel caso estivo

Dopo l'attivazione termica si ha una temperatura costante in entrata nelle serpentine e si evidenzia un cambiamento repentino delle temperature in uscita e del terreno nelle vicinanze della galleria:

- nel caso invernale il fluido termovettore assorbe calore dal terreno, uscendo ad una temperatura maggiore rispetto a quella di ingresso;

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

- nel caso estivo il fluido termovettore rilascia calore nel terreno uscendo ad una temperatura minore rispetto a quella di ingresso.

In entrambi i casi la temperatura in uscita tende ad assestarsi ad un valore pressoché costante, in particolare per il modello più favorevole, dopo alcuni giorni. Nei grafici seguenti (Figure 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21), a titolo esemplificativo, è riportato l'andamento delle temperature nei punti di osservazione nella configurazione 1: IN_8 e OUT_8 sono i punti di osservazione in corrispondenza dell'ingresso e dell'uscita della serpentina dell'ottavo anello, cioè quello al centro del modello, mentre i restanti punti, indicati con la distanza in metri dal centro della galleria, sono gli "observational points" illustrati in Figura 4.13.

Nei grafici relativi al modello più favorevole si osserva un brusco cambiamento in controtendenza della temperatura in uscita dalla serpentina nell'istante iniziale dell'attivazione termica, in particolare nel caso invernale la temperatura aumenta prima di ricominciare a diminuire e nel caso estivo si ha l'effetto opposto. Questo effetto è dovuto all'attraversamento da parte della serpentina di zone a temperatura maggiore e minore rispettivamente nel caso invernale ed estivo, legato al flusso di falda, come è possibile osservare in Figura 4.22, in cui sono riportate le temperature in corrispondenza della serpentina nell'istante antecedente l'attivazione termica. Nel caso del modello meno favorevole i grafici riflettono l'assenza di flusso di falda in direzione ortogonale all'asse della galleria e la scarsa conducibilità termica del terreno nella parte inferiore, infatti le temperature registrate nei punti di osservazione mostrano che allontanandosi dalla galleria l'influenza dell'attivazione termica si smorza più velocemente rispetto al modello più favorevole e la temperatura in uscita dalla serpentina è minore in inverno e maggiore in estate, indicando che lo scambio di calore con il terreno è minore.

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

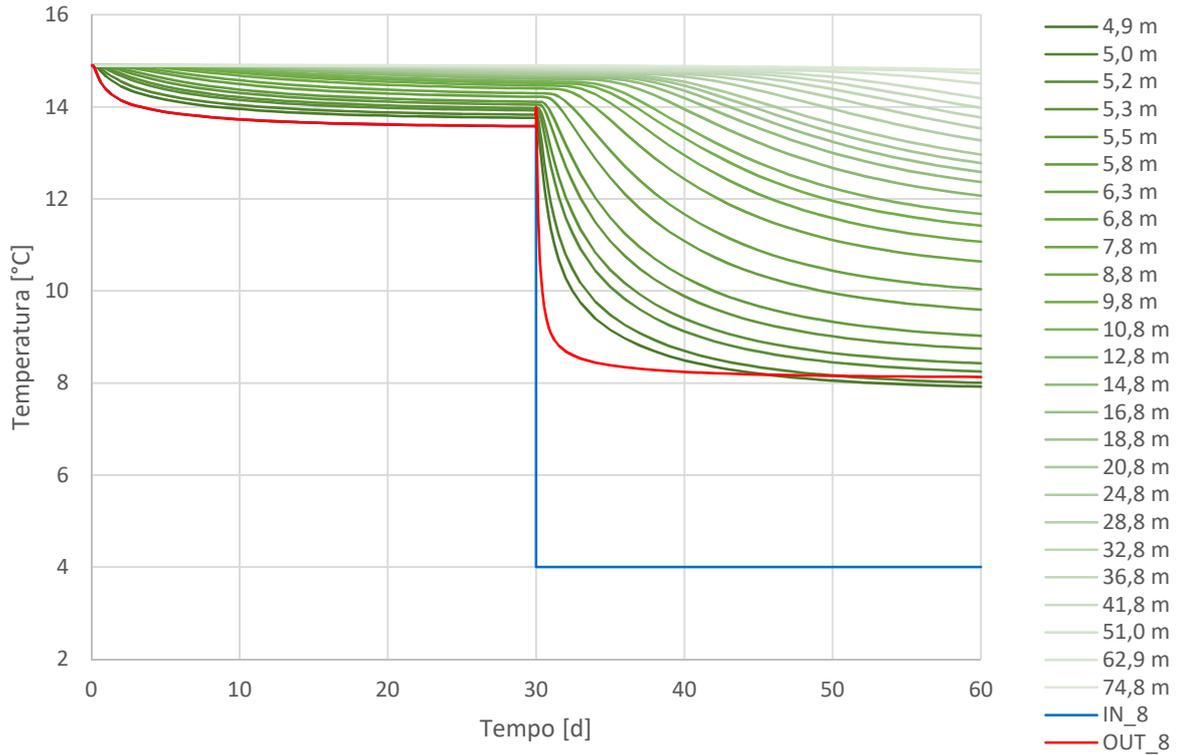


Figura 4.18. Andamento delle temperature registrato in corrispondenza dei punti di osservazione per il modello più favorevole nella configurazione 1, caso invernale

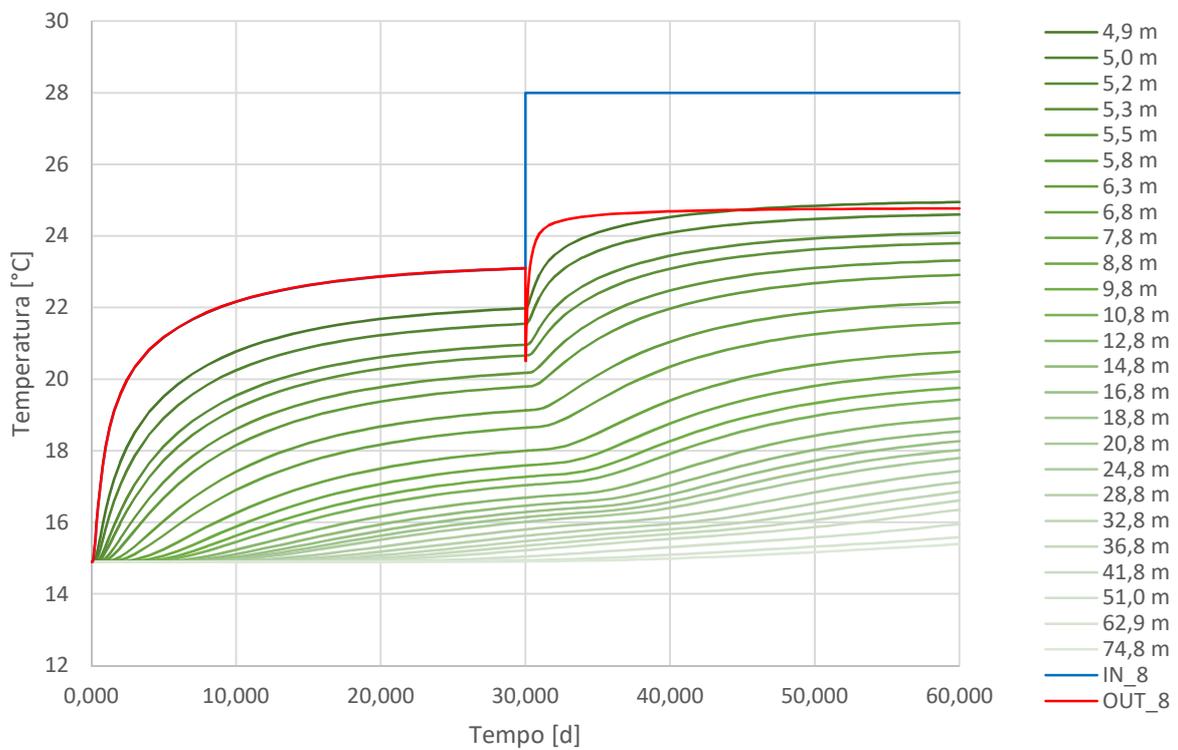


Figura 4.19. Andamento delle temperature registrato in corrispondenza dei punti di osservazione per il modello più favorevole nella configurazione 1, caso estivo

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

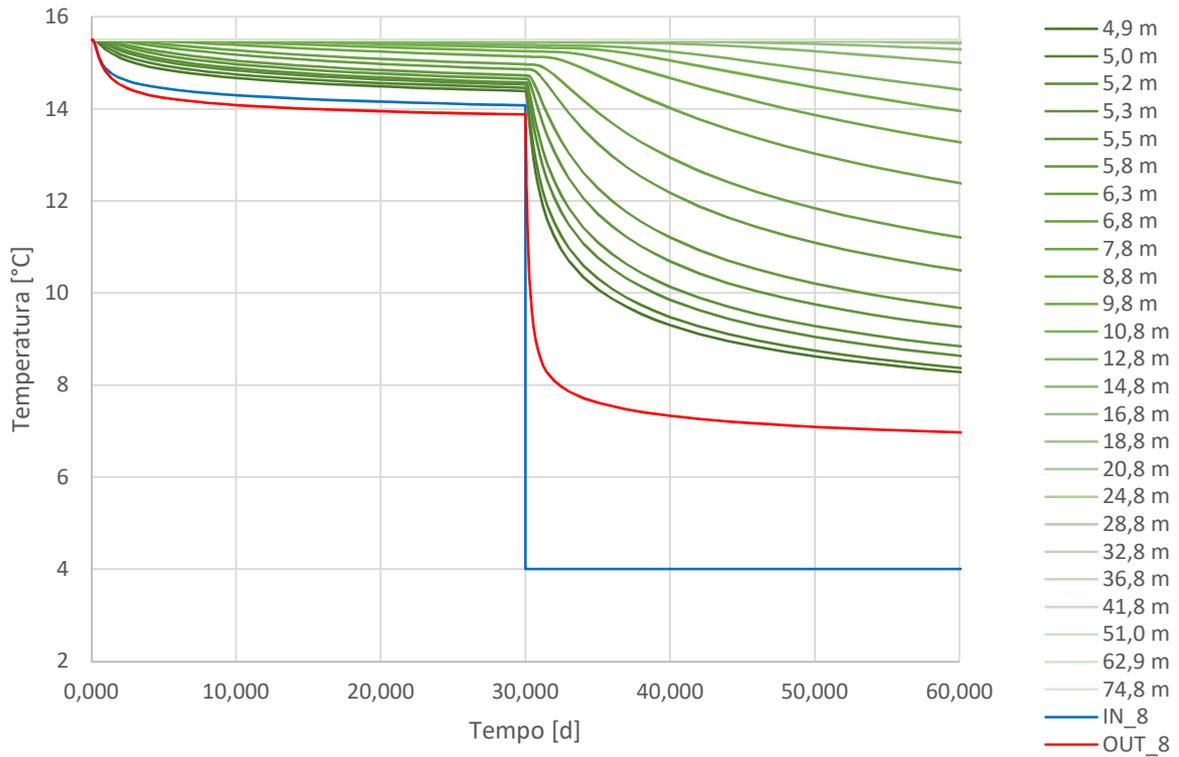


Figura 4.20. Andamento delle temperature registrato in corrispondenza dei punti di osservazione per il modello meno favorevole nella configurazione 1, caso invernale

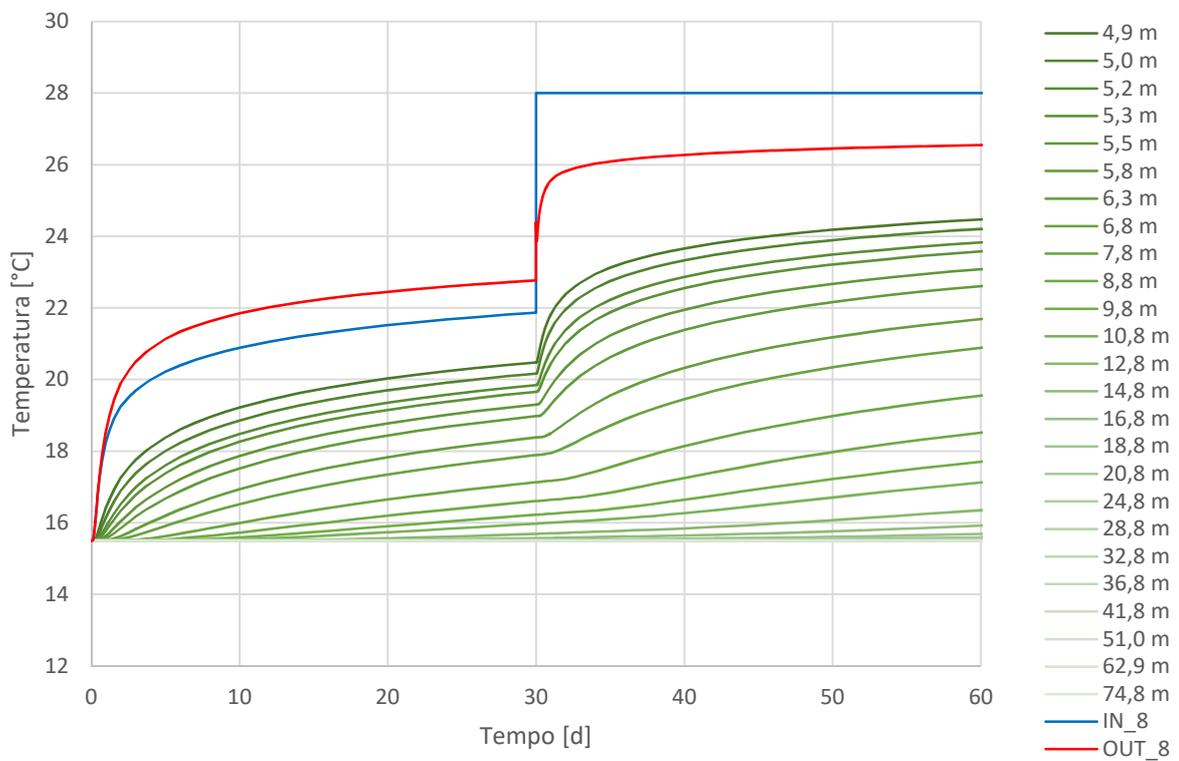


Figura 4.21. Andamento delle temperature registrato in corrispondenza dei punti di osservazione per il modello meno favorevole nella configurazione 1, caso estivo

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

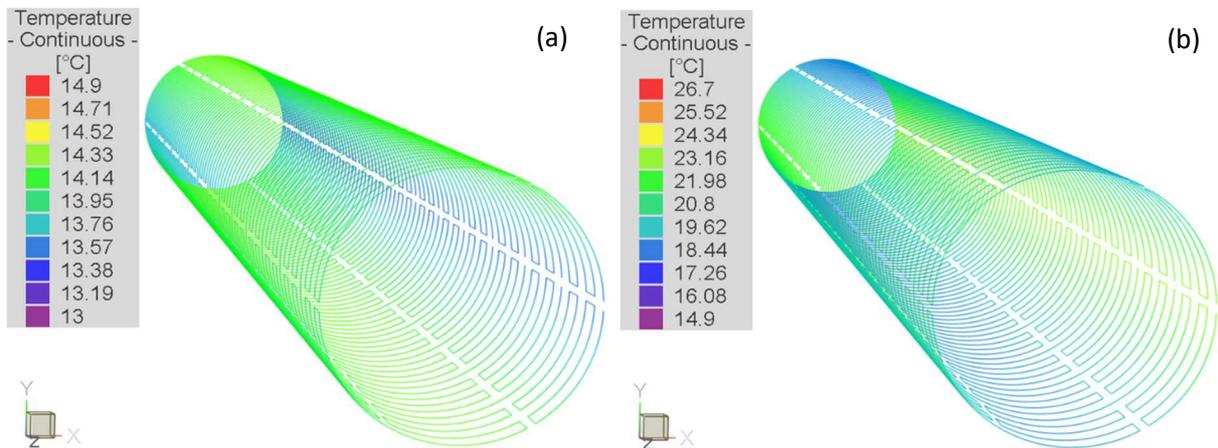


Figura 4.22. Temperature in corrispondenza delle serpentine al trentesimo giorno di simulazione nel modello più favorevole nel caso (a) invernale e (b) estivo

In particolare, al fine di analizzare l'efficienza dell'impianto geotermico, è utile conoscere la temperatura in uscita dalle serpentine. Nei grafici in Figura 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 sono confrontate le cinque configurazioni dell'impianto per ogni sezione analizzata, nel caso estivo ed invernale, dopo l'attivazione termica: T_{in} è la temperatura in ingresso nella serpentina, T_{out_i} è la temperatura in uscita dalla serpentina per la configurazione con i anelli connessi in serie. Si osserva che la temperatura in uscita si discosta maggiormente da quella in entrata all'aumentare degli anelli collegati in serie, in quanto il percorso effettuato dal fluido termovettore è più lungo, perciò l'energia scambiata con il terreno è maggiore.

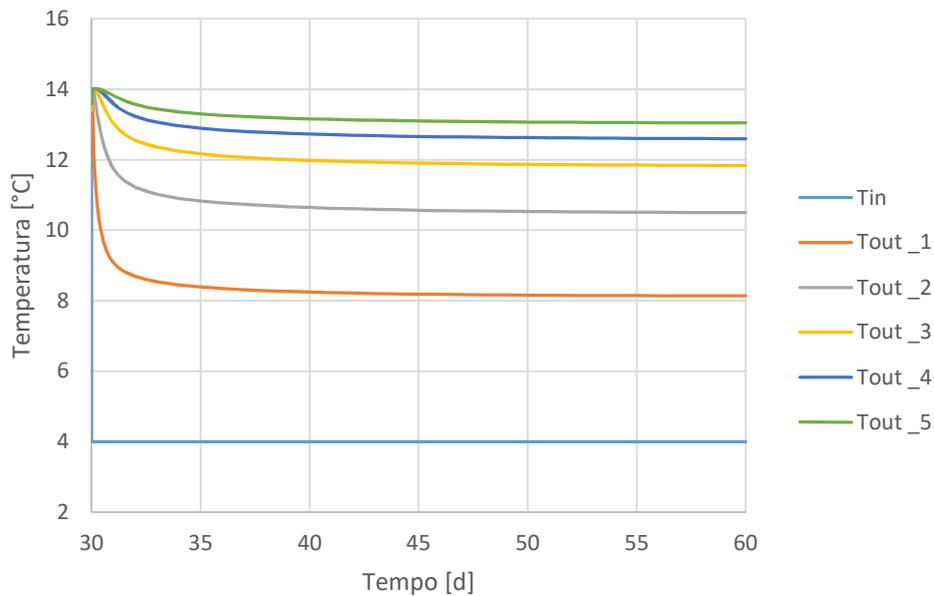


Figura 4.23. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello più favorevole dopo attivazione termica per 30 giorni, caso invernale

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

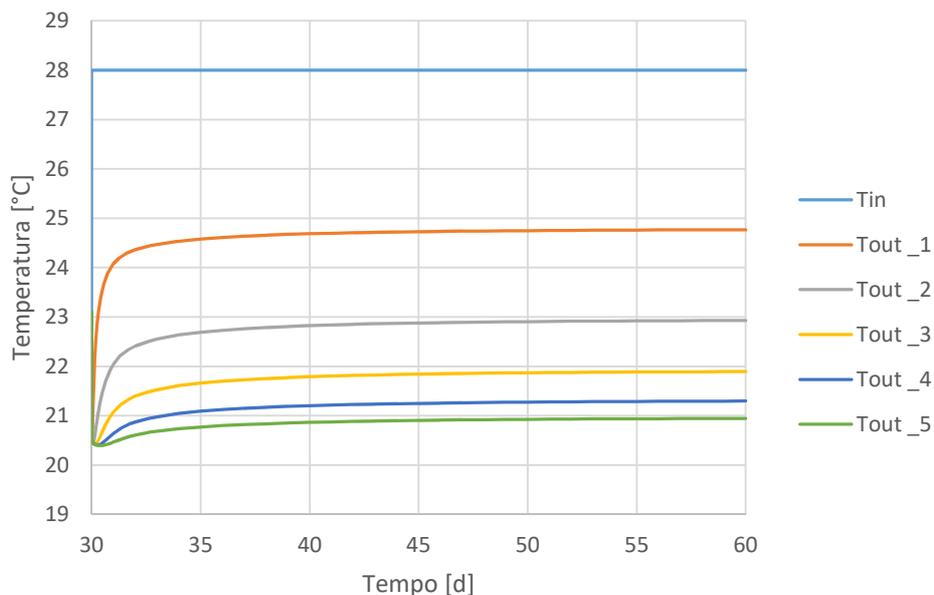


Figura 4.24. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello più favorevole dopo attivazione termica per 30 giorni, caso estivo

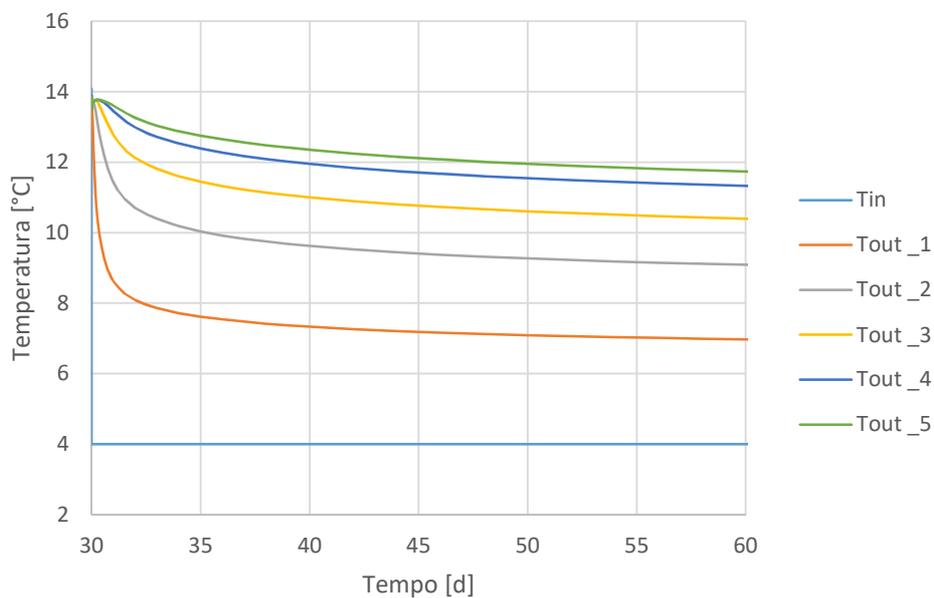


Figura 4.25. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello meno favorevole dopo attivazione termica per 30 giorni, caso invernale

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

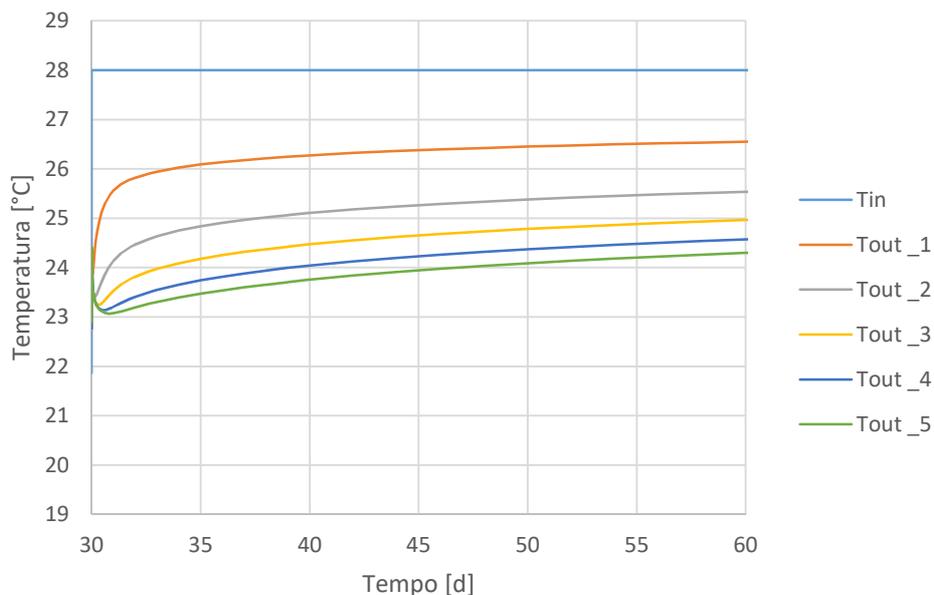


Figura 4.26. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello meno favorevole dopo attivazione termica per 30 giorni, caso estivo

In Tabella 4.5 sono riportate le temperature in uscita dalle serpentine al sessantesimo giorno di simulazione.

Tabella 4.5. Valori di T_{out} al sessantesimo giorno di simulazione per le diverse configurazioni studiate [°C]

Configurazione	Modello più favorevole		Modello meno favorevole	
	caso invernale	caso estivo	caso invernale	caso estivo
1	8,13	24,77	7,03	26,55
2	10,50	22,93	9,10	25,54
3	11,84	21,89	10,37	24,97
4	12,60	21,30	11,31	24,57
5	13,04	20,94	11,72	24,30

Tuttavia, dalle Figure 4.25 e 4.26 si osserva che nel caso di modello meno favorevole al sessantesimo giorno i valori delle temperature in uscita non si sono ancora stabilizzati, a differenza del modello più favorevole (Figure 4.23 e 4.24); ciò si verifica in quanto i processi di flusso idrico e termico all'interno del terreno sono molto più lenti a causa delle sue caratteristiche. Al fine di determinare con maggiore precisione la potenza termica scambiabile vengono effettuate delle analisi con tempo di simulazione di 210 giorni, divisi in 30 giorni di inizializzazione del modello e 180 giorni di attivazione termica dell'impianto, i cui risultati sono riportati nelle Figure 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30.

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

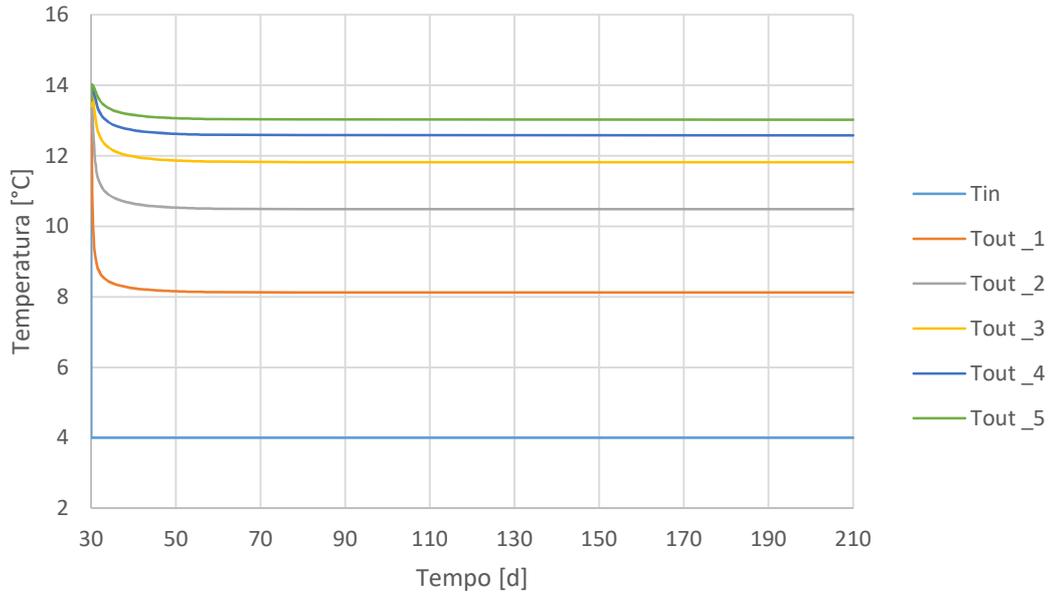


Figura 4.27. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello più favorevole dopo attivazione termica per 180 giorni, caso invernale

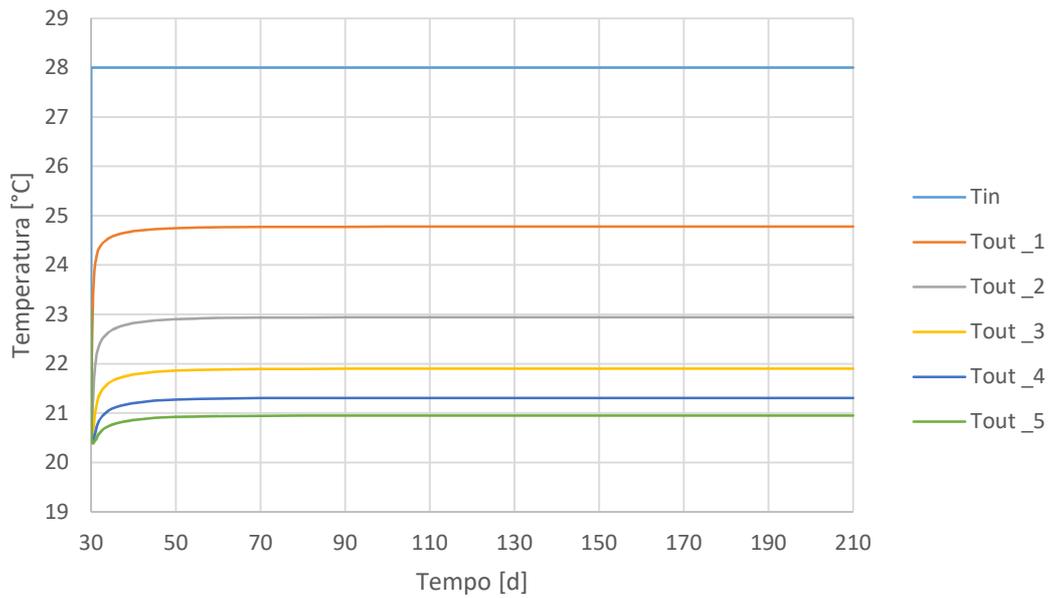


Figura 4.28. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello più favorevole dopo attivazione termica per 180 giorni, caso estivo

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

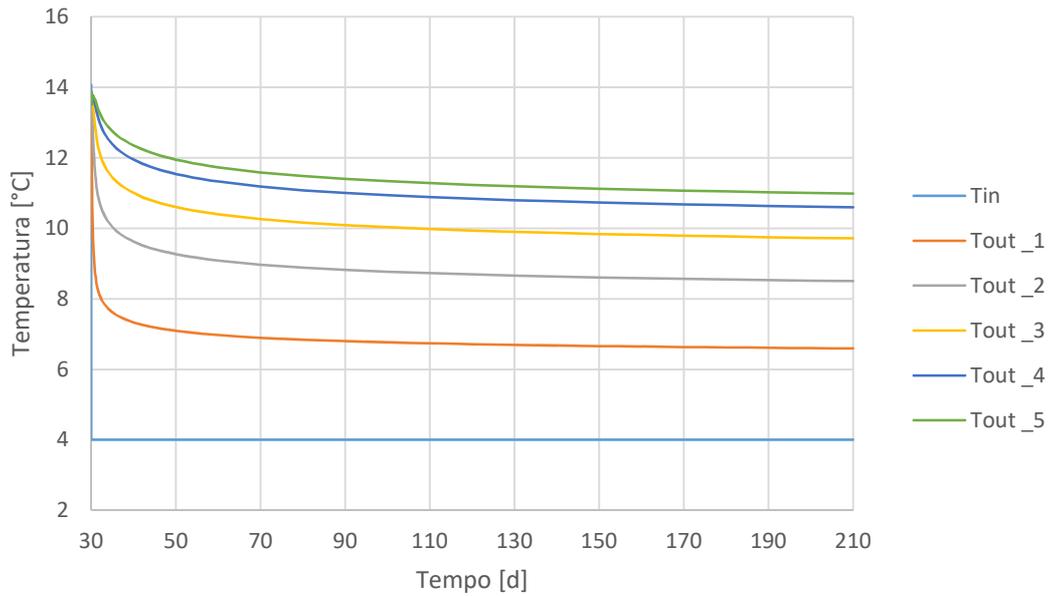


Figura 4.29. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello meno favorevole dopo attivazione termica per 180 giorni, caso invernale

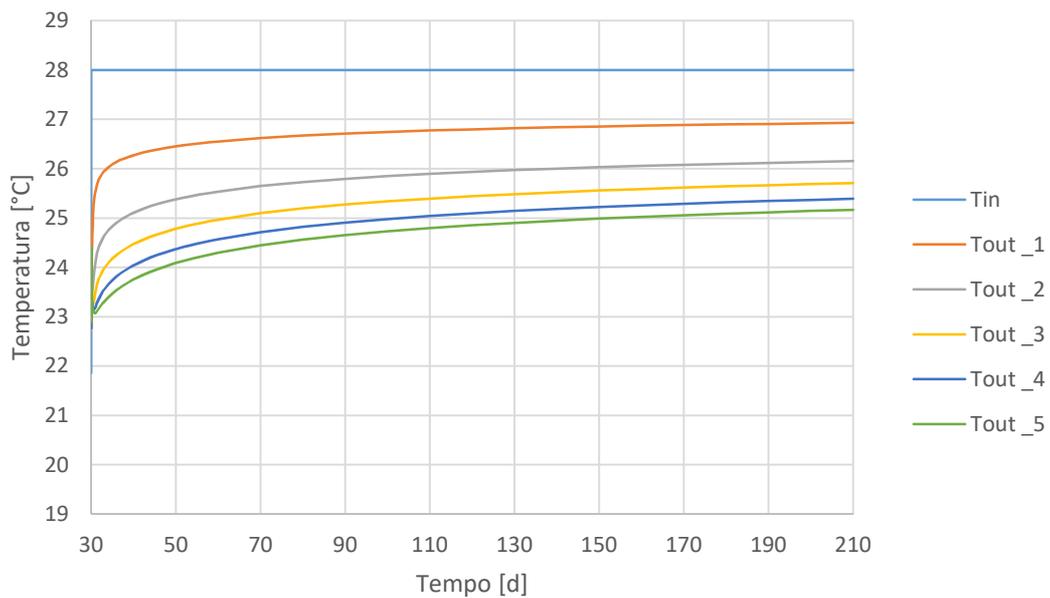


Figura 4.30. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni del modello meno favorevole dopo attivazione termica per 180 giorni, caso estivo

I valori delle temperature in uscita dalle serpentine dopo 180 giorni di attivazione termica, cioè al 210° giorno di simulazione, sono riassunti in Tabella 4.6 e Figura 4.31. Come anticipato, nel caso del modello più favorevole le temperature sono rimaste pressoché costanti rispetto a quelle in Tabella 4.5. Si può notare che le temperature in uscita si discostano maggiormente dalle temperature in entrata per il modello più favorevole e nel caso invernale.

Tabella 4.6. Valori di temperatura in uscita dalle serpentine per le diverse configurazioni studiate [°C]

Configurazione	Modello più favorevole		Modello meno favorevole	
	caso invernale	caso estivo	caso invernale	caso estivo
1	8,12	24,78	6,59	26,93
2	10,48	22,94	8,50	26,15
3	11,82	21,90	9,72	25,71
4	12,58	21,31	10,60	25,39
5	13,03	20,95	10,99	25,17

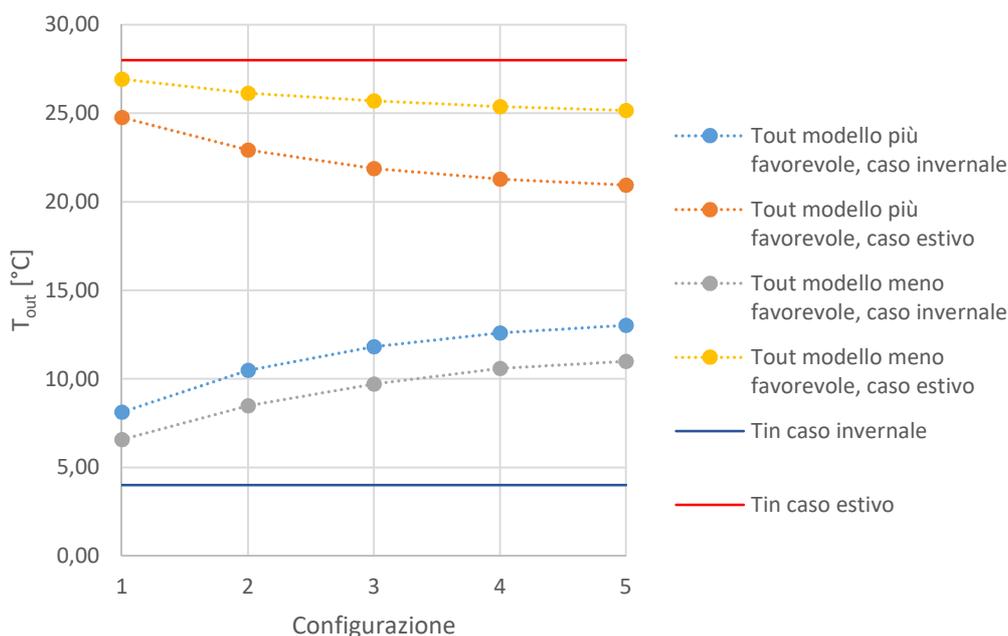


Figura 4.31. Valori di temperatura in uscita dalle serpentine per le diverse configurazioni studiate

4.4 Potenza termica scambiabile

L'energia scambiabile con il terreno è quantificabile a partire dalla differenza di temperatura tra ingresso e uscita del fluido scambiatore di calore:

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

$$\Delta T = |T_{out} - T_{in}|$$

Dove:

- Q è la potenza termica scambiabile [kW];
- \dot{m} è la portata massica del fluido termovettore [kg/s];
- c è il calore specifico del fluido termovettore [kJ/kg·K];

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

- T_{in} e T_{out} sono le temperature in ingresso ed in uscita dalle serpentine [°C].

La portata massica del fluido è ottenuta come prodotto tra la densità ρ_w , la velocità v del fluido stesso e l'area trasversale delle tubazioni A . Le proprietà termiche del fluido termovettore, costituito da acqua miscelata al 10% di glicole propilenico, dipendono dalla temperatura alla quale si trova, perciò i valori dei parametri necessari alla determinazione di Q (Tabella 4.7) sono diversi tra caso invernale e caso estivo.

Tabella 4.7. Valori dei parametri necessari al calcolo della potenza estraibile dal sistema geotermico

Parametro	Caso invernale ($T_{in} = 4$ °C)	Caso estivo ($T_{in} = 28$ °C)
ρ_w [kg/m ³]	1014,6	1006,56
v [m/s]	0,9	0,9
A [m ²]	0,00020106	0,00020106
m [kg/s]	0,18360	0,18214
c [kJ/kg K]	4,043	4,084

La temperatura in ingresso è fissata, attraverso le condizioni al contorno, pari a 4 °C in inverno e 28 °C in estate, quella in uscita è ottenuta come risultato della simulazione. Si noti che il calore scambiato con il terreno è tanto maggiore quanto la temperatura del fluido in uscita è maggiore nel caso invernale e minore nel caso estivo.

Al fine di confrontare le diverse configurazioni dell'impianto si utilizza il concetto di potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria q misurata in kW/m, considerando che la lunghezza della galleria $L_{galleria}$ è uguale alla lunghezza di un anello (1,5 m) moltiplicata per il numero di anelli termicamente collegati in serie:

$$q = \frac{Q}{L_{galleria}}$$

I risultati sono riportati nelle Tabelle 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 e riassunti nei grafici in Figura 4.32 e 4.33, dai quali è possibile notare che l'impianto più efficiente dal punto di vista termico è quello con un solo anello in serie (configurazione 1), in quanto il calore scambiato per unità di metro lineare di galleria è maggiore. Dai grafici si evince inoltre che il calore scambiabile nella situazione invernale è maggiore rispetto alla situazione estiva.

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

Tabella 4.8. Potenza termica scambiabile per il modello più favorevole nel caso invernale

Configurazione	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	ΔT [°C]	Q [kW]	L _{galleria} [m]	q [kW/m]
1	4	8,12	4,12	3,06	1,5	2,04
2	4	10,48	6,48	4,81	3	1,60
3	4	11,82	7,82	5,80	4,5	1,29
4	4	12,58	8,58	6,37	6	1,06
5	4	13,03	9,03	6,70	7,5	0,89

Tabella 4.9. Potenza termica scambiabile per il modello più favorevole nel caso estivo

Configurazione	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	ΔT [°C]	Q [kW]	L _{galleria} [m]	q [kW/m]
1	28	24,78	3,22	2,40	1,5	1,60
2	28	22,94	5,06	3,76	3	1,25
3	28	21,90	6,10	4,54	4,5	1,01
4	28	21,31	6,69	4,98	6	0,83
5	28	20,95	7,05	5,24	7,5	0,70

Tabella 4.10. Potenza termica scambiabile per il modello meno favorevole nel caso invernale

Configurazione	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	ΔT [°C]	Q [kW]	L _{galleria} [m]	q [kW/m]
1	4	6,59	2,59	1,93	1,5	1,28
2	4	8,50	4,50	3,34	3	1,11
3	4	9,72	5,72	4,24	4,5	0,94
4	4	10,60	6,60	4,90	6	0,82
5	4	10,99	6,99	5,19	7,5	0,69

Tabella 4.11. Potenza termica scambiabile per il modello meno favorevole nel caso estivo

Configurazione	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	ΔT [°C]	Q [kW]	L _{galleria} [m]	q [kW/m]
1	28	26,93	1,07	0,80	1,5	0,53
2	28	26,15	1,85	1,37	3	0,46
3	28	25,71	2,29	1,71	4,5	0,38
4	28	25,39	2,61	1,94	6	0,32
5	28	25,17	2,83	2,11	7,5	0,28

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

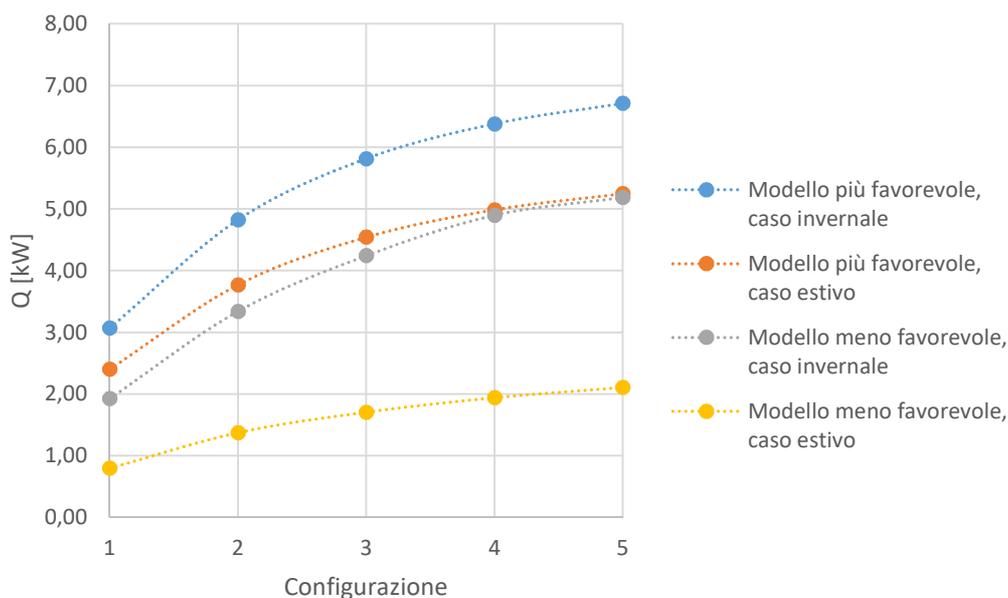


Figura 4.32. Potenza termica scambiabile nei diversi casi studiati

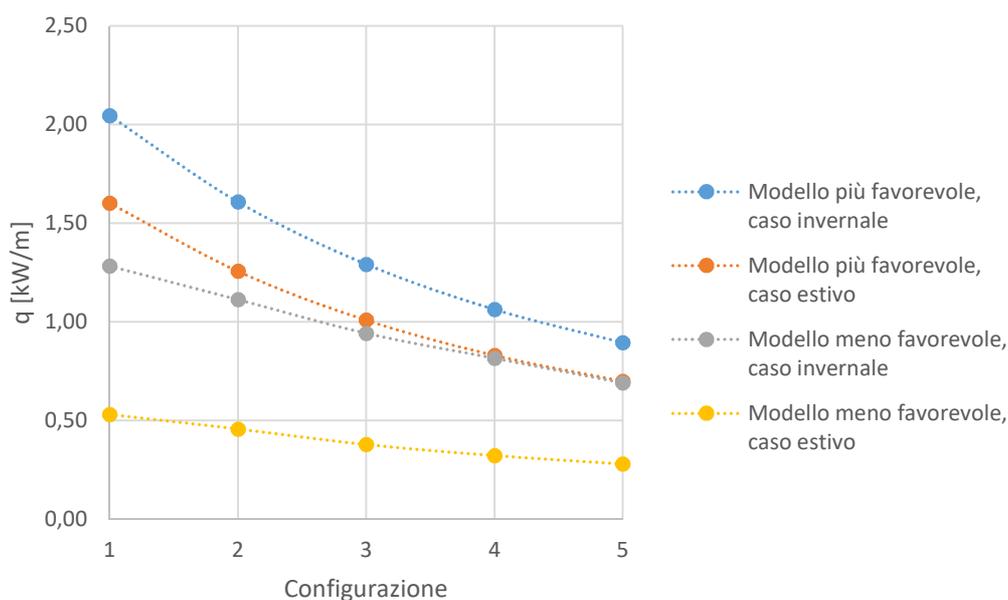


Figura 4.33. Potenza termica scambiabile al metro lineare di galleria nei diversi casi studiati

4.5 Stima dei costi dell'impianto

I costi dell'impianto sono strettamente legati al funzionamento idraulico del sistema. Nella stima del costo globale sono considerati i seguenti contributi:

- Costo di pompaggio;
- Costo degli elementi che costituiscono l'impianto idraulico.

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

Il costo degli elementi che costituiscono l'impianto idraulico è a sua volta dato dalla somma di tre contributi:

- costo delle tubazioni inserite all'interno dei conci di rivestimento e manodopera per la loro installazione;
- costo dei raccordi che collegano le serpentine all'interno dei conci al condotto principale (tubazioni di mandata e ritorno);
- costo di posa delle tubazioni principali di mandata e ritorno.

I costi considerati sono relativi unicamente all'impianto idraulico e non includono i costi di realizzazione dei conci e della galleria, in quanto questi non dipendono dalla scelta di attivare termicamente la struttura. Inoltre non sono inclusi i costi della pompa di circolazione e della pompa di calore.

E' stata effettuata un'analisi parametrica per determinare i costi dell'impianto al variare di:

- numero di anelli collegati in serie, compreso tra 1 e 5;
- lunghezza della galleria da attivare termicamente, compresa tra 90 e 990m;
- velocità del fluido termovettore all'interno delle tubazioni principali, compresa tra 0,25 e 3 m/s.

Tali costi sono stati stimati a partire dai valori di perdita di carico, potenza idraulica e portata entrante nel sistema, ottenuti da un'analisi idraulica effettuata mediante il software EPANET-MATLAB Toolkit (Candito, 2020).

Per ogni configurazione studiata è stato valutato un costo globale giornaliero, determinando il costo di pompaggio in funzione del numero di ore di funzionamento e distribuendo il costo di realizzazione degli elementi dell'impianto idraulico su 10 anni (vita utile di una pompa di calore) per il numero di giorni di attivazione annuale. Si considerano tre ipotesi di funzionamento del sistema geotermico:

- Funzionamento per 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno;
- Funzionamento per 24 ore al giorno e 180 giorni all'anno;
- Funzionamento per 12 ore al giorno e 180 giorni all'anno.

Fissati il numero di anelli collegati in serie e la lunghezza della galleria, si impone una velocità, detta ottimale, al fluido termovettore all'interno delle tubazioni principali in modo da determinare il minimo costo. I costi giornalieri idraulici globali, in funzione del numero di anelli collegati in serie e della lunghezza della galleria attivata termicamente ($L_{galleria}$), per le tre ipotesi di funzionamento sono riassunti nelle Tabelle 4.12, 4.13 e 4.14 (Candito, 2020).

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

Tabella 4.12. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 365 d all'anno (Candito, 2020)

	Numero di anelli collegati in serie [-]				
	1	2	3	4	5
$L_{galleria}$ [m]	Costo giornaliero idraulico [€/d]				
90	55,7	47,4	44,5	43,0	42,1
180	115,2	95,5	89,5	86,3	84,5
270	181,7	145,9	135,3	130,4	127,4
360	256,0	197,4	182,1	175,1	170,9
450	340,9	251,9	230,9	220,4	214,8
540	437,9	309,1	279,7	267,8	259,3
630	550,7	367,8	329,9	314,5	305,7
720	680,2	429,7	382,6	362,0	351,6
810	826,2	495,2	436,5	410,4	397,6
900	993,6	562,9	490,4	460,8	444,3
990	1184,7	634,0	545,9	511,7	491,6

Tabella 4.13. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 180 d all'anno (Candito, 2020)

	Numero di anelli collegati in serie [-]				
	1	2	3	4	5
$L_{galleria}$ [m]	Costo giornaliero idraulico [€/d]				
90	99,7	83,5	77,8	74,8	73,2
180	204,0	167,9	156,2	150,3	146,5
270	315,0	254,4	236,2	226,8	220,9
360	438,0	345,4	317,4	304,4	296,7
450	570,7	437,1	400,1	383,2	372,7
540	718,2	532,2	486,8	462,4	450,0
630	879,2	632,6	572,4	543,5	527,3
720	1059,1	736,0	659,8	628,2	605,9
810	1261,9	841,1	749,3	710,9	686,0
900	1484,4	950,7	842,7	794,7	769,5
990	1727,8	1065,4	937,8	879,8	850,5

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

Tabella 4.14. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 12 h al giorno e 180 d all'anno (Candito, 2020)

$L_{galleria}$ [m]	Numero di anelli collegati in serie [-]				
	1	2	3	4	5
90	92,9	77,0	71,4	68,8	67,1
180	187,6	154,8	143,5	137,6	133,9
270	288,4	234,2	216,8	207,5	202,2
360	394,4	315,1	291,0	278,7	270,7
450	508,8	399,8	366,2	350,4	340,7
540	628,8	485,0	442,5	423,2	410,8
630	758,7	572,0	521,8	496,0	481,9
720	897,3	662,2	601,9	570,0	553,1
810	1045,8	755,5	681,6	645,4	624,8
900	1206,9	851,7	762,6	723,8	697,4
990	1384,9	948,1	845,1	801,1	771,1

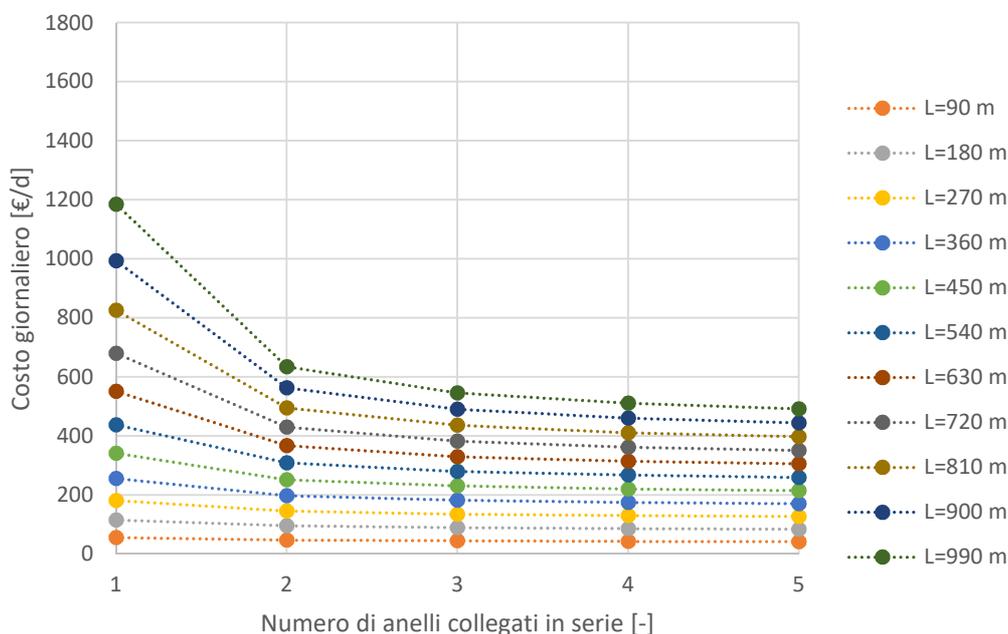


Figura 4.34. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 365 d all'anno

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

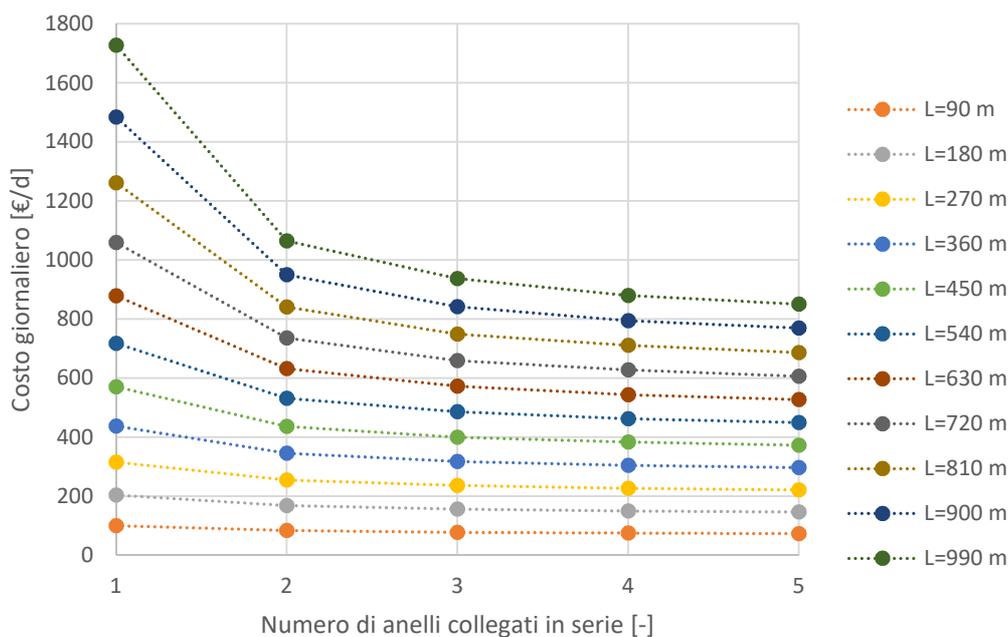


Figura 4.35. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 180 d all'anno

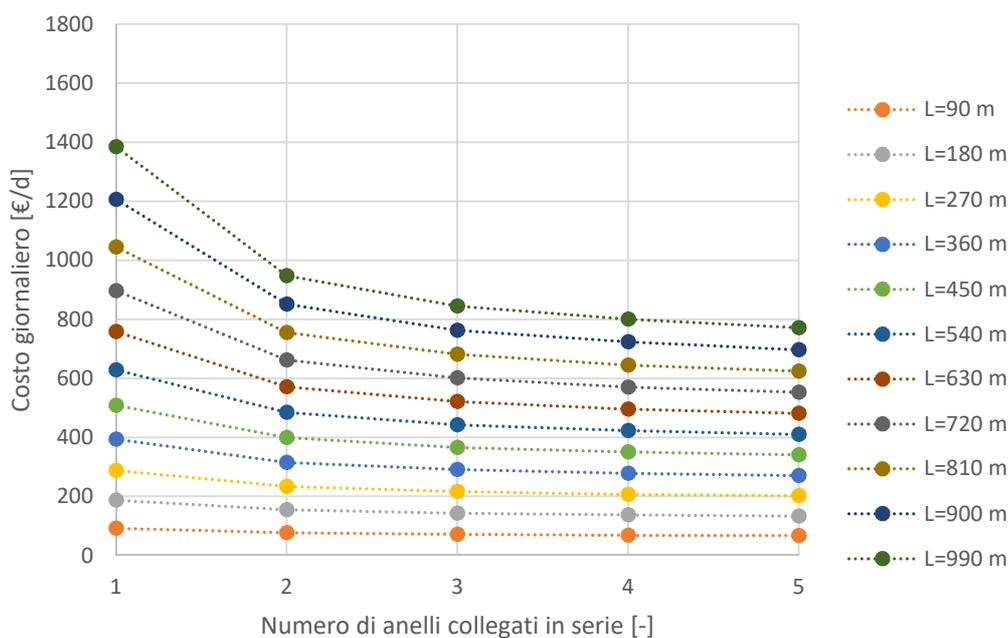


Figura 4.36. Costi giornalieri idraulici globali nel caso di funzionamento per 12 h al giorno e 180 d all'anno

Come si osserva dai grafici in Figura 4.34, 4.35 e 4.36, il costo giornaliero idraulico cresce al diminuire del numero di anelli collegati in serie e all'aumentare della lunghezza della galleria attivata termicamente. In particolare, la variazione del costo in funzione del numero di anelli in serie è più accentuata per grandi lunghezze della galleria ed è maggiore soprattutto per la configurazione che prevede tutti gli anelli collegati in parallelo. I costi sono maggiori nel caso di funzionamento per 24 ore

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

al giorno e 180 giorni all'anno e sono minori nel caso di funzionamento per 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno, infatti:

- ripartendo il costo di realizzazione degli elementi dell'impianto idraulico su 10 anni considerando 180 giorni di attivazione per ogni anno porta a raddoppiare il costo giornaliero di tale contributo rispetto al funzionamento continuo dell'impianto, per il quale si considerano 365 giorni di attivazione per 10 anni;
- l'attivazione dell'impianto per 24 ore al giorno comporta un costo di pompaggio giornaliero doppio rispetto all'attivazione per 12 ore.

E' utile confrontare i costi al metro lineare di galleria: nelle Figure 4.37, 4.38 e 4.39 si osserva che la lunghezza della galleria ha una bassa influenza sul costo al metro per le configurazioni con un maggior numero di anelli in serie, mentre diventa rilevante nel caso di anelli in parallelo.

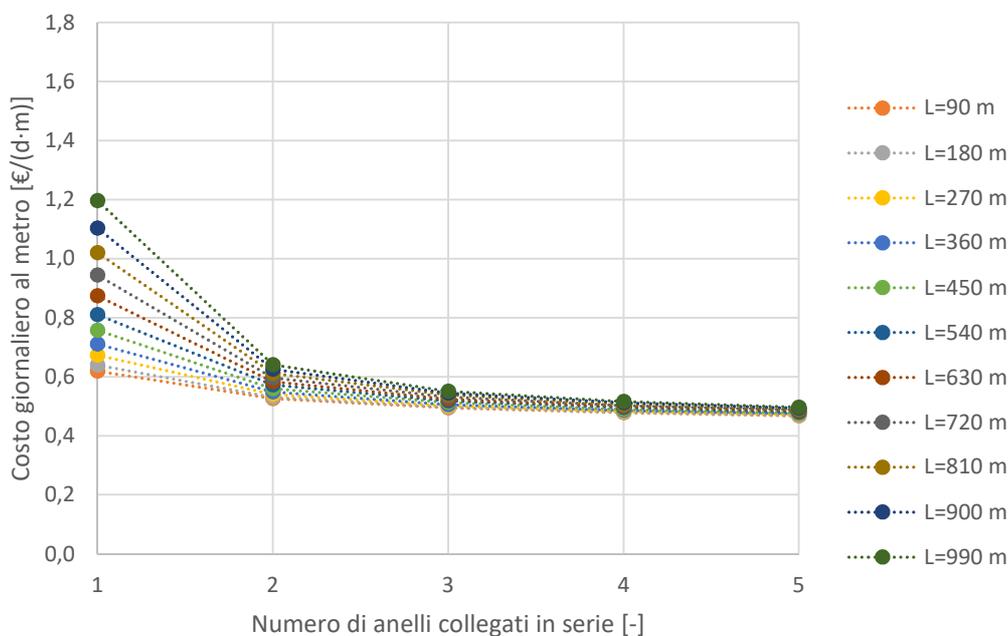


Figura 4.37. Costi giornalieri idraulici globali al metro lineare di galleria nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 365 d all'anno

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

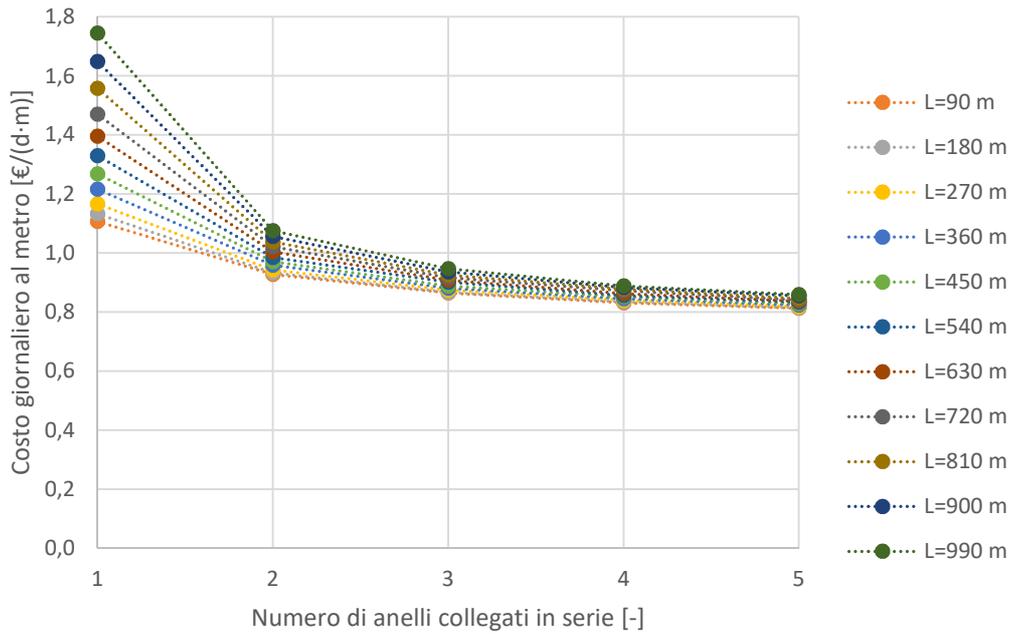


Figura 4.38. Costi giornalieri idraulici globali al metro lineare di galleria nel caso di funzionamento per 24 h al giorno e 180 d all'anno

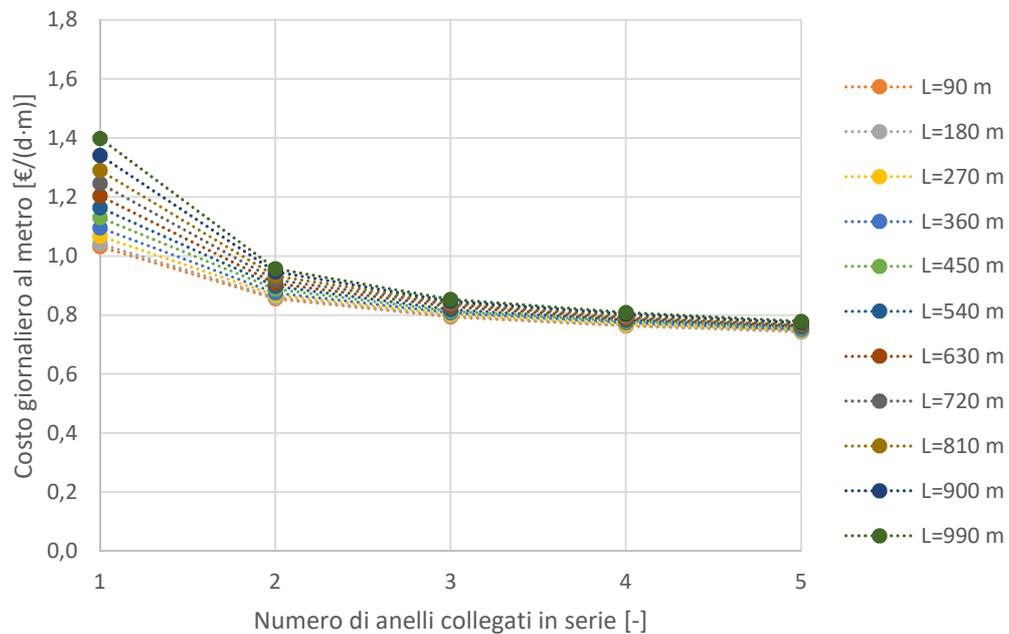


Figura 4.39. Costi giornalieri idraulici globali al metro lineare di galleria nel caso di funzionamento per 12 h al giorno e 180 d all'anno

In conclusione, per tutte le tre ipotesi di funzionamento dell'impianto, la configurazione migliore da un punto di vista dei costi globali è quella caratterizzata da 5 anelli collegati in serie, in quanto risulta essere la più economica. Tale risultato risulta opposto rispetto a quello ottenuto studiando la potenza termica scambiabile, per il quale la configurazione migliore è quella caratterizzata da tutti gli anelli

connessi al condotto principale in parallelo. Di conseguenza occorre valutare la configurazione ottimale attraverso un'analisi costi-benefici.

4.6 Analisi costi-benefici

Al fine di confrontare costi e ricavi per determinare la configurazione ottimale dell'impianto, è necessario quantificare i ricavi termici in termini economici. Pertanto la potenza termica estraibile al metro lineare di galleria (q , misurata in kW/m) è moltiplicata per il costo unitario dell'energia termica (costo di un kilowattora termico, $C_{kWh,E}$, misurato in €/kWh) e per il numero di ore di attivazione giornaliera (t , misurato in ore), in modo da determinare i ricavi termici giornalieri al metro:

$$Ricavi = q \cdot C_{kWh,E} \cdot t \quad [€/(\text{d} \cdot \text{m})]$$

La potenza termica scambiabile considerata ai fini dell'analisi costi-benefici è quella relativa al funzionamento invernale. Il costo di 1 kWh termico destinato ad utenza domestica è considerato pari a 0,083 €, sulla base dei prezzi del teleriscaldamento di Torino individuati da IREN (Ferina, 2019).

I ricavi termici, riportati in Tabella 4.15, sono calcolati per un funzionamento di 24 ore e di 12 ore, per poter effettuare le analisi costi-benefici nelle tre ipotesi considerate per la determinazione dei costi dell'impianto:

- Funzionamento per 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno;
- Funzionamento per 24 ore al giorno e 180 giorni all'anno;
- Funzionamento per 12 ore al giorno e 180 giorni all'anno.

Inoltre, per ogni ipotesi di funzionamento sono considerate due situazioni, che dipendono dalle condizioni termo-idrauliche della sezione scelta per la determinazione della potenza termica estraibile:

- Modello più favorevole;
- Modello meno favorevole.

Tabella 4.15. Ricavi termici giornalieri al metro lineare di galleria

Numero anelli collegati in serie [-]	Modello più favorevole			Modello meno favorevole		
	q [kW/m]	Ricavi per 24 h [€/m]	Ricavi per 12 h [€/m]	q [kW/m]	Ricavi per 24 h [€/m]	Ricavi per 12 h [€/m]
1	2,04	4,06	2,03	1,28	2,56	1,28
2	1,60	3,20	1,60	1,11	2,22	1,11
3	1,29	2,57	1,28	0,94	1,88	0,94
4	1,06	2,11	1,06	0,82	1,63	0,81
5	0,89	1,78	0,89	0,69	1,38	0,69

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

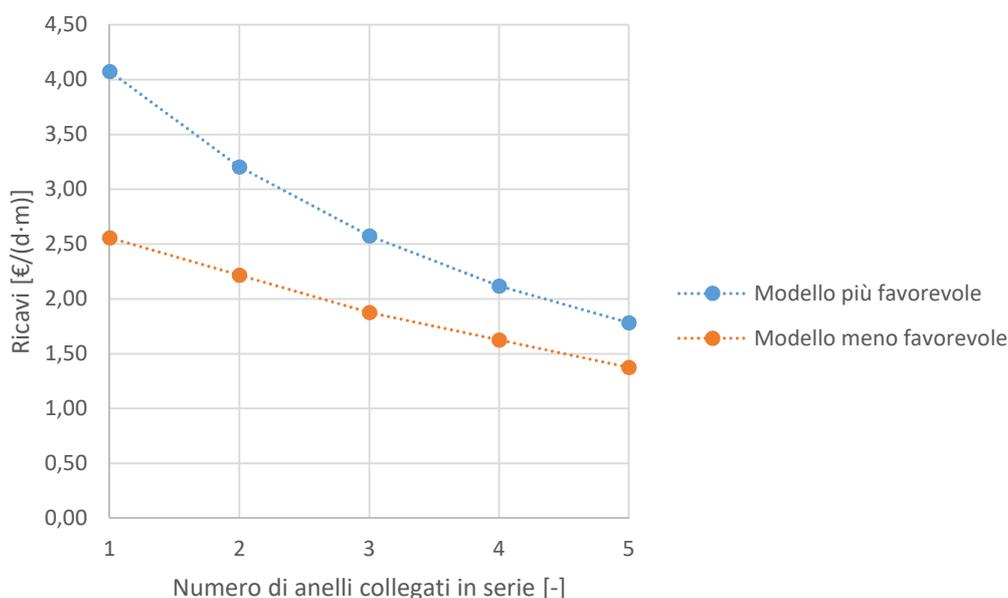


Figura 4.40. Ricavi termici al metro lineare di galleria per le due sezioni studiate, per un funzionamento giornaliero di 24 h

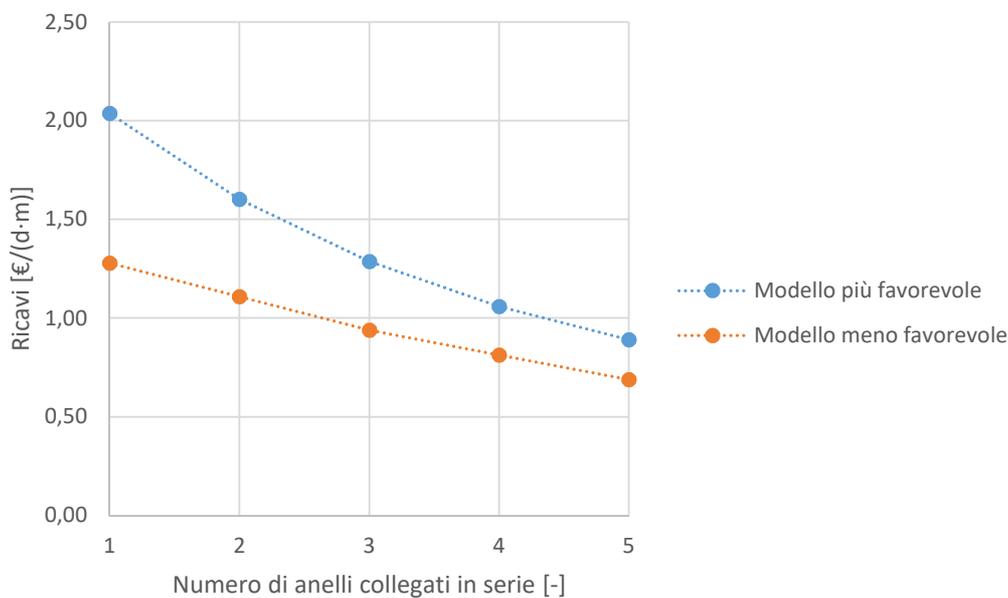


Figura 4.41. Ricavi termici al metro lineare di galleria per le due sezioni studiate, per un funzionamento giornaliero di 12 h

Come si osserva in Tabella 4.15 e nelle Figure 4.40 e 4.41, i ricavi seguono lo stesso andamento della potenza termica estraibile, perciò la configurazione migliore dal punto di vista termico è quella che presenta tutti gli anelli collegati in parallelo. Inoltre nel caso di funzionamento giornaliero di 12 ore si ha un ricavo dimezzato rispetto al caso di funzionamento continuo giornaliero.

E' bene sottolineare che i risultati sono conservativi, in quanto la potenza termica estraibile è ottenuta ipotizzando le condizioni più sfavorevoli, in termini di temperatura all'interno della galleria e del fluido termovettore in ingresso, costanti per tutto il tempo della simulazione. Inoltre anche moltiplicare per 12 ore la potenza termica estraibile, ottenuta dall'analisi numerica ipotizzando un funzionamento continuo dell'impianto, è conservativo, in quanto un funzionamento giornaliero di 12 ore comporta una temperatura in uscita dalle serpentine maggiore, poiché il terreno è meno sfruttato termicamente. Per questo motivo viene considerata anche l'ipotesi di funzionamento per 12 ore al giorno, oltre che per 24 ore al giorno, ma bisogna considerare che i ricavi sono sottostimati.

L'analisi costi-benefici è effettuata confrontando i costi dell'impianto determinati nel paragrafo 4.5 (Figure 4.37, 4.38 e 4.39) e i ricavi termici (Figure 4.40 e 4.41): si effettua il rapporto tra le due grandezze per ogni caso analizzato al fine di determinare la configurazione ottimale.

4.6.1 Modello più favorevole

Nelle Figure 4.42, 4.43 e 4.44 vengono riportati i valori del rapporto tra ricavi e costi per il modello più favorevole, in funzione del numero di anelli collegati in serie e della lunghezza della galleria attivata termicamente, nelle tre ipotesi di funzionamento effettuate: 365 giorni per 24 ore, 180 giorni per 24 ore e 180 giorni per 12 ore.

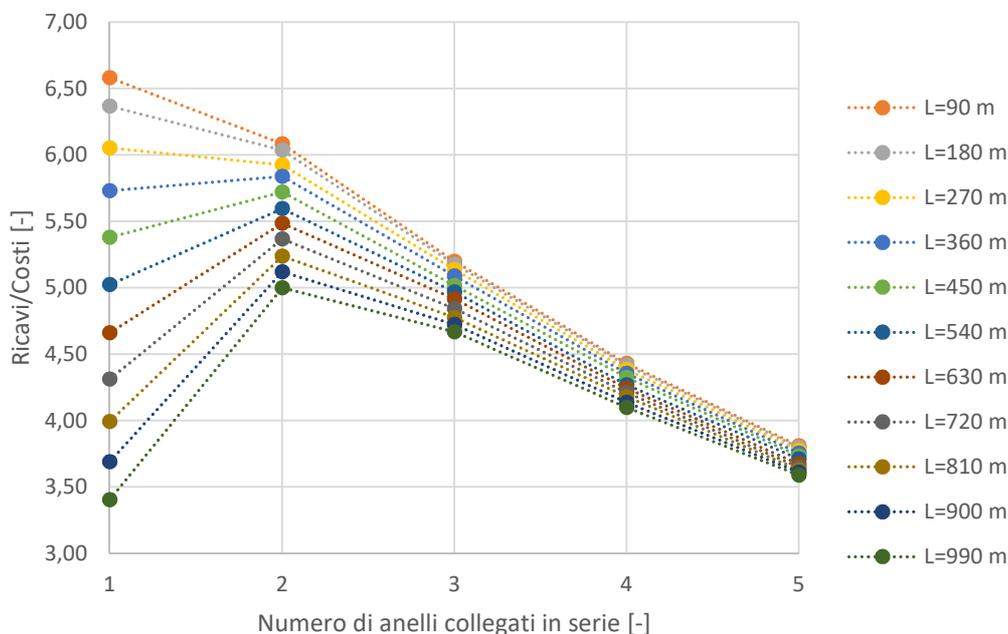


Figura 4.42. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno, modello più favorevole

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

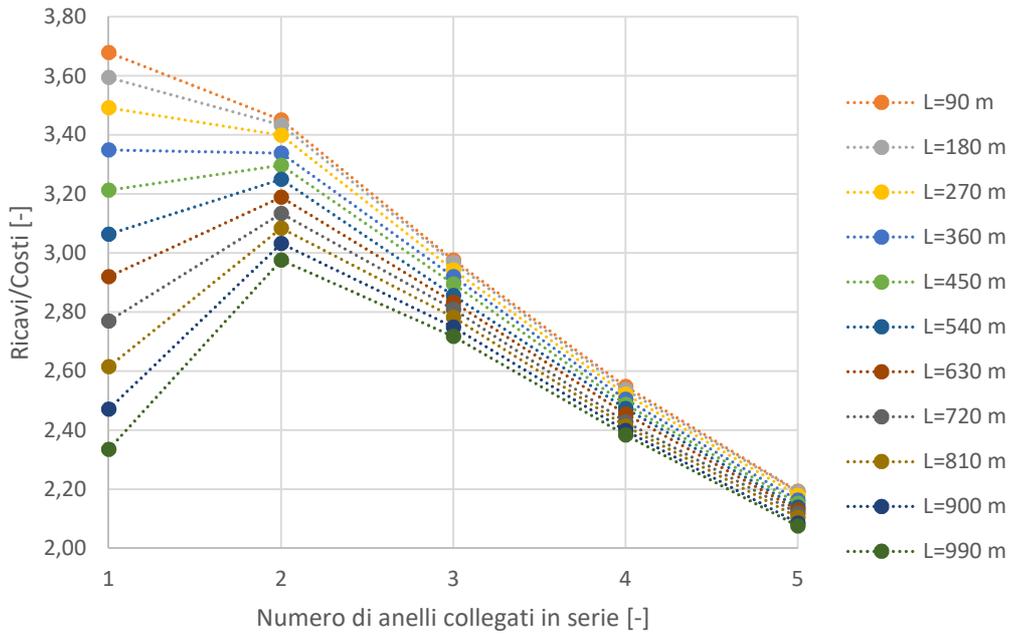


Figura 4.43. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello più favorevole

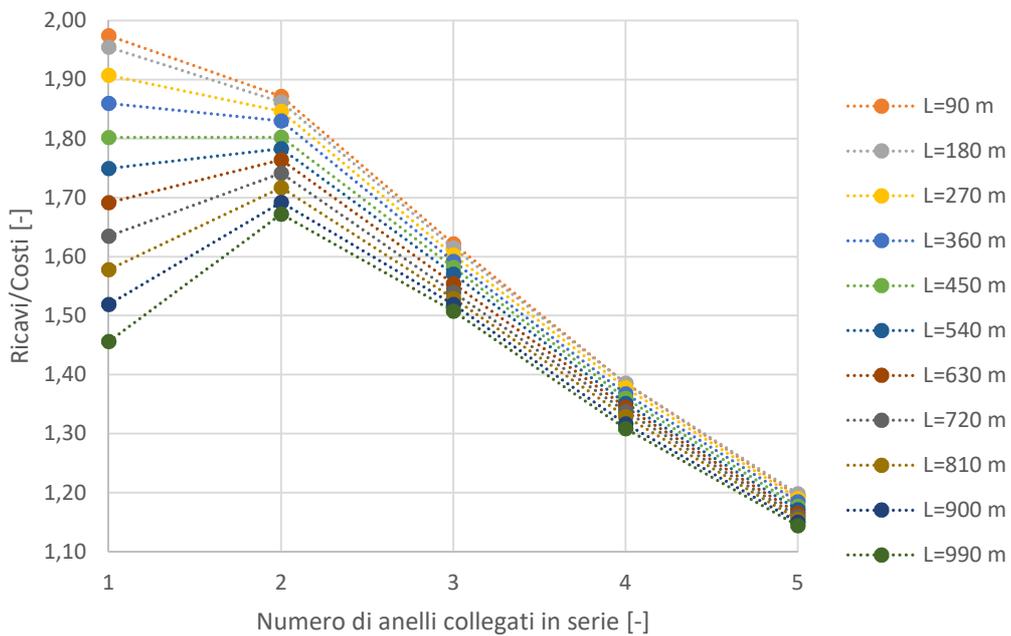


Figura 4.44. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 12 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello più favorevole

Come si osserva dai grafici, la configurazione ottimale dell'impianto dipende dalla lunghezza della galleria da attivare termicamente: fino ad una lunghezza di 300-400 m risulta più conveniente realizzare un impianto geotermico in cui tutti gli anelli sono collegati in parallelo, per lunghezze superiori è conveniente collegare in serie i circuiti degli anelli a due a due. Si ottiene questo risultato

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

in quanto i costi idraulici sono meno variabili rispetto alla potenza termica estraibile al variare della configurazione, ad eccezione della configurazione con gli anelli collegati in parallelo, e sono minori per brevi lunghezze di galleria, pertanto l'andamento della potenza termica estraibile ha una maggiore influenza. Di conseguenza, la configurazione meno conveniente è quella con 5 anelli collegati in serie, nonostante sia quella che comporta il costo minore, in quanto l'energia termica estraibile è circa la metà rispetto a quella estraibile con tutti gli anelli separati termicamente. All'aumentare della lunghezza della galleria i costi dell'impianto aumentano in modo più accentuato per la configurazione con gli anelli collegati in parallelo, perciò al di sopra di una certa lunghezza il picco del rapporto tra ricavi e costi si ha per la configurazione con due anelli collegati in serie.

La massima energia termica estraibile si ha nel caso di funzionamento continuo dell'impianto (24 ore al giorno e 365 giorni all'anno): per una lunghezza della galleria di 90 m e la configurazione con gli anelli collegati in parallelo l'energia termica scambiabile in un giorno è pari a 4419 kWh ad un costo di 55,7€ (corrispondente ad un rapporto tra ricavi e costi di circa 6,6). L'utilizzo dell'impianto per tutto l'anno in condizioni invernali è irrealistico, perciò risulta più verosimile considerare il funzionamento per 180 giorni all'anno (stagione invernale): nel caso di utilizzo continuo giornaliero la massima energia termica estraibile in un giorno su una lunghezza della galleria di 90 m, per la configurazione con gli anelli collegati in parallelo, è pari a 4419 kWh ad un costo di 99,7 € (ricavi/costi = 3,7). Infine, nell'ipotesi che l'impianto sia attivo per 12 ore al giorno per 180 giorni, la massima energia termica estraibile in un giorno su una lunghezza della galleria di 90 m, per la configurazione con gli anelli collegati in parallelo, è pari a 2209 kWh ad un costo di 92,9 € (ricavi/costi = 2,0).

Si può affermare che per la sezione del caso studio che presenta le condizioni più favorevoli per lo scambio termico l'attivazione termica della galleria è conveniente per tutte le configurazioni analizzate, in quanto i ricavi sono maggiori dei costi.

4.6.2 Modello meno favorevole

Nelle Figure 4.45, 4.46 e 4.47 vengono riportati nelle seguenti figure i valori del rapporto tra ricavi e costi per il modello meno favorevole, in funzione del numero di anelli collegati in serie e della lunghezza della galleria attivata termicamente, nelle tre ipotesi di funzionamento effettuate: 365 giorni per 24 ore, 180 giorni per 24 ore e 180 giorni per 12 ore.

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

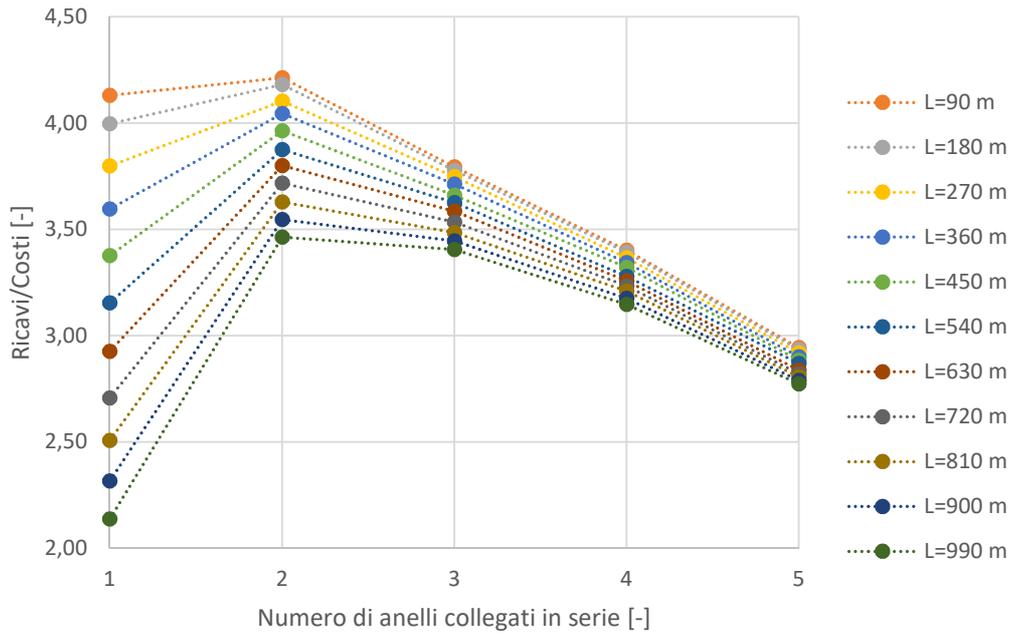


Figura 4.45. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno, modello meno favorevole

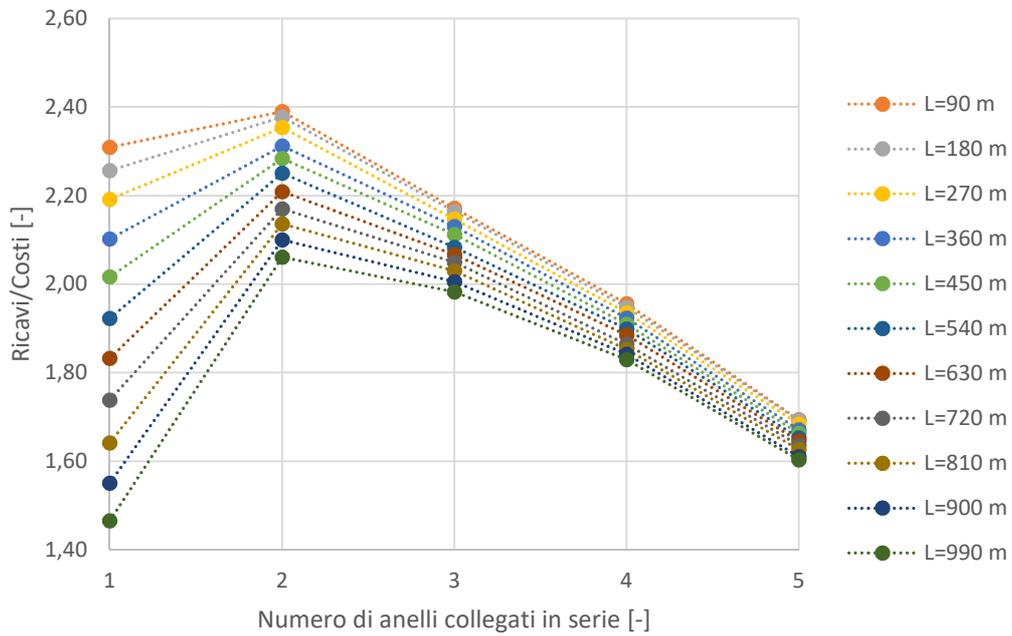


Figura 4.46. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello meno favorevole

4. Ottimizzazione termo-idraulica di una galleria energetica

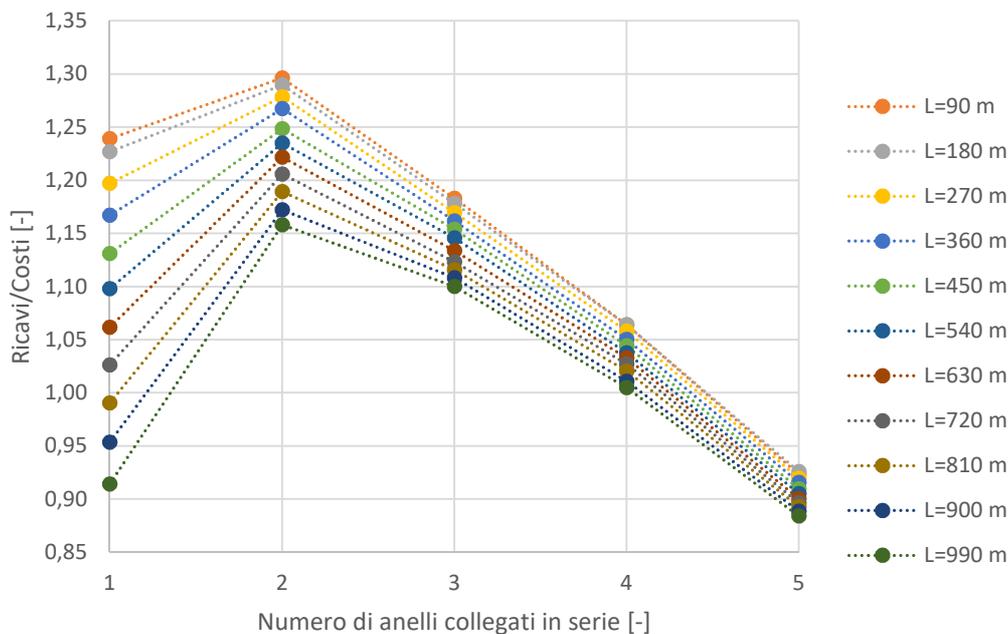


Figura 4.47. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 12 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello meno favorevole

Per il modello meno favorevole i ricavi, legati alla potenza termica estraibile, sono minori, mentre i costi restano i medesimi del caso precedente. Di conseguenza, l'efficienza dell'impianto, espressa in termini di rapporto tra ricavi e costi, è inferiore rispetto alla sezione più favorevole per tutte le configurazioni analizzate.

Dai grafici si osserva che la configurazione ottimale è quella con due anelli in serie per ogni ipotesi di funzionamento dell'impianto e per tutte le lunghezze della galleria prese in considerazione. Come per il modello più favorevole, l'ipotesi di funzionamento più conveniente risulta essere l'attivazione continua dell'impianto per tutto l'anno e per 24 ore al giorno: in un giorno la massima energia termica estraibile su una lunghezza della galleria di 90 m, nel caso di due anelli collegati in serie, è pari a 2406 kWh ad un costo di 47,4 € (ricavi/costi = 4,2). Tuttavia risulta più verosimile considerare un funzionamento di 180 giorni all'anno, considerando la sola stagione invernale: nel caso di attivazione dell'impianto di 24 ore al giorno la massima energia termica estraibile su una lunghezza della galleria di 90 m è pari a 2406 kWh ad un costo di 83,5 € (ricavi/costi = 2,4), nel caso di attivazione dell'impianto di 12 ore al giorno la massima energia termica estraibile su una lunghezza della galleria di 90 m è pari a 1203 kWh ad un costo di 77,0 € (ricavi/costi = 1,3), in entrambi i casi per la configurazione con due anelli collegati in serie.

Si nota che nel caso di condizioni geologiche meno favorevoli allo scambio termico non sempre è conveniente la soluzione di galleria attivata termicamente: ad esempio in Figura 4.47 si osserva che con un funzionamento di 180 giorni e 12 ore i ricavi sono inferiori ai costi se si utilizza la configurazione

con 5 anelli collegati in serie oppure per lunghezze elevate dei tratti di galleria da attivare termicamente. Tuttavia, scegliendo una configurazione dell'impianto adatta, ossia ottimizzando la galleria energetica, è possibile anche in questo caso ottenere dei ricavi maggiori rispetto ai costi.

4.6.3 Considerazioni

L'analisi delle due sezioni del caso studio, scelte in quanto presentano le condizioni più e meno favorevoli allo scambio termico con il fluido termovettore presente all'interno dei conci di galleria, mostra come è fondamentale studiare di volta in volta la fattibilità economica dell'impianto, per valutarne la convenienza rispetto ai metodi convenzionali di riscaldamento.

Occorre valutare i risultati ottenuti tenendo conto che sono sottostimati, in quanto, come visto, le ipotesi utilizzate alla base delle analisi costi-benefici sono conservative. Inoltre nelle analisi condotte il calore estraibile ed i costi dell'impianto sono valutati a monte della pompa di calore, perciò non è necessario considerare il coefficiente di prestazione (COP) della stessa; anche questa ipotesi è conservativa, in quanto, pur dovendo aggiungere i costi dovuti al consumo di energia elettrica per il funzionamento della pompa di calore, i ricavi termici sono sottostimati.

Nella scelta della migliore configurazione si deve tenere in conto della lunghezza del tratto di galleria attivato termicamente, la quale dipende dal progetto, ed in particolare dalla posizione dei condotti di aerazione e/o delle stazioni intermedie della metropolitana. Per quanto riguarda la tratta d'interesse, dal progetto di fattibilità tecnico-economica la distanza tra le stazioni Verona e Novara risulta essere 658 m. Più in generale, per la Linea 2 della Metropolitana di Torino, la distanza tra le stazioni nella tratta centrale varia tra un minimo di 227 m ad un massimo di 928 m e tra di esse sono realizzati dei condotti di aerazione. Data la situazione di progetto, si considera come configurazione ottimale quella in cui gli anelli sono collegati termicamente in serie a due a due.

5 STUDIO DEL COMPORTAMENTO STAGIONALE

Nel presente capitolo è studiato il comportamento stagionale del sistema geotermico, considerando un funzionamento pluriennale, al fine di valutare la variabilità dell'efficienza termica dell'impianto e gli effetti sulla temperatura del terreno. Il caso studio è lo stesso descritto nel capitolo 4: sono analizzate le condizioni più favorevole e meno favorevole nel tratto compreso tra le stazioni Verona e Novara della ML2, considerando la configurazione dell'impianto caratterizzata da anelli collegati termicamente in serie a due a due, in quanto questa è risultata ottimale dall'analisi costi-benefici.

Sono prese in considerazione tre ipotesi di funzionamento dell'impianto geotermico:

- Funzionamento solo invernale, con attivazione per 6 mesi, dal 15 ottobre al 15 aprile;
- Funzionamento solo estivo, con attivazione per 3 mesi, dall'1 giugno al 31 agosto;
- Funzionamento sia invernale che estivo, con attivazione in modalità invernale dal 15 ottobre al 15 aprile ed in modalità estiva dall'1 giugno al 31 agosto.

5.1 Realizzazione del modello

I modelli utilizzati per le due situazioni, più e meno favorevole, sono caratterizzati da geometria e parametri dei materiali uguali a quelli descritti nei paragrafi 4.2.2 e 4.2.3, per la configurazione corrispondente all'attivazione termica di 6 gruppi di 2 anelli le cui serpentine sono collegate in serie. Cambiano, invece, le impostazioni relative al tempo della simulazione, il quale è di 10 anni (3650 giorni, considerando per semplicità ogni anno della durata di 365 giorni) per il modello più favorevole e di 15 anni (5475 giorni) per il modello meno favorevole, e le condizioni al contorno.

Per i casi di funzionamento solo invernale e sia invernale che estivo il tempo zero della simulazione è stato imposto in corrispondenza del 15 ottobre, mentre nel caso di funzionamento solo estivo è stato scelto l'1 giugno.

5.1.1 Condizioni iniziali e al contorno

Rispetto al modello descritto nel capitolo 4, le condizioni iniziali e al contorno relative alla temperatura del terreno ed al flusso di falda non cambiano, in quanto queste non sono soggette a variazioni stagionali.

Subisce variazioni stagionali, invece, la temperatura all'interno della galleria: al fine di determinarne l'andamento sono stati utilizzati i valori di temperatura registrati dal 31/12/2017 al 23/11/2019 da GTT in corrispondenza di dieci pozzi di ventilazione distribuiti lungo la Linea 1 della Metropolitana di Torino, indicati con il simbolo di termometro in Figura 5.1.



Figura 5.1. Indicazione dei pozzi in corrispondenza dei quali è stata misurata la temperatura in galleria per la ML1 (cortesia da GTT)

I dati di temperatura sono riportati nel grafico in Figura 5.2, in cui l'origine è assunta in corrispondenza del giorno 1/01/2018. Sullo stesso grafico è riportata la funzione ciclica interpolante utilizzata per definire le condizioni al contorno termiche all'intradosso della galleria, descritta dalla seguente funzione:

$$T = 20 - 7 \cdot \text{sen}(1 + 0,01721 \cdot t)$$

T rappresenta la temperatura interna alla galleria, mentre t indica il tempo espresso in giorni rispetto al 1° gennaio. La funzione sinusoidale ha un periodo di 365 giorni; la temperatura minima è pari a 13 °C in inverno e quella massima è pari a 27 °C in estate.

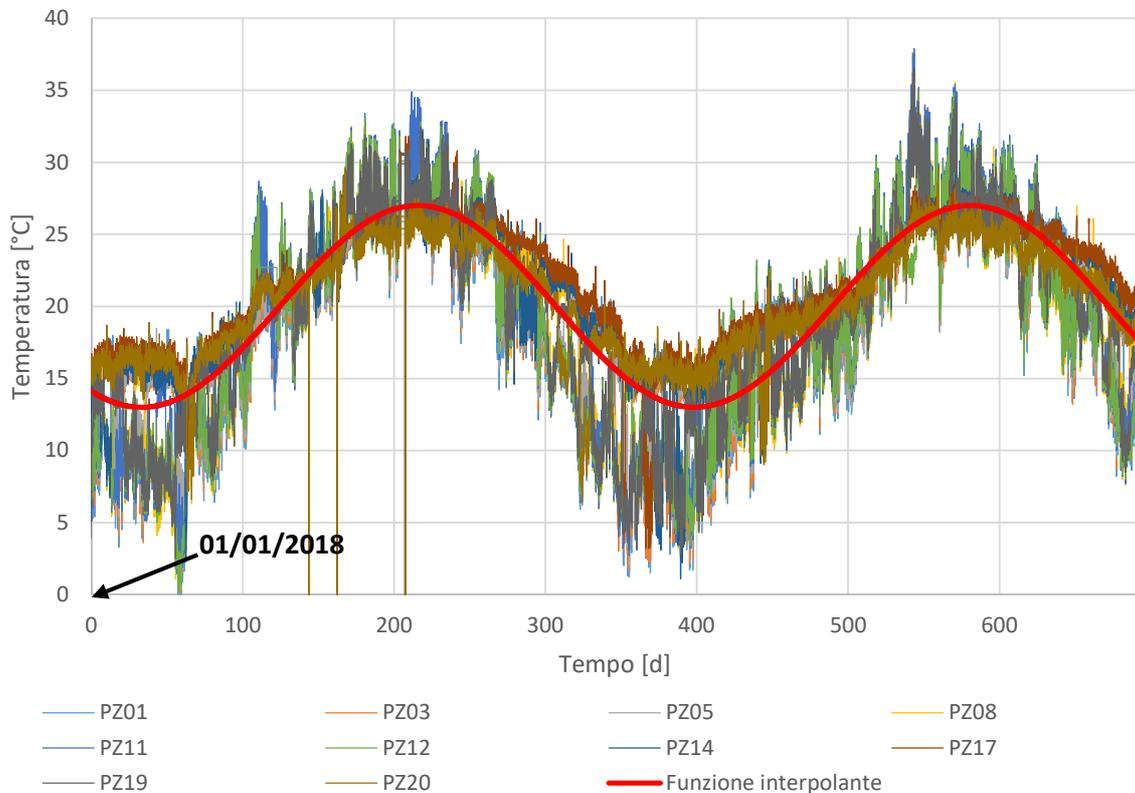


Figura 5.2. Dati di temperatura registrati all'interno della galleria della ML1 in corrispondenza di dieci pozzi di ventilazione e funzione sinusoidale interpolante (dati forniti da GTT)

La funzione sinusoidale così determinata è utilizzata traslando l'origine al 15 ottobre ed all'1 giugno per riportarsi al tempo zero della simulazione:

- funzionamento solo invernale e sia invernale che estivo:

$$T = 20 - 7 \cdot \text{sen}(1 + 0,01721 \cdot (t + 287))$$

- funzionamento solo estivo:

$$T = 20 - 7 \cdot \text{sen}(1 + 0,01721 \cdot (t + 151))$$

All'interno del software FEFLOW tale condizione al contorno è inserita come "time series" di tipo ciclico, riportando il valore che la funzione assume ogni 7 giorni. È utilizzata una condizione al contorno di Cauchy, la quale permette di rappresentare in modo più fedele le condizioni esistenti in sito rispetto alla condizione di Dirichlet: attribuendo agli elementi che si trovano all'intradosso della galleria un coefficiente di conduttanza ("in-transfer rate" e "out-transfer rate") pari a 1,767 J/m²·s·K si simula uno strato limite di aria di spessore 30 cm e conducibilità termica 0,53 W/m·K. Questa condizione comporta una minore influenza della temperatura in galleria sulla stima del potenziale

geotermico rispetto alla condizione di Dirichlet, infatti le stesse analisi effettuate nel capitolo 4 per la configurazione con due anelli collegati in serie, ripetute con condizione al contorno termica di Cauchy all'intradosso della galleria, portano a potenze termiche scambiabili minori in inverno e maggiori in estate, come si vede dal confronto in Tabella 5.1, in cui sono riportati i valori di potenza termica scambiabile per la configurazione caratterizzata da due anelli collegati termicamente in serie, dopo 180 giorni di attivazione, cioè al 210° giorno di simulazione.

Tabella 5.1. Confronto della potenza termica scambiabile per la configurazione caratterizzata da due anelli collegati termicamente in serie in funzione della tipologia di condizione al contorno termica applicata all'intradosso della galleria, per analisi di 210 giorni

		q [kW/m]	
		Condizione al contorno di Dirichlet	Condizione al contorno di Cauchy
Modello più favorevole	caso invernale	1,60	1,35
	caso estivo	1,25	1,39
Modello meno favorevole	caso invernale	1,11	0,67
	caso estivo	0,46	0,47

Infine, sono applicate le condizioni al contorno termiche ed idrauliche ai nodi di ingresso e di uscita delle serpentine per simulare l'attivazione dell'impianto. Anche queste sono inserite su FEFLOW come "times series" di tipo ciclico, sulla base dell'ipotesi di funzionamento analizzata:

- Funzionamento solo invernale: si impone una temperatura in ingresso di 4 °C ed una velocità del fluido pari a 0,9 m/s per la durata di attivazione, ovvero 182 giorni (dal giorno 0 al giorno 182 della simulazione, con ripetizione ogni 365 giorni);
- Funzionamento solo estivo: si impone una temperatura in ingresso di 28 °C ed una velocità del fluido pari a 0,9 m/s per la durata di attivazione, ovvero 91 giorni (dal giorno 0 al giorno 91 della simulazione, con ripetizione ogni 365 giorni);
- Funzionamento sia invernale che estivo: si impone una temperatura in ingresso di 4 °C per il periodo invernale della durata di 182 giorni e di 28 °C per il periodo estivo della durata di 91 giorni, con velocità del fluido pari a 0,9 m/s per tutti gli intervalli di attivazione termica (dal giorno 0 al giorno 182 e dal giorno 229 al giorno 320 della simulazione, con ripetizione ogni 365 giorni).

Negli intervalli temporali durante i quali l'impianto non è attivato si impone una velocità del fluido nulla all'interno delle serpentine ed una temperatura in ingresso pari a quella di equilibrio del terreno (14,9 °C per il modello più favorevole e 15,5 °C per il modello meno favorevole). FEFLOW prevede la

possibilità di inserire all'interno delle "times series" degli intervalli, detti "gap", durante i quali la condizione al contorno è disattivata. Tuttavia, nonostante l'utilizzo dei "gap" sia teoricamente più corretto e corrispondente al funzionamento reale, si è preferito forzare le condizioni al contorno ad essere funzioni continue, in quanto il modello contenente i "gap" all'interno delle serie temporali ha portato a soluzioni contenenti oscillazioni ingiustificate delle temperature nei punti di osservazione, in particolare nell'intervallo di non attivazione dell'impianto. Imponendo la velocità idraulica in entrata ed in uscita dalle serpentine nulla si forza il fluido a non scorrere nell'impianto, mentre la temperatura di equilibrio del terreno imposta ai nodi di ingresso delle serpentine ha un effetto trascurabile sul modello, in quanto la sua influenza si limita a pochi elementi nell'intorno dei nodi.

Nei grafici riportati nelle Figure 5.3, 5.4 e 5.5 sono riassunte le condizioni al contorno di tipo termico in funzione del tempo, per le tre ipotesi di funzionamento dell'impianto, per i primi 5 anni, nel caso di modello più favorevole. Queste si ripetono uguali negli anni successivi. Nel caso di modello meno favorevole, l'unica differenza è la temperatura di equilibrio del terreno, pari a 15,5 °C anziché 14,9 °C. Nei grafici T_{tun} è la temperatura dell'aria all'interno della galleria, T_{in} è la temperatura al nodo di ingresso delle serpentine, T_{ground} è la temperatura di equilibrio del terreno.

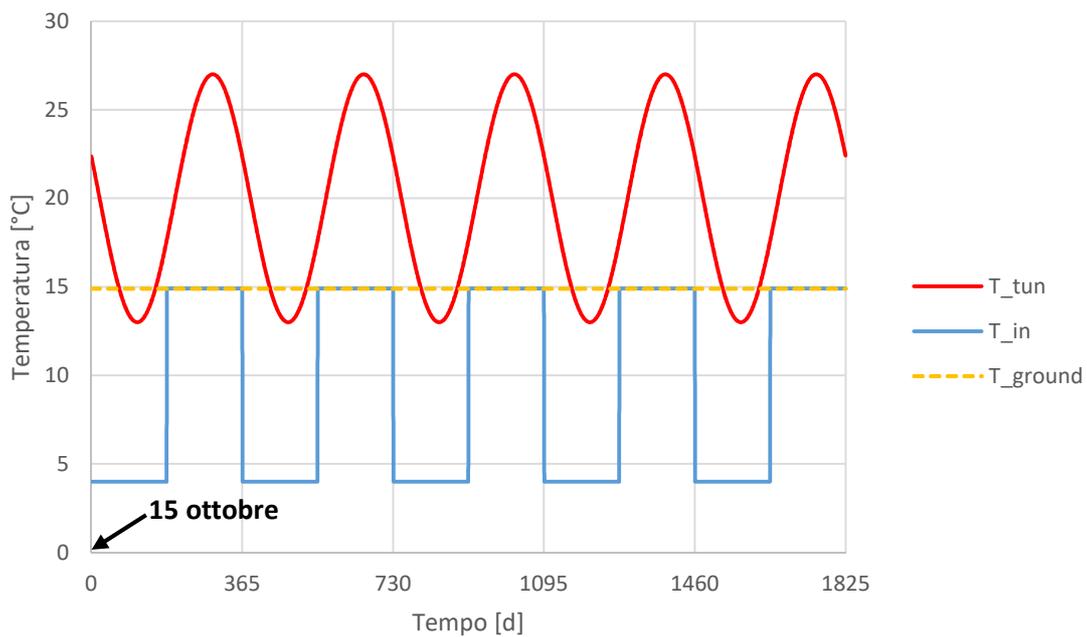


Figura 5.3. Condizioni al contorno termiche per 5 anni, funzionamento solo invernale, modello più favorevole

5. Studio del comportamento stagionale

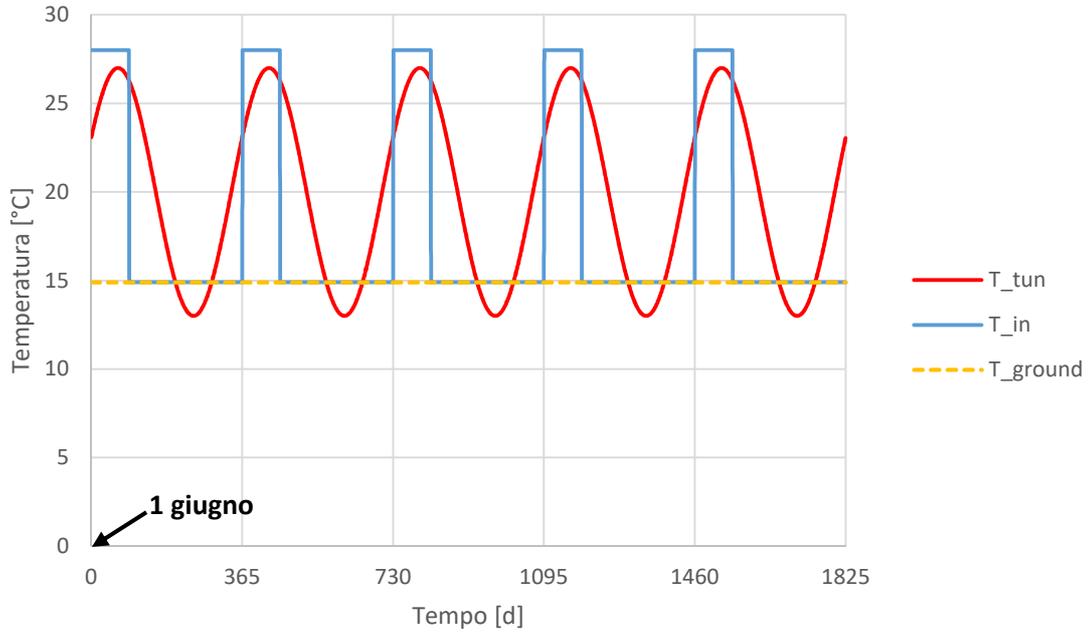


Figura 5.4. Condizioni al contorno termiche per 5 anni, funzionamento solo estivo, modello più favorevole

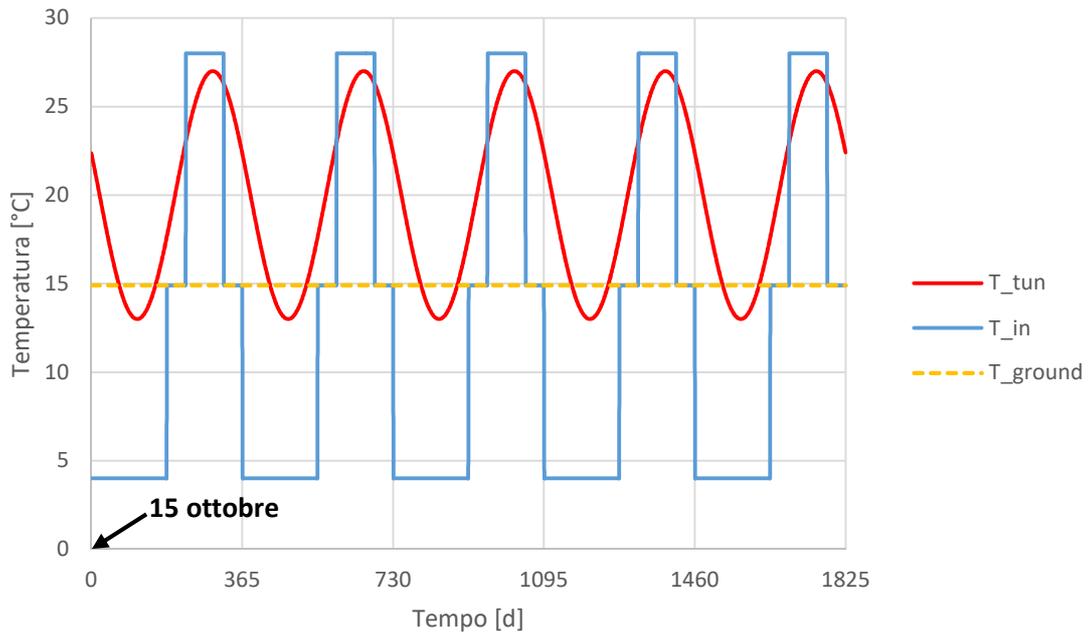


Figura 5.5. Condizioni al contorno termiche per 5 anni, funzionamento sia invernale che estivo, modello più favorevole

Nei grafici riportati nelle Figure 5.6, 5.7 e 5.8 sono riassunte le condizioni al contorno di tipo idraulico in funzione del tempo, per le tre ipotesi di funzionamento dell'impianto, per i primi 5 anni: v_{in} è la velocità in ingresso e v_{out} è la velocità in uscita dalle serpentine.

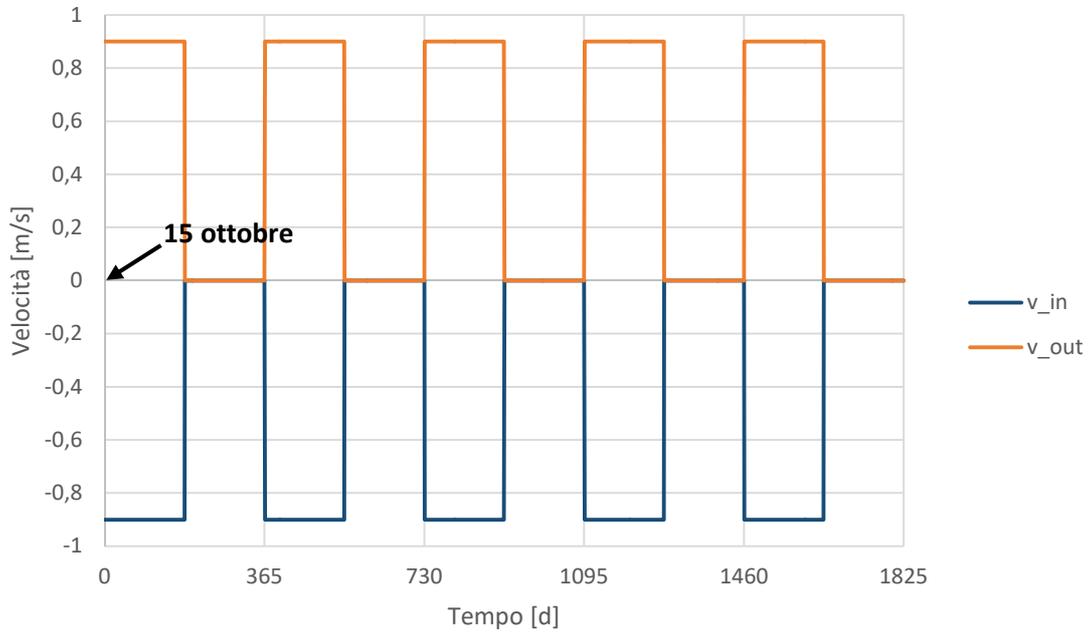


Figura 5.6. Condizioni al contorno idrauliche per 5 anni, funzionamento solo invernale

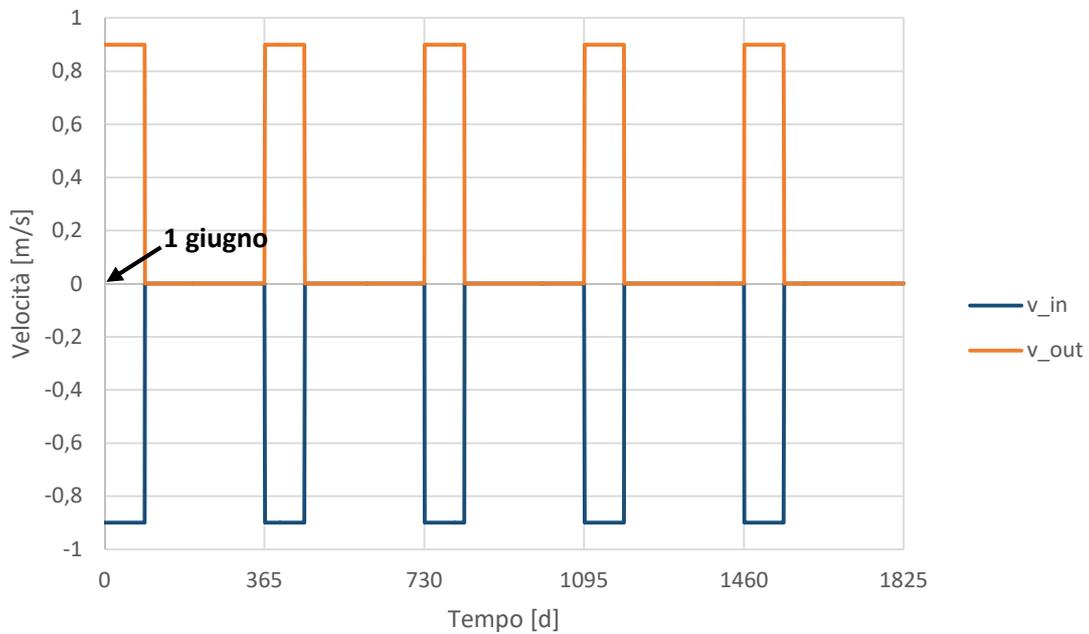


Figura 5.7. Condizioni al contorno idrauliche per 5 anni, funzionamento solo estivo

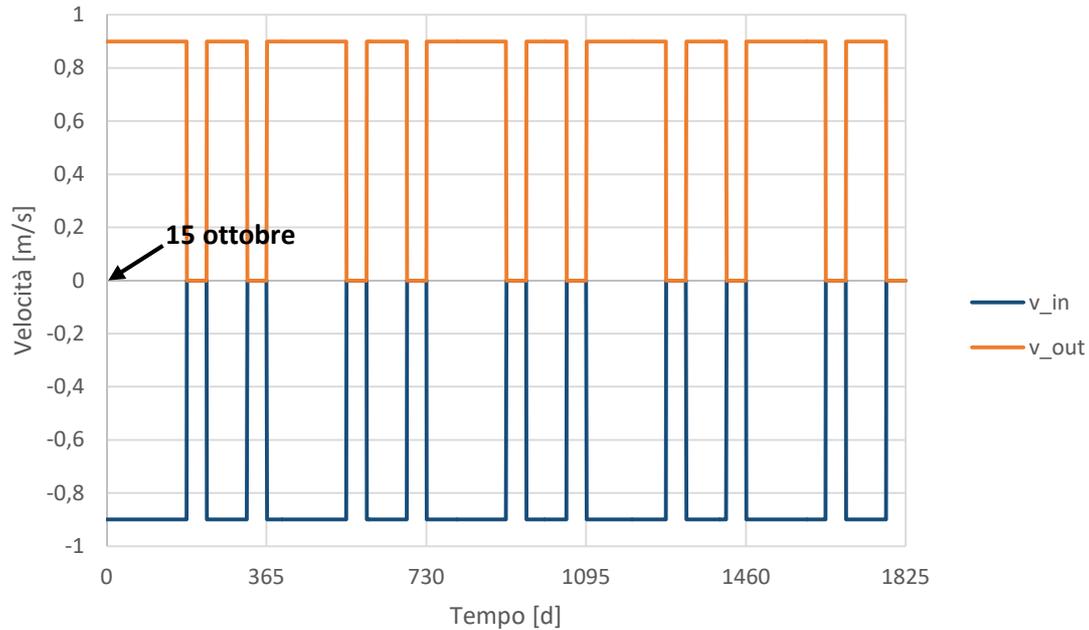


Figura 5.8. Condizioni al contorno idrauliche per 5 anni, funzionamento sia invernale che estivo

5.2 Modello più favorevole

Sono state effettuate le analisi numeriche per studiare il comportamento del sistema geotermico e gli effetti che questo ha sul terreno per una durata totale di 10 anni, considerando le tre diverse ipotesi di funzionamento:

- solo invernale;
- solo estivo;
- sia invernale che estivo.

5.2.1 Funzionamento solo invernale

In Figura 5.9 sono riportate le temperature registrate in corrispondenza dei punti di osservazione nel caso di funzionamento solo invernale dell'impianto: IN_3 e OUT_3 sono rispettivamente la temperatura in entrata ed in uscita dalla serpentina del terzo gruppo di anelli attivati termicamente; i restanti punti si trovano distribuiti nel terreno, lungo la direzione orizzontale a destra della galleria, cioè a valle del flusso di falda, e sono indicati con la distanza dal centro della galleria.

Da una prima analisi, si osserva che l'andamento non subisce importanti variazioni da un anno all'altro, in quanto le proprietà termo-idrauliche del terreno rendono i processi di trasferimento del calore abbastanza veloci da permettere un recupero del calore perso nella fase di attivazione invernale prima dell'attivazione successiva.

5. Studio del comportamento stagionale

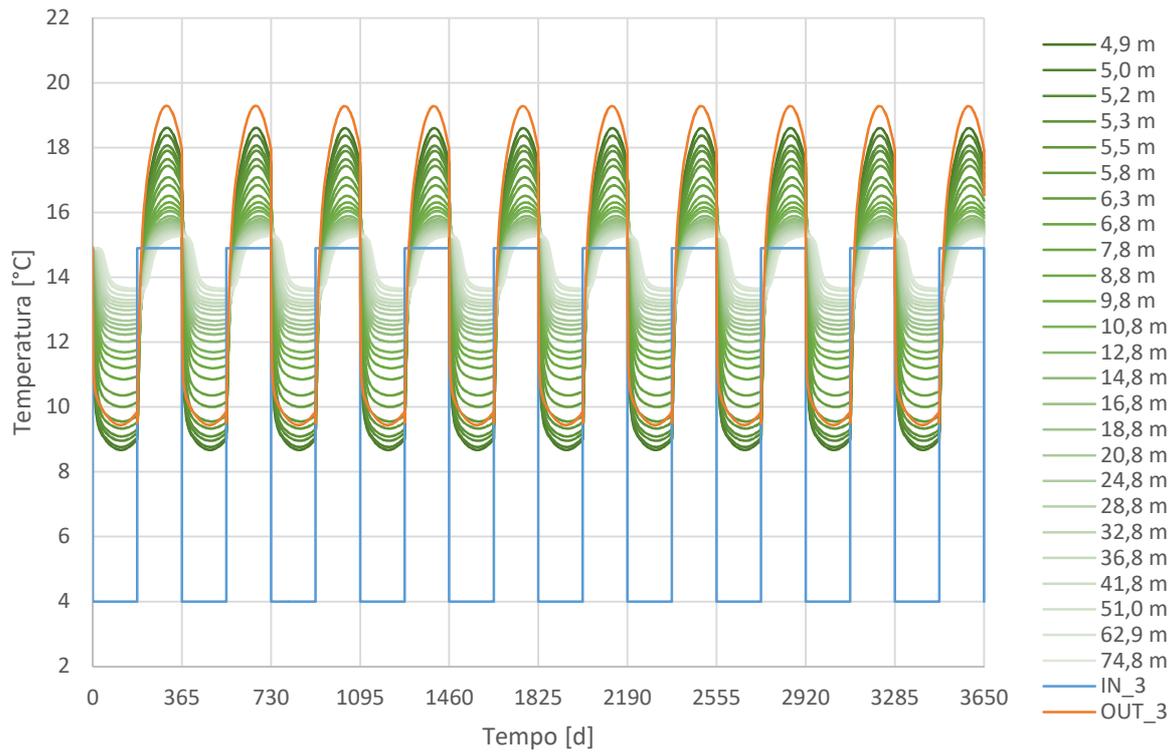


Figura 5.9. Temperature registrate nei punti di osservazione per 10 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello più favorevole

A partire dalla differenza di temperatura, si valuta la potenza termica estraibile durante il periodo di attivazione, come visto al paragrafo 4.4. In Figura 5.10 è riportata la potenza termica estraibile per metro lineare di galleria, q .

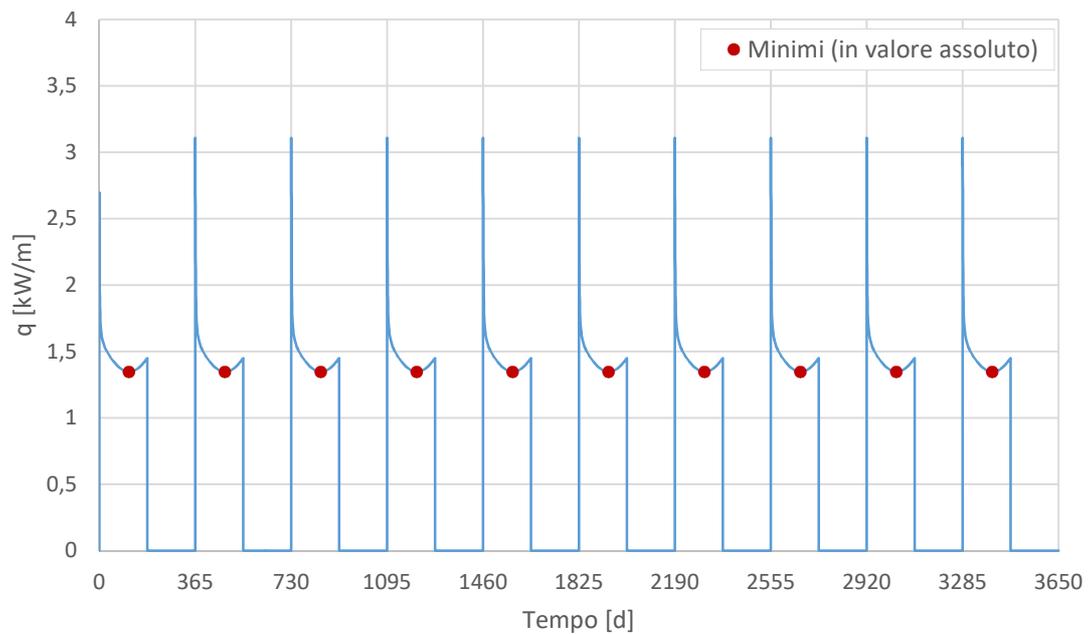


Figura 5.10. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 10 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello più favorevole

Per una valutazione conservativa della potenza estraibile, si considera il valore minimo relativo ad ogni periodo di attivazione dell'impianto, indicato con un punto di colore rosso nel grafico in Figura 5.10. Tale valore risulta costante da un anno all'altro e pari a 1,35 kW/m, perciò si può affermare che in condizioni favorevoli non si ha una diminuzione della potenza termica estraibile. Si nota che la minima potenza estraibile registrata ogni anno è uguale a quella riportata in Tabella 5.1, ottenuta per un modello costruito considerando 180 giorni di attivazione in funzionamento invernale, con temperatura in galleria, imposta con condizione al contorno di Cauchy, costante e pari a 13 °C, corrispondente alla minima temperatura dell'andamento stagionale (Figura 5.2).

Per quanto riguarda la temperatura del terreno, si osserva che questa oscilla intorno al valore di temperatura che il terreno ha in assenza di galleria, ossia 14,9 °C, e non si misura un raffreddamento del terreno dovuto al prelievo di calore. L'apporto di calore dovuto allo scambio termico con l'aria in galleria ed il flusso di falda giocano un ruolo positivo sul ripristino delle condizioni termiche iniziali. In Figura 5.11 si riporta, a titolo di esempio, l'andamento della temperatura in 5 punti a distanze diverse dal centro della galleria, in confronto alla temperatura di equilibrio del terreno.

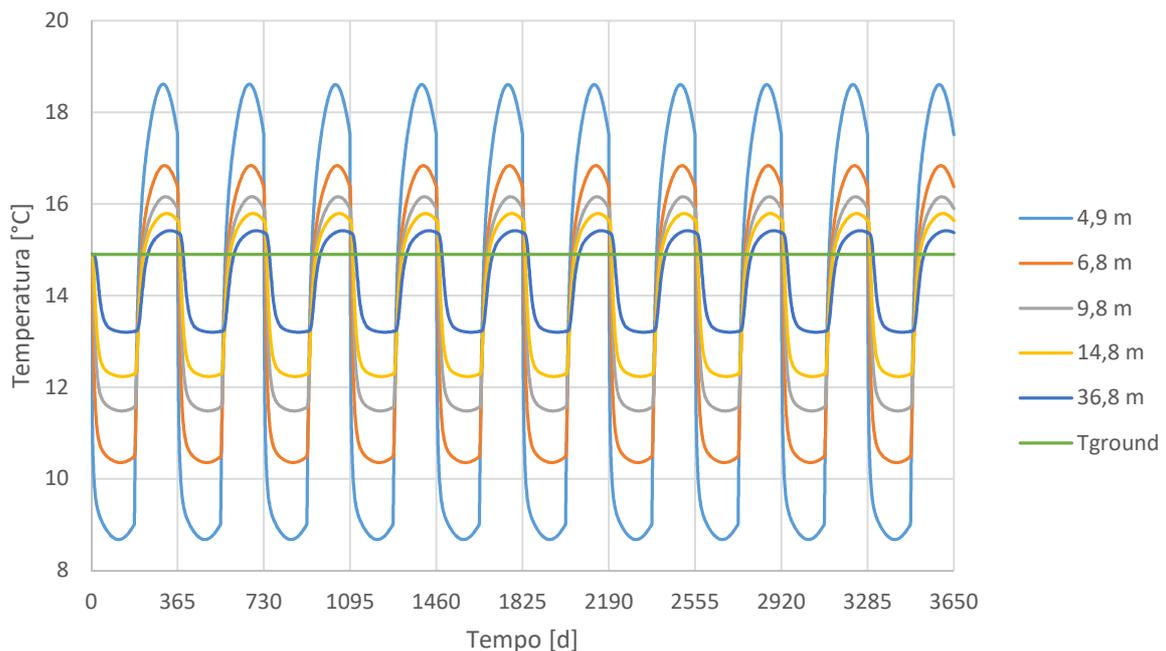


Figura 5.11. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 10 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello più favorevole

5.2.2 Funzionamento solo estivo

In Figura 5.12 sono riportate le temperature registrate nei punti di osservazione nel caso di funzionamento solo estivo dell'impianto.

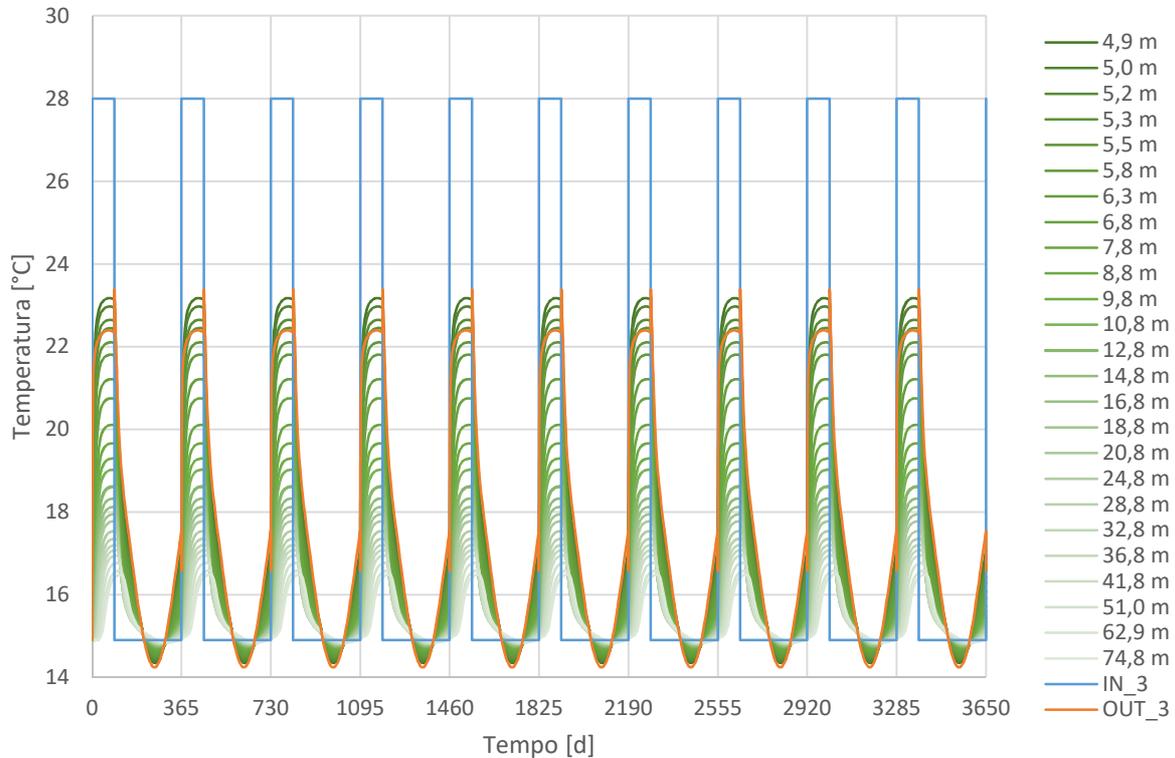


Figura 5.12. Temperature registrate nei punti di osservazione per 10 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello più favorevole

In Figura 5.13 si riporta l'andamento nel tempo della potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria, q , calcolata per i periodi di attivazione come al paragrafo 4.4, a partire dalla differenza di temperatura in ingresso ed in uscita dalle serpentine. Per distinguere la potenza termica estratta dal terreno in inverno e quella ceduta al terreno in estate, si indica come negativa la seconda, in modo da poter rappresentare entrambe con una maggiore chiarezza nella prossima analisi con funzionamento sia invernale che estivo.

Come nel caso di funzionamento invernale, si denota un comportamento costante di anno in anno: il valore minimo, in termini assoluti, della potenza termica scambiabile con il terreno è costante e pari a 1,39 kW/m, perciò anche in questo caso non si ha un decremento della potenza termica che le serpentine dell'impianto sono in grado di cedere al terreno. Il valore minimo di potenza termica scambiabile è, anche per il funzionamento estivo, uguale a quello riportato in Tabella 5.1 per 180 giorni di attivazione con temperatura in galleria, imposta con condizione al contorno di Cauchy, costante e pari a 26,7 °C (la massima temperatura stagionale in galleria nel periodo estivo è pari a 27 °C).

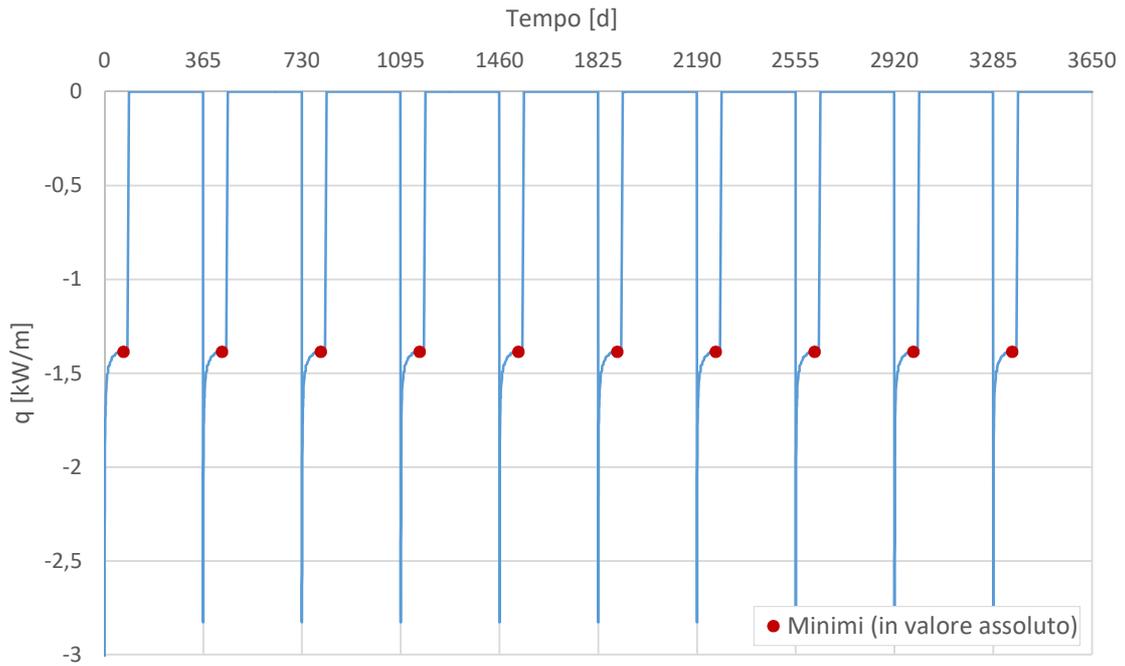


Figura 5.13. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 10 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello più favorevole

Per quanto riguarda la temperatura del terreno, si osserva un'oscillazione che si ripete uguale di anno in anno, senza riscontrare un riscaldamento del terreno legato all'immissione di calore ad opera dell'impianto. In Figura 5.14 si riporta, a titolo di esempio, l'andamento della temperatura in 5 punti a distanze diverse dal centro della galleria, in confronto alla temperatura di equilibrio del terreno, pari a 14,9 °C.

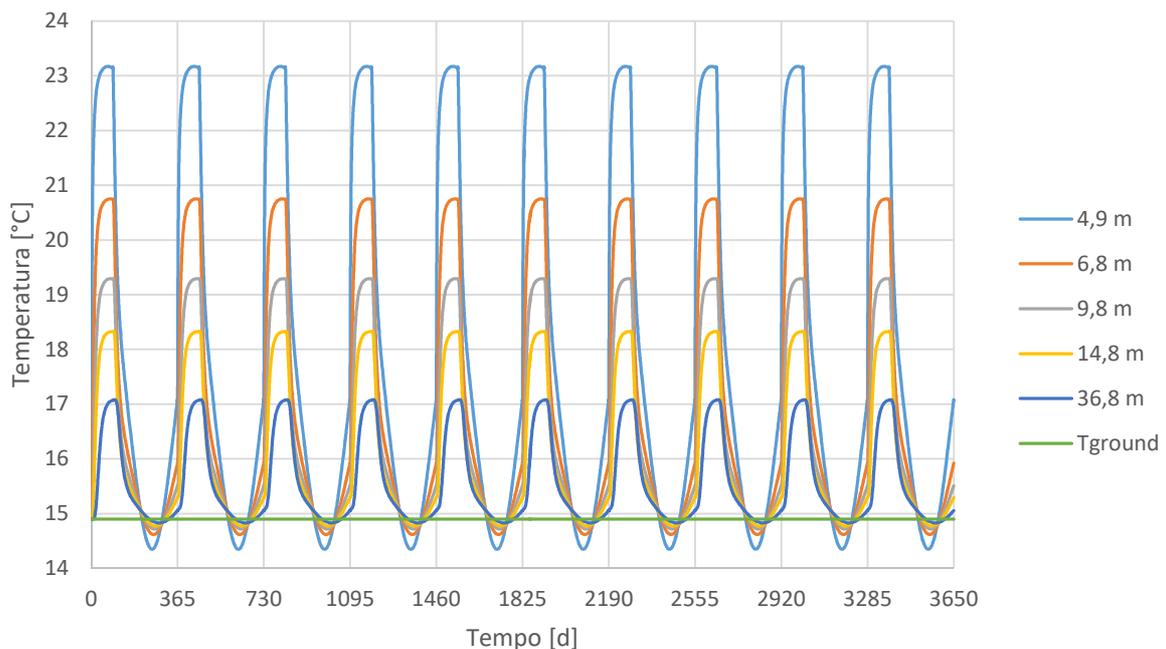


Figura 5.14. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 10 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello più favorevole

5.2.3 Funzionamento sia invernale che estivo

In Figura 5.15 sono riportate le temperature registrate nei punti di osservazione nel caso di funzionamento sia invernale che estivo dell'impianto.

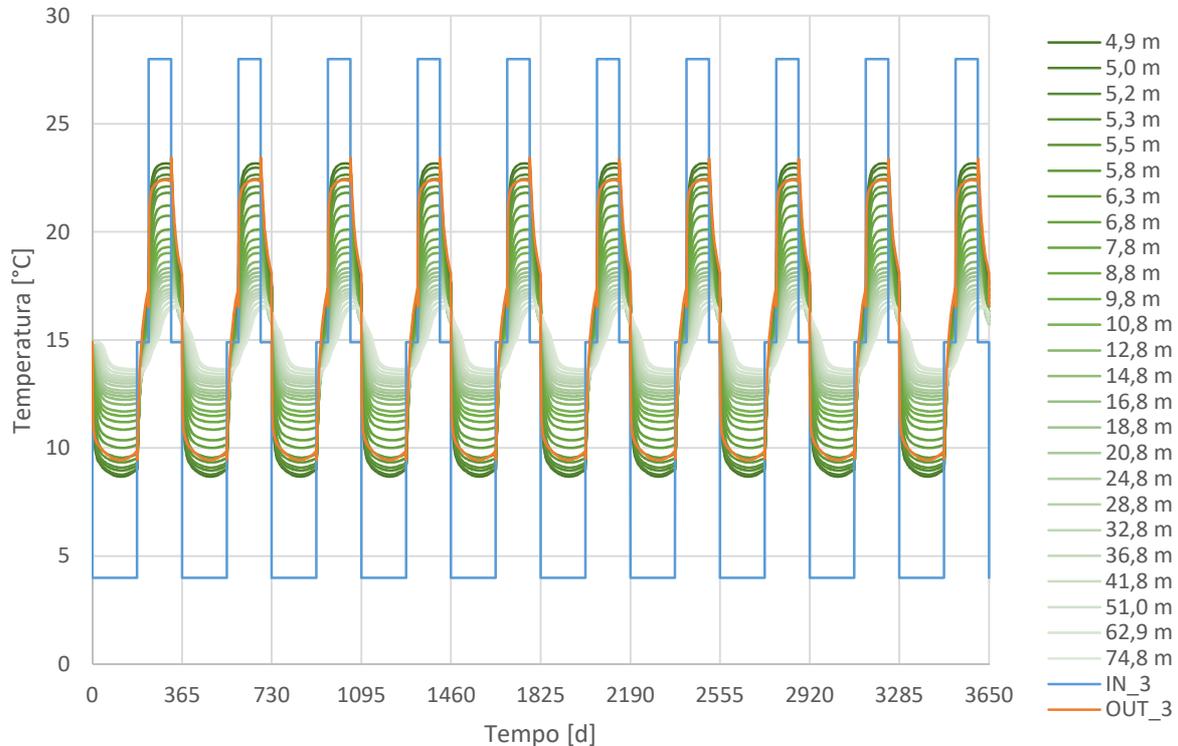


Figura 5.15. Temperature registrate nei punti di osservazione per 10 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello più favorevole

In Figura 5.16 si riporta l'andamento nel tempo della potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria, q , calcolata per i periodi di attivazione dell'impianto come visto al paragrafo 4.4, a partire dalla differenza di temperatura in ingresso ed in uscita dalle serpentine. La potenza termica positiva indica che il calore è ceduto dal terreno al fluido circolante nelle serpentine, quella negativa indica che il calore è ceduto dal fluido al terreno.

Dall'analisi numerica si ottiene un andamento costante, da un anno all'altro, della minima potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria, pari a 1,35 kW/m nel periodo di attivazione invernale e a -1,39 kW/m nel periodo di attivazione estivo. Essendo tali valori uguali a quelli ottenuti per le analisi con funzionamento solamente invernale e solamente estivo, si evince che non vi è mutua influenza tra i due fenomeni.

5. Studio del comportamento stagionale

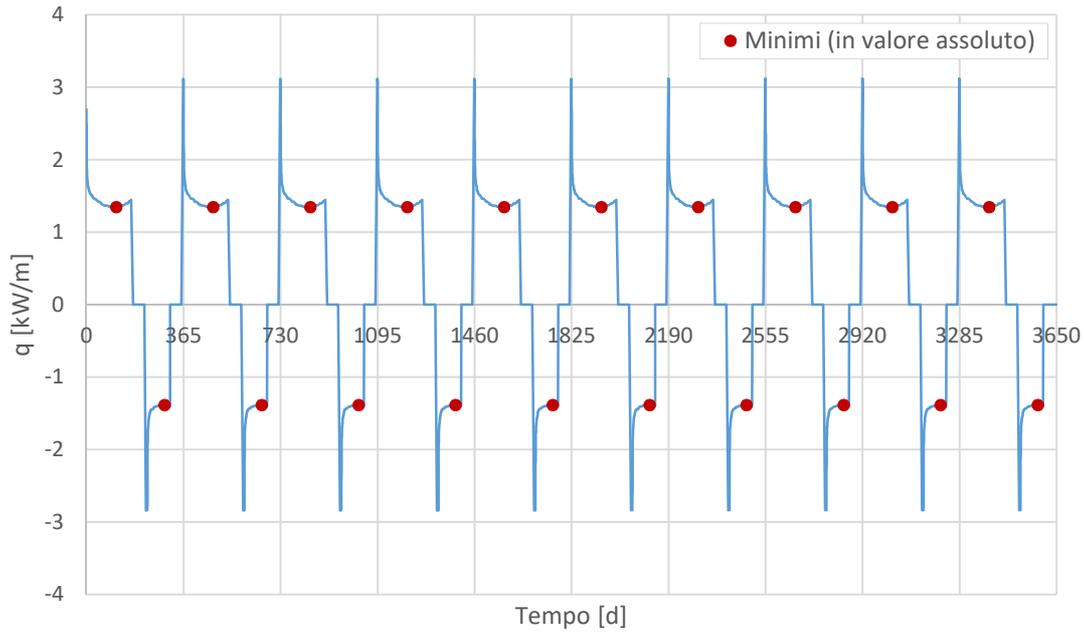


Figura 5.16. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 10 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello più favorevole

Infine, anche in questo caso si osserva un'oscillazione intorno al valore di temperatura che il terreno ha in assenza di galleria, ossia $14,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, senza subire importanti variazioni da un anno all'altro. In Figura 5.17 si riporta, a titolo di esempio, l'andamento della temperatura in 5 punti a distanze diverse dal centro della galleria, in confronto alla temperatura di equilibrio del terreno, pari a $14,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

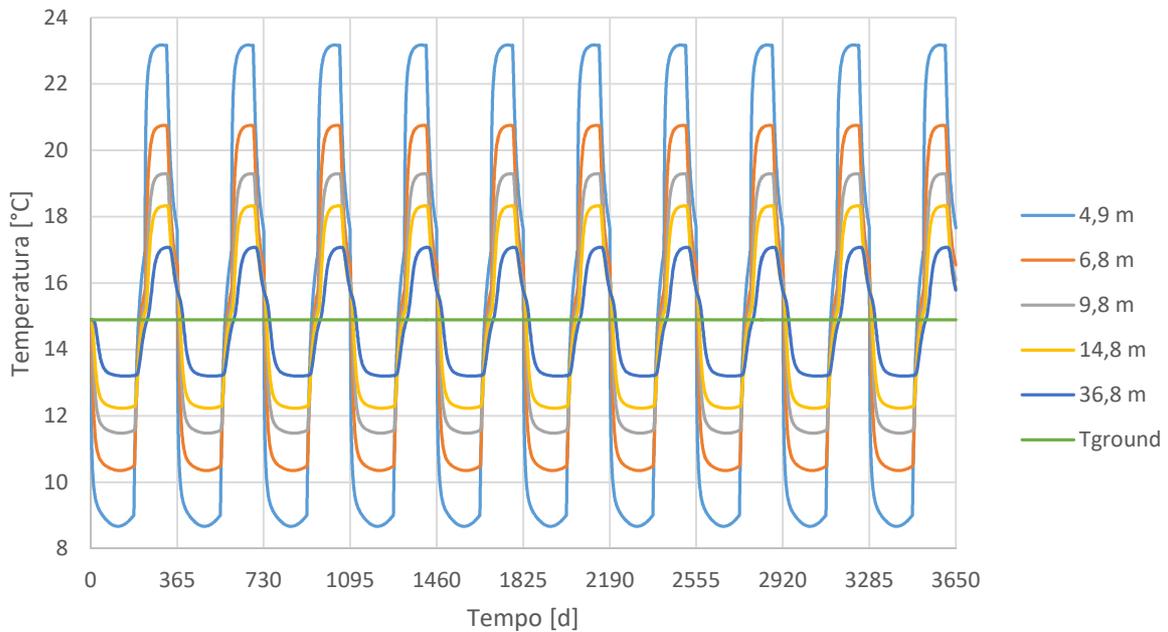


Figura 5.17. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 10 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello più favorevole

5.3 Modello meno favorevole

Sono state effettuate le analisi numeriche per studiare il comportamento del sistema geotermico e gli effetti che questo ha sul terreno per una durata totale di 15 anni, in quanto dalle prime analisi è emersa una variazione delle temperature con il passare degli anni, a differenza del modello più favorevole, e si è voluto capire l'entità di tale variazione dopo un numero maggiore di anni. Sono state considerate le tre diverse ipotesi di funzionamento:

- solo invernale;
- solo estivo;
- sia invernale che estivo.

5.3.1 Funzionamento solo invernale

In Figura 5.18 sono riportate le temperature registrate nei punti di osservazione nel caso di funzionamento solo invernale dell'impianto.

Da una prima analisi, è possibile osservare che l'andamento delle temperature non è più regolare come per il modello più favorevole, ma si verifica un raffreddamento più o meno evidente nei diversi punti del modello nei primi anni di attivazione.

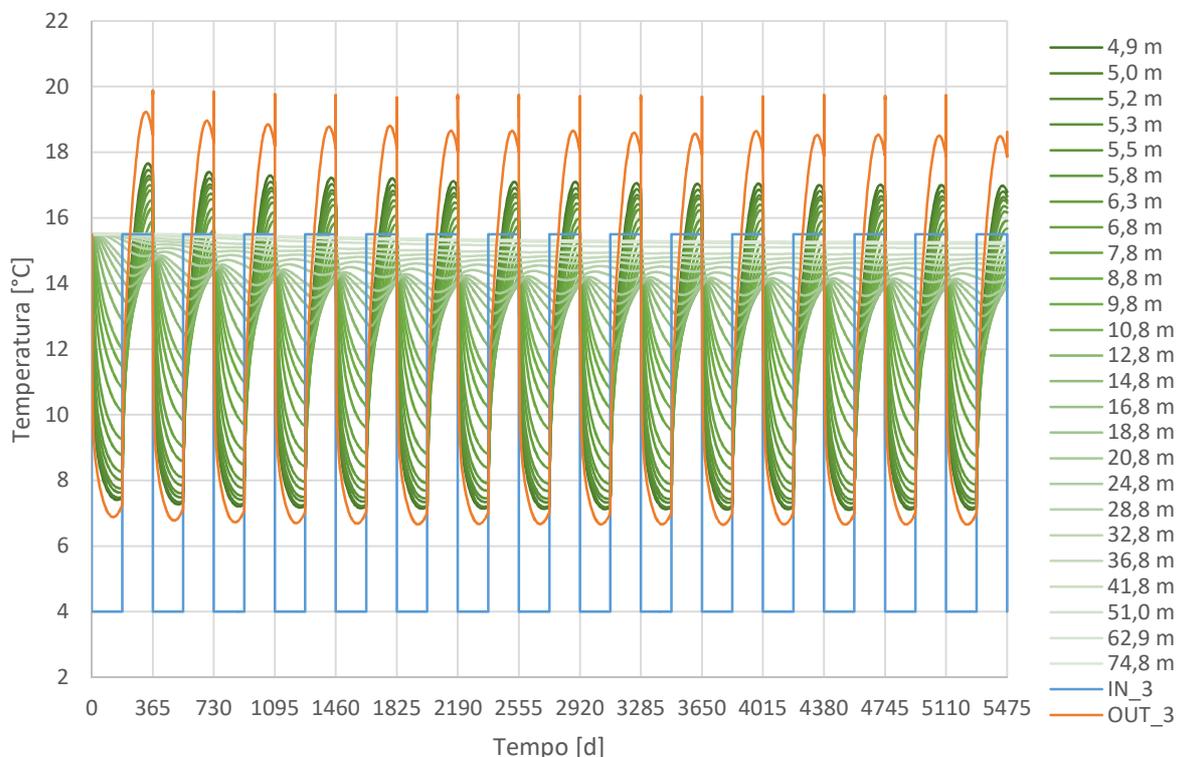


Figura 5.18. Temperature registrate nei punti di osservazione per 15 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello meno favorevole

La potenza termica estraibile per metro lineare di galleria, q , è calcolata per i periodi di attivazione dell'impianto come visto nel paragrafo 4.4, a partire dalla differenza tra la temperatura in ingresso ed in uscita dalle serpentine, e riportata nel grafico in Figura 5.19. I valori minimi relativi ad ogni ciclo di attivazione sono riportati in Figura 5.20, in modo da poterne osservare l'andamento.

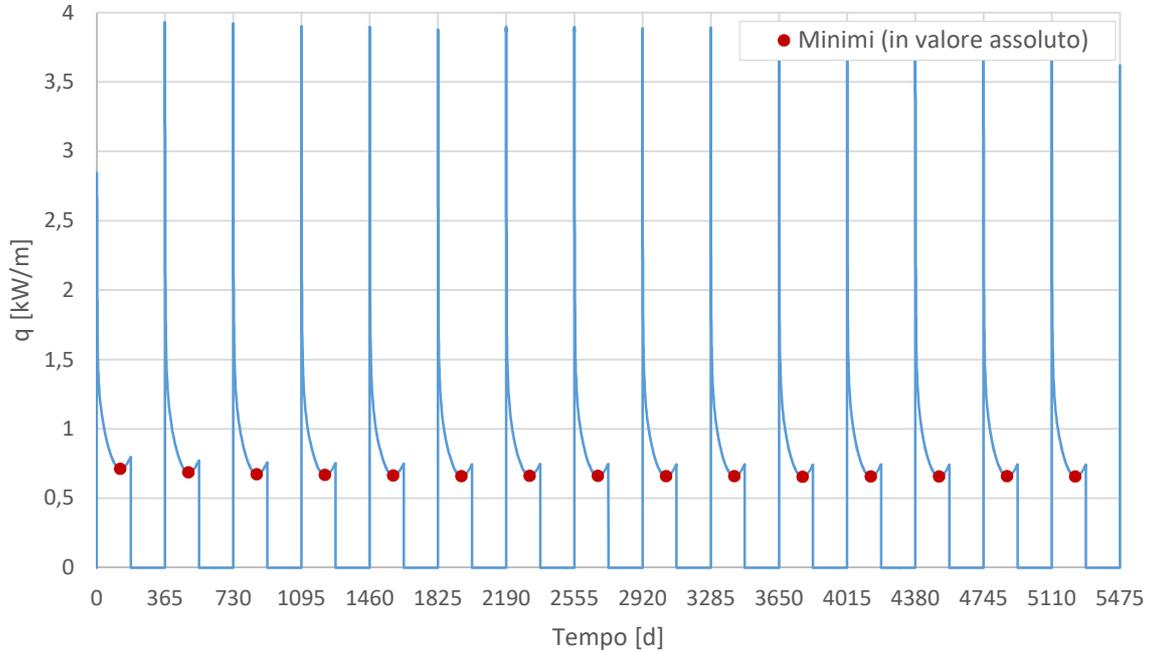


Figura 5.19. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello meno favorevole

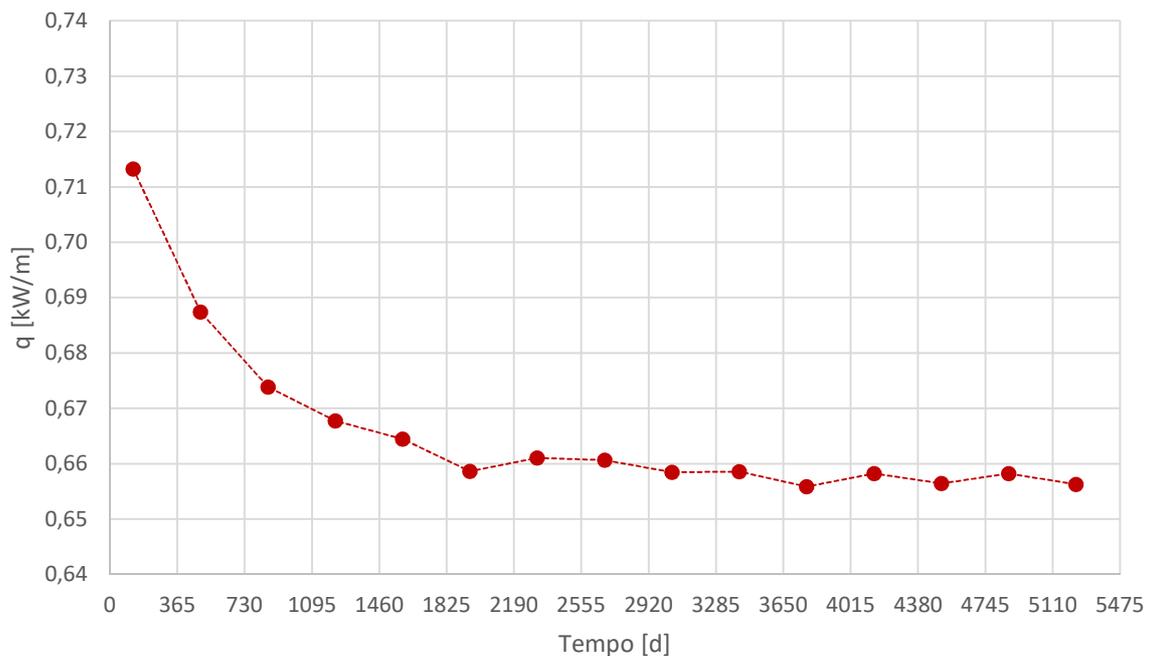


Figura 5.20. Andamento dei valori minimi di potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello meno favorevole

Si osserva una diminuzione della potenza termica estraibile nei primi anni: il primo anno si registra un minimo di 0,71 kW/m, dopodiché i valori minimi diminuiscono fino a stabilizzarsi, a partire dal sesto anno, a circa 0,66 kW/m. Tale fenomeno è legato alla diminuzione della temperatura del terreno per effetto dell'attivazione termica, che comporta il prelievo di calore contenuto nel terreno da parte delle serpentine della geostruttura. In Figura 5.21 si riporta, ad esempio, l'andamento della temperatura in 5 punti a distanze diverse dal centro della galleria, in confronto alla temperatura originaria del terreno, pari a 15,5 °C. Si osserva che ad una distanza di 36,8 m dal centro della galleria, dove le oscillazioni legate all'andamento stagionale della temperatura dell'aria interna e all'attivazione ciclica dell'impianto sono trascurabili, la temperatura varia di circa 0,8 °C; dopo i primi 7-8 anni, la temperatura nel terreno tende a stabilizzarsi.

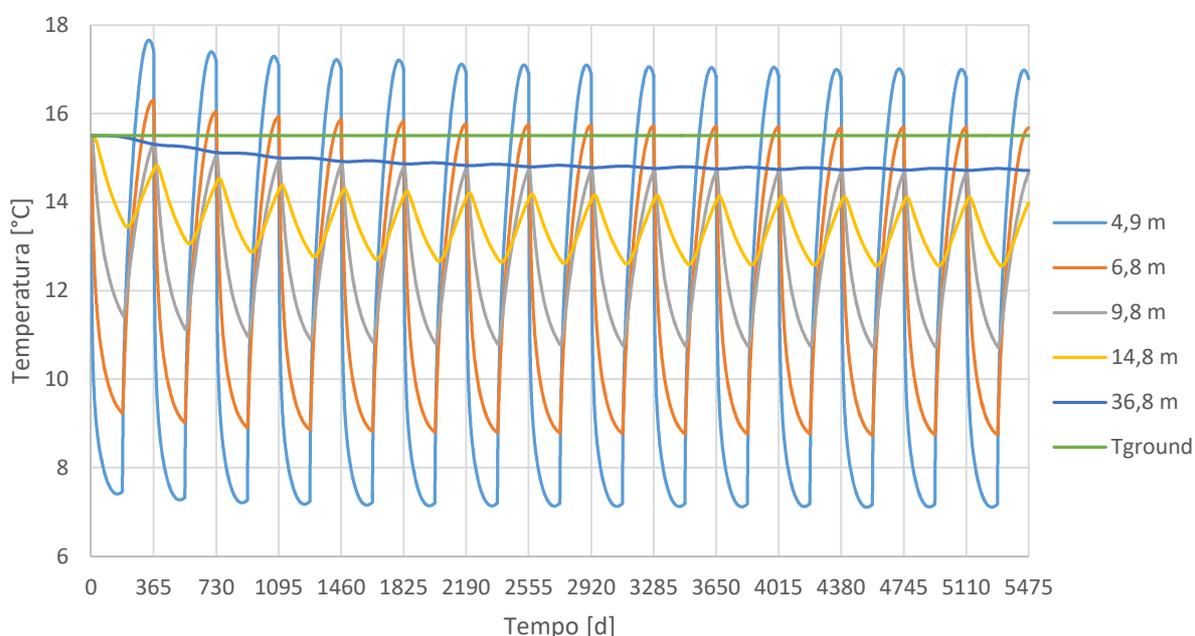


Figura 5.21. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 15 anni di attivazione con funzionamento solo invernale, modello meno favorevole

5.3.2 Funzionamento solo estivo

In Figura 5.22 sono riportate le temperature registrate nei punti di osservazione nel caso di funzionamento solo estivo dell'impianto.

Da una prima analisi, si osserva un riscaldamento del terreno nei primi anni di attivazione termica, perciò il comportamento del sistema non si ripete uguale di anno in anno come accade nel caso del modello più favorevole.

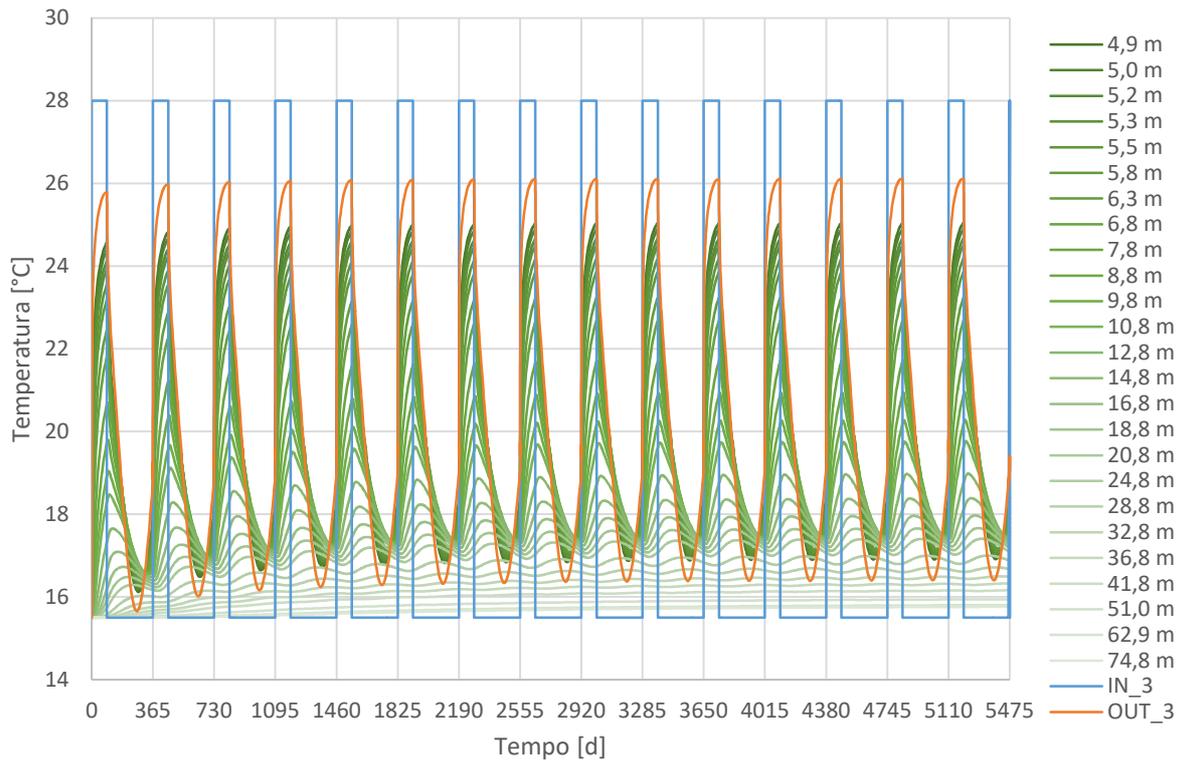


Figura 5.22. Temperature registrate nei punti di osservazione per 15 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello meno favorevole

In Figura 5.23 si riporta l'andamento nel tempo della potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria, q , calcolata per i periodi di attivazione dell'impianto come al paragrafo 4.4, a partire dalla differenza di temperatura in ingresso ed in uscita dalle serpentine.

I valori di potenza termica scambiabile sono considerati negativi perché le serpentine cedono calore al terreno. I valori minimi, in termini assoluti, relativi ad ogni ciclo di attivazione sono riportati in Figura 5.24, in modo da poterne osservare l'andamento. Si osserva una diminuzione, in valore assoluto, della potenza termica scambiabile nei primi anni: il primo anno si registra un minimo di 0,55 kW/m, dopodiché i valori minimi diminuiscono fino a stabilizzarsi, a partire dall'ottavo anno, a circa 0,47 kW/m.

5. Studio del comportamento stagionale

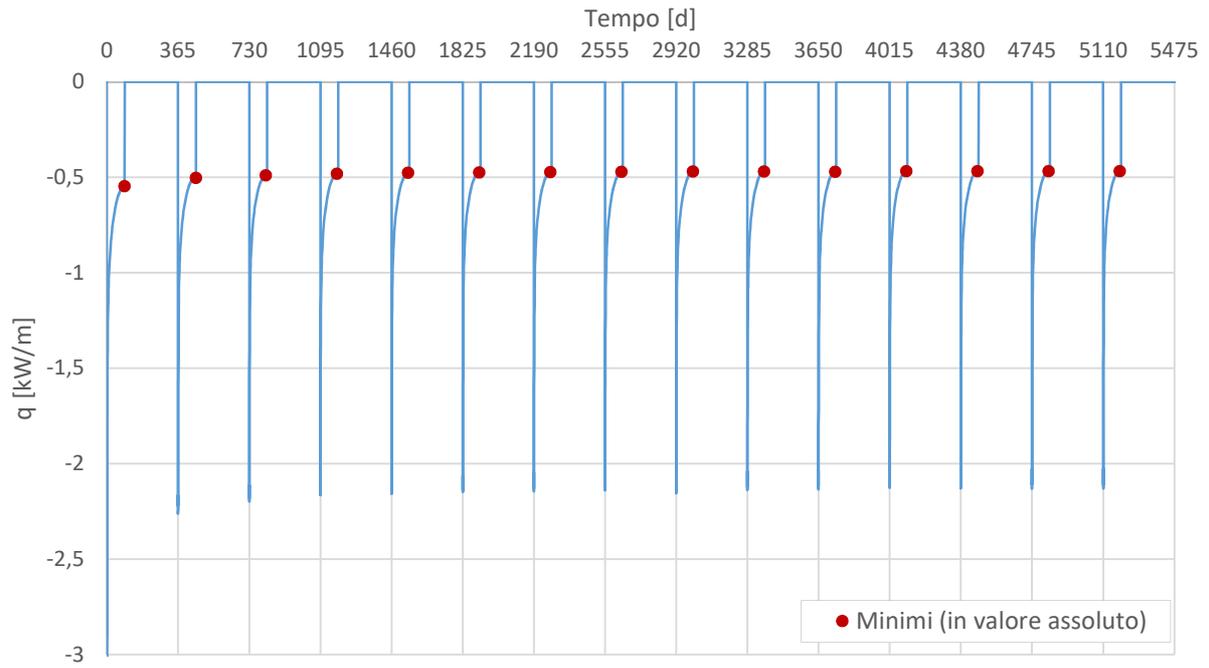


Figura 5.23. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello meno favorevole

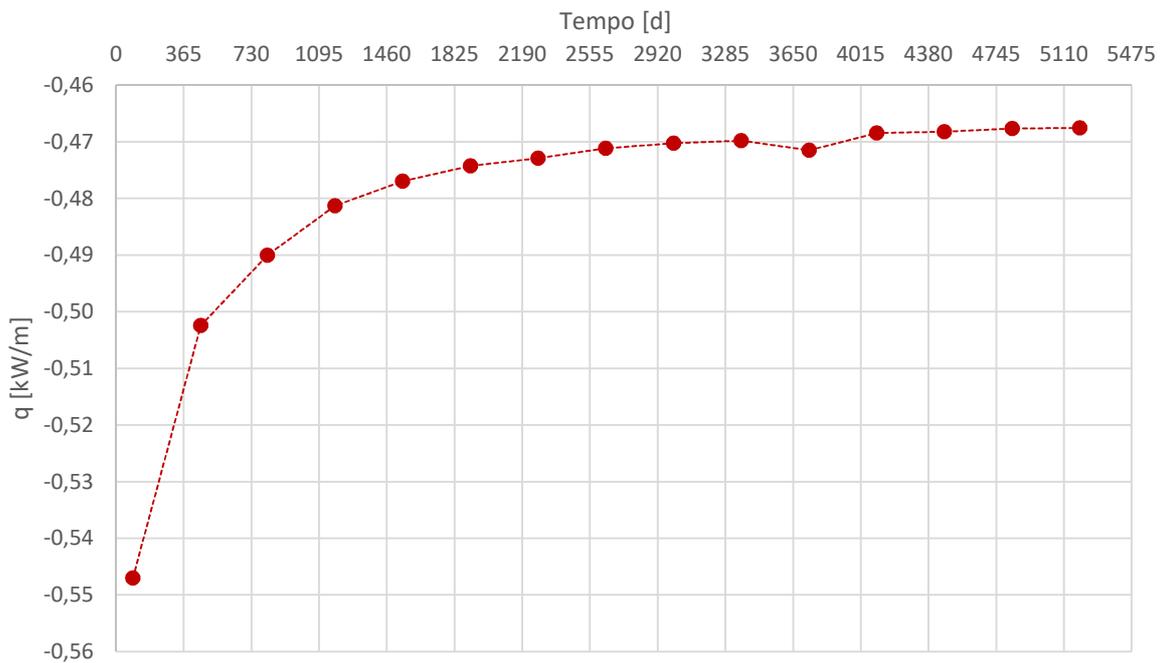


Figura 5.24. Andamento dei valori minimi di potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello meno favorevole

La diminuzione della potenza termica scambiabile è legata all'aumento della temperatura del terreno per effetto dell'attivazione termica, che comporta il trasferimento di calore dalle serpentine della geostruttura al terreno. In Figura 5.25 si riporta, ad esempio, l'andamento della temperatura in 5 punti a distanze diverse dal centro della galleria, in confronto alla temperatura originaria del terreno, pari a 15,5 °C. Si osserva che ad una distanza di 36,8 m dal centro della galleria, dove le oscillazioni legate all'andamento stagionale della temperatura dell'aria interna e all'attivazione ciclica dell'impianto sono trascurabili, la temperatura varia di circa 0,8 °C; dopo i primi 9-10 anni, la temperatura nel terreno tende a stabilizzarsi.

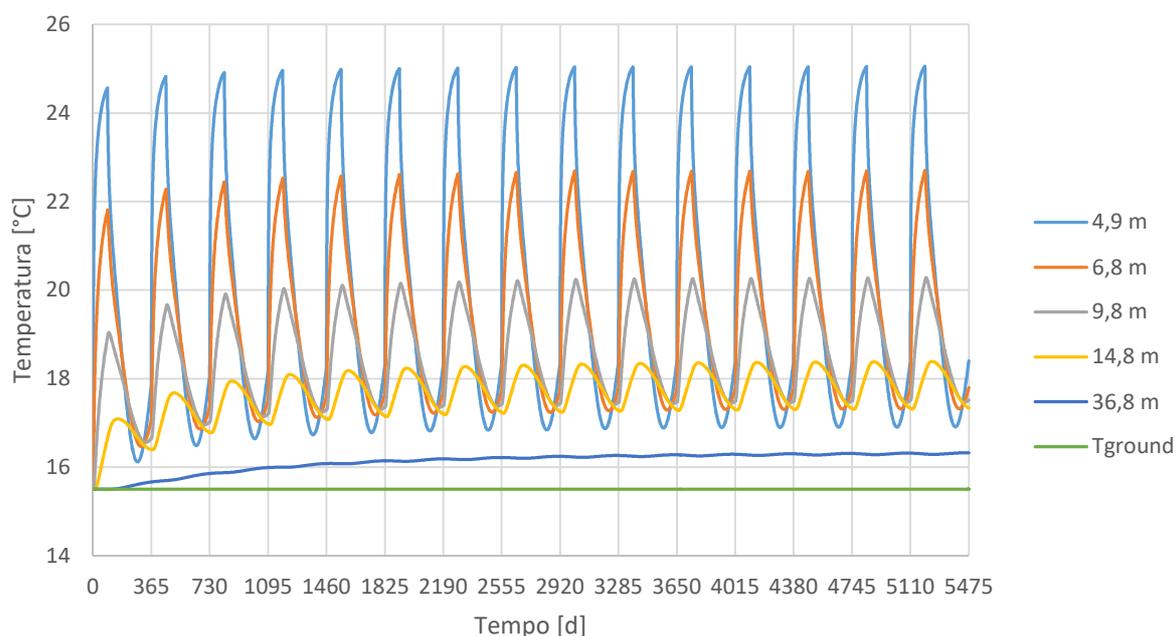


Figura 5.25. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 15 anni di attivazione con funzionamento solo estivo, modello meno favorevole

5.3.3 Funzionamento sia invernale che estivo

In Figura 5.26 sono riportate le temperature registrate nei punti di osservazione nel caso di funzionamento sia invernale che estivo dell'impianto.

Da una prima analisi si osserva che, rispetto alle due ipotesi di funzionamento precedentemente analizzate, di anno in anno non si verificano dei cambiamenti importanti delle temperature registrate.

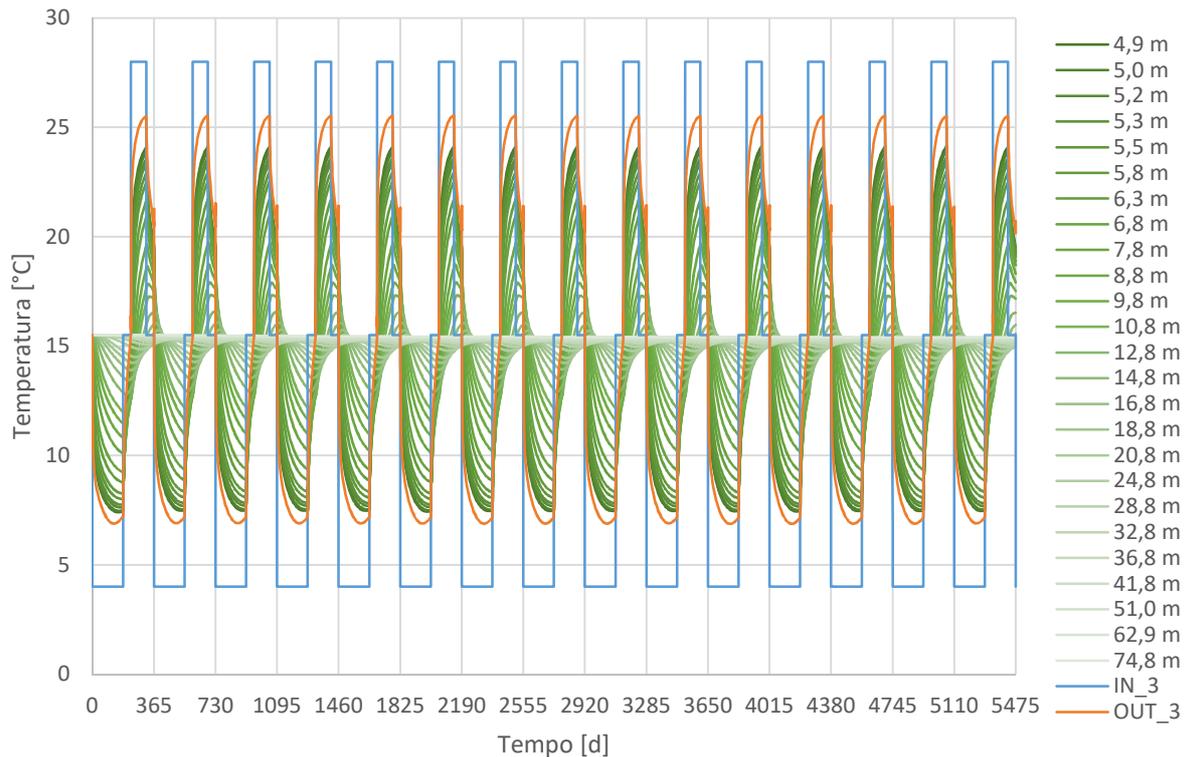


Figura 5.26. Temperature registrate nei punti di osservazione per 15 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello meno favorevole

In Figura 5.27 si riporta l'andamento nel tempo della potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria, q , calcolata per i periodi di attivazione come al paragrafo 4.4, a partire dalla differenza di temperatura in ingresso ed in uscita dalle serpentine. La potenza termica positiva indica che il calore è ceduto dal terreno al fluido circolante nelle serpentine, quella negativa indica che il calore è ceduto dal fluido al terreno. I valori minimi, in termini assoluti, relativi ad ogni ciclo di attivazione sono riportati in Figura 5.28, in modo da poterne osservare l'andamento. Sullo stesso grafico sono riportate, in grigio, le curve relative all'andamento della potenza scambiabile nel caso di funzionamento solo invernale (Figura 5.20) e solo estivo (Figura 5.24), al fine di avere un confronto visivo tra le diverse ipotesi di funzionamento dell'impianto. Si osserva che nel caso di funzionamento sia invernale che estivo q è circa costante e maggiore rispetto ai casi analizzati in precedenza: in inverno è possibile estrarre circa 0,71 kW/m, mentre in estate è possibile cedere al terreno circa 0,61 kW/m. Tale comportamento è dovuto alla mutua influenza tra i due fenomeni di estrazione di calore dal terreno nel periodo invernale e immissione di calore nel terreno nel periodo estivo: gran parte del calore perso dal terreno in inverno è quindi recuperato in estate e viceversa, perciò l'efficienza dell'impianto aumenta rispetto al caso di attivazione solo invernale o solo estiva.

5. Studio del comportamento stagionale

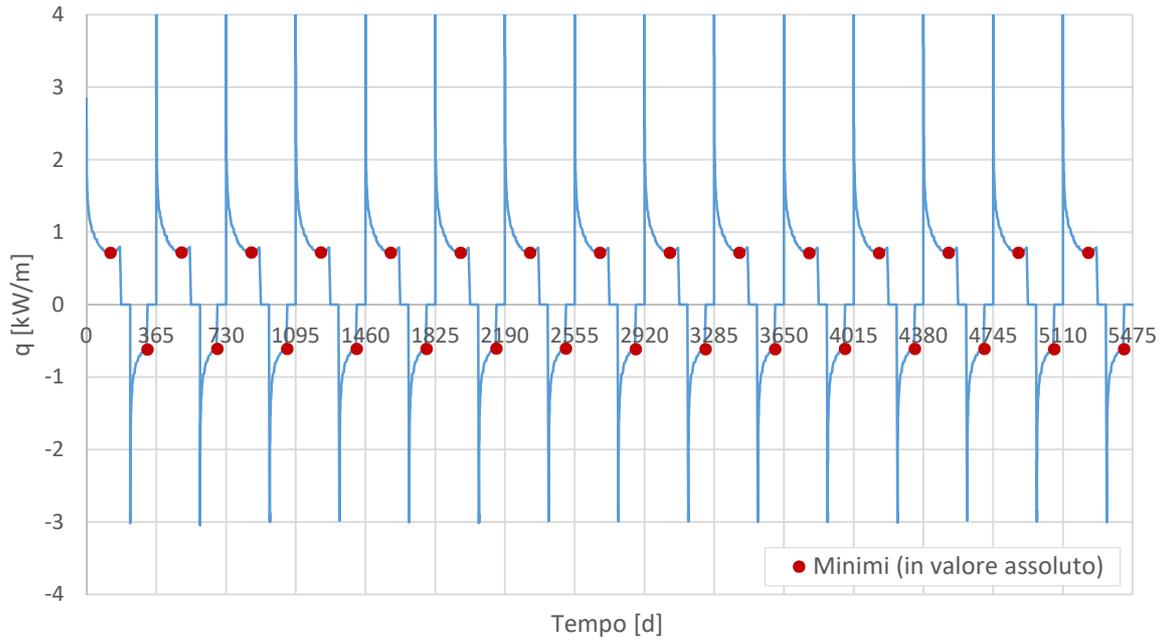


Figura 5.27. Potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello meno favorevole

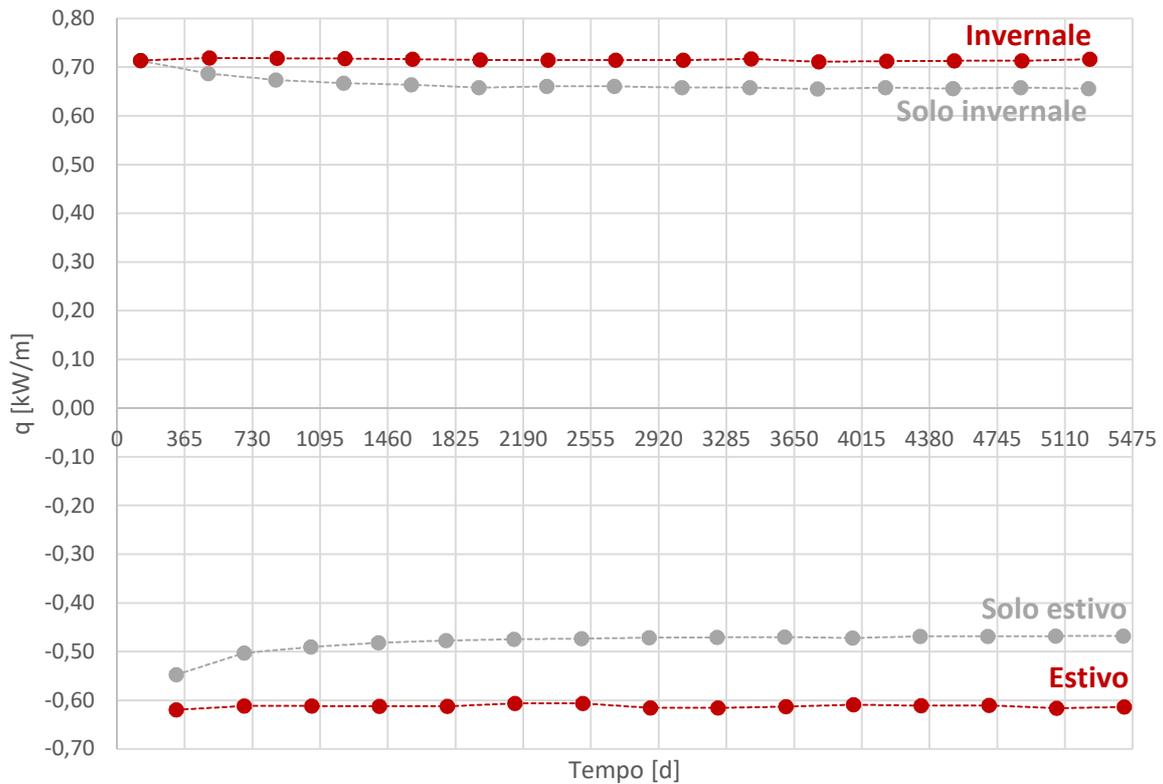


Figura 5.28. Andamento dei valori minimi di potenza termica scambiabile per metro lineare di galleria per 15 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello meno favorevole

5. Studio del comportamento stagionale

Per quanto riguarda la temperatura del terreno, si osserva un leggero raffreddamento, molto minore rispetto al caso di funzionamento solo invernale, dovuto al fatto che la potenza termica scambiata in inverno è di poco superiore a quella scambiata in estate. In Figura 5.29 si riporta, a titolo di esempio, l'andamento della temperatura in 5 punti a distanze diverse dal centro della galleria, in confronto alla temperatura di equilibrio del terreno, pari a 15,5 °C: si osserva che ad una distanza di 36,8 m dal centro della galleria, dove le oscillazioni legate all'andamento stagionale della temperatura dell'aria interna e all'attivazione ciclica dell'impianto sono trascurabili, la temperatura diminuisce di circa 0,3 °C.

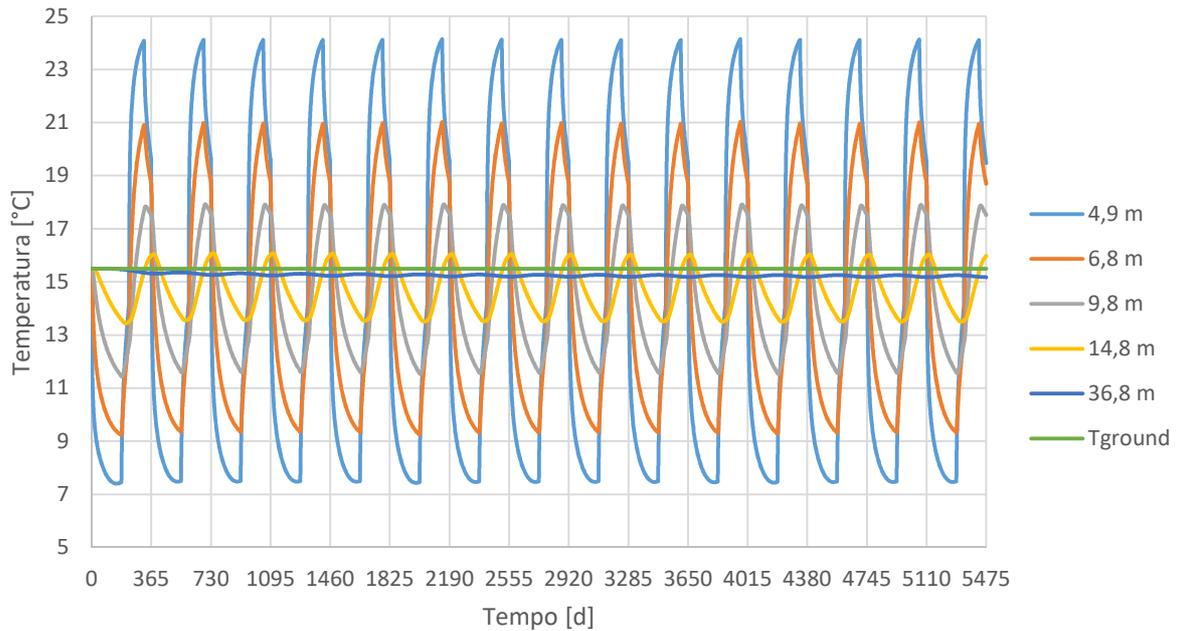


Figura 5.29. Temperatura misurata in cinque punti nel terreno a diverse distanze dal centro della galleria, per 15 anni di attivazione con funzionamento sia invernale che estivo, modello meno favorevole

6 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi è stato svolto al fine di studiare il comportamento termo-idraulico di una galleria attivata termicamente tramite l'integrazione di un impianto geotermico all'interno dei conci, realizzati con configurazione ENERTUN. In particolare, l'attenzione è stata posta alla potenza termica scambiabile e agli effetti indotti sul terreno.

La prima parte è stata dedicata all'individuazione della configurazione impiantistica ottimale sulla base delle condizioni esistenti in sito e del progetto della galleria stessa. A tal fine è stata condotta un'analisi costi-benefici, in cui i ricavi dipendono dalla potenza termica estraibile ed i costi sono legati al funzionamento idraulico del sistema.

La potenza termica scambiabile con il terreno dipende dalle condizioni esistenti in sito e dalla configurazione dell'impianto: essa è stata ottenuta da analisi numeriche agli elementi finiti condotte con il software FEFLOW, il quale consente di studiare il problema termo-idraulico accoppiato. Si è osservato che il calore scambiato per unità di metro lineare di galleria diminuisce all'aumentare degli anelli collegati termicamente in serie, cioè le cui serpentine sono collegate tra loro, perciò la configurazione più efficiente dal punto di vista termico risulta essere quella con tutti gli anelli collegati in parallelo al condotto principale. Inoltre, da uno studio del funzionamento in condizioni invernali ed estive, si è osservato che il calore estratto in inverno è maggiore rispetto a quello ceduto al terreno in estate.

I costi dell'impianto considerati sono complessivi dei costi di pompaggio e degli elementi che costituiscono l'impianto idraulico (tubazioni all'interno dei conci e manodopera per la loro installazione, raccordi che collegano le serpentine al condotto principale e posa delle tubazioni principali), perciò dipendono dalla configurazione dell'impianto e dalla velocità alla quale viene

pompato il fluido termovettore all'interno delle serpentine. Si è osservato che il costo giornaliero idraulico decresce all'aumentare del numero di anelli collegati in serie e al diminuire della lunghezza della galleria attivata termicamente.

Lo studio è stato applicato a due sezioni della Linea 2 della Metropolitana di Torino, caratterizzate da condizioni più e meno favorevoli allo scambio termico sulla tratta Verona-Novara, nella parte Nord-orientale della città. Sono state confrontate le configurazioni con 1, 2, 3, 4 e 5 anelli della galleria collegati termicamente in serie e le ipotesi di funzionamento di 365 giorni per 24 ore al giorno, 180 giorni per 24 ore al giorno e 180 giorni per 12 ore al giorno.

I risultati ottenuti dall'analisi costi-benefici mostrano come sia importante studiare la fattibilità economica dell'impianto sulla base delle condizioni in sito: la configurazione ottimale dipende dalle proprietà termo-idrauliche del terreno e dalla lunghezza della galleria da attivare termicamente, la quale è in genere determinata sulla base del progetto e della posizione dei pozzi di ventilazione e/o delle stazioni della metropolitana. Dal confronto tra i costi e la potenza termica estraibile per il caso studio in esame si è ottenuto che la configurazione ottimale per la sezione con proprietà più favorevoli allo scambio termico è quella con tutti gli anelli collegati in parallelo per lunghezze ridotte (fino a 300-400 m) e quella con gli anelli collegati in serie a due a due per lunghezze maggiori, mentre per la sezione con proprietà meno favorevoli allo scambio termico è quella con due anelli collegati in serie per tutte le lunghezze della galleria da attivare energeticamente prese in considerazione, cioè nell'intervallo tra 90 e 990 metri. Si sottolinea che la soluzione di galleria energetica risulta conveniente, in misura diversa, per entrambe le sezioni di studio, in quanto i ricavi ottenuti sono maggiori dei costi, a patto che venga scelta una configurazione impiantistica adatta. Inoltre i risultati riportati nella presente tesi, in termini di calore estraibile e di costi, sono sottostimati, in quanto ottenuti considerando ipotesi conservative:

- la potenza termica estraibile è ottenuta ipotizzando la temperatura all'interno della galleria costante per tutto il tempo della simulazione e pari al suo valore minimo in inverno e massimo in estate;
- la potenza termica estraibile, ottenuta dall'analisi numerica ipotizzando un funzionamento continuo dell'impianto, è utilizzata anche nell'ipotesi di funzionamento giornaliero di 12 ore;
- il calore estraibile ed i costi dell'impianto sono valutati senza tenere conto del processo di trasferimento termico effettuato dalla pompa di calore.

La seconda parte della tesi è stata incentrata sullo studio del comportamento stagionale della galleria energetica e degli effetti che l'attivazione termica della geostruttura comporta, considerando un funzionamento pluriennale dell'impianto e la variabilità delle condizioni al contorno nel corso

dell'anno. Tale studio è stato condotto svolgendo analisi numeriche attraverso il software FEFLOW. La configurazione dell'impianto adottata per tali analisi è quella con due anelli collegati in serie, in quanto è risultata ottimale per il caso studio in esame dall'analisi costi-benefici. Per entrambe le sezioni della ML2 già considerate nella parte precedente, sono state studiate tre ipotesi di funzionamento dell'impianto: solo invernale, solo estivo e sia invernale che estivo. L'attivazione invernale ha una durata di 6 mesi, dal 15 ottobre al 15 aprile, mentre l'attivazione estiva dura 3 mesi, dal 1 giugno al 31 agosto.

Nel caso della sezione con caratteristiche più favorevoli allo scambio termico, non si verifica una diminuzione dell'efficienza dell'impianto con il passare degli anni: la potenza termica estraibile dal terreno in inverno e cedibile al terreno in estate per metro lineare di galleria risulta costante da un anno all'altro e pari rispettivamente a 1,35 kW/m e 1,39 kW/m, sia per il funzionamento solo invernale o solo estivo, sia per il funzionamento sia invernale che estivo. Da un'osservazione dell'andamento delle temperature nell'intorno della galleria, si può affermare che l'attivazione ciclica dell'impianto e la variazione stagionale della temperatura dell'aria interna alla galleria provocano delle oscillazioni, tanto più ampie quanto più si è vicini alla galleria, che si ripetono ciclicamente ogni anno senza subire importanti variazioni.

Nel caso della sezione con caratteristiche meno favorevoli allo scambio termico, si osserva invece una diminuzione negli anni dell'efficienza termica dell'impianto circa dell'8% e 14,5% rispettivamente nei casi di funzionamento solo invernale e solo estivo. La potenza termica per metro di galleria estraibile in inverno e cedibile in estate tende a stabilizzarsi dopo i primi 6-8 anni ai valori rispettivamente di 0,66 kW/m e di 0,47 kW/m. Simulando l'attivazione dell'impianto nel periodo sia invernale che estivo si è ottenuta una potenza termica scambiabile circa costante da un anno all'altro e maggiore rispetto ai casi di funzionamento solo invernale e solo estivo: in inverno è possibile estrarre circa 0,71 kW/m, mentre in estate è possibile cedere al terreno circa 0,61 kW/m. Questi risultati mostrano che vi è un'influenza reciproca tra i fenomeni di estrazione del calore in inverno ed introduzione del calore nel terreno in estate. Dall'analisi dell'andamento delle temperature nell'intorno della galleria si sono osservati, oltre alle oscillazioni cicliche legate all'attivazione dell'impianto e alla variazione stagionale della temperatura dell'aria interna alla galleria, un raffreddamento del terreno nel caso di funzionamento solo invernale ed un riscaldamento del terreno nel caso di funzionamento solo estivo, entrambi dell'entità di circa 0,8 °C ad una distanza di 36,8 m dal centro della galleria, dove le oscillazioni sono trascurabili. Nel caso di funzionamento sia invernale che estivo, invece, si osserva un leggero raffreddamento, dell'entità di 0,3 °C alla distanza di 36,8 m dal centro della galleria.

Si può concludere, quindi, che è più conveniente, in particolare al peggiorare delle proprietà termoidrauliche del terreno, prevedere un funzionamento combinato dell'impianto in modo da prelevare calore in inverno e restituirlo in estate.

APPENDICE A: ANALISI COSTI-BENEFICI PER LA SEZIONE IN CONDIZIONI PIÙ SFAVOREVOLI DELLA ML2

Nella seguente appendice si riporta l'analisi costi-benefici effettuata sulla sezione che presenta le condizioni più sfavorevoli all'estrazione di calore sull'intero tracciato della ML2. Di seguito si riportano le classi dei parametri relativi alla sezione in esame, facendo riferimento alla tabella in Figura 4.2:

- F: classe 1 (galleria interamente al di sotto del livello di falda);
- T: classe 2 (temperatura compresa tra 15 e 16 °C);
- DF: classe 1 (flusso di falda ortogonale all'asse della galleria);
- I: classe 1 (gradiente di flusso compreso tra 0,25 e 0,4);
- Geo: classe 5 (terreno limoso-argilloso FAA/SAF).

I modelli su FEFLOW per la determinazione della potenza termica scambiabile sono realizzati allo stesso modo di quelli visti nel paragrafo 4.2, considerando proprietà e condizioni al contorno relative al terreno diverse. Per le proprietà del terreno sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 4.1 per il terreno FAA/SAF; è imposta una temperatura iniziale pari a 15,5 °C su tutto il modello ed un gradiente di flusso pari a 0,3 % nella direzione ortogonale all'asse della galleria. A seguito delle considerazioni effettuate per il modello meno favorevole nel paragrafo 4.3, si considera un tempo di simulazione di 210 giorni, divisi in 30 giorni di inizializzazione del modello e 180 giorni di attivazione termica dell'impianto. I risultati delle simulazioni in termini di temperatura uscente dalle serpentine dopo l'attivazione termica sono riportati per le 5 configurazioni, nel caso di funzionamento invernale ed estivo, nelle Figure A.1 e A.2; i valori dopo 180 giorni di attivazione dell'impianto sono riportati in Tabella A.1 e Figura A.3.

APPENDICE A: Analisi costi-benefici per la sezione in condizioni più sfavorevoli della ML2

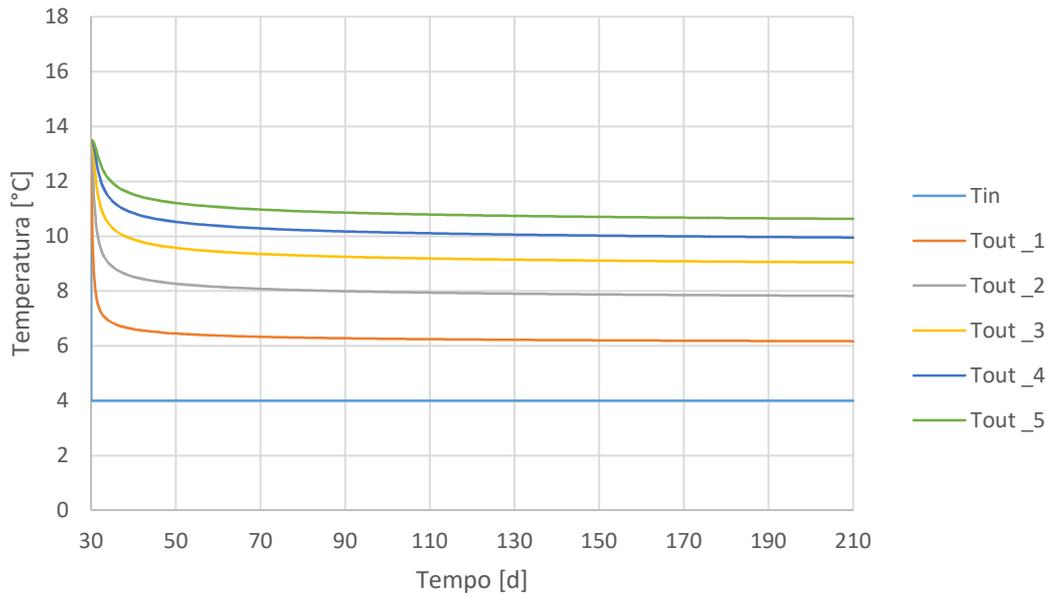


Figura A.1. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni dopo attivazione termica per 180 giorni, caso invernale

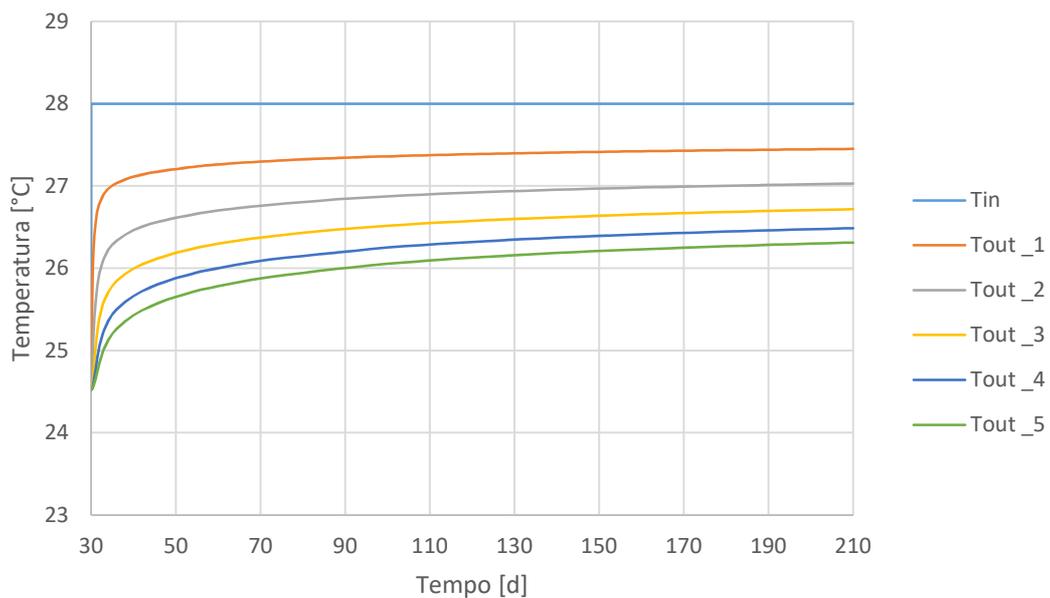


Figura A.2. Temperature in ingresso ed in uscita per le cinque configurazioni dopo attivazione termica per 180 giorni, caso estivo

Tabella A.1 Valori di temperatura in uscita dalle serpentine dopo 180 giorni di attivazione termica [°C]

Configurazione	caso invernale	caso estivo
1	6,17	27,45
2	7,82	27,03
3	9,05	26,72
4	9,96	26,49
5	10,63	26,31

APPENDICE A: Analisi costi-benefici per la sezione in condizioni più sfavorevoli della ML2

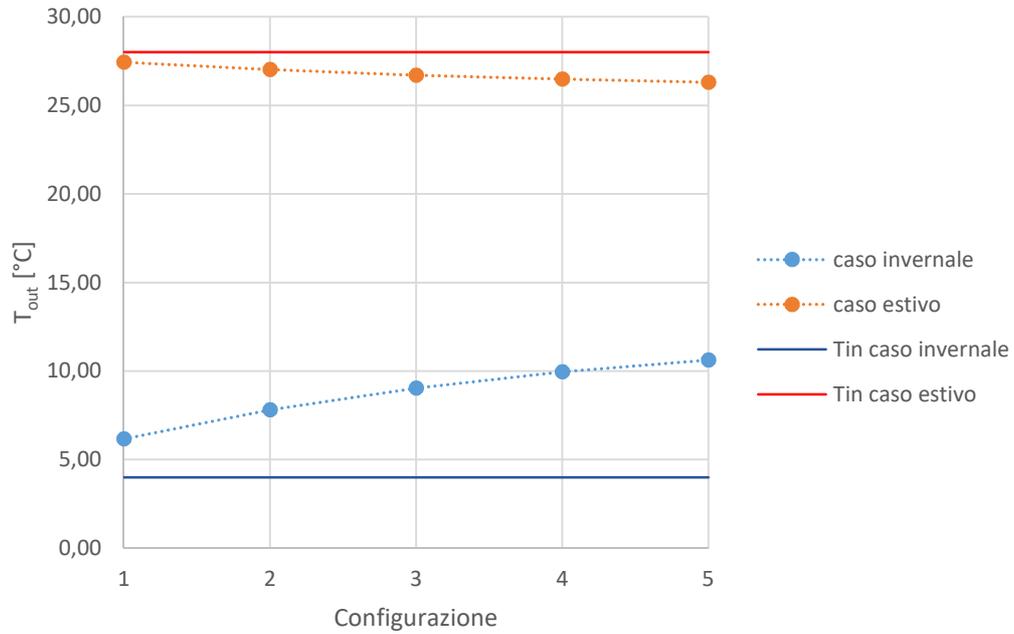


Figura A.3. Valori di temperatura in uscita dalle serpentine per le diverse configurazioni studiate [°C]

Il calcolo della potenza termica scambiabile Q e della potenza termica scambiabile al metro lineare di galleria q è effettuato come descritto nel paragrafo 4.4 ed i risultati sono riportati nelle Tabelle A.2 e A.3 e nelle Figure A.4 e A.5.

Tabella A.2. Potenza termica scambiabile nel caso invernale

Configurazione	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	ΔT [°C]	Q [kW]	L _{galleria} [m]	q [kW/m]
1	4	6,17	2,17	1,61	1,5	1,07
2	4	7,82	3,82	2,84	3	0,95
3	4	9,05	5,05	3,74	4,5	0,83
4	4	9,96	5,96	4,42	6	0,74
5	4	10,63	6,63	4,92	7,5	0,66

Tabella A.3. Potenza termica scambiabile nel caso estivo

Configurazione	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	ΔT [°C]	Q [kW]	L _{galleria} [m]	q [kW/m]
1	28	27,45	-0,55	0,41	1,5	0,27
2	28	27,03	-0,97	0,72	3	0,24
3	28	26,72	-1,28	0,95	4,5	0,21
4	28	26,49	-1,51	1,13	6	0,19
5	28	26,31	-1,69	1,26	7,5	0,17

APPENDICE A: Analisi costi-benefici per la sezione in condizioni più sfavorevoli della ML2

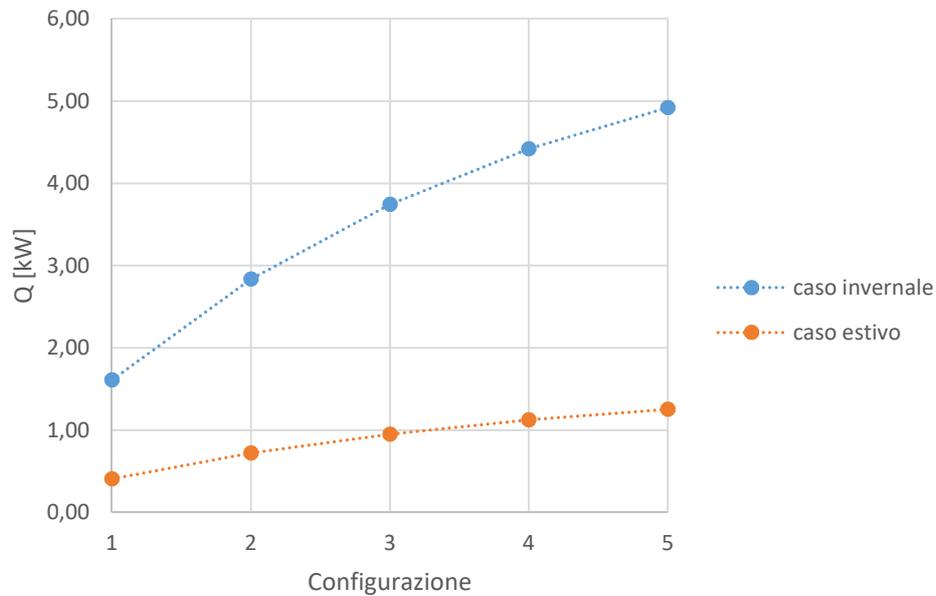


Figura A.4. Potenza termica scambiabile nei diversi casi studiati

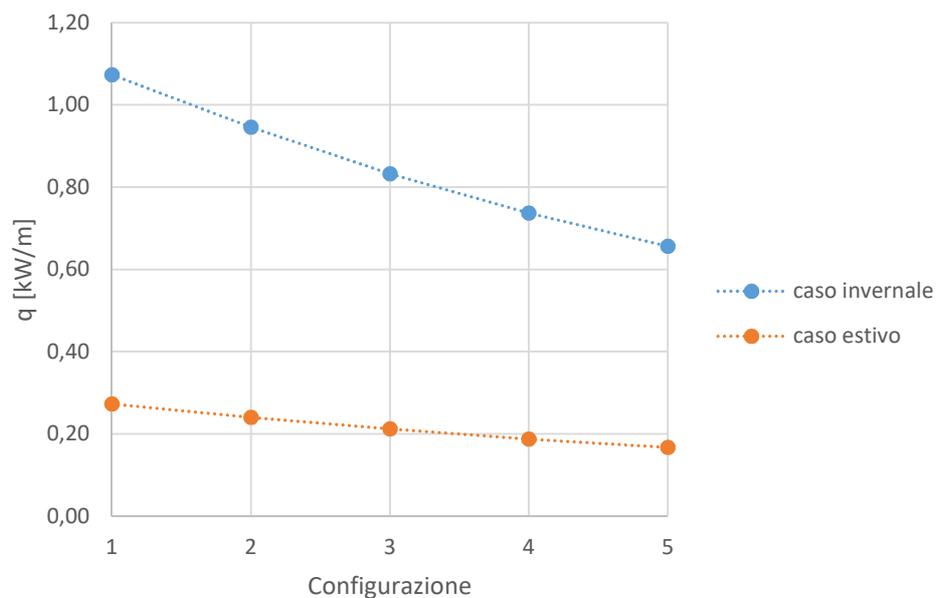


Figura A.5. Potenza termica scambiabile al metro lineare di galleria nei diversi casi studiati

Si procede al calcolo dei ricavi termici giornalieri al metro (Tabella A.4) come descritto nel paragrafo 4.6 e al loro confronto con i costi riportati nel paragrafo 4.5 nelle tre ipotesi di funzionamento dell'impianto considerate:

- Funzionamento per 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno;
- Funzionamento per 24 ore al giorno e 180 giorni all'anno;
- Funzionamento per 12 ore al giorno e 180 giorni all'anno.

APPENDICE A: Analisi costi-benefici per la sezione in condizioni più sfavorevoli della ML2

Tabella A.4. Ricavi termici giornalieri al metro lineare di galleria

Numero anelli collegati in serie [-]	q [kW/m]	Ricavi per 24 h [€/m]	Ricavi per 12 h [€/m]
1	1,07	2,14	1,07
2	0,95	1,88	0,94
3	0,83	1,66	0,83
4	0,74	1,47	0,73
5	0,66	1,31	0,65

Nelle Figure A.6, A.7 e A.8 vengono riportati i valori del rapporto tra ricavi e costi in funzione del numero di anelli collegati in serie e della lunghezza della galleria attivata termicamente.

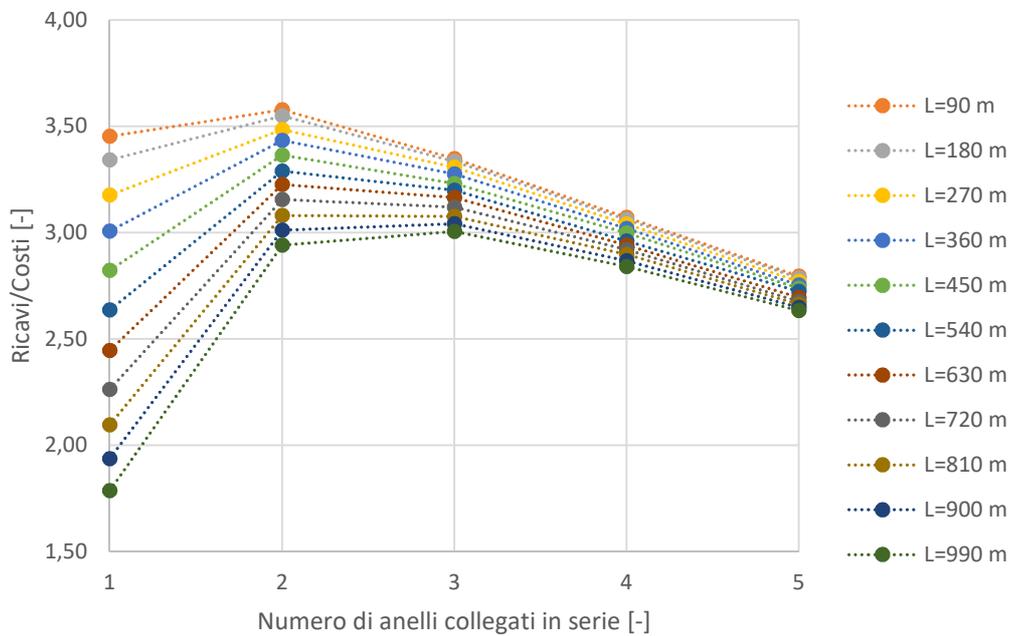


Figura A.6. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 365 giorni all'anno, modello meno favorevole

APPENDICE A: Analisi costi-benefici per la sezione in condizioni più sfavorevoli della ML2

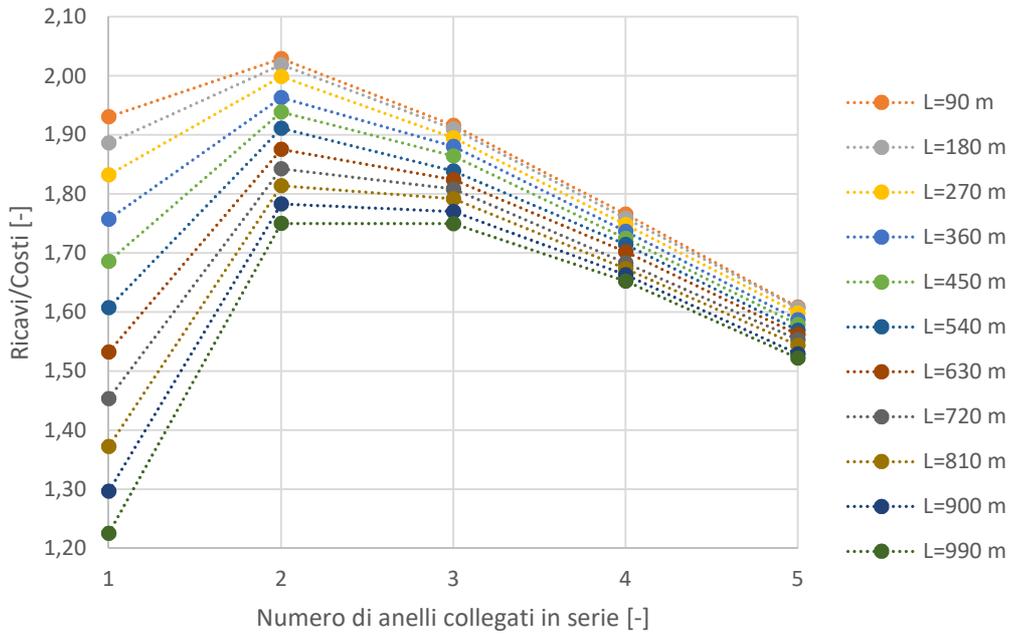


Figura A.7. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 24 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello meno favorevole

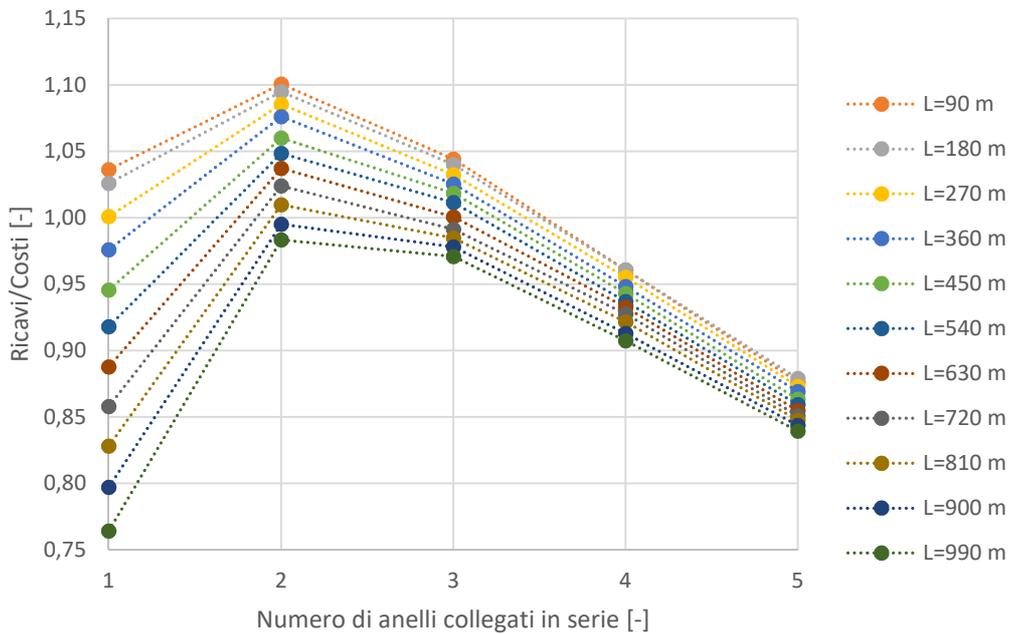


Figura A.8. Rapporto tra ricavi e costi al variare della configurazione dell'impianto e della lunghezza della galleria per un funzionamento di 12 ore al giorno e 180 giorni all'anno, modello meno favorevole

Dai grafici si osserva che la configurazione ottimale è quella con due anelli in serie per ogni ipotesi di funzionamento dell'impianto e per tutte le lunghezze della galleria prese in considerazione, ad eccezione del caso di funzionamento per 24 ore al giorno e per 365 giorni all'anno, per il quale con

lunghezze della galleria maggiori di 900 m diventa più conveniente la configurazione con tre anelli in serie.

L'ipotesi di funzionamento più conveniente risulta essere l'attivazione continua dell'impianto per tutto l'anno e per 24 ore al giorno: in un giorno la massima energia termica estraibile su una lunghezza della galleria di 90 m, nel caso di due anelli collegati in serie, è pari a 2043 kWh ad un costo di 47,4 € (ricavi/costi = 3,6). Tuttavia risulta più verosimile considerare un funzionamento di 180 giorni all'anno, considerando la sola stagione invernale: nel caso di attivazione dell'impianto di 24 ore al giorno la massima energia termica estraibile su una lunghezza della galleria di 90 m è pari a 2043 kWh ad un costo di 83,5 € (ricavi/costi = 2,0), nel caso di attivazione dell'impianto di 12 ore al giorno la massima energia termica estraibile su una lunghezza della galleria di 90 m è pari a 1021 kWh ad un costo di 77,0 € (ricavi/costi = 1,1), in entrambi i casi per la configurazione con due anelli collegati in serie.

Si nota che non sempre è conveniente la soluzione di galleria attivata termicamente: ad esempio in Figura A.8 si osserva che con un funzionamento di 180 giorni e 12 ore i ricavi sono inferiori o di poco superiori ai costi. Tuttavia, come espresso nel paragrafo 4.6, in tal caso i ricavi sono sottostimati.

BIBLIOGRAFIA

- Adam D., Markiewicz R. (2009), *Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers*, in *Géotechnique*, vol. 59, n. 3, pp. 229-236, Vienna
- Barla M., Baralis M., Insana A., Zacco F., Aiassa S., Antolini F., Azzarone F., Marchetti P. (2019), *Feasibility study for the thermal activation of Turin Metro Line 2*, in *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*, pp.231-240, Taylor and Francis Group, Londra
- Barla M., Di Donna A. (2015), *Gallerie energetiche in ambiente urbano*, IARG Incontro Annuale Ricercatori Geotecnica, Cagliari
- Barla M., Di Donna A. (2016), *Conci energetici per il rivestimento delle gallerie*, Strade e autostrade
- Barla M., Di Donna A. (2018), *Energy tunnels: concept and design aspects*, Dept. of Structural, Building and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino
- Barla M., Di Donna A., Insana A. (2019), *A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel*, Dept. of Structural, Building and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino
- Barla M., Di Donna A., Perino A. (2016), *Application of energy tunnels to an urban environment*, Dept. of Structural, Building and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino
- Brandl H. (2006), *Energy foundations and others thermo-active ground structures*, in *Géotechnique*, vol. 56, n. 2, pp. 81-122, Vienna
- Brandl H. (2016), *Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds*, in *Procedia Engineering*, vol.165, pp.747-764, Institute of Geotechnics, University of Technology, Vienna

- Candito G. (2020), *Studio di ottimizzazione dell'impianto idraulico di una galleria energetica*, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino
- Capodaglio P., Baietto A., Casasso A., Della Valentina S. (2018), *Geotermia a bassa entalpia: aspetti ambientali, energetici ed economici*, Il Progetto Interreg Alpine Space GRETA in Valle d'Aosta
- Casali E. (2015), *Pompe di calore. Tipologie, progettazione e benefici nell'utilizzo*, Dario Flaccovio Editore, Palermo
- DHI-WASY (2009), *White Papers Vol.I (FEFLOW)*, DHI-WASY GmbH, Berlino
- DHI-WASY (2010), *White Papers Vol.V (FEFLOW)*, DHI-WASY GmbH, Berlino
- Di Donna A., Barla M. (2015), *Il ruolo delle condizioni geotecniche sull'efficienza delle gallerie enregetiche*, IARG Incontro Annuale Ricercatori Geotecnica, Cagliari
- Dickson M.H., Fanelli M. (2004), *Cos'è l'Energia Geotermica?*, Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa
- Doninelli M. e M., Ardizzioia C., Prini E., Tadini M. e C., Carnevali G., Planca R. (2007), *Le pompe di calore*, Idraulica n°33, Caleffi, Poligrafica Moderna S.p.a., Novara
- Ferina D. (2019), *Geostrutture energetiche a bassa temperatura: integrazione in sistemi di teleriscaldamento*, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino
- Insana A., Barla M. (2020), *Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel*, Dept. of Structural, Building and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino
- Jing L. (2003), *A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering*, in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.40, pp.283-353, Division of Engineering Geology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- Karytsas S., Choropanitis I. (2017), *Barriers against and actions towards renewable energy technologies diffusion: A Principal Component Analysis for residential ground source heat pump (GSHP) systems*, Centre for Renewable Energy Sources and Saving (CRES), Geothermal Energy Department, Atene
- Laloui I., Di Donna A. (2011), *Understanding the behaviour of energy geo-structures*, in *Civil Engineering*, vol.164, pp. 184-191, ICE Publishing

BIBLIOGRAFIA

Ministero dello sviluppo economico, *Sintesi Piano di Azione Nazionale per le Energie Rinnovabili (direttiva 2009/28/CE)*

Politecnico di Torino (2020), *Studio dell'integrazione della galleria energetica (calore a bassa temperatura) nei sistemi di teleriscaldamento*, Rapporto n. 1902IREN_RL, pp.1-89

Pregliasco M. (2013), *Tettonica delle placche: Come funziona?*, ONC CAI Savona

Sommaruga C., Verdiani G. (1995), *Geotermia. Principi, ricerca, produzione*, La Nuova Italia Scientifica, Roma

Sterpi D., Coletto A., Mauri L. (2017), *Investigation on the behaviour of a thermo-active diaphragm wall by thermo-mechanical analyses*, Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano

Venzo G.A. (2006), *Il calore interno della Terra, una fonte gigantesca di energia*, Contributi della classe di scienze matematiche, fisiche e naturali, Acc. Rov. Agiati

www.energyhunters.it (2012), *Pompe di calore geotermiche: caratteristiche, vantaggi e svantaggi*, <http://www.energyhunters.it/pompe-di-calore-geotermiche-caratteristiche-vantaggi-e-svantaggi/>

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo lavoro di tesi, desidero dedicare qualche riga alle persone che hanno contribuito alla realizzazione dello stesso e che mi sono state vicine in questo percorso di crescita personale e professionale.

Un sentito ringraziamento va innanzitutto al Prof. Marco Barla e all'Ing. Alessandra Insana per la disponibilità, i consigli e l'attenzione con cui mi hanno guidato nella stesura della tesi.

E' doveroso inoltre ringraziare l'azienda GTT (Gruppo Torinese Trasporti) per i dati di temperatura dell'aria in galleria misurati lungo la Linea 1 della Metropolitana di Torino, utilizzati per definire le condizioni al contorno termiche del modello numerico.

Ringrazio i miei genitori per non avermi mai fatto mancare il loro sostegno e per i sacrifici che hanno fatto per permettermi di raggiungere questo traguardo. Grazie ai miei nonni, per il supporto e l'interesse con cui hanno seguito il mio percorso universitario. Grazie a Carola, mia sorella, per aver sempre creduto in me e avere dimostrato negli ultimi anni una forza che mi ha ispirato.

Grazie alle persone che ho conosciuto in questo percorso universitario a Torino e con cui ho condiviso studio, progetti, ansia, ma anche momenti di svago e divertimento: soprattutto grazie a loro questi anni sono ricchi di ricordi che mi porto dietro con una certa nostalgia. Grazie ai miei amici del primo piano sezione Crocetta del Collegio Einaudi, che sono stati per me una seconda famiglia.

Grazie ai miei amici biellesi, a chi in questi anni mi è stato vicino e mi ha aiutato ad affrontare le difficoltà incontrate con maggiore serenità, contribuendo indirettamente al raggiungimento di questo traguardo.