# POLITECNICO DI TORINO

# Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il territorio

Tesi di Laurea Magistrale

# Studio dell'interferenza reciproca tra impianti

# geotermici a bassa entalpia open-loop



# **Relatore:**

Ing. Alessandro Casasso

## Correlatori:

Prof. Rajandrea Sethi Ing. Simone Della Valentina

Candidato:

Enrico Marchetti

Sessione Luglio 2019

Indice

Abstract	1
Premessa	2
1 Introduzione	5
1.1 L'energia geotermica	5
1.1.1 Trasporto di calore nei mezzi porosi	7
1.2 Pompe di calore geotermiche	9
1.2.1 La pompa di calore	10
1.2.2 Impianti geotermici closed-loop	14
1.2.3 Impianti geotermici open-loop	15
1.3 Problemi di gestione degli impianti geotermici open-loop	17
1.3.1 Cortocircuito idraulico e termico	18
1.3.2 Propagazione dei plume termici	19
2 Modello concettuale e modello numerico	21
2.1 Il dominio di calcolo	21
2.1.1 Modello stratigrafico	23
2.2 Condizioni iniziali e al contorno	25
2.2.1 Condizioni al contorno e iniziali di flusso	26
2.2.2 Condizioni al contorno e iniziali di trasporto di calore	27
2.3 Parametri idrodinamici e termici acquifero	28
2.4 Carichi termici	29
2.5 Fattore di performance stagionale (SPF)	35
3 Risultati e discussione	37
3.1 Modello di validazione dei risultati	38
3.2 Risultati: spessore saturo $b = 40 m$	41
3.2.1 Carico termico in modalità di riscaldamento	41
3.2.2 Carico termico in modalità di riscaldamento e raffrescamento	54
3.3 Risultati: spessore saturo $b = 20 m$	57
3.3.1 Carico termico in modalità di riscaldamento	57
3.3.2 Carico termico in modalità di riscaldamento e raffrescamento	65
4 Conclusioni	70
Bibliografia	72

#### Abstract

Geothermal heat pumps are a valid solution to mitigate climate change, using the ability of aquifers to exchange heat with a heat pump and thus providing heating and/or cooling to buildings. The renewable energy resources represented by such exchange capacity is limited in space. Therefore, it is necessary to evaluate the mutual impact between geothermal installations in order to sustainably manage the presence of multiple plants, for instance in urban areas.

Through the FEFLOW numerical simulation software with finite element, numerical models of the subsoil were developed to assess the propagation of flow and heat in a shallow unconfined aquifer. Models were generated to assess the relative influence of the various parameters considered: distance between geothermal system, hydrodynamic properties of the aquifer, thermal power of heat pumps (and, hence, the flow rate exchanged with the aquifer), the time trend of the thermal load during the year (constant thermal load during the entire season vs monthly steps) in heating only mode and in heating and cooling mode. The domain of the model includes four geothermal plants installed along the groundwater flow direction, so the cumulate effect of upstream installations could be evaluated through the processing of modelling results. It turns out that the thermal power of upstream plants has a much larger influence on such impact than the distance between the geothermal systems themselves. Therefore, increasing the distance among open-loop geothermal systems.

Also, the impact of upstream installations on the Seasonal Performance Factor (SPF) of a certain plant is negligible, compared to how strongly the induced variation of operating temperatures could limit the possibility of exploiting shallow geothermal energy, especially in heating mode.

As for the discretization of thermal loads, the results assuming a constant thermal load applied during the entire season were compared with those applying constant monthly steps. It turns out that the former is a more conservative assumption, as it overestimates the thermal impact on downstream plants.

The work carried out in the thesis provides insights on the mutual interaction between openloop geothermal systems in urban areas and could support the sustainable management and the future expansion of the use of this technology.

#### Premessa

L'innalzamento delle temperature medie stagionali, l'incremento delle aree deserte e l'aumento di eventi metereologici estremi, rappresentano solo alcuni degli effetti legati ai cambiamenti climatici. La crescita demografica su scala mondiale e l'incremento inevitabile di persone che potranno accedere sempre più a beni e servizi nei prossimi anni sono solo alcuni dei fattori che prevedono per l'imminente futuro un significativo aumento della domanda di: cibo, acqua ed energia.

Già ad oggi, durante le giornate più calde nella stagione estiva la richiesta di energia elettrica aumenta notevolmente a causa della necessità di alimentare gli impianti di climatizzazione delle varie utenze: uffici, centri commerciali, abitazioni e insediamenti produttivi. A causa dell'incremento delle temperature medie stagionali sono attese nel breve futuro estati sempre più calde, con un prevedibile ulteriore incremento dei picchi di richiesta di energia per la climatizzazione. L'aumento delle aree deserte, oltre ad essere strettamente connesso alla problematica legata all'accesso alla risorsa idrica per le popolazioni coinvolte, può rappresentare su scala mondiale un ampliamento di luoghi richiedenti energia impiegata per raffrescare gli edifici. Periodi invernali con temperature inferiori a quelle attuali attesi per l'effetto di eventi meteorologici estremi, potrebbe generare un aumento dei consumi energetici legati al riscaldamento. Il recente sviluppo dell'isolamento termico delle costruzioni ha portato un miglioramento nelle prestazioni energetiche degli edifici nella stagione di riscaldamento, con tuttavia un aumento delle temperature interne nella stagione estiva, incrementando ulteriormente la domanda di energia elettrica necessaria al raffrescamento degli ambienti interni [1].

È noto ormai da tempo che la produzione di energia da fonti fossili, oltre a non avere un tasso di rinnovo sostenibile rispetto alle quantità e i tempi di consumo, a causa della reazione di combustione necessaria per il suo impiego emette in ambiente polveri sottili e gas serra, considerati i principali responsabili dei cambiamenti climatici, dell'effetto serra e del relativo riscaldamento globale.

La riduzione dei periodi di pioggia durante la stagione invernale genera un peggioramento della salubrità dell'aria, soprattutto nei centri urbani, diretta conseguenza dell'emissione nell'ambiente di gas e particolato prodotti dalla reazione di combustione di combustibili fossili necessaria ad alimentare la maggior parte degli impianti di riscaldamento.

L'energia geotermica rappresenta una possibile soluzione, ove sia possibile il suo impiego, sia per la produzione di energia elettrica e sia per il contenimento e/o abbattimento delle emissioni inquinanti durante le stagioni di riscaldamento e raffrescamento, soprattutto in aree urbane rispetto ai tradizionali impianti di climatizzazione. La pianura Padana per esempio rappresenta una possibile area in cui nel prossimo futuro potranno essere installati nuovi impianti geotermici, così da favorire il contenimento delle problematiche di inquinamento atmosferico che affliggono da tempo quest'area durante la stagione invernale legate all'accensione degli impianti di riscaldamento.

Al di sotto di questa superficie è presente un acquifero non confinato molto produttivo sebbene, in vaste aree, non idoneo a un utilizzo idropotabile. L'area padana è quindi potenzialmente adatta ad uno sfruttamento geotermico.

Sia l'energia geotermica e sia l'energia solare, oltre a provenire entrambe da fonti rinnovabili possono essere concretamente sfruttate sia per la generazione di energia elettrica e sia per la produzione di calore per il riscaldamento di utenze abitative, commerciali o industriali. Inoltre, l'utilizzo di pompe di calore geotermiche consente di contenere notevolmente i consumi di energia elettrica necessari alla produzione di calore sia per il riscaldamento e sia per il raffrescamento. Accoppiando questa tecnologia con un sistema di generazione di energia elettrica proveniente da fonte rinnovabile, quale energia: solare, idrica o eolica, le emissioni di inquinanti e gas serra nell'ambiente risulterebbero completamente abbattute rispetto alle odierne principali tecnologie di produzione di calore, le quali prevedono la combustione di combustibili di origine fossile, come gasolio e metano. Risulta quindi evidente come l'energia geotermica possa fornire un importante contributo in risposta sia alla crescente domanda di energia su scala mondiale e sia alla riduzione delle emissioni inquinanti nell'ambiente, incrementando la sostenibilità ambientale nelle aree urbane, sostituendo parzialmente i consumi energetici e le emissioni inquinanti prodotti dai combustibili fossili.

Tenuto conto dell'elevato potenziale dell'energia geotermica a bassa entalpia, per le configurazioni a circuito aperto si rende necessaria una valutazione quantitativa dell'interferenza reciproca tra questi impianti. In aree in cui è possibile prevedere un'elevata densità di questi impianti sarà necessario assicurare che l'installazione di un nuovo impianto geotermico non riduca le prestazioni energetiche di altri impianti geotermici presenti nello stesso acquifero. In particolare, durante le fasi di progetto di un nuovo impianto geotermico a circuito aperto occorre valutare che l'impatto generato da questo sulla falda non alteri in modo significativo le temperature di esercizio di impianti geotermici esistenti istallati nel medesimo acquifero.

In commercio sono disponibili alcuni software di calcolo, i quali consentono di simulare l'attività degli impianti geotermici e determinare una stima quantitativa dell'interazione reciproca tra essi. Per fare ciò occorre definire il modello numerico su cui il software eseguirà le simulazioni di attività degli impianti geotermici. Il modello numerico è definito dalle caratteristiche geometriche, stratigrafiche e dalle proprietà assegnate al dominio considerato. Le assunzioni sulle proprietà del dominio hanno carattere estremamente cautelativo così da adempiere allo scopo della tesi. Nel lavoro di tesi sono stati definiti diversi modelli numerici così da poter valutare l'interazione tra impianti geotermici a circuito aperto in diverse configurazioni.

Nella parte introduttiva del lavoro (Capitolo 1) seguono i riferimenti normativi nazionali all'energia geotermica, alla sua formazione e ai meccanismi di propagazione del calore nei mezzi porosi.

Viene inoltre descritto brevemente il funzionamento delle pompe di calore geotermiche presentando le due configurazioni di impianti geotermici a bassa entalpia: closed-loop e open-loop, descrivendo per questi ultimi i principali problemi di gestione: la corto-circuitazione termica e la propagazione del plume termico nell'acquifero.

Nel Capitolo 2 viene descritto il modello concettuale e numerico con cui è stato definito il dominio e le proprietà del modello numerico adottato per il lancio delle simulazioni. I modelli numerici generati combinano tra loro i diversi parametri considerati: proprietà idrodinamiche dell'acquifero, distanze tra gli impianti geotermici e modalità di applicazione del carico termico. In questo capitolo sono quindi descritte le proprietà geometriche, stratigrafiche, le condizioni al contorno e condizioni iniziali attribuite al dominio e impiegate dal software di calcolo per le soluzioni delle equazioni differenziali che descrivono il problema.

Nel Capitolo 3 sono presentati e discussi i risultati dell'attività di simulazione. Il modello numerico è stato dapprima validato rispetto ai risultati di soluzioni analitiche relative al problema del cortocircuito termico negli impianti open-loop. L'analisi dei risultati si concentra sull'alterazione delle temperature operative, e quindi del rendimento energetico, degli impianti a valle rispetto a quello più a monte, che opera in assenza di disturbi.

Il Capitolo 4 riporta infine le conclusioni del lavoro svolto.

#### 1 Introduzione

In questo capitolo si riportano alcuni cenni introduttivi all'argomento della tesi: la definizione di energia geotermica a bassa entalpia e i meccanismi di trasporto di calore nei mezzi porosi. Segue una breve descrizione del funzionamento della pompa di calore e delle varie tipologie di pompa di calore geotermica.

#### 1.1 L'energia geotermica

L'Unione Geotermica Italiana [2] definisce l'energia geotermica come l'energia termica immagazzinata nel sottosuolo.

In Italia il D. Lgs 22/2010 classifica le risorse geotermiche in: alta, media e bassa entalpia.

Sono definite risorse geotermiche: ad alta entalpia, se la temperatura del fluido rinvenuto è superiore a 150°C; media entalpia, se la temperatura del fluido reperito è compresa tra i 90 ÷ 150 °C e bassa entalpia, se la temperatura del fluido estratto è inferiore a 90 °C. Le prime sono sfruttabili per la produzione di energia elettrica mediante turbine a vapore; le seconde impiegate per usi diretti di teleriscaldamento o calore di processo industriale e le ultime adoperate per usi diretti di riscaldamento. In particolare, se la temperatura del fluido reperito è notevolmente inferiore ai 90 °C, l'adozione di pompe di calore geotermiche consente di estendere i campi di impiego di questa risorsa anche per la produzione di acqua calda sanitaria o per alimentare impianti di riscaldamento e/o raffrescamento di utenze commerciali, uffici, abitazioni o processi industriali.

Il lavoro di tesi è stato svolto considerando l'utilizzo della risorsa geotermica a bassa entalpia mediante pompe di calore con lo scopo di riscaldare e/o raffrescare gli ambienti interni degli edifici.

A livello nazionale non esiste una normativa unitaria e specifica sulla geotermia a bassa entalpia.

A livello regionale solo alcune Regioni hanno provveduto ad emanare leggi e regolamenti in materia.

A livello nazionale risulta quindi un quadro legislativo frammentato e incompleto, a livello regionale diversificato tra regione e regione. L'assenza di norme specifiche in materia genera un rallentamento nelle procedure burocratiche per le richieste di installazione degli impianti, ove previste, e conseguentemente un ostacolo agli investimenti in impianti geotermici.

Anche se non ancora attualmente in vigore, l'Ente Nazionale Italiano di Unificazione ha emanato tre norme UNI: 11466, 11467 e 11468 le quali definiscono rispettivamente i requisiti per: il dimensionamento e la progettazione, l'installazione e problematiche ambientali connesse alle pompe di calore geotermiche. Per le configurazioni impiantistiche che prevedono lo scarico dell'acqua in falda occorre fare riferimento al D. Lgs 152/2006, il quale concede agli impianti geotermici lo scarico diretto in acquifero, attività in generale vietata. L'energia geotermica ha origine dal decadimento radioattivo degli isotopi presenti negli strati più profondi della Terra, in particolare nel: nucleo, mantello e crosta terrestre.

La radioattività di questi elementi genera un flusso di calore, stimato tra i 50-70 mW m<sup>-2</sup>, in grado di propagarsi fino agli strati più superficiali della Terra. Tale flusso geotermico viene trasmesso verso la superficie principalmente per conduzione. Se il flusso geotermico proveniente dagli strati più profondi della terra durante la sua risalita impattasse con un'eventuale falda idrica, il calore appartenente al flusso verrebbe trasportato prevalentemente attraverso il meccanismo di advezione e dispersione. L'intensità del flusso sarà direttamente proporzionale alla conducibilità termica del mezzo, proprietà intrinseca del materiale incontrato dal flusso geotermico durante la sua risalita verso la superficie; essendo i materiali costituenti il sottosuolo spazialmente disomogenei, l'intensità del flusso sarà variabile da zona a zona. Tuttavia è possibile individuare un aumento della temperatura a partire da alcune decine di metri di profondità dalla superficie terrestre, di circa 3 K ogni 100 m. L'assorbimento dell'energia solare nel terreno e il relativo scambio di calore con l'aria presente in superficie generano un'alterazione termica limitata ai soli primi metri di crosta terrestre; in questi casi il loro contributo, al fine di un bilancio termico complessivo del sottosuolo può essere trascurato e si assume per questi strati una temperatura costante, pari alla temperatura media annua nella zona considerata. In generale, ad una profondità dalla superficie terrestre superiore i 10-15 m, le variazioni di temperatura indotte dalle fluttuazioni stagionali risultano trascurabili; oltre tali profondità la temperatura del sottosuolo potrà quindi essere assunta costante durante tutto l'anno. Questa peculiarità combinata alla presenza del flusso geotermico consente lo sfruttamento del sottosuolo a risorsa geotermica.

L'acqua presente nell'acquifero risulta anch'essa essere caratterizzata da una stabilità termica, derivante sia dal flusso di calore proveniente dagli stati più profondi della terra e sia dalla condizione quasi adiabatica dello strato insaturo soprastante la falda idrica. Il lavoro svolto nella tesi considera proprio il potenziale termico dell'acqua contenuta nell'acquifero, si ritiene dunque necessario definire i meccanismi di trasporto di calore nei mezzi porosi.

#### 1.1.1 Trasporto di calore nei mezzi porosi

In un sistema acquifero e più in generale in un mezzo poroso, si individuano tre meccanismi principali di trasporto del calore:

 CONDUZIONE: la trasmissione del calore avviene da zone a temperature maggiore, verso zone a temperatura minore, per effetto dello stato vibrazionale di atomi e molecole, definendo così a livello microscopico la condizione di eccitazione delle particelle atomiche. Questo meccanismo di trasporto è descritto dalla legge di Fourier, che nel caso 1-D risulta:

$$j_{c,x} = -\lambda \cdot \frac{\delta T}{\delta x}$$
 Equazione 1

in cui:  $j_{c,x}$  [W m<sup>-2</sup>] rappresenta il flusso di calore che si propaga per conduzione lungo la direzione x ,  $\lambda$  [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] la conducibilità termica e  $\frac{\delta T}{\delta x}$  la variazione di temperatura T [K] lungo la direzione di riferimento x.

 ADVEZIONE o convezione: trasporto di calore da parte di un fluido (in generale, gas o liquido) a causa del suo contatto con una matrice solida a diversa temperatura e il moto complessivo del fluido stesso. Analiticamente tale meccanismo di trasporto di calore viene descritto dalla legge di Newton:

$$j_{a,x_i} = \rho_w c_w \cdot u \cdot T$$
 Equazione 2

dove:  $j_{a,x}$  [W m<sup>-2</sup>] rappresenta il flusso di calore che si propaga per advezione lungo la direzione x,  $\rho_w$  [kg m<sup>-3</sup>] la densità dell'acqua,  $c_w$  [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] il calore specifico dell'acqua,

u [m s<sup>-1</sup>] la velocità di Darcy definita dal prodotto tra la conducibilità idraulica del mezzo poroso K [m s<sup>-1</sup>] e il gradiente idraulico *i*, infine *T* la differenza di temperatura tra la temperatura della matrice solida e quella del fluido con cui essa è a contatto.

 DISPERSIONE: trasporto di calore in un fluido a causa dell'eterogeneità del campo di moto generate da una distribuzione disomogenea della velocità dell'acqua di falda, a causa della eterogeneità in dimensione e in distribuzione dei pori in cui il fluido fluisce. La formula analitica che descrive tale fenomeno risulta:

rispetto alle formule precedenti restano da introdurre:  $\alpha_x$  il fattore di dispersività termica lungo la direzione di riferimento  $x_i \, e \, v_e \, [m \, s^{-1}]$  la velocità effettiva del fluido che attraversa il mezzo poroso, definita dal rapporto tra la velocità di Darcy e la porosità efficace  $n_e$ . L'equazione differenziale che descrive il trasporto di calore nei mezzi porosi è quindi:

in cui:  $\frac{\delta T}{\delta t}$  rappresenta la variazione di temperatura T[K] del fluido reperito nel tempo  $t[s]; D_x[m^2 s^{-1}]$ il coefficiente di dispersione termica sull'asse x, direzione per la quale si assume diretto il flusso di falda,  $D_y[m^2 s^{-1}] \in D_z[m^2 s^{-1}]$  i coefficienti di dispersione termica rispettivamente sugli assi y e z;  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \in \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$  le derivate seconde della temperatura rispetto alle direzioni  $x, y \in z; v_{th} [m^2 s^{-1}]$  la velocità di avanzamento del plume termico nel mezzo poroso;  $\frac{\delta T}{\delta x}$  rappresenta la variazione di temperatura lungo la direzione x; H [W m<sup>-3</sup>] la sorgente termica, cioè la densità di potenza;

 $\rho \cdot c$  [J m<sup>-3</sup>K<sup>-1</sup>] la capacità termica del mezzo poroso, cioè il prodotto tra la densità del mezzo e il suo calore specifico. All'inizio del Capitolo 1.3.2 si trova la definizione di plume termico.

Nell' Equazione 4 i fattori di dispersione termica, oltre a contenere il contributo di trasporto di calore dispersivo, tengono anche conto del meccanismo di trasporto per conduzione e sono così definiti:

$$D_x = rac{\lambda}{
ho \cdot c} + lpha_L \cdot v_{th}$$
 Equazione 5

$$D_{y=z} = rac{\lambda}{
ho \cdot c} + lpha_T \cdot v_{th}$$
 Equazione 6

In particolare, la conducibilità termica  $\lambda$  [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] influenza il meccanismo di trasporto di calore per conduzione. Rocce compatte e terreni saturi sono caratterizzati da valori di conducibilità termica maggiori rispetto a terreni sedimentari insaturi. Nei primi il contributo di trasporto di calore per conduzione risulta maggiore rispetto ai secondi.

Il meccanismo di trasporto di calore per dispersività termica genera sul plume termico effetti diversi a seconda della direzione considerata. Lungo la direzione di flusso della falda, il plume termico tende nel tempo ad allungarsi per effetto della dispersività termica longitudinale  $\alpha_L$ . Lungo le altre due direzioni principali, il plume termico tende nel tempo ad allargarsi per l'effetto della dispersività termica trasversale  $\alpha_T$ . I parametri di dispersività termica  $\alpha_L \alpha_T$  dipendono dalla scala dell'analisi e in genere assumono valori tra loro diversi.

Il plume termico avanza con una velocità  $v_{th}$  minore rispetto alla velocità con cui l'acqua si muove all'interno del mezzo poroso, cioè la velocità effettiva  $v_e$ . Il rapporto tra la velocità effettiva e la velocità con cui il calore si propaga nell'acquifero stesso definisce il fattore di ritardo termico  $R_{th}$  e, in genere, assume dei valori compresi tra 2 e 3. Il fattore di ritardo termico è anche definito dal rapporto tra la capacità termica del mezzo poroso  $\rho \cdot c$  e la capacità termica dell'acqua  $\rho_w \cdot c_w$ . Note velocità effettiva  $v_e$  e fattore di ritardo termico  $R_{th}$  nel mezzo poroso, il loro prodotto rappresenta la velocità di avanzamento del plume termico  $v_{th}$ . La capacità termica del mezzo definisce la quantità di calore scambiata a fronte di una variazione di temperatura di 1 K di un volume unitario del mezzo considerato. Dall' Equazione 4 emerge come l'aumentare della capacità termica del mezzo determini una variazione di temperatura nel tempo minore, a parità di potenza termica scambiata e medesimi fattori dei meccanismi che determinano il trasporto di calore.

#### 1.2 Pompe di calore geotermiche

Le pompe di calore sono delle macchine che consentono di trasferire calore da un corpo a temperatura minore ad uno a temperatura maggiore, fenomeno che non può avvenire spontaneamente in natura perché in violazione al secondo principio della termodinamica. Le pompe di calore possono essere classificate a seconda della sorgente con cui scambiano calore: aria, terreno o acqua (superficiale come fiumi, laghi e stagni o di falda). In particolare, l'energia geotermica a bassa entalpia consiste nella disponibilità della pompa di calore di scambiare calore con il terreno o con l'acqua disponibile nel sottosuolo, intese come sorgenti naturali: a temperatura maggiore durante la stagione di riscaldamento e a temperatura minore durante la stagione di raffrescamento, determinando così un risparmio energetico delle pompe di calore, tradotto in un incremento nei rendimenti delle pompe di calore stesse.

Negli impianti geotermici a bassa entalpia lo scambio di calore con il sottosuolo può avvenire mediante: pozzi di estrazione di acqua dall'acquifero, pali di fondazione, sonde verticali o orizzontali, a seconda della direzione in cui lo scavo è approfondito. La modalità con cui avviene lo scambio di calore con il sottosuolo determina la configurazione dell'impianto geotermico a bassa entalpia, il quale potrà essere: closed-loop (a circuito chiuso, Figura 4) o open-loop (a circuito aperto, Figura 5), rispettivamente approfonditi nel Capitolo1.2.2 e nel Capitolo 1.2.3. Infine, nel Capitolo 1.3 vengono descritti i principali problemi a cui occorre porre rimedio già durante la fase di progettazione e dimensionamento degli impianti geotermici legati all'interferenza termica tra l'acqua re-introdotta in acquifero con la risorsa idrica qui presente, con particolare riferimento alla propagazione del plume termico e ai fenomeni di cortocircuito idraulico e termico, così da evitare possibili riduzioni nei rendimenti delle pompe di calore geotermiche.

#### 1.2.1 La pompa di calore

Le pompe di calore sono delle macchine che consentono di trasferire calore da una sorgente a temperatura minore verso un'altra sorgente a temperatura maggiore, per farlo assorbono energia elettrica o, meno comunemente calore. Le pompe di calore elettriche possono essere impiegate in configurazione sia di riscaldamento (Figura 2) e sia di raffrescamento (Figura 3). Le pompe di calore ad assorbimento di calore sono principalmente adottate nella sola configurazione di raffrescamento, ad oggi poco installate e non considerate in questa tesi.

Gli elementi che compongono la pompa di calore sono connessi tra loro mediante un circuito chiuso, al cui interno circola un fluido refrigerante. La climatizzazione degli ambienti avviene sfruttando l'intero ciclo termodinamico a cui è sottoposto il fluido refrigerante.

In riferimento a Figura 2 e Figura 3 e la nomenclatura qui adottata, la pompa di calore è composta da quattro dispositivi principali:

- evaporatore: il fluido refrigerante passa dallo stato fisico di liquido a bassa pressione (o liquido freddo) allo stato fisico di vapore a bassa pressione (o vapore freddo); in raffrescamento è sfruttato il calore latente di evaporazione necessario alla trasformazione di fase, sottraendo questo direttamente dall'ambiente da raffrescare.
- 2) Compressore: attraverso l'apporto esterno di energia elettrica, il compressore comprime il fluido refrigerante, il quale passa dallo stato fisico di vapore freddo allo stato fisico di vapore ad alta pressione (o vapore caldo). Il compressore ha lo scopo di mantenere il salto di pressione tra l'evaporatore e il condensatore, così da ottenere le temperature del fluido refrigerante tali da consentire i passaggi di stato nei due scambiatori di calore.
- 3) Condensatore: il fluido refrigerante passa dallo stato fisico di vapore caldo allo stato fisico di liquido ad alta pressione (o liquido caldo); in riscaldamento è sfruttato il calore latente di condensazione rilasciato dal fluido refrigerante durante la trasformazione di fase all'ambiente da riscaldare.
- 4) Valvola di espansione: permette di ridurre la pressione del fluido refrigerante, il quale passerà dallo stato fisico di liquido caldo allo stato fisico di liquido freddo, così da riportare questo nello stato termodinamico iniziale e chiudendo infine il circuito.

I terminali che consentono lo scambio di calore tra il fluido refrigerante e gli ambienti interni da climatizzare sono il condensatore in configurazione di riscaldamento e l'evaporatore in configurazione di raffrescamento. Lo scambio di calore con l'ambiente esterno avverrà ad elementi invertiti, cioè evaporatore durante la stagione di riscaldamento e condensatore durante la stagione di raffrescamento.

Nelle applicazioni residenziali i terminali a cui si fa riferimento possono essere di tre categorie: radiatori (o definiti anche termosifoni), fan coils e i più recenti pannelli radianti. Oltre ad essere costituiti da materiali diversi sono anche caratterizzati da temperature di esercizio del fluido refrigerante diverse. Come visto, la pompa di calore consiste in un circuito chiuso al cui interno circola un fluido detto refrigerante. Gli elementi contenuti nel circuito sono: un condensatore, una valvola di espansione, un evaporatore e un compressore. In riferimento a Figura 1, il ciclo termodinamico del fluido refrigerante in modalità di riscaldamento prevede: la compressione del fluido refrigerante (1-2) uscente dall'evaporatore sottoforma gassosa a bassa pressione; l'aumento di pressione del fluido refrigerante genera un aumento di temperatura dello stesso, con passaggio dallo stato di vapore a bassa pressione a vapore ad alta pressione (o equivalentemente da vapore freddo a vapore caldo). Il contatto del fluido refrigerante con il condensatore (2-3), genera il passaggio di fase dello stesso, dallo stato fisico gassoso allo stato liquido, nello specifico da vapore ad alta pressione a liquido ad alta pressione (o da vapore caldo a liquido caldo). Il calore latente di condensazione rilasciato dal fluido refrigerante nella trasformazione di fase, viene ceduto all'ambiente riscaldato. Attraversando la valvola di espansione (3-4), il fluido refrigerante passa da liquido ad alta pressione a liquido a bassa pressione (o da liquido caldo a liquido freddo). Infine, il liquido refrigerante a bassa pressione attraversa l'evaporatore (4-1), da cui assorbe il calore necessario per il passaggio di fase da liquido a bassa pressione a vapore a bassa pressione (o da liquido freddo a vapore freddo). A questo punto il fluido refrigerante si ritrova nel punto di partenza del sul ciclo.

Durante la stagione invernale (Figura 2) viene sfruttato il calore latente di condensazione del fluido refrigerante ceduto all'ambiente da riscaldare.

Durante la stagione estiva (Figura 3) viene invertito il ciclo termodinamico percorso dal fluido refrigerante sottraendo il calore latente di evaporazione del refrigerante dall'ambiente da raffrescare, a beneficio dello stesso.



Entropia

Figura 1 Grafico entalpia- temperatura del ciclo termodinamico del fluido refrigerante utilizzato dalla pompa di calore.



Figura 2 Schema di una pompa di calore geotermica in configurazione di riscaldamento. Fonte: "The Cambridge renewable energy centre"<sup>1</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> https://cambridgeenergycentre.co.uk/our-ground-source-heat-pumps; visitato in data 13/03/2019



Figura 3 Schema di una pompa di calore geotermica in configurazione di raffrescamento. Fonte: "The Cambridge renewable energy centre"<sup>1</sup>.

La maggior parte delle pompe di calore non ha una regolazione di potenza, ma lavora sempre alla potenza di picco. Si rende quindi necessario un apposito accumulatore, posto tra la pompa di calore e il circuito dei terminali, il quale permette di ridurre la frequenza di accensione e spegnimento.

Come mostrato in Figura 4, la pompa di calore geotermica può essere accoppiata ad altri sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili, nell'esempio pannelli solari per la produzione di acqua calda o pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica. Indipendentemente dalla configurazione impiantistica adottata, l'energia elettrica alimenta sia la pompa di calore e sia l'intero impianto geotermico. L'assenza di emissioni nell'ambiente nel sito di installazione dell'impianto, rispetto all'utilizzo di caldaia a combustibili fossili o biomasse, rappresenta uno dei principali vantaggi del loro impiego e plausibile soluzione volta ad incrementare la sostenibilità ambientale nell'aree urbane.

L'elevata efficienza della pompa di calore e la possibilità di alimentare l'intero impianto mediante energia elettrica generata da fonti rinnovabili rende la geotermia a bassa entalpia una valida tecnologia in grado di contenere le emissioni di gas e particolato in ambiente, principali responsabili dei cambiamenti climatici.

Per poter confrontare i rendimenti energetici delle pompe di calore si possono definire vari coefficienti di performance, i quali rappresentano il rapporto tra la potenza (o l'energia) termica ceduta o assorbita, a seconda che si stia valutando la stagione invernale o la stagione estiva, con la potenza (o l'energia) elettrica necessaria a fornire o sottrarre calore. Il Coefficient Of Performance COP, rappresenta il coefficiente di prestazione della pompa di calore nella stagione invernale, periodo in cui la pompa di calore sarà impostata in modalità di riscaldamento. L'Energy Efficiency Ratio EER consente di

esprimere l'efficienza della pompa di calore durante la stagione estiva, periodo in cui la pompa di calore sarà in regime di raffrescamento.

Nell'ipotesi di utilizzare una pompa di calore ideale, cioè una pompa di calore che non generi un aumento di entropia del sistema durante le fasi di compressione ed espansione del fluido circolante all'interno della pompa di calore, il rendimento di tale macchina potrà essere determinato agevolmente a partire da una macchina termica che realizzi il ciclo di Carnot inverso. Per queste macchine ideali l'Equazione 7 e l'Equazione 8 consentono di esprimerne rendimento ed efficienza:

$$COP = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \qquad \qquad Equazione 7$$

$$EER = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \qquad \qquad Equazione 8$$

in cui  $T_2$  [K] rappresenta la temperatura della sorgente a temperatura maggiore e  $T_1$  [K] la temperatura della sorgente a temperatura minore.

Nella realtà le pompe di calore non eseguono un ciclo di Carnot ideale inverso, poiché durante le fasi di ciclo di compressione ed espansione, le macchine reali aumentano l'entropia determinando una diminuzione dei rendimenti delle pompe di calore rispetto ai casi ideali. Le performance di queste macchine possono essere stimate applicando un rendimento  $\eta_{Carnot} < 1$  rispetto ai valori di COP ed EER ideali.

Le più moderne pompe di calore geotermiche consentono di ottenere dei COP compresi tra 4 e 5.

I valori di EER risultano invece poco inferiori ai valori di COP. Dall' Equazione 7 emerge come elevati rendimenti delle pompe di calore siano possibili minimizzando la differenza di temperatura tra la sorgente a temperatura maggiore e la sorgente a temperatura minore. Tale aspetto risulterà determinante ai fine della valutazione dell'interferenza reciproca nelle prestazioni energetiche tra impianti geotermici a bassa entalpia.

#### 1.2.2 Impianti geotermici closed-loop

Gli impianti geotermici closed-loop (o a circuito chiuso) prevedono lo scambio di calore prevalentemente per conduzione, tra il terreno e un fluido termovettore circolante all'interno di un circuito idraulico chiuso composto da tubi posati nel sottosuolo e collegati alla pompa di calore geotermica.

Gli scambiatori di calore a sonde orizzontali sono installati nel terreno entro alcuni metri dalla superficie, tra 1÷4 m, profondità soggette ad alterazione termica giornaliera; sono quindi caratterizzati

#### Enrico Marchetti – Studio dell'interferenza reciproca tra impianti geotermici a bassa entalpia open-loop

da rendimenti inferiori e necessitano di elevate superfici a disposizione per la posa rispetto alle sonde verticali. Queste ultime consentono di ottenere buoni rendimenti energetici ma richiedono la realizzazione di pozzi profondi alcune centinaia di metri, tra  $50 \div 200$  m, con conseguente elevato costo iniziale legato alle opere di perforazione.

Pali geotermici e geo-strutture prevedono l'inserimento di sonde geotermiche per lo scambio di calore sfruttando, in genere per le nuove costruzioni, lo scavo necessario alla realizzazione di elementi strutturali, quali: pali di fondazione, conci, diaframmi e platee.

Gli impianti geotermici closed-loop possono essere installati nella maggior parte dei contesti geologici (esclusi per esempio siti soggetti ad instabilità), richiedono elevati investimenti iniziali ma sono caratterizzati da ridotti costi di manutenzione rispetto agli impianti geotermici open-loop.



Figura 4 Geotermia a bassa entalpia configurazione closed-loop.

#### 1.2.3 Impianti geotermici open-loop

Negli impianti geotermici open-loop (o a circuito aperto), come riportato in Figura 5, l'acqua di falda viene emunta da un pozzo di prelievo e inviata alla pompa di calore per lo scambio termico per essere poi re-introdotta nella stessa falda mediante un pozzo di re-immissione, così da evitare di depauperare l'acquifero. In alternativa al prelievo della risorsa idrica sotterranea, meno comunemente l'acqua viene sottratta da un corpo idrico superficiale e restituita all'ambiente in un corpo idrico ricettore, accertandosi che la differenza di temperatura tra l'acqua proveniente dallo scambio termico con la pompa di calore e quella presente nel corpo idrico superficiale sia inferiore a 3°C.

Negli impianti a circuito aperto risulta prioritaria la disponibilità della portata prevista per alimentare la pompa di calore geotermica. La possibilità di emungere acqua a una temperatura indisturbata nel tempo consente a questa configurazione di impianto geotermico un maggiore rendimento energetico rispetto alla configurazione closed-loop, in cui il terreno limitrofo alla sonda tende a riscaldarsi durante la stagione estiva e raffreddarsi durante la stagione invernale. Tuttavia, una temperatura di prelievo dell'acqua troppo fredda potrebbe compromettere il vantaggio di impiegare questa tecnologia durante il periodo di riscaldamento. Negli impianti in cui è previsto l'utilizzo dell'acqua di falda, oltre alla necessità di disporre di un acquifero potente e produttivo, occorre conoscere la soggiacenza media della falda idrica, poiché se troppo profonda, ne incrementa i costi necessari al pompaggio e alla manutenzione.



Figura 5 Geotermia a bassa entalpia configurazione open-loop.

Rispetto alla temperatura indisturbata dell'acqua di falda, per effetto della variazione termica applicata all'acqua dalla pompa di calore, l'acqua re-immessa sarà caratterizzata da una temperatura maggiore durante la stagione estiva e da una temperatura minore durante la stagione invernale. In prossimità del pozzo di re-immissione vi sarà quindi: un incremento del carico idraulico dovuto all'introduzione della risorsa idrica nell'acquifero e, la formazione di un plume termico generato dalla variazione termica tra l'acqua ri-introdotta in falda rispetto alle condizioni termiche indisturbate dell'acquifero. Nell'intorno del pozzo di prelievo invece, vi sarà una diminuzione del carico idraulico dovuto all'emungimento dell'acqua dalla falda, con la formazione di un cono di depressione legato all'effetto di richiamo dell'attività di pompaggio sulla risorsa idrica. L'estensione del cono di depressione sarà funzione sia della portata emunta dal pozzo di prelievo e sia dalle caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero.

I pozzi geotermici di prelievo e re-immissione dell'acqua dovranno essere posizionati ad una certa distanza tra loro, così da evitare il ripescaggio da parte del pozzo di prelievo dell'acqua re-introdotta dal pozzo di re-immissione, fenomeno definito di corto-circuitazione.

## 1.3 Problemi di gestione degli impianti geotermici open-loop

I principali problemi riscontrabili nella gestione degli impianti geotermici in configurazione open-loop sono legati alla formazione nell'intorno del pozzo di re-immissione di una zona con temperatura alterata dell'acqua di falda dell'acquifero.

La migrazione del plume termico dal pozzo di re-immissione può raggiungere sia il pozzo di prelievo dello stesso impianto geotermico, generando così una diminuzione del rendimento della pompa di calore stessa per effetto di corto-circuitazione termica, o raggiungere il pozzo di prelievo di un impianto geotermico installato a valle dell'impianto considerato, determinando un'alterazione della temperatura di prelievo dell'acqua dall'acquifero di questo impianto. Questi due fenomeni sono rispettivamente descritti nel Capitolo 1.3.1 e nel Capitolo 1.3.2.

È preferibile che lo studio e la stima delle proprietà dei plume termici avvenga attraverso la simulazione con opportuni modelli numerici [3], così da tener conto delle condizioni transitorie che descrivono il fenomeno, piuttosto che la soluzione di formule analitiche.

La presenza di una normativa strutturata e univoca favorirebbe l'installazione di questi impianti, tutelando il potenziale energetico della risorsa idrica presente nel sottosuolo assicurandone uno sfruttamento sostenibile ed effettivamente rinnovabile. Occorre garantire un metodo appropriato di prevenzione, monitoraggio e controllo sull'installazione di impianti geotermici open-loop tali da non monopolizzare il potenziale termico presente nell'acquifero, così da consentire a tutti i fruitori un accesso allo stesso potenziale termico. Risulta ancora necessario tutelare la qualità della risorsa idrica disponibile nelle sue caratteristiche: fisiche, chimiche e biologiche.

Sono disponibili dei protocolli, frutto del lavoro di alcuni gruppi di ricerca come quello proposto da [3], il quale propone di regolamentare l'installazione di impianti geotermici introducendo dei range di temperatura di re-introduzione dell'acqua in falda, tutelando in questo modo le proprietà prima citate: eque opportunità di sfruttamento del potenziale termico per tutti i fruitori, garantendo sostenibilità e qualità della risorsa idrica disponibile nell'acquifero.

L'attività microbica del sottosuolo sembra non subire conseguenze dovute alla propagazione del plume termico. Il limite esistente sulla differenza di temperatura dell'acqua scaricata dall'impianto geotermico nel corpo idrico superficiale consente di tutelare le specie acquatiche presenti.

Per gli impianti geotermici open-loop può ancora essere necessario gestire dei periodici interventi di manutenzione, atti a garantire un elevata efficienza del sistema di prelievo e re-immissione dell'acqua dall'acquifero e prevenire la proliferazione batterica nell'intorno del pozzo di re-immissione.

Nelle aree urbane il cui acquifero sottostante potenzialmente sfruttabile a scopi geotermici risultasse contaminato, si rende necessaria una valutazione preliminare all'installazione di impianti a circuito a aperto volta a prevenire la migrazione di contaminanti a causa dell'attività di pompaggio.

#### 1.3.1 Cortocircuito idraulico e termico

Uno dei principali problemi che occorre prevenire durante la fase di progettazione degli impianti geotermici open-loop riguarda il fenomeno definito come: "corto-circuitazione" e riportato schematicamente in Figura 5.

Si origina corto-circuitazione idraulica quando, parte dell'acqua emunta dal pozzo di prelievo deriva dall'acqua re-introdotta nell'acquifero dal pozzo di re-immissione; corto-circuitazione termica, quando l'acqua estratta dal pozzo di prelievo risente di una variazione termica, rispetto alla condizione indisturbata, derivante dalla temperatura dell'acqua re-immessa dal pozzo di re-iniezione.

Per prevenire l'instaurarsi di tale fenomeno sarà necessario anzitutto porre il pozzo di prelievo a monte, rispetto alla direzione di deflusso dell'acqua di falda e rispetto al pozzo di ri-iniezione; in secondo luogo i due pozzi dovranno essere separati da una distanza tale da evitare o, se non possibile, ritardare al più tardi il verificarsi di questo fenomeno, il quale determinerebbe un aumento dei consumi energetici della pompa di calore. Per questa ragione, la corto-circuitazione termica è preferibile che sia evitata. Il fenomeno di corto-circuitazione viene distinto in corto-circuitazione idraulica e termica poiché il calore si propaga meno velocemente rispetto alla velocità con cui si muove l'acqua all'interno del mezzo poroso, cioè la velocità effettiva  $v_e$ . Il rapporto tra le due velocità definisce il fattore di ritardo termico $R_{th}$ , come introdotto nel Capitolo 1.1., il quale descrive i meccanismi di trasporto del calore nei mezzi porosi.

Per evitare il verificarsi della corto-circuitazione idraulica e termica si può dimostrare che sia sufficiente rispettare la condizione:

$$X = \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot K \cdot b \cdot i \cdot L} < 1$$
 Equazione 9

in cui: Q [m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>] rappresenta la portata emunta dal pozzo di estrazione, K [m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>] conducibilità idraulica, b [m] spessore saturo, i il gradiente idraulico e L [m] la distanza tra il pozzo di estrazione e il pozzo di re-iniezione. X viene definita come riportato e rappresenta una variabile adimensionale.

Nell'ipotesi di emungere dalla falda una fissata portata Q e in definite condizioni idrodinamiche, la distanza tra i pozzi L per cui non si generi corto-circuitazione risulta:

$$L > \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot K \cdot b \cdot i}$$
 Equazione 10

Spesso, le configurazioni idrodinamiche degli acquiferi combinate con le portate necessarie da emungere per alimentare gli impianti geotermici open-loop richiederebbero distanze tra i doppietti *L* molto elevate, così da evitare di certo la formazione di corto-circuitazione, rendendo però impossibile la loro installazione. Un altro approccio, ai fini di ovviare al problema legato alla corto-circuitazione prevede di valutare il tempo necessario affinché si instauri tale fenomeno. Se tale tempo risultasse superiore alla stagione reale di utilizzo dell'impianto geotermico, definita durante la progettazione dell'impianto stesso, sarebbe necessario emungere acqua dall'acquifero per una durata superiore a quella reale della stagione considerata.

È quindi possibile definire il tempo  $t_{tb}$  [s] necessario affinché si generi corto-circuitazione tra i doppietti di un impianto geotermico open-loop:

$$t_{tb} = R_{th} \frac{n_e \cdot L}{K \cdot i} \cdot \left( \frac{X}{\sqrt{X-1}} \cdot tan^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{X-1}} \right) - 1 \right) \qquad \text{Equatione 11}$$

Sarà dunque possibile fissare la distanza tra il pozzo di prelievo e il pozzo di re-immissione dell'acqua di falda necessaria ad alimentare l'impianto geotermico, in modo tale da prevenire la cortocircuitazione idraulica, ma soprattutto termica entro la durata della stagione reale di funzionamento dell'impianto.

#### 1.3.2 Propagazione dei plume termici

Come precedentemente anticipato, per effetto dell'introduzione in falda di acqua a una temperatura diversa rispetto alla condizione indisturbata dell'acquifero, nello spazio intorno al pozzo di re-immissione degli impianti geotermici a circuito aperto, si genera una zona termicamente alterata rispetto alle condizioni termiche limitrofe. Nel linguaggio scientifico internazionale, tale area viene definita Thermal Affected Zone [4] e da origine al plume termico.

Come visto in precedenza, (riferimento al Capitolo 1.2.1 che tratta la pompa di calore) i rendimenti delle pompe di calore geotermiche sono strettamente connessi alle temperature di scambio termico tra le sorgenti. La temperatura di prelievo dell'acqua dalla falda inciderà dunque sulle prestazioni delle pompe di calore, in particolare nella stagione invernale, il prelievo di acqua a una temperatura inferiore rispetto alle condizioni indisturbate dell'acquifero diminuirà il rendimento previsto della pompa di calore; medesimo effetto si genererebbe se nella stagione estiva, il prelievo dell'acqua avvenisse a una temperatura maggiore rispetto alle condizioni termiche indisturbate.

Si rende dunque necessario uno studio preliminare dell'interferenza reciproca tra impianti geotermici open-loop, così da mantenere il più possibile invariate le temperature di prelievo dell'acqua dall'acquifero e di conseguenza i rendimenti delle pompe di calore previsti nella fase di progettazione dell'impianto anche durante l'attività degli impianti geotermici. Durante la progettazione di un nuovo impianto geotermico a circuito aperto occorre garantire quantitativamente che la propagazione del plume termico nell'acquifero generato dal pozzo di re-immissione del nuovo impianto non raggiunga, o al più alteri minimamente la temperatura dell'acqua emunta da un pozzo di prelievo di un impianto geotermico posto a valle.

Nelle aree caratterizzate da un'elevata densità di impianti geotermici open-loop, l'interferenza reciproca tra gli impianti può compromettere la sostenibilità degli impianti installati a valle, i quali potrebbero prelevare acqua a una temperatura alterata rispetto alle condizioni indisturbate.

La propagazione del plume termico può contribuire anche positivamente sui rendimenti delle pompe di calore geotermiche installate a valle. Infatti, se la perturbazione termica generata dall'impianto di monte raggiungesse il pozzo di prelievo di valle con una stagione di ritardo potrebbe incrementare i rendimenti di questa pompa di calore, almeno per una parte della stagione. Per esempio, l'acqua rintrodotta in acquifero nel periodo invernale dal pozzo di re-immissione di monte risulterà a una temperatura inferiore rispetto alla temperatura della risorsa idrica presente nell'acquifero. Nell'ipotesi che la migrazione di questo freddo raggiungesse il pozzo di prelievo dell'impianto di valle a partire dalla stagione estiva, la pompa di calore avrebbe un beneficio legato al fatto che la risorsa sarebbe emunta a una temperatura inferiore rispetto alle condizioni indisturbate, determinando così un incremento dell'efficienza energetica della pompa di calore installata a valle. L'approccio risulta analogo a stagioni invertite.

Lo studio della propagazione del plume termico e l'interferenza reciproca tra gli impianti geotermici consente inoltre di prevedere le temperature di re-introduzione dell'acqua nell'acquifero dal pozzo di re-immissione. La necessità di garantire una reale sostenibilità della risorsa idrica e di assicurare a tutti i possibili fruitori il medesimo potenziale geotermico ha portato in alcune aree l'adozione di protocolli specifici, i quali prevedono l'introduzione di temperature massime e minime dell'acqua re-introdotta in acquifero dopo lo scambio termico con la pompa di calore, rispettivamente per il periodo di raffrescamento e per il periodo di riscaldamento.

In particolare, in regime di riscaldamento occorre garantire che dallo scambio termico con la pompa di calore l'acqua non raggiunga temperature tali da generare una sua trasformazione di fase da liquido a solido. È necessario prevenire la formazione di ghiaccio nell'impianto poiché questo determinerebbe un danneggiamento delle componenti impiantistiche con un conseguentemente fermo impianto.

È quindi possibile prevedere una soglia di temperatura minima, così da prevenire l'insorgere di questo fenomeno. Inoltre, l'utilizzo di acqua a temperature troppo basse nel periodo di riscaldamento, come già precedentemente detto, riduce notevolmente il rendimento della pompa di calore.

#### 2 Modello concettuale e modello numerico

Allo scopo di valutare i possibili effetti legati all'interferenza reciproca tra impianti geotermici open-loop posti tra loro in serie sono stati creati dei modelli numerici che, mediante un apposito software di calcolo, riproducessero il trasporto di calore e di flusso instaurato nel mezzo poroso a seconda dei parametri idrodinamici caratterizzanti l'acquifero. Il modello numerico permette la soluzione delle equazioni differenziali che descrivono il problema attraverso la discretizzazione del dominio. Le simulazioni numeriche consentono quindi di valutare il possibile impatto di un impianto geotermico collocato a monte sugli impianti presenti a valle, definendo le variazioni di temperatura di prelievo dell'acqua di falda di questi impianti, rispetto alle condizioni indisturbate dell'acquifero. È perciò possibile prevedere le variazioni: dei rendimenti energetici delle pompe di calore degli impianti di valle, della temperatura minima e massima di re-immissione della risorsa idrica in falda, rispettivamente nel periodo di riscaldamento e raffrescamento rispetto ai valori assunti per questi impianti nella fase di progetto. Il discostamento dai parametri di progetto genera delle condizioni operative di esercizio diverse da quelle previste, con conseguente incertezza sulla durata e funzionalità degli impianti.

Le simulazioni sono state lanciate mediante FEFLOW, un software agli elementi finiti che consente di risolvere le equazioni di conservazione di massa, energia e quantità di moto, in ogni nodo appartenente al dominio definito; permette ancora di riprodurre sia il moto dell'acqua presente nell'acquifero e sia i flussi di calore e di massa presenti nel mezzo poroso, sia in condizione stazionaria e sia in condizione transitoria. Tale software può essere impiegato per simulare aspetti legati al trasporto di materia e di calore nel sottosuolo, viene perciò utilizzato per modellare problemi legati al trasporto di sostanze, per esempio inquinanti, valutazioni idrogeologiche o geotermiche.

#### 2.1 Il dominio di calcolo

Il dominio di calcolo definisce la porzione di spazio assunta nel modello numerico e rappresenta quindi il volume entro cui il software esegue la simulazione. Il dominio considerato è composto da una superficie di 800m x 3000m e da 5 layers come mostrato in Figura 9. Ciascun layer rappresenta un particolare strato del sottosuolo così come descritto nel Capitolo 2.1.1, il quale descrive il modello stratigrafico.

La mesh è stata generata a partire da un poligono esterno di forma rettangolare composto all'interno da triangoli, resi il più possibile equilateri, così da ridurre lo sforzo computazionale richiesto al calcolatore. All'interno di questo confine sono stati posizionati i punti coincidenti con la collocazione dei pozzi geotermici (Figura 6). Al fine di ridurre il più possibile l'incertezza nell'intorno di tali punti

è stata creata una rete di punti a forma di esagono, con al centro il singolo pozzo, allo scopo di infittire maggiormente, sempre con triangoli equilateri, tali aree del dominio di particolare interesse. La tesi non pone l'obiettivo nella stima delle dimensioni del plume termico generato dall'attività degli impianti geotermici, bensì di valutare le variazioni nei rendimenti di pompe di calore collegate ai doppietti posti in serie tra loro e le variazioni di temperatura nei pozzi di prelievo e re-immissione dell'acqua di falda, rispetto alle condizioni indisturbate dell'acquifero. Per questa ragione e tenuto conto del limite superiore di nodi utilizzabili imposto dal software, si è optato per la costruzione di un dominio che consentisse di rappresentare qualitativamente l'andamento del plume termico, infittendo la mesh nel solo intorno dei doppietti geotermici (Figura 7), così da incrementare l'accuratezza dei risultati generati dalle simulazioni nelle sole aree di interesse. La mesh è composta da 49626 nodi, che rappresentano i vertici degli elementi triangolari in cui è suddiviso il dominio. La versione accademica utilizzata nelle simulazioni, infatti, impone un limite massimo di 50000 nodi. È stato però appurato, come verrà mostrato più avanti, che la mesh utilizzata permette comunque di raggiungere una buona accuratezza del modello numerico.



Figura 6 Il poligono esterno definisce i confini del dominio del modello numerico, i punti rappresentano la posizione dei pozzi geotermici. Nel particolare si mostra l'esagono che circonda il pozzo posto all'interno, emerge, operazione necessaria per migliorare la precisione e risoluzione dei risultati nell'intorno dei pozzi.



Figura 7 Si riporta la mesh triangolare generata nel dominio. Nel particolare si nota come l'intorno dei pozzi abbia un'elevata densità di triangoli il più possibile equilateri, rispetto ai confini del dominio. I triangoli colorati in verde rappresentano dei triangoli con proprietà maggiormente proprie dei triangoli equilateri rispetto ai triangoli colorati in blu.

I pozzi di prelievo e re-immissione dell'acqua di falda dell'impianto geotermico sono stati posti a una distanza fissata e assunta pari a 50 m. Tale distanza consente di ridurre al minimo gli effetti di cortocircuitazione termica, rendendo questi trascurabili o comunque accettabili nella maggior parte dei modelli definiti.

Il primo impianto geotermico è stato posto ad una distanza di 500 m dal margine di monte della mesh, così da ridurre gli effetti di eventuali errori numerici generati dalla presenza delle condizioni al contorno su questo fronte. Le simulazioni sono state impostate sempre con 4 doppietti attivi posti in serie a distanze, costanti nella singola simulazione, ma variabili da simulazione a simulazione, così da poter valutare i diversi effetti di impianti geotermici open-loop nella stessa configurazione idrodinamica ma a distanze tra loro diverse, così come riportato in Figura 8.



Figura 8 Si riportano i quattro impianti geotermici, ciascuno composto da un doppietto, a distanze tra loro diverse.

Le distanze valutate tra i doppietti, cioè le distanze tra gli impianti geotermici, sono state di: 100, 150, 200 e 300 m. L'installazione degli impianti geotermici è stata ipotizzata lungo la medesima linea di deflusso dell'acquifero, rappresenta una configurazione cautelativa rispetto alla realtà ma adeguata ad adempiere lo scopo della tesi.

## 2.1.1 Modello stratigrafico

La discretizzazione del dominio di calcolo prevede la sua suddivisione in strati (layers) ai quali vengono assegnate proprietà omogenee lungo la verticale (mentre in orizzontale è possibile variarne il valore). In Figura 10 si riporta la rappresentazione schematica con cui è stato discretizzato il sottosuolo. Il primo layer rappresenta lo spessore insaturo. La soggiacenza della falda idrica è stata posta inizialmente pari a 10 m sull'intero dominio per tutte le simulazioni. L'attività dei pozzi di prelievo e re-immissione dell'acqua di falda attivi per il regolare funzionamento della pompa di calore geotermica, determinano una variazione della soggiacenza nell'intorno dei pozzi durante la simulazione, così come descritto nel Capitolo 1.2.3, nel quale è riportato il funzionamento degli impianti geotermici openloop.

La lunghezza, la profondità di inizio e di fine della finestratura dei pozzi geotermici sono state definite in funzione dello spessore saturo b, il cui valore varia a seconda delle caratteristiche idrodinamiche considerate. I doppietti geotermici sono ipotizzati di dimensioni e proprietà uguali tra loro, ogni pozzo ha raggio costante pari a 0,25 m. Tra la fine della finestratura del pozzo e l'inizio del tetto dell'acquitardo è stata assunta una distanza di 1 m così da tener conto sia dell'intestatura del pozzo stesso nell'acquitardo e sia per ridurre eventuali errori numerici generati dal software durante la fase di calcolo, legati all'utilizzo del plug-in open-loop.

È stato necessario imporre nel modello un elevato spessore dell'acquitardo, al fine di limitare gli effetti di propagazione del calore proveniente dai pozzi di re-immissione geotermici nei soli primi metri dell'ultimo strato.



Figura 9 Si riporta la finestra classica di modellazione 3-D del software FEFLOW, da cui emergono: dominio del modello, slides e layers appartenenti al modello stesso e il numero complessivo di nodi generati.



Figura 10 Si riporta l'associazione schematica tra la composizione del sottosuolo con i relativi layers creati nel modello. Le proprietà del layer sono state assunte equivalenti a quelli del mezzo poroso a cui loro sono idealmente riferite. Rappresentazione schematica e non in scala.

## 2.2 Condizioni iniziali e al contorno

In generale, a seconda dello scenario da simulare occorre introdurre nei modelli opportune condizioni al contorno e condizioni iniziali, così da permettere la soluzione delle equazioni differenziali che descrivono il problema. Il software FEFLOW supporta quattro condizioni al contorno:

- primo tipo o di Dirichlet, utile a fissare un valore ritenuto noto appartenete al dominio, come per esempio il carico idraulico o la temperatura dell'acqua di falda proveniente da monte;
- secondo tipo o di Neuman, fissa un flusso di calore o di massa, proveniente per esempio dai bordi adiabatici del dominio;
- terzo tipo o di Cauchy, utilizzato per un flusso di massa o di calore direttamente proporzionale alla differenza di carico idraulico o di temperatura; rappresenta una condizione mista tra il primo e il secondo tipo;
- quarto tipo o Multi-layers well, impiegata per estrarre o introdurre una portata in un nodo del modello.

#### 2.2.1 Condizioni al contorno e iniziali di flusso

Il flusso di acqua in acquifero è regolato dal carico idraulico e dalla conducibilità idraulica. Al modello numerico è stato assegnato come condizione al contorno del primo tipo il carico idraulico di monte e di valle (quest'ultimo determinato una volta fissato il gradiente idraulico), definendo così la direzione di flusso e assumendo nell'intero dominio un carico idraulico costante (Figura 11), ad eccezione dello spazio limitrofo ai pozzi, come descritto nel Capitolo 1.2.3. In particolare, nell'intorno del pozzo di prelievo il carico idraulico sarà minore a causa dell'effetto del pompaggio; nell'intorno dei pozzi di re-immissione il carico idraulico sarà maggiore in conseguenza della re-introduzione dell'acqua nella falda.

Nei punti in cui sono stati collocati i pozzi di prelievo e re-immissione dell'acqua di falda utilizzata dagli impianti geotermici è stato definito per ogni pozzo la condizione di quarto tipo, in cui sono state definite le caratteristiche dei pozzi.



Figura 11 Rappresentazione del carico idraulico con gradiente idraulico pari al 1%.

#### 2.2.2 Condizioni al contorno e iniziali di trasporto di calore

La temperatura del dominio nella parte di monte del modello numerico è stata definita impostando una condizione al contorno del primo tipo. In questo modo si assumono costanti le caratteristiche termiche dell'acqua di falda in ingresso nel dominio. Il primo pozzo di prelievo dell'impianto geotermico open-loop emungerà quindi acqua dall'acquifero a una temperatura indisturbata nel tempo, assunta pari a 14 °C, a meno di eventuale corto-circuitazione termica. Al tetto e alla base del modello è stata imposta una condizione al contorno di terza specie, con cui si definiscono le proprietà di trasferimento del calore in questi estremi del dominio, affinché sia garantita su questi bordi una temperatura costante nel tempo di 14 °C (Figura 12). L'equilibrio termico iniziale in cui si assume essere l'intero dominio permette di definire come condizione iniziale la temperatura nel sottosuolo, posta a 14 °C (Figura 13).



Figura 12 Condizione al contorno di trasporto di calore di terza specie applicata al dominio.



Figura 13 Condizione iniziale di temperatura definita per l'intero dominio e assunta pari a 14 °C.

#### 2.3 Parametri idrodinamici e termici acquifero

Come riportato nel Capitolo 2.1.1 che descrive il modello stratigrafico ipotizzato, il modello numerico realizzato assume la presenza di un acquifero libero limitato inferiormente da un acquitardo. I valori assegnati nelle simulazioni ai principali parametri idrodinamici dell'acquifero superficiale sono riportati in Tabella 1. Tali parametri sono stati attribuiti in modo tale da poter considerare un'ampia casistica di falde idriche potenzialmente sfruttabili mediante impianti geotermici a circuito aperto.

Tabella 1 Valori assegnati alle proprietà idrodinamiche dell'acquifero nei modelli impiegati nelle simulazioni.

Grandezze idrodinamiche acquifero	Valori		
Conducibilità idraulica $K \text{ [m/s]}$	10 - 3	3.10 - 4	10 - 4
Gradiente idraulico	10 - 2	3.10 - 3	10 - 3
Spessore saturo $b$ [m]	40	20	10

In Germania la normativa di riferimento assume che l'abbassamento massimo della falda atteso in prossimità del pozzo per l'attività di pompaggio sia al massimo pari a  $\frac{1}{3}$  dello spessore saturo *b*.

Tale abbassamento può essere stimato in via approssimativa dal rapporto tra la portata emunta dal pozzo di prelievo e la trasmissività dell'acquifero, definita dal prodotto tra la conducibilità idraulica e lo spessore saturo dell'acquifero stesso. Questa considerazione ha consentito di escludere le simulazioni in cui la configurazione dei parametri (idrodinamici dell'acquifero combinati con la portata emunta) potesse prevedere di lasciare nella condizione di secco il pozzo di prelievo dell'impianto, a causa dell'incapacità dell'acquifero di ricaricare il pozzo di prelievo. Valutato che la maggior parte delle simulazioni con spessore saturo di 10 m avrebbero generato abbassamenti in pozzo maggiori alla soglia definita, tali configurazioni sono state escluse dalle simulazioni.

La conducibilità idraulica riportata in Tabella 1 fa riferimento alla conducibilità idraulica orizzontale dell'acquifero libero. La conducibilità idraulica verticale è stata assunta minore di un ordine di grandezza rispetto alla conducibilità idraulica orizzontale dello strato di riferimento.

Per l'ultimo strato la conducibilità idraulica orizzontale è stata definita pari a 10<sup>-9</sup> m s<sup>-1</sup>.

Il rapporto tra il volume dei vuoti e il volume complessivo del mezzo poroso, cioè la porosità dell'acquifero, risulta n = 0,3.

Di seguito si riportano i valori attribuiti nel modello numerico ai parametri che determinano la propagazione del calore nel mezzo poroso, introdotti nei precedenti capitoli, di cui: dispersività termica longitudinale  $\alpha_{\rm L}$  =5 m, dispersività termica trasversale  $\alpha_{\rm T}$ =0,5 m, capacità termica della matrice solida  $\rho_s \cdot c_s$  =2,5 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> e la capacità termica dell'acqua  $\rho_w \cdot c_w$  =4,2 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>.

#### 2.4 Carichi termici

Le capacità termiche delle pompe di calore sono state scelte in modo tale da rappresentare un vasto campione di unità abitative e commerciali: singola villetta indipendente, condominio, albergo e/o modesto centro commerciale, alle quali si possono attribuire delle potenze termiche rispettivamente di circa: 10, 100, 300, 500 e 1000 kW. Si ritiene ragionevole che le pompe di calore geotermiche a circuito aperto applichino una variazione termica tra la temperatura di prelievo e la temperatura di re-immissione dell'acqua di  $\pm$  3°C. Nello specifico, durante la stagione di riscaldamento la variazione termica risulterà negativa; durante la stagione di raffrescamento la variazione termica sarà positiva. Definite dunque le potenze termiche dalle pompe di calore P [W] e la variazione termica  $\Delta T$  [K] applicata al fluido termo-vettore, nel nostro caso acqua, l'Equazione 12 consente di ottenere la portata Q [m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>] necessaria da emungere dalla falda per alimentare la pompa di calore geotermica:

L'Equazione 13 consente di ricavare l'energia elettrica necessaria ad alimentare la pompa di calore rappresenta cioè il consumo annuo di energia [Wh]:

$$Consumo \ annuo \ energia \ = \ \frac{Potenza \ termica \cdot HDD \cdot 24}{(20 - T_{esterna} \ progetto)} \qquad Equazione \ 13$$

in cui: *HDD* [°C] (Heating Degree Days) rappresentano i gradi giorno, grandezza che quantifica il fabbisogno termico necessario mediamente per mantenere una temperatura confortevole durante l'anno in una località, 24 è un fattore di conversione, 20 corrisponde alla temperatura interna di progetto dell'ambiente climatizzato e  $T_{esterna\ progetto}$  [°C] la temperatura esterna di progetto per la località scelta, temperatura di progetto minima nel periodo invernale e massima nella stagione estiva. Per il lavoro di tesi è stata adottata come località Torino. Per questa città il D.P.R. 412/1993<sup>2</sup> assegna la fascia climatica E, con stagione di riscaldamento prevista dal 15 ottobre al 15 aprile, in raffrescamento l'altra parte dell'anno. La normativa europea vigente per il calcolo del carico termico di progetto in riscaldamento UNI EN 12831 attribuisce a Torino per il periodo invernale una temperatura esterna minima di progetto di - 8°C e assegna alla città 2617 gradi giorno. I gradi giorno sono definiti dalla sommatoria delle sole differenze positive tra la temperatura dell'ambiente riscaldato assunta convenzionalmente 20 °C e la temperatura esterna media giornaliera.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Regolamento recante norme la progettazione, installazione, esercizio e la manutenzione degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia.

La sommatoria dei gradi giorno giornalieri, nell'arco del mese definisce i gradi giorno mensili e con riferimento all'intera stagione di riscaldamento fornisce HDD impiegato nella formula.

Dal sito di Arpa Piemonte<sup>3</sup> sono disponibili le temperature medie giornaliere registrate nelle stazioni da loro gestite, tra le quali sono stati considerati i dati rilevati nelle stazioni di: Torino - Alenia, Giardini Reali, Vallere, Via della Consolata e Reiss Remoli. In questo modo si sono ottenuti i dati utili a definire i gradi giorno giornalieri. Per l'ultima stazione non sempre risulta disponibile la temperatura media giornaliera nella stagione estiva, anche se non di primaria importanza per il calcolo di HDD in riscaldamento, la temperatura mancante è stata assunta come media delle temperature medie giornaliere registrate nelle altre stazioni considerate. Tra le varie stazioni disponibili sono state scelte le cinque stazioni in cui fossero disponibili i dati annuali di temperatura e per gli anni 2006 e 2008, anni in cui HDD annuo risulta simile a quello definito dalla normativa per Torino.

Il tempo di funzionamento dell'impianto geotermico è definito dal rapporto tra l'energia elettrica consumata annualmente dalla pompa di calore per generare la potenza termica di picco e la potenza stessa della pompa di calore o, equivalentemente dal prodotto tra i gradi giorno e il fattore di conversione 24, diviso la differenza di temperatura, tra la temperatura dell'ambiente riscaldato e la temperatura minima esterna di progetto. Da quest'ultimo approccio, il tempo di funzionamento dell'impianto risulta indipendente dalla potenza termica della pompa di calore, la quale però definisce la portata necessaria da emungere dal pozzo di prelievo per l'alimentazione della pompa di calore stessa. Il periodo di funzionamento mensile dell'impianto geotermico potrà quindi definirsi sostituendo, nel primo approccio il consumo di energia elettrica mensile al consumo annuo di energia e nel secondo i gradi giorno mensili ai gradi giorno della stagione climatica considerata.

La durata di attività delle pompe di calore è stata calcolata con il secondo metodo appena descritto sia per la stagione di riscaldamento e sia per la stagione di raffrescamento, per la quale occorrerà utilizzare i gradi giorni riferiti al periodo estivo e le corrette temperature di raffrescamento interne ed esterne di progetto. In raffrescamento la normativa di riferimento UNI 10339 assegna per la città di Torino una temperatura esterna di progetto di 30,5 °C. Nella stagione estiva il passaggio da una percezione di caldo a una sensazione di freddo risulta essere estremamente sottile rispetto alla stessa percezione nel periodo invernale. Infatti, la temperatura ambiente di 26 °C rappresenta la temperatura al di sopra della quale mediamente l'essere umano percepisce una sensazione di caldo, al di sotto di questa soglia mediamente si apprezza l'effetto del raffrescamento. Nella stagione estiva gli apporti di calore negli ambienti interni dovuti all'irraggiamento solare e alle fonti interne di calore, come elettrodomestici e apparecchi elettronici (sempre più presenti in tutte le tipologie di utenze sia nelle abitazioni, sia negli

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/selezione-gradi-giorno/selezione-gradigiorno.html

uffici e sia in centri commerciali) generano un effetto di incremento della temperatura interna. Questo elemento è stato tenuto conto calcolando un carico di raffrescamento utilizzando come temperatura di riferimento interna di 20 °C. Al di sopra di una temperatura esterna di 20 °C, quindi, compare il fabbisogno di raffrescamento.

In Tabella 2 vengono riportate le grandezze descritte in questo paragrafo, il consumo annuo di energia riportato si riferisce all'ipotesi di applicazione del carico termico a inizio mese. L'energia consumata con applicazione del carico termico costante per l'intera stagione risulterà essere definita dal prodotto della potenza termica di picco e il tempo di funzionamento della pompa di calore.

Tabella 2 Potenze termiche di picco, consumo annuo di energia sia in riscaldamento sia in raffrescamento e relative portate emunte dai pozzi geotermici ipotizzati nelle simulazioni.

Potenza termica di picco [kW]	Energia consumata in riscaldamento [MWh]	Energia consumata in raffrescamento [MWh]	Portata prelevata [1/s]
10	22,5	8,1	0,7
100	224.3	81,5	7,9
300	672,9	244,5	23,8
500	1121,6	407,5	39,7
1000	2243,1	841,9	79,4

In Figura 14 si riporta il confronto, espresso in percentuale, tra la durata di funzionamento delle pompe di calore rispetto alle ore complessive relative al periodo considerato. I mesi di dicembre e gennaio risultano i mesi in cui l'impianto geotermico è attivo per più tempo in regime di riscaldamento; per il mese di luglio si prevede un picco di utilizzo dell'impianto durante la stagione estiva. Emerge ancora come per la città di Torino gli impianti termici siano sbilanciati in un loro maggiore utilizzo nel periodo invernale rispetto alla stagione estiva. Per questa ragione i fabbricati di non recente costruzione spesso sono dotati di solo impianto di riscaldamento; in edifici più recenti, uffici, alberghi e centri commerciali invece, sono previsti impianti termici in grado di garantire un elevato confort sia nella stagione invernale e sia nella stagione estiva. Questa considerazione ha portato un ulteriore aspetto tenuto conto nella tesi, la valutazione di possibili variazioni del plume termico in configurazioni in cui il carico termico fosse applicato durante l'anno nella sola stagione di riscaldamento o in entrambe le stagioni, riscaldamento e raffrescamento.



Figura 14 Confronto, espresso in percentuale, tra il periodo di attività dell'impianto geotermico rispetto alla durata complessiva del periodo considerato.

Sono state introdotte le successive ipotesi di applicazione dei carichi termici così da bilanciare questi, con la necessità di alleggerire lo sforzo computazionale richiesto al calcolatore. I carichi termici ipotizzati sono applicati in modalità: costante durante l'intera stagione (Figura 16 e Figura 18), concentrando il carico termico mensile ad inizio del mese di riferimento (Figura 15 e Figura 17) o assegnando metà carico termico ad inizio mese e l'altra metà nella seconda parte del mese. Tenuto conto dello sforzo computazionale richiesto al calcolatore nell'elaborare il modello con applicato il carico termico due volte al mese e i risultati ottenuti, del tutto comparabili con quelli derivanti dall'ipotesi di applicazione del carico termico concentrato ad inizio mese, si è optato di ridurre tempi e quantità di simulazione da lanciare trascurando l'applicazione del carico termico due volte al mese.

In Figura 15 si riporta l'applicazione del carico termico concentrato all'inizio del periodo considerato sia in modalità di riscaldamento e sia in modalità di raffrescamento.

In Figura 16 si ipotizza l'applicazione di un carico termico costante durante l'intero anno sia in modalità di riscaldamento e sia in modalità di raffrescamento.

La Figura 17 mostra l'applicazione del carico termico concentrato all'inizio del periodo considerato nella sola modalità di riscaldamento.

In Figura 18 si riporta l'applicazione di un carico termico costante nella sola stagione di riscaldamento. Per tutti questi grafici, sull'asse secondario è stata riportata la variazione termica applicata all'acqua dalla pompa di calore, variazione negativa nel periodo invernale e variazione positiva nel periodo estivo.



Figura 15 Applicazione carico termico concentrato ad inizio mese in modalità riscaldamento e raffrescamento. Sull'asse secondario si riporta la variazione termica applicata all'acqua dalla pompa di calore geotermica, variazione negativa nella stagione invernale e positiva nella stagione estiva.



Figura 16 Applicazione carico termico costante durante l'intero anno in modalità riscaldamento e raffrescamento. Sull'asse secondario si riporta la variazione termica applicata all'acqua dalla pompa di calore geotermica, variazione negativa nella stagione invernale e positiva nella stagione estiva.


Figura 17 Applicazione carico termico concentrato ad inizio mese in sola modalità riscaldamento. Nella stagione estiva l'impianto geotermico si suppone spento. Sull'asse secondario si riporta la variazione termica applicata all'acqua dalla pompa di calore geotermica, per questo periodo la variazione risulta negativa.



Figura 18 Applicazione carico termico con modalità constante durante l'intera stagione di riscaldamento. Nella stagione estiva l'impianto geotermico si suppone spento. Sull'asse secondario si riporta la variazione termica applicata all'acqua dalla pompa di calore geotermica, nel periodo di funzionamento dell'impianto la variazione è negativa.

## 2.5 Fattore di performance stagionale (SPF)

Come riportato nel Capitolo 1.2.1 il quale descrive le pompe di calore geotermiche è possibile confrontare le prestazioni energetiche delle pompe di calore valutando il rapporto tra l'energia (o la potenza) termica ceduta o assorbita della pompa di calore, a seconda del periodo di climatizzazione di riferimento, rispetto all'energia (o potenza) necessaria per alimentare la pompa di calore stessa. Nello stesso Capitolo 1.2.1 erano anche stati definiti i coefficienti di performance: COP e EER.

Le più recenti pompe di calore geotermiche sono in grado di coprire le esigenze termiche sia in regime di riscaldamento e sia in regime di raffrescamento. Questo aspetto è stato tenuto conto nel lavoro di tesi applicando nelle simulazioni un carico termico di raffrescamento nel periodo estivo e un carico termico di riscaldamento nel periodo invernale.

Per valutare le prestazioni energetiche delle pompe di calore capaci di operare sia in modalità di riscaldamento e sia in modalità di raffrescamento si definisce il Seasonal Performance Factor (SPF) come rapporto tra l'effetto utile generato dalla pompa di calore e il suo consumo energetico e rappresenta un fattore di performance stagionale medio della pompa di calore stessa. Occorre precisare che il valore di SPF non rappresenta la media semplice dei valori di COP e/o EER, ma la loro media pesata in base al valore del carico termico.

Nell'Equazione 14 si riporta la dimostrazione per ricavare il valore di SPF. Il calore scambiato della pompa di calore  $Q_{scambiato}$  [kWh] (calore ceduto durante la stagione invernale o calore assorbito durante la stagione estiva) può essere espresso dal prodotto tra la potenza termica di picco della pompa di calore  $P_{picco}$  [kW] e le ore complessive di funzionamento della pompa di calore stessa N [ore]. Il consumo energetico della pompa di calore  $E_{elettrica}$ [kWh] potrà essere determinato dal rapporto tra la sua potenza termica  $P_{picco}$  [kW] e i valori istantanei dei coefficienti di prestazione energetica della pompa di calore, COP<sub>i</sub> in regime di riscaldamento ed EER<sub>i</sub> in regime di raffrescamento.

SPF sarà allora definito dal rapporto tra le ore complessive di funzionamento della pompa di calore e l'inverso della sommatoria dei coefficienti prestazionali orari della pompa di calore stessa, così come riportato in Equazione 14:

$$SPF = \frac{Q_{ceduta}}{E_{elettrica}} = \frac{P_{picco}*N}{\sum_{i=1}^{N} \frac{P_{picco}}{COP_{i}}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{COP_{i}}}$$
 Equazione 14

Nell' ipotesi che la pompa di calore possa essere utilizzata sia in modalità di riscaldamento e sia in modalità di raffrescamento, SPF sarà definito dal rapporto tra le ore complessive di funzionamento in entrambe le modalità e le sommatorie dell'inverso dei coefficienti di rendimento orari sia in regime di riscaldamento e sia in regime di raffrescamento. L'Equazione 15 esprime tale relazione:

$$SPF = \frac{N_{riscaldamento} + N_{raffedamento}}{\sum_{i=1}^{N_{riscaldamento}} + \sum_{i=1}^{N_{raffredamento}} \sum_{Equazione 15}^{1}}$$

Dai risultati ottenuti dalla modellazione in FEFLOW sono disponibili le temperature dell'acqua sia nei pozzi di prelievo e sia nei pozzi di re-immissione, per l'intera durata di funzionamento degli impianti geotermici. La durata complessiva della simulazione è stata impostata di 10 anni. A seconda che il carico termico sia applicato in modo costante durante l'intera stagione o concentrato all'inizio del mese, con lo scopo di valutare i rendimenti delle pompe di calore sono state considerate le sole temperature dell'acqua provenienti dai pozzi di estrazione durante i soli periodi di effettivo prelievo dell'acqua dall'acquifero. Al fine di disporre di dati di temperature con cadenza oraria, ove il dato risultasse assente è stato ottenuto mediante interpolazione lineare tra il dato di temperatura precedente e successivo rispetto al dato mancante, in questo modo per ogni pozzo di estrazione e per i soli periodi di reale funzionamento dell'impianto geotermico è disponibile il dato orario di temperatura. Applicando un rendimento  $\eta_{Carnot} = 0.4$ , come proposto in [5], rispetto alla performance energetica della pompa di calore ideale (così come descritto al Capitolo 1.2.1) risulta dunque possibile definire COP<sub>i</sub> o EER<sub>i</sub> reali, a seconda che il periodo di funzionamento sia di riscaldamento o raffrescamento.

Per il COP la temperatura della sorgente calda  $T_2$  sarà assunta pari a quella dello scambiatore e  $T_1$  sarà invece la temperatura dell'acqua proveniente dal pozzo di estrazione. Per l'EER invece, i termini  $T_2$  e  $T_1$  si invertono di significato rispetto al caso precedente. Al fine di poter tenere conto di un'ampia casistica di impianti geotermici, le temperature dei terminali sono state assunte per la stagione invernale pari a 50 °C e per la stagione estiva pari a 5 °C. Noti COP<sub>i</sub>, EER<sub>i</sub> reali e la durata complessiva di funzionamento della pompa di calore è possibile determinare agevolmente SPF.

Per la tesi è stato scritto un apposito codice MATLAB ai fini di stimare tutti i coefficienti di rendimento delle pompe di calore prima citati. Infine, si è valutata la differenza di temperatura massima e minima di re-immissione dell'acqua in falda rispetto alla condizione di acquifero indisturbato, con particolare attenzione a quei casi in cui la temperatura minima dell'acqua re-introdotta fosse in prossimità di 0°C, così da prevenire il passaggio di stato dell'acqua da liquido a solido con inevitabile fermo dell'impianto.

## 3 Risultati e discussione

Al fine di poter validare i risultati ottenuti dalle simulazioni occorre anzitutto assicurare la robustezza del modello numerico generato e descritto nel precedente capitolo, confrontando i risultati forniti dalle simulazioni rispetto ai risultati ricavati dalla soluzione delle equazioni analitiche e/o altri codici di calcolo già collaudati.

Nel Capitolo 3.2 e nel Capitolo 3.3 si riportano i risultati ottenuti dalle elaborazioni numeriche rispettivamente per spessori saturi di 40 e 20 m.

Al fine di tener conto delle variazioni di efficienza energetica stagionale e delle variazioni massime di temperatura positive e negative dell'acqua emunta dai pozzi di prelievo degli impianti geotermici openloop per effetto dell'alterazione reciproca tra gli impianti stessi, si introduce ancora il tempo di propagazione advettivo  $t_{adv}$ . Tale tempo è definito dal rapporto tra la distanza percorsa dal fronte advettivo e la sua velocità di propagazione. Nella tesi è stata assunta la distanza tra gli impianti geotermici, così da tener conto di questo elemento nei risultati. Come introdotto nel Capitolo 1.3.1 in cui sono descritti i fenomeni di cortocircuito idraulico e termico, la velocità con cui si propaga il calore nel mezzo poroso è definita dal rapporto tra la velocità effettiva  $v_e$  e il ritardo termico  $R_{th}$ . Si ricorda che la velocità effettiva rappresenta la velocità con cui l'acqua si muove nell'acquifero ed è determinata dal rapporto tra il prodotto del gradiente idraulico per la conducibilità idraulica dell'acquifero, fratto la porosità efficace dell'acquifero stesso. Questa grandezza consente quindi, fissato a priori spessore saturo e modalità di applicazione del carico termico, la stima delle grandezze in funzione della combinazione dei parametri idrodinamici assunti per l'acquifero, cioè: conducibilità idraulica e gradiente idraulico.

Per ogni configurazione considerata si riporta la variazione del rendimento energetico delle pompe di calore in funzione del tempo di propagazione advettivo, le variazioni di temperature positive e negative attese nei pozzi di prelievo ritenute maggiormente significative, rispettivamente in regime di raffrescamento e riscaldamento, rispetto alle condizioni termiche indisturbate dell'acquifero.

Per le configurazioni i cui risultati mostrano potenziali temperature minime critiche di re-immissione dell'acqua in acquifero vengono riportate le temperature minime raggiunte nelle simulazioni.

Il modello assume una temperatura indisturbata dell'acquifero pari a 14 °C. Per prevenire dei fermi impianto forzati occorre quindi prestare attenzione a configurazioni con carichi termici e proprietà idrodinamiche simili a quella considerate ma con temperatura indisturbata dell'acquifero minore rispetto quella ipotizzata. Per le configurazioni con spessore saturo pari a 40 m e carico termico nella sola stagione di riscaldamento sono stati confrontati i risultati ottenuti dall'applicazione del carico termico costante con il carico termico a inizio mese.

### 3.1 Modello di validazione dei risultati

La robustezza del modello numerico creato e utilizzato per il lancio delle simulazioni è stata verificata confrontando i risultati generati dal software FEFLOW, con i risultati forniti dall'applicazione di un codice disponibile open source basato sull'approssimazione alle differenze finite della teoria del flusso potenziale [6]. Tale codice, chiamato Thermal Recycling Simulator (TRS), consente soprattutto per gli impianti geotermici open-loop di piccola taglia, un efficace e rapido approccio volto a prevenire il fenomeno di corto-circuitazione. Il codice, indispensabile nella fase di progettazione, compilato con i dati necessari in input restituisce: in funzione del tempo la variazione di temperatura dell'acqua emunta dal pozzo di prelievo, il tempo entro cui avviene la cortocircuitazione termica e la percentuale massima di acqua ricircolata. Definite le configurazioni idrodinamiche dell'acquifero da voler simulare sono quindi state lanciate delle simulazioni con il software FEFLOW, in cui le portate prelevate dalla falda da parte di un doppietto generassero volutamente corto-circuitazione termica. Per una maggiore stabilità dei risultati, il tempo di simulazione è stato assunto pari a 10 anni, in questo modo il codice numerico TRS raggiunge la temperatura massima asintotica di alterazione termica nel pozzo di prelievo a causa dalla cortocircuitazione termica. Per verificare la robustezza del modello creato si è supposto un solo doppietto geotermico attivo, così da evitare la possibile interferenza termica generata dall'attività degli altri doppietti. La robustezza del modello generato è stata dunque valutata confrontando i risultati dell'alterazione termica nel pozzo di prelievo dell'acqua di falda dovuti all'effetto della cortocircuitazione termica, ottenuti dalla simulazione mediante il software FEFLOW e dall'implementazione del codice numerico TRS. Più l'alterazione termica dell'acqua nel pozzo di prelievo, o equivalentemente la temperatura dell'acqua estratta dall'acquifero risultano simili tra i due metodi, maggiore sarà la robustezza del modello numerico creato.

In Tabella 3 si riportano i valori dei parametri principali assegnati al codice numerico e al modello numerico impiegati per il confronto dei risultati ottenuti dai due metodi, in cui K rappresenta la conducibilità idraulica, *i* il gradiente idraulico, *b* lo spessore saturo,  $n_e$  la porosità efficace e L la distanza tra il pozzo di prelievo e il pozzo di reiniezione.

Tabella 3 Si riportano i valori dei parametri assunti per la validazione del modello numerico.

K [m/s]	i	b [m]	n <sub>e</sub>	L [m]
10-3	10-2	40	0,2	50

Si sono così confrontati i risultati ottenuti dall'implementazione del codice numerico TRS con i risultati elaborati dal software FEFLOW. Il confronto è avvenuto ipotizzando diverse portate di prelievo di acqua di falda, assunte pari a: 40, 50, 80 e 100 l/s e mantenendo costanti i parametri riportati in Tabella 3. Di seguito si riporta un confronto grafico dei risultati ottenuti per le sole portate di 50 e 100 l/s. In Figura 19 e in Figura 20 si riporta il confronto grafico dell'alterazione termica dell'acqua emunta dal pozzo di prelievo per effetto della corto-circuitazione termica, rispettivamente per portate estratte dall'acquifero pari a 50 e 100 l/s ottenute dai risultati della simulazione numerica in FEFLOW e dal codice numerico TRS.



Figura 19 Confronto grafico sulla variazione di temperatura dell'acqua nel pozzo di prelievo per effetto della corto-circuitazione termica prevista dai risultati della simulazione numerica in FEFLOW e il codice numerico TRS. Portata emunta dal pozzo pari a Q = 50 l/s.



Figura 20 Confronto grafico sulla variazione di temperatura dell'acqua nel pozzo di prelievo per effetto della corto-circuitazione termica prevista dai risultati della simulazione numerica in FEFLOW e il codice numerico TRS. Portata emunta dal pozzo pari a Q = 100 l/s.

Valutata la modesta differenza dei risultatati generati dai due diversi metodi si ritiene che il modello numerico generato sia sufficientemente robusto per adempiere agli scopi della tesi fornendo risultati attendibili.

# 3.2 Risultati: spessore saturo b = 40 m

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dall'elaborazione ipotizzando uno spessore saturo dell'acquifero pari a 40 m. Tale spessore saturo consente di ottenere dei risultati per tutte le proprietà idrodinamiche considerate.

Nel Capitolo 3.2.1 si riportano i risultati per gli impianti operanti solo per riscaldamento, mentre nel Capitolo 3.3.2 si riportano i risultati nel caso sia attivo anche il raffrescamento estivo.

### 3.2.1 Carico termico in modalità di riscaldamento

Di seguito si riportano i risultati delle simulazioni effettuate ipotizzando uno spessore saturo di 40 m, mettendo a confronto due assunzioni semplificative sulle serie temporali del carico termico: un valore costante applicato su tutta la stagione di riscaldamento e step mensili costanti, rispettivamente presentati nella sotto-capitolo 3.2.1.1 e nel sotto-capitolo 3.2.1.2.

Per questa configurazione si sono ancora confrontanti i risultati delle variazioni di temperatura dell'acqua nel pozzo di re-immissione dell'impianto di valle per effetto dell'applicazione dei due carichi termici ipotizzati. Per fare ciò è stato necessario normalizzare la potenza termica della pompa di calore con applicato il carico termico applicato a inizio mese rispetto alle ore complessive di funzionamento dell'impianto geotermico sull'intera stagione di riscaldamento.

#### 3.2.1.1 Carico termico costante durante la stagione

Per ciascuna simulazione sono stati analizzati due impatti degli impianti a monte sull'impianto posto più a valle, in una fila di 4 installazioni: la variazione del Seasonal Performance Factor (SPF), come riportata in Figura 21, e la variazione massima della temperatura dell'acqua nel pozzo di re-immissione, come riportato in Figura 22. Se, infatti, la variazione dell'efficienza della pompa di calore può essere considerato un impatto spesso trascurabile, la variazione della temperatura minima raggiunta nell'impianto rappresenta un vincolo importante per la sostenibilità stessa dell'utilizzo della risorsa geotermica, per evitare la formazione di ghiaccio nell'impianto. I grafici in Figura 21 e in Figura 22 riportano l'alterazione di SPF e la variazione massima di temperatura in funzione della potenza dell'impianto e del "tempo di percorrenza del fronte advettivo", ovvero il rapporto fra la distanza tra le installazioni e la velocità di avanzamento del fronte termico. Si osserva come l'andamento delle curve non sia monotono in una direzione e che quindi, ad esempio, distanziare maggiormente gli impianti non comporti necessariamente una riduzione dell'interferenza reciproca (come invece avverrebbe sicuramente per gli impianti con sonde geotermiche). Per questa configurazione, da Figura 21 si nota una diminuzione nei rendimenti energetici della pompa di calore per un tempo di propagazione del fronte advettivo di circa un anno.

In Figura 22 si riporta la variazione attesa di temperatura nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda in seguito allo scambio termico con la poma di calore dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. Si conferma per un tempo di propagazione del fronte advettivo pari a circa un anno una variazione significativa della temperatura dell'acqua nel pozzo di re-immissione.



Figura 21 Variazione di performance energetica stagionale della pompa di calore dell'impianto geotermico di valle in funzione del tempo di propagazione advettivo, ipotesi di spessore saturo b=40 m e carico termico costante durante la sola stagione di riscaldamento.



Figura 22 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua nell'acquifero dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. La configurazione prevede spessore saturo pari a 40 m e carico termico costante durante la sola stagione di riscaldamento.

In Figura 23, Figura 25 e Figura 27 si riporta la variazione di temperatura massima attesa per questa configurazione nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore in funzione della distanza tra gli impianti geotermici.

In Figura 24, Figura 26 e in Figura 28 la medesima variazione di temperatura attesa in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore.

Le proprietà idrodinamiche considerate sono riportate nelle didascalie delle figure. Valutata la temperatura indisturbata dell'acquifero, per le tre configurazioni idrodinamiche considerate emerge la necessità di porre attenzione alla combinazione tra carico termico, taglia della pompa di calore e proprietà idrodinamiche dell'acquifero, così da evitare situazioni con temperature critiche per impianti con potenza di taglia maggiore ai 300 kW.

Per tutte le casistiche simulate si nota da subito come l'effetto della distanza tra le installazioni geotermiche appare molto ridotto (Figura 23), l'alterazione termica massima segue un andamento pressoché lineare con la potenza termica di ciascun impianto (Figura 24). Questo risultato fornisce una prima importante indicazione sulla valutazione degli impatti reciproci tra gli impianti geotermici a circuito aperto: distanziare gli impianti tra di loro non sortisce effetti apprezzabili di mitigazione dell'impatto degli impianti a monte.



Figura 23 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=3.10<sup>-3</sup>.



Figura 24 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3}\frac{m}{s}$  e i=3·10<sup>-3</sup>.



Figura 25 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=3\cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 26 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=3 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 27 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K = 10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 28 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K = 10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.

In Figura 29 e in Figura 30 si riportano i risultati della simulazione di temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle, per le configurazioni idrodinamiche ritenute maggiormente critiche.



Figura 29 Si riporta il risultato della simulazione di temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle, per configurazione idrodinamica con K= $10^{-3} \frac{m}{s}$  e i= $3 \cdot 10^{-3}$ .



Figura 30 Si riporta il risultato della simulazione di temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle, per configurazione idrodinamica con:  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.

# 3.2.1.2 Carico termico applicato a inizio mese

Per ciascuna simulazione sono stati analizzati due impatti degli impianti a monte sull'impianto posto più a valle, in una fila di 4 installazioni. I grafici in Figura 31 e in Figura 32 riportano l'alterazione di SPF e la variazione massima di temperatura in funzione del tempo del fronte advettivo.

Per questa configurazione la variazione dell'efficienza della pompa di calore genera un impatto considerato trascurabile, la variazione massima della temperatura raggiunta nell'impianto rappresenta un potenziale vincolo per la sostenibilità e utilizzo dell'impianto geotermico.



Figura 31 Variazione di performance energetica stagionale della pompa di calore dell'impianto geotermico di valle in funzione del tempo di propagazione advettivo, ipotesi di spessore saturo b=40 m e carico termico applicato a inizio mese durante la sola stagione di riscaldamento.



Figura 32 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua nell'acquifero dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. La configurazione prevede spessore saturo pari a 40 m e carico termico applicato a inizio mese durante la sola stagione di riscaldamento.

In Figura 33 e in Figura 35 si riporta la variazione massima di temperatura attesa nel pozzo di reimmissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore in funzione della distanza tra gli impianti geotermici.

In Figura 34 e in Figura 36 si riportano la variazione della stessa grandezza in funzione della distanza tra gli impianti geotermici.

Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero considerate nei grafici sono riportate nelle didascalie delle figure.



Figura 33 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero: conducibilità  $K = 10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=3·10<sup>-3</sup>.



Figura 34 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore. Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K = 10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=3·10<sup>-3</sup>.



Figura 35 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=3 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 36 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore. Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=3 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.

In Figura 37 e in Figura 38 si riporta la temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle per le configurazioni idrodinamiche ritenute potenzialmente critiche.



Figura 37 Si riporta il risultato della simulazione di temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle, per configurazione idrodinamica con K= $10^{-3} \frac{m}{s}$  e i= $3 \cdot 10^{-3}$ .



Figura 38 Si riporta il risultato della simulazione di temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle, per configurazione idrodinamica con K= $3 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$  e i= $10^{-2}$ .

La durata necessaria al calcolatore per l'elaborazione del modello numerico con applicato il carico termico costante risulta inferiore al tempo necessario alla simulazione dello stesso modello numerico con applicato un carico termico a inizio mese, di seguito definito come: "carico intermittente".

Quindi, se gli effetti generati dalle due configurazioni prima presentate (nel sotto-capitolo 3.2.1.1 carico termico costante e nel sotto-capitolo 3.2.1.2 carico termico intermittente) a parità di configurazione idrodinamica presentassero risultati simili tra loro sarebbe possibile eseguire simulazioni con applicato un carico termico costante piuttosto che un carico termico intermittente, velocizzando così la durata della simulazione almeno nelle fasi iniziali del progetto.

L'energia termica scambiata nelle due configurazioni risulta diversa, infatti l'impianto in regime di riscaldamento con applicato il carico termico costante ha una durata di attività pari a 4368 ore annue, contro le 2247 ore annue di funzionamento dell'impianto con applicato il carico termico a inizio mese. Per rendere confrontabili tra loro i risultati ottenuti dall'applicazione dei due carichi termici considerati si è scelto di normalizzare la potenza termica della pompa di calore con applicato il carico intermittente rispetto alle ore di funzionamento complessive della pompa di calore sull'intera stagione.

Per fare ciò è stata moltiplicata la potenza della pompa di calore con applicato il carico termico intermittente per il rapporto tra le ore di funzionamento complessive del carico a step mensili fratto le ore di funzionamento dell'impianto durante l'intera stagione di riscaldamento.

In questo modo è possibile confrontare i risultati ottenuti per un impianto attivo costantemente durante il periodo considerato con i risultati di un impianto funzionante a step costanti mensili.

In Figura 39, Figura 40 e in Figura 41 si confrontano i risultati ottenuti tra le variazioni attese di temperatura dell'acqua nel pozzo di re-immissione dell'impianto di valle per effetto dell'applicazione di un carico termico costante e intermittente normalizzato a costante nelle medesime condizioni idrodinamiche dell'acquifero. In tutte e tre le configurazioni idrodinamiche considerate i risultati presentano un simile andamento all'interno della stessa configurazione idrodinamica. Il carico termico costante presenta sempre una variazione di temperatura attesa maggiore rispetto all'applicazione del carico termico intermittente.

In accordo con [4] e con [7] le simulazioni con l'applicazione di un carico termico costante per l'intera stagione generano risultati cautelativi e poco reali, rispetto all'applicazione di un carico termico intermittente.

Non risulta dunque possibile ridurre la durata delle simulazioni con applicato un carico termico intermittente con modelli in cui è applicato un carico termico costante, a meno di non accettare variazioni di temperatura attesa maggiori a quelle reali.



Figura 39 Confronto tra i risultati della variazione attesa di temperatura dell'acqua nel pozzo di re-immissione di valle a seguito dello scambio con la pompa di calore ipotizzando l'applicazione di un carico termico intermittente e costante, con configurazione idrodinamica con K= $10^{-3} \frac{m}{s}$  e i= $10^{-2}$ .



Figura 40 Confronto tra i risultati della variazione attesa di temperatura dell'acqua nel pozzo di re-immissione di valle a seguito dello scambio con la pompa di calore ipotizzando l'applicazione di un carico termico intermittente e costante, con configurazione idrodinamica con K= $3 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$  e i= $10^{-2}$ .



Figura 41 Confronto tra i risultati della variazione attesa di temperatura dell'acqua nel pozzo di re-immissione di valle a seguito dello scambio con la pompa di calore ipotizzando l'applicazione di un carico termico intermittente e costante, con configurazione idrodinamica con  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-3</sup>.

#### 3.2.2 Carico termico in modalità di riscaldamento e raffrescamento

Di seguito si riportano i risultati delle simulazioni con spessore saturo dell'acquifero pari a 40 m e carico termico applicato durante l'intero anno, sia in regime di riscaldamento e sia in regime di raffrescamento. Nel sotto-capitolo 3.2.2.1 il carico termico è applicato con modalità costante durante l'anno. Nel sotto-capitolo 3.2.2.2 il carico termico è applicato con step mensili.

Con entrambe le modalità di climatizzazione attive può accadere che gli impianti geotermici di valle possano potenzialmente incrementare le loro prestazioni energetiche se il plume termico generato dagli impianti di monte raggiungesse gli impianti di valle nella stagione successiva, così come già introdotto nel Capitolo 1.3.2 in cui è descritta la propagazione del plume termico.

#### 3.2.2.1 Carico termico costante durante la stagione

Per ciascuna simulazione sono stati analizzati due impatti degli impianti a monte sull'impianto posto più a valle, in una fila di 4 installazioni. I grafici in Figura 42 e in Figura 43 riportano l'alterazione di SPF e la variazione massima di temperatura in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. Per questa configurazione emerge che per un breve tempo di propagazione del fronte advettivo, l'impianto geotermico migliora il suo coefficiente di performance stagionale, cioè l'effetto del plume termico dagli impianti di monte genera un beneficio sull'impianto di valle, raggiungendo questo nella stagione successiva. Considerate le ipotesi cautelative che definiscono il modello si può ritenere che non si instaurino interferenze dannose, in termini di performance energetiche, per gli impianti di valle causati dagli impianti di monte.

Dai risultati delle simulazioni per questa configurazione non emergono temperature minime tali da presentare potenziali criticità da causare dei fermi impianto forzati.



Figura 42 Variazione di performance energetica stagionale della pompa di calore dell'impianto geotermico di valle in funzione del tempo di propagazione advettivo, ipotesi di spessore saturo b=40 m e carico termico costante applicato durante la stagione di riscaldamento e raffrescamento.



Figura 43 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua nell'acquifero dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. La configurazione prevede spessore saturo pari a 40 m e carico termico costante applicato durante la stagione di riscaldamento e raffrescamento.

#### 3.2.2.2 Carico termico applicato a inizio mese

I grafici in Figura 44 e in Figura 45 riportano l'alterazione di SPF e la variazione massima di temperatura in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. Per ciascuna configurazione, i risultati non rivelano variazioni significative dei parametri considerati e non emergono temperature minime tali da presentare potenziali criticità per l'impianto geotermico.



Figura 44 Variazione di performance energetica stagionale della pompa di calore dell'impianto geotermico di valle in funzione del tempo di propagazione advettivo, ipotesi di spessore saturo b=40 m e carico termico applicato a inizio mese durante la stagione di riscaldamento e raffrescamento.



Figura 45 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua nell'acquifero dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. La configurazione prevede spessore saturo pari a 40 m e carico termico applicato a inizio mese durante la stagione di riscaldamento e raffrescamento.

## 3.3 Risultati: spessore saturo b = 20 m

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dall'elaborazione ipotizzando uno spessore saturo dell'acquifero pari a 20 m. Poiché con questo spessore saturo, nel caso con conducibilità idraulica  $K = 10^{-4} m/s$  e gradiente idraulico i=10<sup>-3</sup> non sarebbe possibile far operare un impianto geotermico (sia per il cortocircuito termico e sia per agli abbassamenti attesi nel pozzo di prelievo), tale configurazione è stata dunque esclusa dalle simulazioni. Per lo stesso motivo, anche la taglia di impianto di 1 MW è stata esclusa dalle simulazioni.

Nel capitolo 3.3.1 si riportano i risultati per gli impianti operanti solo per riscaldamento, mentre nel capitolo 3.3.2 si riportano i risultati nel caso sia attivo anche il raffrescamento estivo.

### 3.3.1 Carico termico in modalità di riscaldamento

Di seguito si riportano i risultati delle simulazioni effettuate ipotizzando uno spessore saturo di 20 m, mettendo a confronto due assunzioni semplificative sulle serie temporali del carico termico: un valore costante applicato su tutta la stagione di riscaldamento e step mensili costanti, rispettivamente presentati nel sotto-capitolo 3.3.1.1 e nel sotto-capitolo 3.3.1.2.

## 3.3.1.1 Carico termico costante durante la stagione

Per ciascuna simulazione sono stati analizzati due impatti degli impianti a monte sull'impianto posto più a valle, in una fila di 4 installazioni. I grafici in Figura 46 e in Figura 47 riportano l'alterazione di SPF e la variazione massima di temperatura in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. Per questa configurazione la variazione dell'efficienza della pompa di calore genera un impatto considerato trascurabile, la variazione massima della temperatura raggiunta nell'impianto rappresenta un potenziale vincolo per la sostenibilità e utilizzo dell'impianto geotermico.

In Figura 48 e in Figura 50 si riporta la variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore in funzione della distanza tra gli impianti geotermici e, in Figura 49 e in Figura 51 in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore.

Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero considerate nei grafici sono riportate nelle didascalie delle figure.

Anche per questa configurazione, per tutte le casistiche considerate emerge come la potenza termica di picco della pompa di calore apporti un contributo maggiore sulla variazione di temperatura attesa dell'acqua nel pozzo di re-immissione, rispetto alla distanza tra gli impianti geotermici.



Figura 46 Variazione di performance energetica stagionale della pompa di calore dell'impianto geotermico di valle in funzione del tempo di propagazione advettivo, ipotesi di spessore saturo b=20 m e applicazione di un carico termico costante durante la sola stagione di riscaldamento.



Figura 47 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua nell'acquifero dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. La configurazione prevede spessore saturo pari a 20 m e carico termico costante durante la sola stagione di riscaldamento.



Figura 48 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 49 Si riporta la variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 50 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=3\cdot10^{-4}\frac{m}{s}$  e  $i=3\cdot10^{-3}$ .



Figura 51 Si riporta la variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica della pompa di calore. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=3\cdot10^{-4}\frac{m}{s}$  e i= $3\cdot10^{-3}$ .

Dai risultati delle simulazioni emerge come per la configurazione idrodinamica con conducibilità idraulica  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e gradiente idraulico  $i=10^{-2}$ , riportata in Figura 52, possa presentare una situazione quantomeno di allerta per la formazione di ghiaccio nel pozzo di re-immissione di valle per potenze termiche della pompa di calore di taglia pari a 500 kW. Sarà dunque necessario prestare attenzione a configurazioni con carico termico e caratteristiche idrodinamiche simili a quelle considerate ma con temperature indisturbate dell'acquifero minori rispetto a quella ipotizzata.

In Figura 53 si riporta, per la configurazione idrodinamica con conducibilità idraulica  $K=3\cdot10^4 \frac{m}{s}$  e gradiente idraulico i=3·10<sup>-3</sup>, il risultato della simulazione di temperatura minima dell'acqua nel pozzo di re-immissione dell'impianto di valle in funzione della potenza termica della pompa di calore.

Per questa configurazione idrodinamica è opportuno installare impianti con una potenza termica di taglia massima di circa 100 kW, preferibilmente a distanze tra loro superiori i 150 m.

In questo modo indipendentemente dalla temperatura indisturbata dell'acquifero, l'interazione reciproca tra gli impianti geotermici non risulta tale da compromettere l'operatività degli impianti di valle.



Figura 52 Si riporta il risultato della simulazione di temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle in funzione della distanza tra gli impianti geotermici, per configurazione idrodinamica con K= $10^{-3} \frac{m}{s}$  e i= $10^{-2}$ .



Figura 53 Si riporta il risultato della simulazione di temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore, per configurazione idrodinamica con K= $3 \cdot 10^{-4} \frac{m}{2}$  e i= $3 \cdot 10^{-3}$ .

# 3.3.1.2 Carico termico applicato a inizio mese

I grafici in Figura 54 e in Figura 55 riportano l'alterazione di SPF e la variazione massima di temperatura in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo.

Per impianti di piccola taglia installati in questa configurazione l'effetto dell'interazione tra gli impianti geotermici sulla variazione di SPF della pompa di calore di valle risulta trascurabile.



Figura 54 Variazione di performance energetica stagionale della pompa di calore dell'impianto geotermico di valle in funzione del tempo di propagazione advettivo, ipotesi di spessore saturo b=20 m e applicazione di un carico termico concentrato a inizio mese durante la sola stagione di riscaldamento.



Figura 55 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua nell'acquifero dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. Spessore saturo pari a 20 m e carico termico applicato a inizio mese nella sola modalità di riscaldamento

L'applicazione del carico termico a inizio mese determina una variazione di temperatura nel pozzo di re-immissione dell'impianto di valle minore rispetto al caso precedente, in cui era applicato un carico termico constante durante l'intera stagione di riscaldamento. In tale configurazione non risultano temperature minime potenzialmente critiche.

In Figura 56 e in Figura 57 si riporta la variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, rispettivamente in funzione della distanza tra gli impianti geotermici e della potenza termica di picco della pompa di calore.

Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero considerate in Figura 56 e in Figura 57 sono: conducibilità idraulica K= $10^{-3} \frac{m}{s}$  e gradiente idraulico i= $10^{-2}$ .

In Figura 58 si riporta il risultato della simulazione di temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle con riferimento alla configurazione idrodinamica appena presentata.

Tenuto conto dell'impostazione cautelativa assegnata al dominio, questa configurazione presenta un limite massimo di potenza termica possibile da installare piuttosto che una reale interferenza termica tra impianti geotermici di piccola taglia.



Figura 56 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 57 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3}\frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 58 Si riporta il risultato della simulazione di temperatura minima nel pozzo di re-immissione dell'acqua in acquifero dell'impianto di valle, per configurazione idrodinamica con: idrodinamica con conducibilità idraulica K= $10^{-3} \frac{m}{s}$  e gradiente idraulico i= $10^{-2}$ .

### 3.3.2 Carico termico in modalità di riscaldamento e raffrescamento

Di seguito si riportano i risultati delle simulazioni effettuate ipotizzando uno spessore saturo di 20 m e un carico termico applicato sia in modalità di riscaldamento e sia in modalità di raffrescamento. Nel sotto-capitolo 3.3.2.1 il carico termico è applicato con modalità costante durante l'anno. Nel sotto-capitolo 3.3.2.2 il carico termico è applicato con step mensili.

Come già precedentemente ricordato, con entrambe le modalità di climatizzazione attive può accadere che gli impianti geotermici di valle possano potenzialmente incrementare le loro prestazioni energetiche se il plume termico generato dagli impianti di monte raggiungesse gli impianti di valle nella stagione successiva, così come già introdotto nel Capitolo 1.3.2 in cui è descritta la propagazione del plume termico.

#### 3.3.2.1 Carico termico costante durante le stagioni

Per ciascuna simulazione sono stati analizzati due impatti degli impianti a monte sull'impianto posto più a valle, in una fila di 4 installazioni. I grafici in Figura 59 e in Figura 60 riportano l'alterazione di SPF e la variazione massima di temperatura in funzione della potenza dell'impianto e del tempo del fronte advettivo. Per questa configurazione emerge come per un breve tempo di propagazione del fronte advettivo, l'impianto geotermico migliora il suo coefficiente di performance stagionale, cioè l'effetto del plume termico dagli impianti di monte genera un beneficio all'impianto di valle, raggiungendo questo nella stagione successiva. Considerate le ipotesi cautelative che definiscono il modello si può ritenere che non si instaurino interferenze dannose, in termini di performance energetiche, per l'impianto di valle causati dagli impianti di monte.

Dai risultati delle simulazioni per questa configurazione non emergono temperature minime tali da presentare potenziali criticità da causare dei fermi impianto forzati.



Figura 59 Variazione di performance energetica stagionale della pompa di calore dell'impianto geotermico di valle in funzione del tempo di propagazione advettivo, ipotesi di spessore saturo b=20 m e carico termico costante applicato sia nella stagione di riscaldamento e sia nella stagione di raffrescamento.



Figura 60 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua nell'acquifero dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. La configurazione prevede spessore saturo pari a 20 m e carico termico costante applicato durante la stagione di riscaldamento e raffrescamento.

In Figura 61 e in Figura 62 si riporta la variazione di temperatura massima per questa configurazione attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, rispettivamente in funzione: della distanza tra gli impianti geotermici e della potenza termica di picco della pompa di calore.

Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero considerate in Figura 61e in Figura 62 sono: conducibilità idraulica K= $10^{-3} \frac{m}{s}$  e gradiente idraulico i= $10^{-2}$ .



Figura 61 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 62 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.

## 3.3.2.2 Carico termico applicato a inizio mese

Infine, in Figura 63 si riporta la variazione di performance energetica stagionale della pompa di calore dell'impianto geotermico di valle per effetto dell'interazione di questo con gli altri impianti geotermici, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. Per questa configurazione l'interferenza tra gli impianti geotermici risulta trascurabile.

In Figura 64 si riporta la variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua nell'acquifero dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. Le variazioni attese non sono tali da evidenziare situazioni critiche.



Figura 63 Variazione di performance energetica stagionale della pompa di calore dell'impianto geotermico di valle in funzione del tempo di propagazione advettivo, ipotesi di spessore saturo b=20 m e carico termico applicato a inizio mese sia durante la stagione di riscaldamento e sia nella stagione di raffrescamento.



Figura 64 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua nell'acquifero dell'impianto di valle, in funzione del tempo di propagazione del fronte advettivo. La configurazione prevede spessore saturo pari a 20 m e carico termico applicato a inizio mese in modalità sia di riscaldamento sia di raffrescamento.

In Figura 65 e in Figura 66 si riporta la variazione di temperatura massima attesa per questa configurazione nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, rispettivamente in funzione della distanza tra gli impianti geotermici e della potenza termica di picco della pompa di calore. Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero considerate sono riportate nella didascalia delle figure. Si nota come per la stagione di raffrescamento l'applicazione del carico termico a inizio mese non generi una variazione termica dell'acqua re-immessa in falda, evento invece atteso nell'ipotesi di applicare un carico termico costante.



Figura 65 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della distanza tra gli impianti geotermici. Proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3} \frac{m}{s}$  e i=10<sup>-2</sup>.



Figura 66 Variazione di temperatura attesa nel pozzo di re-immissione dell'acqua di falda nell'impianto di valle in seguito allo scambio termico con la pompa di calore, in funzione della potenza termica di picco della pompa di calore. Le proprietà idrodinamiche dell'acquifero:  $K=10^{-3} \frac{m}{c}$  e i=10<sup>-2</sup>.
## 4 Conclusioni

Le pompe di calore geotermiche rappresentano una valida soluzione di mitigazione dei cambiamenti climatici, utilizzando la capacità degli acquiferi di scambiare energia con una pompa di calore e di fornire riscaldamento e/o raffrescamento agli edifici. Tuttavia, la risorsa energetica rinnovabile rappresentata da questa capacità di scambio è limitata nello spazio: è necessario valutare l'impatto reciproco tra installazioni geotermiche per poter gestire in modo sostenibile la presenza di più impianti, ad esempio in ambito urbano.

In questa tesi è stato studiato l'impatto tra installazioni poste una a valle dell'altra, effettuando con simulazioni numeriche agli elementi finiti di flusso e trasporto di calore in acquifero, utilizzando il software FEFLOW. L'utilizzo di modelli numerici richiede la conoscenza dei parametri da attribuire alle grandezze fisiche che definiscono il modello di partenza. La precisione e l'accuratezza dei parametri in gioco risulta essenziale per ottenere risultati attendibili dalle simulazioni.

Le simulazioni lanciate combinano tra loro i vari parametri considerati: proprietà idrodinamiche dell'acquifero, distanze tra gli impianti geotermici, potenze termiche delle pompe di calore (con relativa portata emunta dall'acquifero), periodo di applicazione del carico termico durante l'anno (carico termico costante durante l'intera stagione o concentrato nella prima parte del mese) in regime di solo riscaldamento e in regime di riscaldamento e raffrescamento.

Sono stati valutati 4 impianti installati in serie lungo la direzione di deflusso della falda, un'ipotesi estremamente cautelativa poiché solitamente gli impianti presentano dei disallineamenti che permettono di ridurre l'impatto termico reciproco.

Per ciascuna simulazione sono stati analizzati gli impatti degli impianti a monte sull'impianto posto più a valle, determinando la variazione del Seasonal Performance Factor (SPF) e l'alterazione massima della temperatura dell'acqua nel pozzo di re-immissione rispetto a quella del primo impianto a monte, che opera in assenza di disturbo termico da impianti a monte.

Dai risultati ottenuti emerge come, per qualunque configurazione analizzata la variazione dell'efficienza energetica della pompa di calore generi degli impatti ritenuti trascurabili.

Occorre invece prestare maggiore attenzione alle configurazioni che presentano temperature minime dell'acqua intorno a 0° C nel pozzo di re-immissione dell'impianto di valle a seguito dello scambio termico con la pompa di calore. Tali temperature possono generare un guasto dell'impianto a causa della formazione di ghiaccio nell'impianto stesso o ridurre notevolmente le prestazioni energetiche di questa tecnologia.

È dunque possibile prevedere di introdurre sulla condotta di prelievo dell'impianto di valle un dispositivo tale da interrompere il funzionamento dell'impianto al raggiungimento di una soglia

minima di temperatura, così da prevenire danni generati dalla formazione di ghiaccio o prestazioni energetiche non convenienti dell'impianto geotermico.

Dai grafici che riportano l'alterazione termica massima dell'acqua nel pozzo di re-immissione in funzione della potenza della pompa di calore emerge come la variazione termica massima segua un andamento pressoché lineare con la taglia di ciascun impianto.

Da questo risultano si evince che distanziare gli impianti geotermici tra loro non sortisce effetti apprezzabili di mitigazione dell'impatto degli impianti di monte, come invece avverrebbe per impianti a sonde geotermiche. La potenza della pompa di calore risulta dunque apportare un contributo maggiore alla variazione di temperatura attesa dell'acqua nel pozzo dell'impianto di valle rispetto alla distanza tra gli impianti stessi.

Dal confronto tra i risultati ottenuti dall'applicazione dei due carichi termici risulta come il carico termico costante sull'intera stagione presenta sempre una variazione della temperatura dell'acqua nel pozzo di re-immissione dell'impianto di valle maggiore rispetto all'applicazione del carico termico con step costanti mensili. Le simulazioni in cui il carico termico è assunto costante per l'intera stagione generano risultati estremamente cautelativi rispetto alle simulazioni in cui è applicato un carico termico concentrato a inizio mese. Non risulta dunque possibile ridurre la durata delle simulazioni con applicato un carico termico intermittente con modelli in cui è applicato un carico termico costante, a meno di non accettare variazioni di temperatura dell'acqua maggiori a quelle reali.

Il lavoro di tesi può fornire dunque le basi su cui orientare futuri progetti volti ad indagare ulteriormente l'interazione reciproca tra gli impianti geotermici open-loop in ambito urbano. Tale valutazione non potrà però prescindere da un miglioramento della conoscenza delle proprietà idrodinamiche degli acquiferi in ambito urbano e delle caratteristiche degli impianti geotermici installati.

## Bibliografia

- [1] M. Rivoire, «Dynamic simulation and economic analysis of geotheral HVAC system in different climate zones», Politecnico di Torino, 2017.
- M. Fanelli e M. Dickson, «Cos'è l'Energia Geotermica?», Unione Geotermica Italiana, feb-2004. [In linea]. Available at: https://www.unionegeotermica.it/cosa-e-energia-geotermica.asp. [Consultato: 08-mag-2019].
- [3] A. García-Gil, E. Vázquez-Suñe, E. G. Schneider, J. Á. Sánchez-Navarro, e J. Mateo-Lázaro, «Relaxation factor for geothermal use development – Criteria for a more fair and sustainable geothermal use of shallow energy resources», *Geothermics*, vol. 56, pagg. 128–137, lug. 2015.
- [4] S. Lo Russo, G. Taddia, V. Verda, L. Gnavi, e E. Roccia, "Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis", *Geothermics*, vol. 43, pagg. 66–74, lug. 2012.
- [5] R. Ferro, «Numerical modelling of the reciprocal interference between Ground Water Heat Pumps», Master thesis, Politecnico di Torino, 2017.
- [6] A. Casasso e R. Sethi, «Modelling thermal recycling occurring in groundwater heat pumps (GWHPs)», Renew. Energy, vol. 77, pagg. 86–93, mag. 2015.
- [7] B. Piga, A. Casasso, F. Pace, A. Godio, e R. Sethi, "Thermal Impact Assessment of Groundwater Heat Pumps (GWHPs): Rigorous vs. Simplified Models", *Energies*, vol. 10, n. 9, pag. 1385, set. 2017.