

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER
L'AMBIENTE E TERRITORIO**

D.I.C.A.M.

TESI DI LAUREA

In

Modelli Geostatistici M

ANALISI DELLA STABILITÀ DEI RISULTATI DEI

TEST DI RISPOSTA TERMICA:

**PROVE IN CAMPO, CONFRONTO E ANALISI CRITICA PER DIVERSI
METODI DI ESECUZIONE E MODELLIZZAZIONE**

CANDIDATO:
Salvatore Mercuri

RELATORE:
Prof. Roberto Bruno

CO-RELATORE:
Ing. Francesco Tinti

Anno Accademico 2011/2012

Sessione II

Special thank you to "Groenholland Geo Energy systems", in particular Henk Witte and A.J. van Gelder for their availability and assistance in addition to having made possible this work and which enabled me to carry out a very interesting experience alongside them.

Salvatore

PAROLE CHIAVE:

- **Geotermia a bassa entalpia**
- **Test di Risposta Termica**
- **Movimento d'acqua di falda**
- **Analisi geostatistica**
- **Variogramma e covarianze incrociate**

INDICE

I INTRODUZIONE	5
1.1 Presentazione dell'azienda.....	7
II ANALISI TEORICA DEL TEST DI RISPOSTA TERMICA.....	9
2.1 Caratteristiche termiche del reservoir geotermico a bassa entalpia per circuiti chiusi.....	9
2.1.1 Conducibilità termica.....	9
2.1.2 Capacità termica volumetrica	11
2.1.3 Temperatura del suolo indisturbata.....	11
2.2 Test di Risposta Termica e teoria della sorgente lineare infinità.....	12
2.2.1 Limiti del modello	18
III PROGETTO DELLE PROVE IN SITU.....	21
3.1 Obiettivi del progetto	21
3.2 Esperimento Henk Witte e A.J. van Gelder nel 2005	21
3.2.1 Differenze tra gli esperimenti e complicazioni durante il progetto	25
3.3 Attrezzature disponibili per i TRT.....	27
3.3.1 Presentazione della macchina TRT.....	27
3.3.2 Termocoppie	34
3.3.3 PT100.....	36
3.3.4 Fluido termovettore.....	37
3.4 Presentazione del sito.....	39
3.4.1 Geografia	39
3.4.2 Geologia del suolo	40
3.4.3 Stima delle conduttività termica del suolo usando il metodo “Non-Steady-State Probe”	42
3.4.4 Caratteristiche del geo scambiatore e impostazioni dell'esperimento..	43

3.5	Temperatura iniziale del profilo del suolo	46
3.6	Estrazione d'acqua di falda.....	47
3.7	Simulazione degli esperimenti.....	50
3.8	Test di Risposta Termica effettuati	56
3.8.1	TRT senza movimento d'acqua di falda – Reference.....	57
3.8.2	TRT con movimento d'acqua di falda – Groundwater flow.....	63
3.8.3	TRT con movimento d'acqua di falda – Injection.....	71
3.8.4	Overview dei risultati dei TRT	77
IV	ANALISI GEOSTATISTICA DEI DATI SPERIMENTALI	83
4.1	Approccio probabilistico all'analisi dei TRT	83
4.2	Strumenti geostatistici disponibili	84
4.3	Analisi dei dati.....	86
4.3.1	Analisi della temperatura media del fluido per i diversi TRT	87
4.3.2	Studio delle fluttuazioni per le singole variabili per i diversi TRT	99
4.3.3	Correlazioni tra le variabili dei diversi TRT.....	114
4.3.4	Osservazione dai risultati ottenuti.....	124
V	CONCLUSIONI.....	129
5.1	Sviluppi futuri	131
BIGLIOGRAFIA		133
	Articoli e pubblicazioni	133
	Manuali	135
	Normative	135

I INTRODUZIONE

L'energia geotermica è definita dalla direttiva europea 2009/28/EC come l'energia stoccata sotto forma di calore al di sotto della crosta terrestre. Non sono ben definite le distinzioni tra la geotermia superficiale e quella profonda, in linea di massima viene considerata geotermia superficiale quando non vengono raggiunte alte temperature legate ad elevate profondità, in generale non superiori ai 200 m della crosta terrestre. La geotermia superficiale, detta anche geotermia a bassa entalpia utilizza il calore immagazzinato nel sottosuolo proveniente dal nucleo terrestre ed è classificata come una fonte di energia rinnovabile. Normalmente le energie rinnovabili (es. solare, eolico, geotermico, etc.) sono chiamate sostenibili a prescindere dalla modalità di sfruttamento. In effetti, per la geotermia questo non è vero, perché la sostenibilità è strettamente legata ad una corretta progettazione ed utilizzo della risorsa. Per questa ragione, un punto critico di ogni corretta progettazione è la conoscenza, più dettagliata possibile, delle proprietà termiche del sottosuolo.

Allo stato attuale della tecnologia, il test esistente con il più alto grado di accuratezza per la caratterizzazione del reservoir geotermico superficiale è il Test di Risposta Termica (*Thermal Response Test-TRT*), il quale consiste in una simulazione in situ del funzionamento del sistema a circuito chiuso, per un periodo limitato di tempo, attraverso l'iniezione o estrazione di calore a potenza costante all'interno del geo-scambiatore (*Borehole Heat Exchanger-BHE*). Dall'analisi della variazione delle temperature del fluido circolante, è possibile avere una stima delle proprietà termiche medie del volume del reservoir geotermico interessato dal test.

Questo lavoro vuole: i) introdurre uno studio sui problemi di caratterizzazione del reservoir geotermico superficiale, in particolare analizzando l'effetto che il movimento d'acqua di falda ha sui parametri termici; ii) analizzare la sensibilità dei risultati del test alle variabilità dei parametri caratteristici del funzionamento delle attrezzature.

Parte del lavoro della mia tesi è stata svolta in azienda per un periodo di 4 mesi presso la “Groenholland Geo Energy systems” che ha sede ad Amsterdam in Olanda. Tre diversi esperimenti sono stati realizzati sullo stesso sito (stratigrafia nota del terreno: argilla, sabbia fine e sabbia grossa) usando una sonda profonda 30 metri e diversi pozzi per l'estrazione d'acqua e per monitorare gli effetti in prossimità del geo scambiatore.

Questo elaborato è costituito in cinque capitoli principali di cui il primo è questa introduzione, il secondo capitolo caratterizza le proprietà termiche del reservoir geotermico a bassa entalpia per sistemi chiusi e introduce i Test di Risposta Termica. Nel terzo è presentato un riassunto delle attività svolte in azienda, dei mezzi adoperati e i risultati ottenuti mediante l'applicazione della teoria classica. Nel quarto capitolo, dopo una premessa dell'approccio geostatistico adottato, si analizzano le fluttuazioni sui dati misurati per determinare la loro variabilità e affidabilità. L'ultimo capitolo contiene le conclusioni dell'elaborato e osservazioni.

Si termina quest'introduzione, ponendo un'attenzione al notevole sviluppo degli ultimi decenni dei sistemi geotermici per la climatizzazione e, quindi, la costante ricerca di una maggiore efficienza di tali impianti hanno rivelato la grande importanza delle problematiche connesse alla misura delle proprietà termiche dei terreni e delle rocce. Lo studio delle varie modalità di misura e di stima delle varie proprietà termiche del sottosuolo risulta, quindi, un argomento di notevole importanza ed attualità.

1.1 Presentazione dell'azienda

La Groenholland Geo Energy systems è un'azienda fondata nel 1990 in Amsterdam, che opera nel settore delle scienze ambientali occupandosi di studi sul suolo e falde acquifere. Dal 1996 si è concentrata sul tema della geotermia superficiale in particolare nel disegno e progettazione di scambiatori di calore e assemblaggio delle pompe di calore.

Dal 1997 l'azienda opera anche nel Regno Unito, attualmente è la più vecchia "attiva" compagnia che esercita nel Paese. In questi anni di attività la Groenholland oltre ad essere una delle compagnie più tecnicamente avanzate nel settore è anche una delle più costanti ed affidabili.

L'azienda ha realizzato più di 100 progetti da quando è stata fondata, questo lascia intendere l'enorme esperienza accumulata in materia. Inoltre la Groenholland Geo Energy Systems non si limita solamente nell'operare nel settore ma è un'azienda estremamente interessata alla ricerca. Diverse importanti pubblicazioni sono state realizzate da Henk Witte e Guus van Gelder, principali esperti della Groenholland.

L'azienda inoltre vanta diverse collaborazioni Europee sulle tematiche ambientali, svolgendo corsi di formazione per i tecnici del settore e partecipa alle più importanti manifestazioni internazionali sulla geotermia.

II ANALISI TEORICA DEL TEST DI RISPOSTA TERMICA

2.1 Caratteristiche termiche del reservoir geotermico a bassa entalpia per circuiti chiusi

2.1.1 Conducibilità termica

La conducibilità termica (λ) [W/(m.K)] è la misura del materiale naturale di trasmettere calore. Anche trascurando la variazione della conducibilità con la temperatura, nei materiali anisotropi essa varia in genere con la direzione ed è rappresentata attraverso un tensore del secondo ordine. Inoltre, in materiali non uniformi, come lo sono i materiali naturali, la conduttività varia con la posizione spaziale. In effetti, si tratta di una Variabile Regionalizzata $\vec{\lambda}(x)$.

Questo problema è molto importante e deve essere preso in considerazione quando si caratterizza un reservoir geotermico superficiale per almeno due motivi:

- 1) Il volume interessato dal flusso di calore varia durante le operazioni nel reservoir;
- 2) La natura tensoriale della variabile la rende una grandezza non sommabile, e quindi non è possibile calcolare un valore medio attraverso una media aritmetica.

Le proprietà della conducibilità termica del sottosuolo sono del tutto analoghe a quelle della permeabilità. Infatti, per analogia, possiamo confrontare formalmente la legge di Darcy e l'equazione di Fourier.

$$q_h = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.1)$$

In questo caso il flusso, q_h , si riferisce al flusso di acqua ed è proporzionale al gradiente di pressione idraulica. Il coefficiente di proporzionalità è la permeabilità idraulica, che è un tensore di ordine due. In questo modo, per analogia, possiamo fare riferimento all'abbondante letteratura esistente sulla permeabilità e trasferire nel campo geotermico i risultati significativi trovati.

Discretizzando il dominio del sottosuolo in elementi regolari caratteristici (di supporto) sufficientemente piccoli per essere considerati omogenei, ci troviamo a dover accoppiare due volumi elementari con una conducibilità termica λ_1, λ_2 .

Pertanto la conducibilità media sarà compresa tra la media aritmetica e la media armonica:

$$\frac{2}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}} \leq \overline{\lambda_{1+2}} \leq \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (2.2)$$

In pratica, invece, possiamo misurare la conducibilità termica in laboratorio su campioni di piccole dimensioni, di supporto quasi puntuale, con una conseguente distribuzione dei valori. Le informazioni così ottenute permettono di modellare la distribuzione spaziale della conducibilità in questa piccola scala, anche se qualsiasi applicazione su scala più ampia sarebbe non appropriata.

Il nome comune utilizzato per identificare un valore medio di conducibilità su un dominio di larga scala è “*conducibilità termica efficace*” o meglio “*conduttività equivalente*”, definita in base alla definizione analoga di permeabilità equivalente data da Matheron (1967), come la conduttività fittizia di un mezzo omogeneo soggetto allo stesso flusso di calore q come quello reale. In realtà esistono due interpretazioni operative della conduttività equivalente: la *conducibilità efficace* e la *conduttività del blocco* (De Lucia, 2008).

- La conducibilità efficace, λ_{eff} , si riferisce a un mezzo statisticamente omogeneo su larga scala, con una distanza di correlazione piccola rispetto alla dimensione del dominio. Questo avviene quando si ha un flusso di calore uniforme e questa proprietà risulta essere una caratteristica intrinseca del mezzo, indipendente dalle condizioni al contorno macroscopiche.
- La conducibilità equivalente, λ_{eq} , invece, è attribuita a ciascun blocco di dimensioni finite, appartenente a un determinato dominio discretizzato, che si riferisce ad uno specifico problema geo-termico. Non è, pertanto, una proprietà intrinseca del mezzo conduttivo, ma solo un intermediario individuato, definito dalle condizioni al contorno, e dal metodo numerico adottato per risolvere il sistema di equazioni differenziali, in modo tale da

garantire la coerenza tra i risultati effettivi delle applicazioni su larga scala e i risultati della modellazione su piccola scala. Non esiste una soluzione unica, difatti sono necessari i criteri di equivalenza. Questa è la definizione che si applica nella maggior parte dei casi nella modellazione di un reservoir geotermico superficiale, poiché i volumi a portata di mano hanno una dimensione piccola, e quindi trascurabile rispetto alle altre.

2.1.2 Capacità termica volumetrica

La capacità termica volumetrica c [J/(m³.K)] è la quantità di calore necessaria a produrre una variazione di unità di temperatura in un volume unitario di suolo. In mezzi naturali la capacità termica volumetrica varia, ma solo nello spazio. Anche in questo caso può essere considerata come una variabile regionalizzata, $c(x)$, definita in ogni punto, x , del dominio di studio.

Riguardo allo specifico problema del TRT, è la responsabile della fase transitoria, caratterizzata da un incremento di temperatura del fluido, fino alla situazione stazionaria, allorché il calore è stato scambiato tra il foro e il terreno. La capacità termica volumetrica, a differenza della conducibilità, è una grandezza sommabile, quindi in caso di più strati sovrapposti viene ottenuto semplicemente attraverso la media aritmetica.

2.1.3 Temperatura del suolo indisturbata

Per quanto concerne la Temperatura indisturbata del suolo T_g [°C] si riferisce alla temperatura esistente prima dell'iniezione/estrazione di calore; la temperatura successivamente varierà in seguito allo sfruttamento del reservoir geotermico. La temperatura del suolo è influenzata da diversi fattori quali temperatura esterna, gradiente geotermico, moti convettivi, ecc.. Ad ogni modo essa è una variabile spazio temporale, anche se le variazioni naturali stagionali sono significative solo nello strato superficiale termicamente instabile, in genere considerato i primi 10 metri al di sotto della superficie. La $T_g(x,t)$ in ogni punto del dominio spazio-temporale è, ai fini del Test di Risposta Termica, sostituita da una T_g media, alla scala del reservoir geotermico.

2.2 Test di Risposta Termica e teoria della sorgente lineare infinità

Il Test di risposta termica (*TRT*) è un procedimento che prevede l'iniezione/estrazione di calore con potenza termica costante all'interno della sonda geotermica verticale, registrando al contempo la temperatura d'ingresso ed uscita del fluido termovettore. I valori dei parametri termici equivalenti / medi del terreno coinvolto dal test sono analizzati in accordo con la teoria adottata.

Mediante l'analisi dei TRT è possibile individuare la conducibilità termica equivalente dei materiali all'interno del volume coinvolto e la resistenza termica equivalente del foro, costituita dalla resistenza termica dovuta alla circolazione del fluido termovettore all'interno della sonda e la resistenza termica del terreno circostante la sonda.

Esistono diversi modelli per l'analisi dei dati. Quello maggiormente affermato in Europa e adottato in questo studio di tesi è la sorgente lineare infinità *ILS (Infinite Line Source Model)*, adoperato da Ingersoll e Plass 1948 per la progettazione di BHE ma usato la prima volta per lo studio dei TRT da Mogensen 1983.

Tale metodo si basa su specifiche condizioni quali:

- 1) la temperatura lungo il foro è presa costante così come la sua variabilità verticale è minima comparata al campo radiale;
- 2) il foro è considerato di una linea di lunghezza infinita per periodi brevi di tempo in quanto i valori di lunghezza sono molto più grandi del raggio del foro, considerato costante;
- 3) lo scambio termico tra il fluido ed il terreno circostante si riferisce ad un problema puramente conduttivo;
- 4) ogni parametro del terreno è considerato costante nello spazio.

Per le condizioni di stato stazionario, è possibile applicare l'equazione semplificata di Hellstrom, Eskilson e Mogensen (Eskilson, 1987):

$$Tg - Tb(t) = q Rg = \frac{q}{4\pi\lambda g} \left(\ln \frac{4\alpha t}{rb^2} - \gamma \right) \quad (2.3)$$

Dove:

Tg [$^{\circ}C$] è la temperatura del terreno indisturbato,

$Tb(t)$ [$^{\circ}C$] è la temperatura media sulle pareti del foro,

t [s] è la durata del test;

q [W/m] è la potenza termica al metro iniettata nello scambiatore ed è uguale al rapporto tra la potenza totale iniettata P [W] e la lunghezza attiva del foro, cioè la lunghezza influenzata dallo scambio termico D [m];

Rg [$K.m/W$] è la resistenza termica equivalente del terreno che circonda il foro;

λg [$W/(m.K)$] è la conduttività termica equivalente del terreno;

rb [m] è il raggio del foro;

α [m^2/s] è la diffusività termica equivalente del terreno; è uguale al rapporto tra λg e la capacità termica volumetrica media del terreno cg [$J/(m^3.K)$];

γ è la costante di Eulero, uguale a 0,5772

Il terreno non è omogeneo così che ogni parametro chimico fisico non è spazialmente costante. Ciò nonostante la semplificazione comune di considerarli costanti, spesso giustificata dall'ordine di grandezza delle variazioni effettive, permette di soddisfare la relazione teorica per il problema.

La validità del modello di sorgente lineare infinita dipende non solo dalle approssimazioni considerate, ma anche, dall'esistenza delle condizioni stazionarie postulate in precedenza. La temperatura del fluido varia nel tempo, ed è necessario superare il periodo transitorio per la stabilizzazione della variazione. Diversi studi sperimentali hanno confermato l'ipotesi teorica che essa dipende dalle caratteristiche pozzo, dal raggio (rb) e dalla diffusività termica (α_b) dei materiali di rivestimento del pozzo, e che l'equazione semplificata è accettabile

per i tempi:

$$t \geq \frac{w r_b^2}{\alpha_b}. \quad (2.4)$$

Dove w è un coefficiente numerico e risulta accettabile quando ha valore pari a 5 avendo una precisione teorica del 10% tuttavia adottando un valore w pari a 20 si ottiene una precisione teorica intorno al 2,5% .

Un altro fattore di estrema importanza è la resistenza termica del pozzo R_b , tra il fluido termovettore che passa attraverso i geo-scambiatori e la superficie esterna del pozzo, cioè la superficie a contatto con il terreno. Vale perciò la seguente relazione:

$$T_f(t) - T_b(t) = q \cdot R_b \quad (2.5)$$

dove:

$T_f(t)$ temperatura media del fluido nel collettore [K];

$T(t)$ temperatura alla superficie della sonda [K];

q quantità di potenza iniettata per metro lineare [W/m];

R_b resistenza termica del pozzo [K/ (W/m)].

Le due resistenze R_b e R_g sono disposte in serie (Figura1), in modo tale che in condizioni stazionarie, per una quantità di potenza iniettata costante, la variazione di temperatura che si manifesta dal fluido al terreno può essere espressa da:

$$\Delta T(r_b, t) = T_f - T_g \text{ [K]} \quad (2.6)$$

Trasformando l'equazione del campo termico, inserendo la resistenza termica del pozzo R_b , si ottiene l'equazione della variazione della temperatura dal fluido termovettore al terreno cioè:

$$\Delta T(r_b, t) = q \cdot (R_b + R_g) = q \left[R_b + \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_b^2} - \gamma \right) \right] \quad (2.7)$$

La resistenza termica del pozzo non va tralasciata, difatti essa è responsabile di un forte abbattimento della temperatura tra fluido e terreno. La resistenza termica del pozzo dovrebbe essere la più bassa possibile, riducendola utilizzando materiali di riempimento adeguati. L'abbattimento della temperatura nell'intorno del pozzo, invece è più limitata .

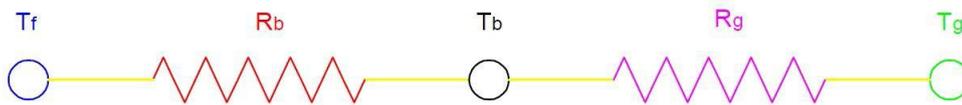


Figura 1 Resistenze disposte in serie del pozzo e del terreno

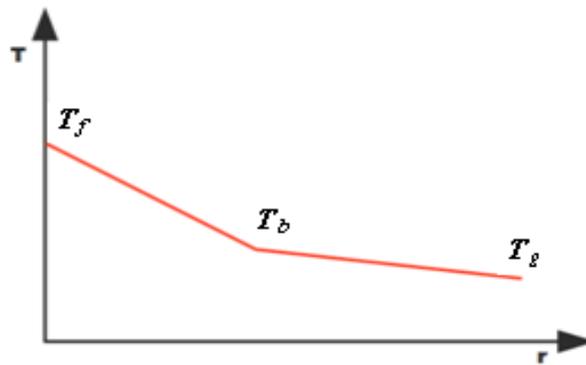


Figura 2 Andamento della temperatura in funzione della distanza dall'asse del pozzo.

Nel modello *ILS*, le temperature del fluido e del foro variano con il tempo, mentre la temperatura del terreno indisturbato resta costante. Questo perché la resistenza termica del terreno si riferisce a volumi che aumentano con il tempo, $Rg(t)$, così che semplicemente Tg si sposta dal centro del foro, fino a che il flusso di calore diventa trascurabile. Dopo alcuni passaggi, esplicitando il flusso di calore come il rapporto tra la potenza Q e la lunghezza attiva della sonda H , è possibile esprimere $Tf(t)$ nella seguente forma:

$$T_f = \left[\frac{Q}{H} \cdot \left(\frac{1}{4\pi \cdot \lambda_{eq}} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha_g}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right) + T_g \right] + \frac{Q}{4\pi \cdot \lambda_{eq} \cdot H} \cdot \ln(t) \quad (2.8)$$

Questa equazione può essere semplificata scrivendola in forma lineare nella scala del logaritmo del tempo $\ln(t)$:

$$T_f(t) = a + b \cdot \ln(t) \quad (2.9)$$

Dove i parametri della retta, a [°C] e b [°C/ln(s)], sono espressi come nelle seguenti equazioni:

$$b = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{eq} \cdot H} \quad (2.10)$$

$$a = T_g + \frac{Q}{H} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{eq}} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha_g}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right) \quad (2.11)$$

La pendenza b e l'intercetta a vengono stimate operando una classica regressione lineare in funzione delle misure registrate della temperature del fluido, Tf_i , ai tempi t_i , ma solo dopo che il *TRT* ha raggiunto condizioni di stato quasi stazionario. Conoscendo il valore della pendenza di regressione b , è possibile derivare un valore stimato di λ_{eq} , indipendente dal tempo (Gehlin, 2002):

$$\lambda_{eq} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot b^*} \quad (2.12)$$

In questa maniera il *TRT* permette il calcolo di una conduttività equivalente del materiale incluso nel volume interessato dal geo- scambiatore durante la prova. Il nome comune utilizzato per definire questo parametro equivalente è "conduttività efficace", ma a seguito di quanto affermato nel precedente, non è un valore efficace per due evidenti ragioni: i) le condizioni al contorno cambiano nel tempo, a causa dei cambiamenti di temperatura del pozzo; ii) le dimensioni del volume di riferimento cambiano, perché la superficie limite esterna, i cui limiti sono definiti dalla T_g , si allarga nel tempo.

Dopo aver scelto un valore di tentativo di c_g , l'intercetta della regressione a permette di stimare la R_b (Marcotte, 2008):

$$R_b = \frac{H}{Q} \cdot (a^* - T_g) - \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{eq}} \left(\ln \frac{4 \cdot \frac{\lambda_{eq}}{c_g}}{r_b^2} - \gamma \right) \right) \quad (2.13)$$

La procedura usuale è basata puramente sul modello conduttivo con note condizioni al contorno; Q deve essere costante temporalmente; delle proprietà termiche del terreno e della temperatura del terreno indisturbato si considera un

unico valore medio. Anche accettando il modello proposto, alcune considerazioni possono essere fatte:

- valori iniziali di t_0 , b e tf sono necessari, la cui scelta è totalmente affidata all'operatore e non basata su nessuna misura quantitativa;
- i risultati sono affetti da un'incertezza che dipende dalla correttezza delle ipotesi assunte.

Un aspetto interessante da considerare è il calcolo della temperatura media del fluido all'interno del collettore, infatti l'adozione della semplice media aritmetica della temperatura in ingresso T_{in} con la temperatura in uscita T_{ret} , che viene generalmente applicata, risulta vera solo quando si ha un flusso costante di calore per tutto il pozzo, situazione in pratica difficile da avere. *Incropera e altri*, hanno dimostrato che quando si ha una temperatura costante sulle pareti del pozzo la temperatura media del fluido è meglio espressa dal logaritmo della differenza di temperatura rappresentata come variazione delle temperatura in ingresso e uscita rispetto alla temperatura indisturbata del suolo.

$$Tf = Tg + \frac{|T_{ret}(t) - Tg| - |T_{in}(t) - Tg|}{\ln\left(\frac{|T_{ret}(t) - Tg|}{|T_{in}(t) - Tg|}\right)} \quad (2.14)$$

Anche in questo caso viene imposta una condizione poco realistica, temperatura costante lungo il pozzo, per la breve durata del Test di Risposta Termica.

Marcotte e Pasquier hanno individuato una formula che meglio rappresenta la temperatura medio del fluido in funzione di un fattore p . Per p (1, - 1/2, -2, 0, -1) si avrà rispettivamente la media aritmetica, media geometrica, media armonica, convergenza del risultato con la soluzione di *Incropera* e una migliore rappresentazione della temperatura media del fluido.

$$Tf = Tg + \frac{p (|T_{in}(t) - Tg|^{p+1} - |T_{ret}(t) - Tg|^{p+1})}{(1+p)(|T_{in}(t) - Tg|^{p+1} - |T_{ret}(t) - Tg|^p)} \quad (2.15)$$

Esistono modelli numerici che in principio possono dare una risposta a molte delle osservazioni sopra riportate, ma non a tutte. E' desiderabile un approccio

differenti, capace di tenere in conto i diversi fattori secondari che discostano la teoria dalle assunzioni del test.

Inoltre bisogna considerare che la ripetizione di più Test di Risposta Termica sulla medesima sonda geotermica verticale, ma in periodi e a condizioni climatiche differenti, porta ad ottenere risultati di temperatura del terreno indisturbato T_g e resistenza termica del foro R_b differenti per ogni prova.

2.2.1 Limiti del modello

La procedura per la valutazione delle proprietà termiche è basata su di un modello puramente conduttivo con condizioni al contorno note; la potenza termica deve essere costante, così come le proprietà termiche dei materiali sono considerate spazialmente costanti. Anche accettando il modello proposto, si possono fare alcune considerazioni sulla validità generale di quest'approccio.

Una prima osservazione è che, fin dall'inizio della prova, si ha la necessità di avere a disposizione dei valori presunti della capacità termica volumetrica del suolo e della diffusività del rivestimento pozzo. La scelta di tali parametri non deriva da una misurazione oggettiva quantitativa, ma è completamente soggettiva e si basa sulla conoscenza della successione stratigrafica del terreno, da cui si possono ricavare attraverso la letteratura, i valori associati dei vari parametri necessari.

Una seconda osservazione si ha nella procedura per l'identificazione della resistenza del pozzo. Questa è una funzione del raggio del pozzo e della diffusività, $R_b(r_b, d_b)$ ed è stimata dalla regressione lineare applicata in condizioni stabili, cioè a partire da un tempo iniziale effettivamente individuato dalla disequazione $t > w \cdot r_b^2 / \alpha_b$: per identificare questo periodo iniziale, occorre definire un valore, α_b , di diffusività del rivestimento, che è, implicitamente già di per sé, un valore presunto della resistenza del pozzo e di cui non si ha nessun controllo di convergenza rispetto al valore vero di resistenza.

La presenza di ogni tipo di flusso d'acqua di falda nella regione termicamente influenzata dal Test di Risposta Termica non è considerata nella valutazione di un

TRT, mediante il modello della sorgente lineare infinita, che riguarda solo il processo di conduzione termica e quindi non i moti convettivi generati da variazione di temperatura in un fluido in movimento. Un moto convettivo naturale o indotto può far variare sia la direzione del trasferimento di calore nel terreno, sia il quantitativo di calore stesso, iniettato o estratto, e la velocità di diffusione termica lontano dal foro, fino anche al totale azzeramento o quasi della quantità di energia termica (o frigorifera) stoccata e quindi dell'incremento (o decremento) di temperatura nel foro (Hellstrom, 1991). Influenze molto piccole di flusso di acqua di falda sono difficili da individuare e sono in genere trascurate, tanto che nell'analisi ILS rientrano all'interno del valore noto come la conduttività termica equivalente del terreno. Qualora invece l'influenza diventi significativa, l'assunzione del modello di una Sorgente Lineare Infinita con sola conduzione termica non è più valida. L'intensità degli effetti dell'acqua di falda, dipende dall'effettivo grado di manifestazione della componente convettiva/adveviva. Esso dipende essenzialmente: dalla velocità dell'acqua di falda, dalle caratteristiche fisiche e geometriche del mezzo naturale, dalle caratteristiche fisiche e geometriche del foro in cui è inserita la sonda verticale e dalla differenza di temperatura tra il fluido termovettore e l'acqua di falda.

Un'altra serie di osservazioni si riferiscono all'approssimazione dei risultati in funzione delle ipotesi originariamente adottate dal modello. Ricordiamo le principali: il pozzo ha una lunghezza infinita; la temperatura del fluido è considerata costante su tutta la lunghezza del foro, e qualsiasi altro parametro termico equivalente del suolo è considerato costante nello spazio. I risultati conseguenti sono interessati da un'impresione che varia, secondo il grado di probabilità delle ipotesi assunte.

Le ultime osservazioni si riferiscono alle condizioni di stato stazionario richiesto per il test. Il metodo si basa su una premessa fondamentale: la potenza termica Q iniettata deve essere mantenuta costante per tutta la durata della prova. In effetti, la potenza effettiva dipende da molti fattori secondari che influenzano il TRT, come attrezzature utilizzate, le condizioni meteorologiche, il cambiamento delle caratteristiche del fluido dovuto alla variazione di temperatura durante la prova,

ecc. Nella pratica il valore della potenza termica, durante il periodo di prova, è soggetto a fluttuazioni, in alcuni casi rilevanti.

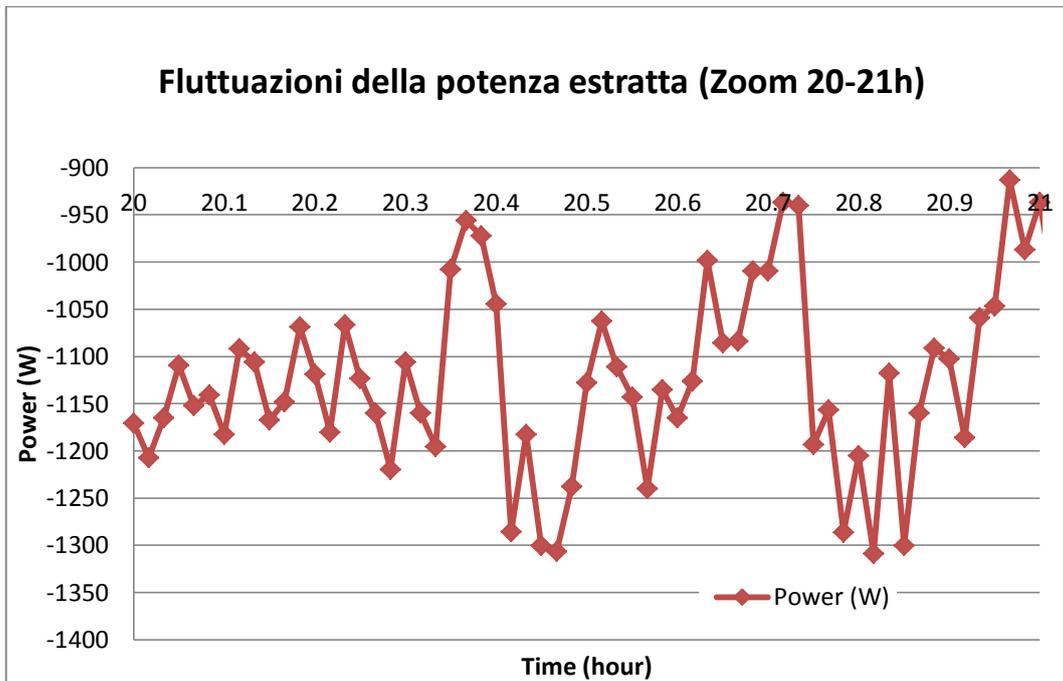


Figura 3 Andamento delle fluttuazioni della potenza estratta tra la 20- 21 h di un esperimento con estrazione di calore

III PROGETTO DELLE PROVE IN SITU

3.1 Obiettivi del progetto

L'obiettivo principale durante lo svolgimento del tirocinio in azienda è stato quello di osservare gli effetti della componente advettiva dovuti al movimento dell'acqua di falda sui risultati dei Test di Risposta Termica. Sulla base dei limiti e dei problemi evidenziati nei capitoli precedenti si è ritenuto di progettare diversi test in condizioni al contorno variabili sullo stesso foro.

Sono stati eseguiti diversi Test durante questo periodo alla Groenholland Geo Energy systems, in particolare vengono riportati su questo studio di tesi 3 casi.

- 1) Un test di risposta termica senza movimento di acqua di falda caratterizzato da una prima fase di estrazione di calore per 48 ore per poi a seguire una fase di iniezione di calore per 52 ore. Tra le due fasi vi è una pausa di 2 ore necessarie per raggiungere adeguate temperature del serbatoio.
- 2) Un test di risposta termica con movimento di acqua di falda caratterizzato da una prima fase di estrazione di calore per 48 ore per poi seguire una fase di iniezione di calore di 57 ore. Tra le due fasi vi è una pausa di 2 ore necessarie per raggiungere adeguate temperature del serbatoio.
- 3) Un test di risposta termica con movimento di acqua di falda caratterizzata da una fase di iniezione di calore per 52 ore.

Del lavoro era stato già svolto in precedenza sullo stesso sito, da H.J.L Witte e A.J. van Gelder nel 2005, per l'investigazione degli effetti dell'acqua di falda sui TRT in condizioni e modalità operative diverse. A seguire un breve richiamo dell'esperimento.

3.2 Esperimento Henk Witte e A.J. van Gelder nel 2005

Un nuovo tipo di procedura per i Test di Risposta Termica è stato definito mediante un multiplo impulso termico con iniezione ed estrazione di calore, chiamato Type III MPL – HCP (*multi power level heating and cooling pulses*). Questo nuova procedura ha un duplice aspetto: per prima cosa consente, in

accordo con i problemi legati al raggiungimento della temperatura limite del test troppo rapidamente, di procedere con un primo impulso a bassa energia per poi applicare un secondo impulso a energia superiore per ottenere maggiore accuratezza dei risultati. La seconda ragione è che gli effetti della convezione e del flusso dell'acqua di falda sono in funzione della temperatura. In particolare questi effetti sono legati alla differenza di temperatura tra il fluido che circola all'interno della sonda e la temperatura dell'acqua di falda. La combinazione di più impulsi a procedere con le fasi di iniezione e estrazione di calore fornisce un maggior numero di informazioni, particolarmente utili allo studio della convezione del calore. L'iniezione di calore, comporta un riscaldamento del fluido e un decremento della viscosità e viceversa durante l'estrazione di calore comportando un raffreddamento del fluido ed aumento della viscosità. Eseguendo un duplice esperimento nelle stesse condizioni con unica variante l'induzione del movimento d'acqua di falda si è indagato l'influenza di tale effetto sul test. L'esperimento senza movimento d'acqua di falda è stato eseguito tra il 03/10/2005 e il 07/10/2005 e verrà indicato come "Reference" mentre l'esperimento con movimento d'acqua di falda, indicato come "Groundwater flow" è stato eseguito nel periodo compreso tra 31/10/2005 e 04/11/2005. Un pozzo d'estrazione d'acqua è presente a una distanza di 2,5 m con filtro a una profondità intorno ai 20 m in cui è stata estratta una portata di 3,2 m³/h durante l'esperimento "Groundwater flow", inoltre sono presenti pozzi di osservazione collocati a diverse distanze radiali per la misura del carico piezometrico. Per quanto riguarda il movimento d'acqua di falda naturale è trascurabile. Per analizzare al meglio questi risultati si sono affiancati ai comuni modelli analitici un modello numerico, in questo caso ottenuto mediante TRNSYS (*Transient simulation model*). La stima dei parametri è ottenuta mediante GenOPT che è un programma di ottimizzazione della minimizzazione del costo della funzione, caratterizzato da diversi algoritmi. Infine per calcolare la risposta della geo scambiatore è stato adoperato SBM (*Superposition Borehole Model*) realizzato da Eskilson nel 1986 . Tale modello è in grado di calcolare il campo delle temperature in 3 dimensioni per qualsiasi numero di pozzi verticali usando differenti tecniche numeriche. I problemi locali possono essere parametrizzati

andando a definire le condizioni geometriche del pozzo e mediante due parametri quali la resistenza interna del pozzo e la resistenza termica del pozzo.

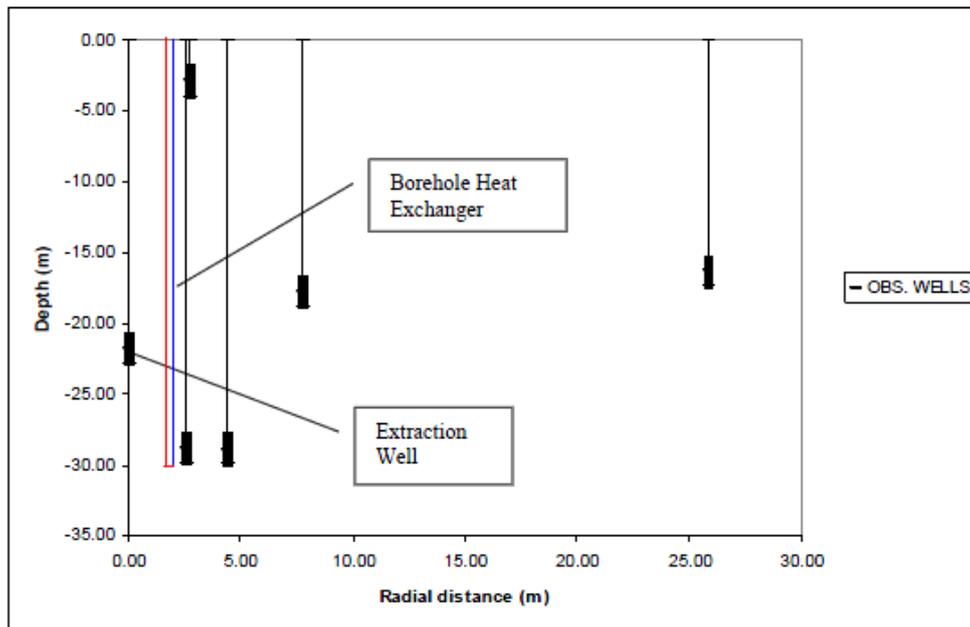


Figura 4 Posizione dei pozzi di osservazione – profondità del filtro e distanza radiale dal pozzo di estrazione d’acqua - Esperimento Henk Witte e e A.J. van Gelder nel 2005

A seguire una breve overview dei parametri che caratterizzano il Test di Risposta Termica per i due esperimenti.

Experiment	Pulse duration (hours)	Flow rate (m ³ /hour)	ΔT (K)	Energy flux (W)
REF - PULSE 1	0 - 24	0.71 ± 0.0074	2.04 ± 0.175	1602 ± 174.5
REF - PULSE 2	24 - 47	0.72 ± 0.0053	3.09 ± 0.145	2446 ± 119.4
REF - RECOVERY	47 - 51	0.70 ± 0.0124	0.00 ± 0.185	4 ± 63.77
REF - PULSE 3	51 - 95	0.70 ± 0.0046	-2.51 ± 0.113	-1947 ± 87.66
GW - PULSE 1	0 - 24	0.69 ± 0.0061	2.09 ± 0.144	1606 ± 108.8
GW - PULSE 2	24 - 48	0.68 ± 0.0066	3.29 ± 0.064	2477 ± 45.72
GW - RECOVERY	48 - 52.4	0.69 ± 0.0151	0.02 ± 0.0902	11 ± 70.05
GW - PULSE 3	52.4 - 95	0.70 ± 0.0047	-2.52 ± 0.117	-1945 ± 91.52

Tabella 1 Overview dei parametri che caratterizzano i TRT per i diversi impulsi per il Reference e il Groundwater flow test Esperimento Henk Witte e e A.J. van Gelder nel 2005

La temperatura del terreno indisturbato è intorno a una temperatura di 12.3 ° C. Dall'andamento della risposta termica per entrambi gli esperimenti in riferimento alla temperatura fluido termovettore iniziale si evincono delle differenze dai test.

Il Groundwater test è caratterizzato da una risposta termica più bassa rispetto al Reference da come aspettativa, in quanto nel test con movimento d'acqua di falda si avranno maggiori conducibilità termiche che permetteranno una maggiore dispersione del calore. Fenomeno maggiormente pronunciato nel secondo impulso con iniezione di calore.

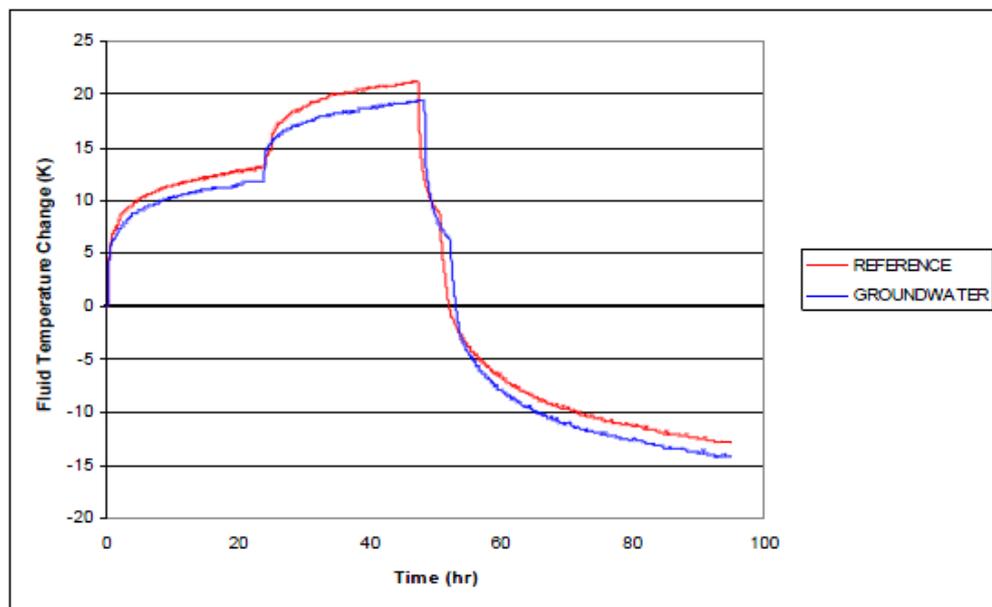


Figura 5 TRT per entrambi gli esperimenti rappresentando la temperatura media del fluido rispetto alla temperatura del fluido termovettore iniziale - Esperimento Henk Witte e e A.J. van Gelder nel 2005

Dai presupposti del test si aspetta che la conduttività apparente del suolo tendi ad aumentare con l'aumento della differenza di temperatura tra il fluido all'interno della sonda e l'acqua di falda, d'altro canto il valore vero può essere stimato con piccole differenze di temperatura tra i due fluidi. Con l'aumento della differenza di temperatura tenderà ad essere notevolmente più grande l'effetto del movimento d'acqua di falda se presente. In teoria se il movimento d'acqua di falda non gioca un ruolo importante si dovrebbero ottenere gli stessi risultati sia durante l'estrazione che l'iniezione di calore.

Experiment	Pulse duration (hours)	Soil conductivity (W/mK)	Borehole Resistance (K/(W/m))	Error
REFERENCE	5-95	2.09	0.086	14.75
REF - PULSE 1	5-23	2.11	0.148	0.264
REF - PULSE 2	27-47	2.01	0.126	0.384
REF - PULSE 3	55-95	2.18	0.038	1.428
GW EXTRACTION	5-95	2.31	0.09	15.8
GW - PULSE 1	5-23	2.03	0.146	0.299
GW - PULSE 2	27-47	2.22	0.130	0.321
GW - PULSE 3	55-95	2.32	0.045	1.54

Tabella 2 Overview dei risultati ottenuti dal modello per i diversi impulsi , per TRT Reference e Groundwater flow - Esperimento Henk Witte e e A.J. van Gelder nel 2005

Tuttavia in questi test il più alto valore di conduttività è stato trovato per l'esperimento con movimento d'acqua di falda durante l'ultimo impulso, l'estrazione di calore, quando la differenza di temperatura non era molto grande tra la temperatura del fluido all'interno del geo scambiatore e l'acqua di falda. Forse del residuo di calore dal precedente impulso d'iniezione di energia è trasportato attraverso la sonda, ma in quel caso si sarebbe atteso una diminuzione dell'effetto nel tempo, cosa che non è avvenuta.

Per meglio comprendere la natura di tali fenomeni si è pensato di ripetere gli esperimenti ma a fasi invertite, prima estrazione di calore e poi iniezione, così da determinare come l'ordine degli impulsi influenza le misure.

3.2.1 Differenze tra gli esperimenti e complicazioni durante il progetto

Diversi anni sono passati dall'esperimento di Witte e van Gelder, e alcune condizioni possono essere cambiate quali per esempio la compattezza del materiale di riempimento del pozzo (incidendo così su diversi parametri quali la conducibilità termica del materiale). In particolare il filtro del pozzo di estrazione d'acqua danneggiato nel corso del tempo è stato sostituito. Tuttavia per limiti operativi è stato cambiato con un altro di lunghezze inferiori così andando a interessare dei strati diversi del terreno (con diversa conducibilità idraulica) dall'esperimento precedente.

Anche una parte della strumentazione è cambiata, si è inserito un maggior numero di sensori di temperatura in pozzi vicini così da avere delle informazioni sul comportamento dei vari strati del terreno a determinate distanze e una pompa di estrazione d'acqua non sommersa, che ha fornito una portata d'estrazione pari a 1/6 rispetto a quella nel passato esperimento, fermandosi qualche ora per limiti operativi durante l'esperimento.

Infine durante il lavoro di tesi si sono manifestati delle complicazioni nella macchina per il TRT legate all'usura della 3 Way Valve, che induceva delle fluttuazioni di temperatura troppo alte tra il fluido in ingresso e in uscita dello scambiatore di calore; così da avere iniezioni o estrazioni di calore non realmente costanti. Dopo diversi tentativi il problema è stato risolto solo dopo aver sostituito integralmente la 3 Way Valve. A seguire un esempio di TRT con delle eccessive fluttuazioni, queste sono più evidenti durante l'estrazione di calore che durante l'iniezione legati a un maggior funzionamento della valvola. Infatti avendo come limite operativo il punto di congelamento del fluido si imposteranno dei range di temperatura più ristretti e quindi sarà necessaria una maggior attività di miscelamento da parte della 3 Way Valve.

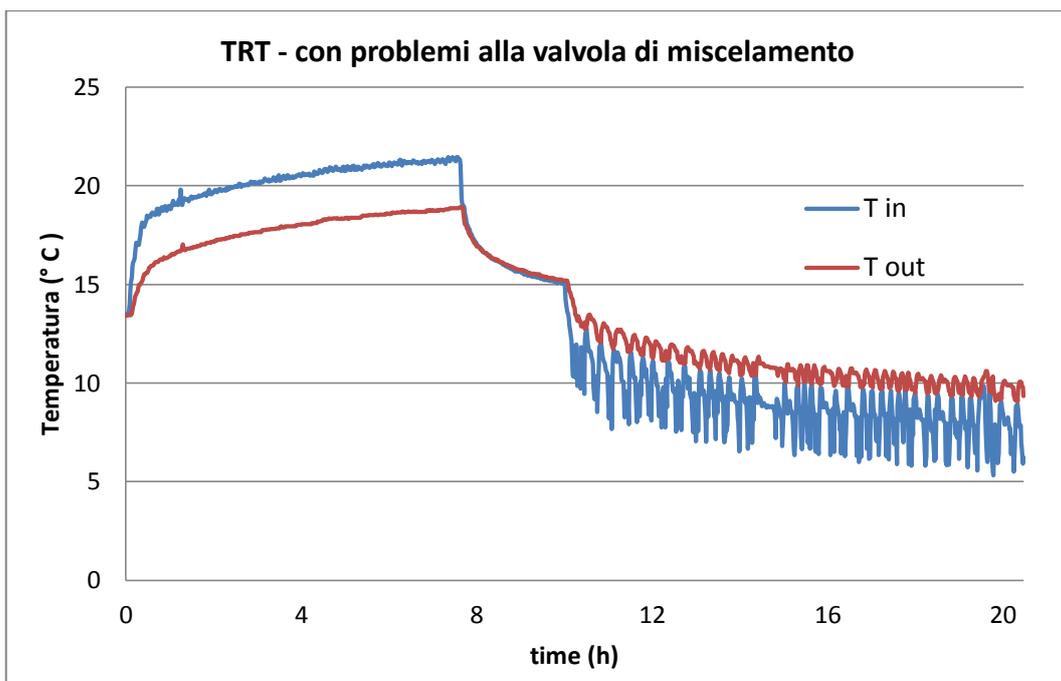


Figura 6 TRT con problemi alla 3 way valve

3.3 Attrezzature disponibili per i TRT

3.3.1 Presentazione della macchina TRT

L'obiettivo dei Test di Risposta Termica (*TRT*) è misurare accuratamente la conducibilità termica del terreno, la resistenza termica del pozzo e la temperatura indisturbata del terreno in un pozzo con scambiatore di calore. La base del test è di controllare l'iniezione o l'estrazione di calore del pozzo, analizzando le relazioni tra il tempo e la risposta termica. L'apparecchio della Groenholland Geo Energy systems raggiunge questo controllando la differenza di temperatura (ΔT), la portata del flusso all'interno dello scambiatore di calore mantenendo costante l'apporto di energia. Sono diverse le variabili che vanno tenute in conto quali: la temperatura del flusso in ingresso, temperatura del flusso in uscita, portata del flusso, ma anche la temperatura esterna, posizione della valvola, temperatura del serbatoio, ecc. tutte queste variabili vengono registrate a intervalli regolari.

Il test opera usando una pompa reversibile di calore acqua-aria che riscalda o raffredda un serbatoio contenente acqua usando come fonte l'aria mantenendo la temperatura del serbatoio più alta o bassa rispetto alla temperatura del fluido all'interno del terreno. The 3 Way Valve regola l'ammontare di fluido caldo o freddo da aggiungere all'interno dello scambiatore di calore e un'uguale quantità di flusso dal terreno andrà all'interno del serbatoio che sarà a sua volta riscaldato o raffreddato. La 3 Way Valve mantiene una fissata differenza di temperatura usando a PID controller algoritmo mentre per mantenere fissa la portata si adopera un controllo di frequenza della pompa.

L'apparecchio per la misurazione del Test di Risposta Termica è costruito all'interno di un container che ne consente un facile trasporto e può operare senza la necessità di un supervisore. La potenza necessaria per svolgere il Test può essere fornita o dalla rete elettrica o fornita da un generatore. L'apparecchio è provvisto di un sistema telemetrico che ne consente un monitoraggio in remoto.



Figura 7 Foto della macchina TRT della Groenholland Geo Energy systems

L'accuratezza del test dipende, in particolar modo, dalla precisione delle misure della portata e dalla differenza di temperatura. Tuttavia, fattori esterni quali agenti atmosferici o movimenti di acqua di falda possono influenzare i risultati, specialmente un alto numero di Reynolds potrebbe generare del calore all'interno della sonda dovuto a fenomeni di attrito. Questo fenomeno potrebbe essere misurato con misure di differenza di pressione ma in generale risultato essere abbastanza piccolo.

L'apparecchio della Groenholland Geo Energy systems risulta simile agli altri apparecchi adoperati da altre strutture o compagnie con l'eccezione che esso consente di eseguire il Test di Risposta Termica sia in iniezione che in estrazione. La principale differenza è che la macchina non adopera un riscaldatore elettrico direttamente per riscaldare il fluido ma adopera come precedentemente detto una pompa di calore reversibile acqua-aria, uno schema è illustrato nella figura a seguire. Componenti del sistema includono: una pompa di calore - un serbatoio di 0.5 m^3 - 2 pompe di circolazione (una per il fluido tra la pompa di calore e il serbatoio e un'altra per la circolazione del fluido dal serbatoio alla sonda) - 3 Way Valve - sensori di flusso e diversi sensori di temperatura

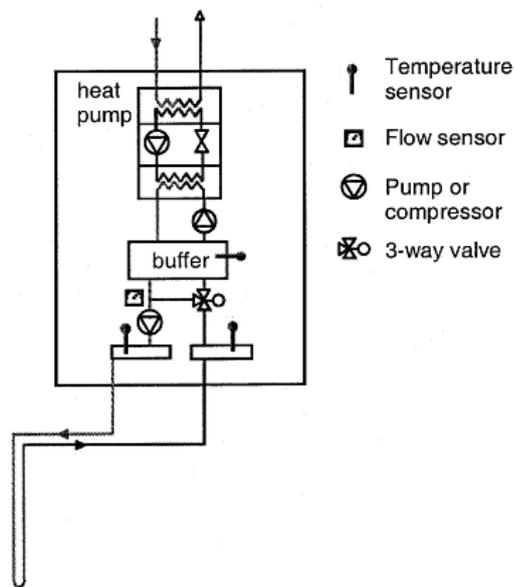


Figura 8 Schema componenti della macchina TRT

L'interfaccia del software installato sulla macchina fornisce diverse informazioni, qui di seguito una breve descrizione.

Viene raffigurato il display principale del quadro di comando del software .

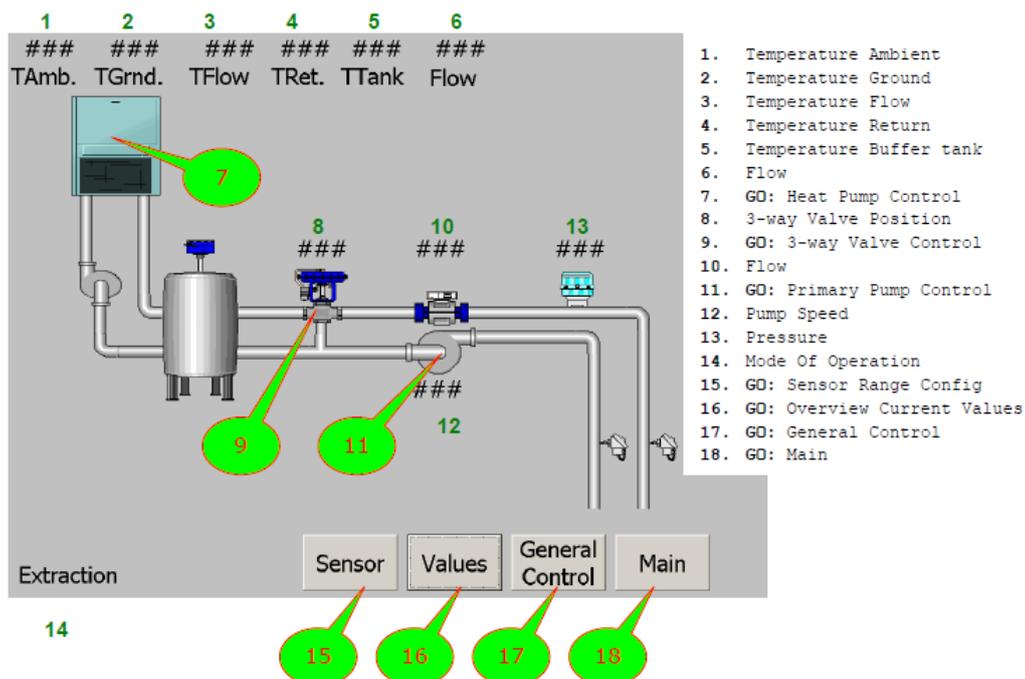


Figura 9 Display principale del quadro di comando del software

Lungo la fila in alto si leggono i principali valori dei sensori mentre in basso sulla sinistra s'indica il modo di operare (estrazione o iniezione di calore), dopo questo

ci sono quattro bottoni che consentono all'operatore di andare al display settaggio dei sensori, per i correnti valori dei sensori, per il quadro generale di controllo e infine per ritornare all'interfaccia principale.

Il resto del display mostra lo schema della macchina TRT del sistema. La pompa di calore è disposta in alto a sinistra, a seguire il serbatoio, 3 way valve, la pompa con frequenza di controllo e i sensori di pressione. Infine i due sensori di temperatura collocati in prossimità dello scambiatore di calore.

La pompa di calore, 3 way valve e la pompa con frequenza di controllo sono aree attive, quando l'operatore seleziona una di queste aree corrisponde ad un altro display di controllo riferito al componente. In questo display mostra ad ogni modo le attuali condizioni delle operazioni.

Il display della pompa di calore controlla il riscaldamento o il raffreddamento del serbatoio legato alla temperatura del fluido all'interno del geo-scambiatore (*BHE*), in maniera tale aggiungere un certo apporto di fluido all'interno di esso per raggiungere la differenza di temperatura decise. Nella figura a seguire il display per la pompa di calore.

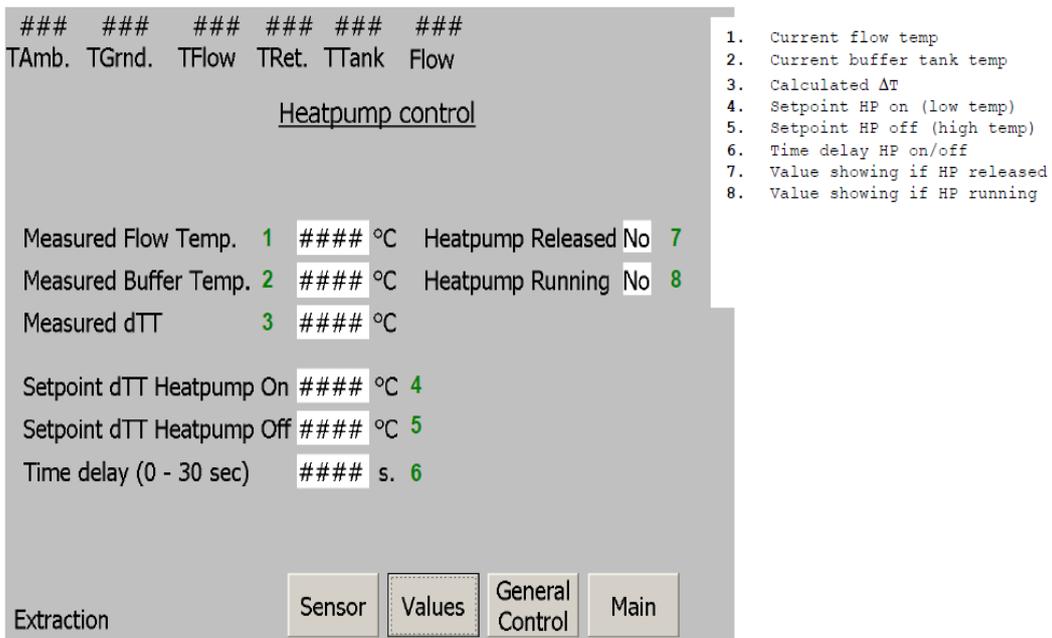


Figura 10: Display per la pompa di calore del software

La scelta del range in cui la pompa di calore opera, differenza di temperatura tra il fluido nel serbatoio e il fluido in ingresso nello scambiatore di calore, viene fornita dalla esperienza. Il principio di questa banda è quello di avere un buon controllo della 3 Way valve durante il funzionamento della pompa di calore. Tali valori dovrebbero essere selezionati tenendo conto del ritardo presente tra l'attivazione della pompa di calore e l'apporto di calore inviato al serbatoio. D'altra parte, una grossa differenza di temperatura tra il serbatoio e il fluido d'ingresso potrebbe influenzare il funzionamento della 3 Way valve (così da non operare in condizioni ottimali) . Potrebbe, infatti, essere necessario cambiare i parametri durante l'esperimento. I numeri (1) (2) e (3) mostrano la temperatura del fluido, la temperatura del serbatoio e la differenza di temperatura tra i due, mentre i valori (7) e (8) indicano se la pompa di calore è aperta e se attualmente è attiva o meno. Il funzionamento della pompa di calore è quindi legato a questi due parametri. La pompa di calore si attiverà una volta che la differenza di temperatura sarà uguale o più piccola del primo valore imposto (4) mentre si chiuderà quando questa differenza sarà più grande del valore (5). Il tempo di ritardo è usato quando i valori dei sensori sono coincidenti con i valori fissati. Durante l'iniezione di calore il ΔT è calcolato come (ΔT positivo quando T serbatoio > T flow):

$$\Delta T = T\text{-serbatoio} - T\text{-flow}$$

mentre durante l'estrazione di calore il ΔT è calcolato come (ΔT positivo quando T serbatoio < T flow):

$$\Delta T = T\text{-flow} - T\text{-buffer}$$

La 3 Way valve display controlla la differenza di temperature tra il fluido in ingresso e in uscita dallo scambiatore di calore e I PID (Proportional Integral Differential) parametri per i sensori di temperatura andando ad aprire così la valvola apportando una porzione di fluido dal serbatoio più caldo o freddo all'interno dello scambiatore.

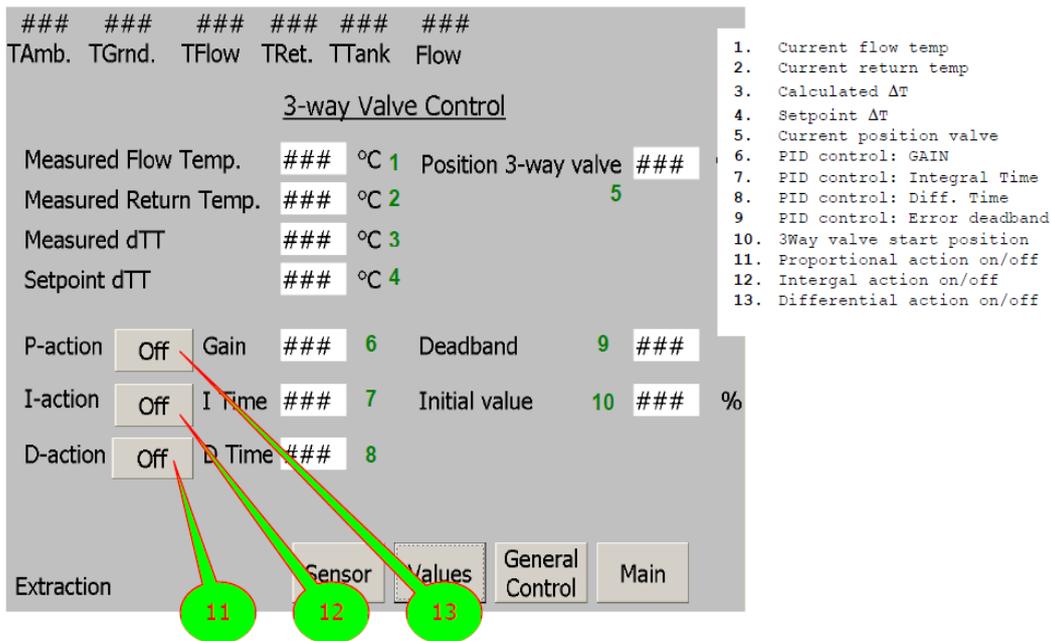


Figura 11 - 3 Way Valve display del software

Il principale processo di riscaldamento o raffreddamento nella sonda viene controllato qui. Il calore iniettato o estratto è misurato dalla differenza di temperatura (3) tra il fluido in uscita (1) e in ingresso (2) che dovrebbe essere mantenuto uguale dalla differenza di temperatura stabilita (4). La posizione della valvola (5) è controllata dal PID algoritmo di controllo. L'operatore può selezionare se attivare o no i P, I, D e controllare tali funzioni mediante i parametri Gain, I time e D time selezionando opportuni valori (6) (7) e (8) che vengono in genere scelti dall'esperienza in campo. Deadband (9) viene selezionata per prevenire delle fluttuazioni eccessive della valvola andando tuttavia ad incidere sulla accuratezza. Un'iniziale posizionamento della valvola (10) può essere selezionato, così che quando la 3 Way valve viene aperta e quando il PID control viene chiuso la valvola si posiziona a tale valore.

La pompa per la circolazione imposta la velocità del fluido, manualmente o con PID (Proportional Integral Differential) algoritmo di controllo.

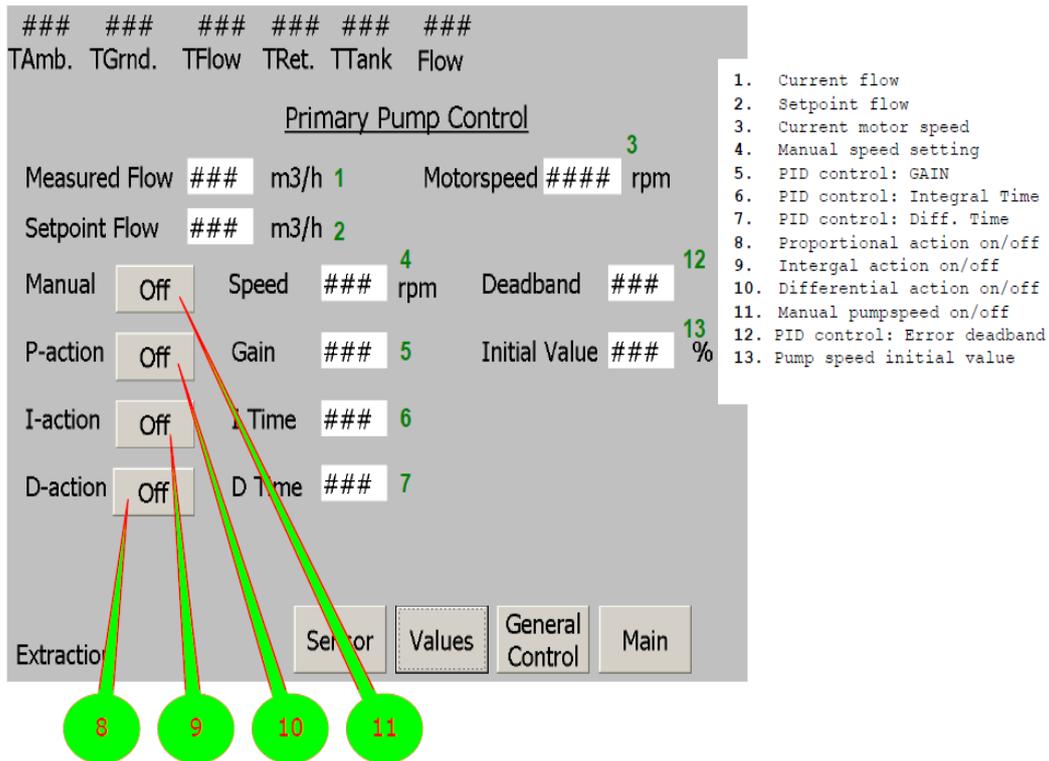


Figura 12 Pompa di circolazione display del software

L'operatore può selezionare se attivare o no i P, I, D e controllare tali funzioni mediante i parametri Gain, I time e D time selezionando opportuni valori (6) (7) e (8) che vengono in genere scelti dall'esperienza in campo. Deadband (9) viene selezionata per prevenire delle fluttuazioni eccessive della valvola andando tuttavia ad incidere sulla accuratezza. Una manuale impostazione può essere scelta usando il bottone (11) e il valore (4).

Il General Control display controlla l'intero sistema e tutti i singoli componenti inizio/fine, il modo di operare estrazione o iniezione, il tempo di registrazione dei dati (8) e infine il comando per uscire dal software è qui presente.

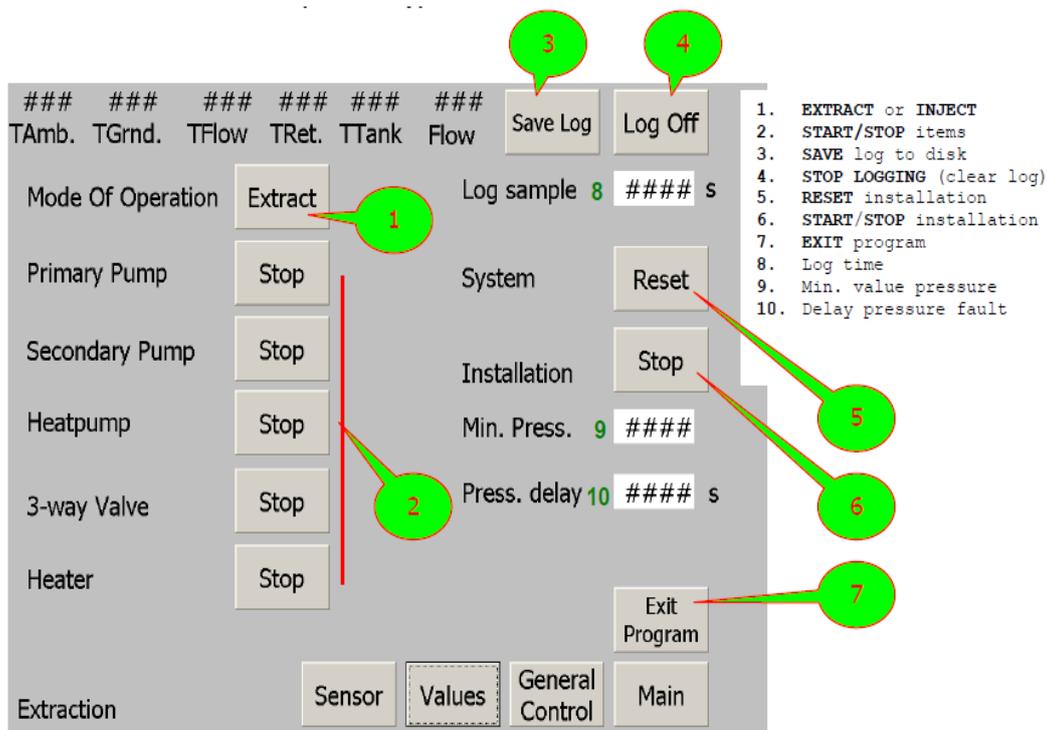


Figura 13 General control display del software

3.3.2 Termocoppie

La termocoppia è un sensore di temperatura largamente diffuso. In particolare le termocoppie sono ampiamente utilizzate perché economiche, facilmente sostituibili, standardizzate e possono misurare un ampio intervallo di temperature.

In un circuito formato da due conduttori di natura differente, sottoposto a un gradiente di temperatura, si instaura una differenza di potenziale. Questo fenomeno, chiamato effetto Seebeck in onore del fisico che scoprì tale principio, è sfruttato dalle termocoppie.

Una termocoppia, quindi, è costituita da una coppia di conduttori elettrici di diverso materiale uniti tra loro in un punto. In particolare per proteggere la termocoppia la si riveste di una guaina impermeabile. Esistono diverse tipi di termocoppie, per i nostri esperimenti è stata adoperata una termocoppia Tipo K (Chromel (Ni-Cr) (+)/Alumel (Ni-Al) (-)) che sono termocoppie di uso generale, economiche e disponibili in una grande varietà di formati. Il loro intervallo di misura va da -200 °C a 1260 °C. La sensibilità è di circa 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Queste termocoppie sono collegate a una centralina acquisizione dati CR1000, che misura l'impulso elettrico convertendo esso in unità ingegneristiche, migliorando le operazioni di calcolo e riducendo i dati in operazioni statistiche. Le misure sono memorizzate all'interno del Datalogger CR1000 per poi essere trasferite al PC via dispositivo di memoria esterna o via telematica.

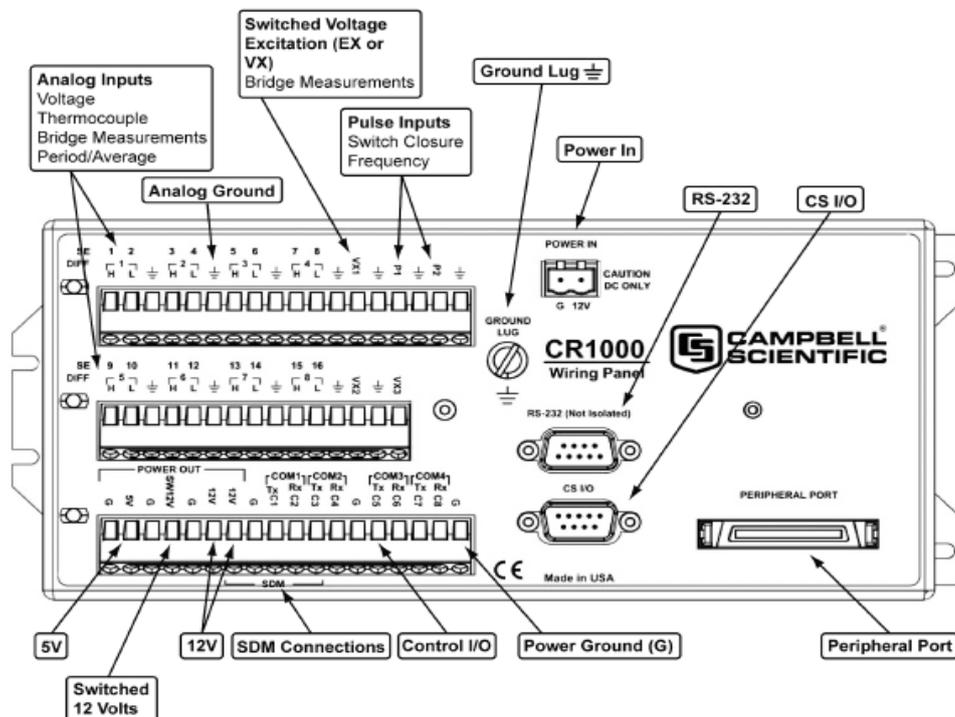


Figura 14 Rappresentazione del Datalogger CR1000

L'errore nella misurazione della temperatura risulta essere una combinazione dell'errore nel termistore di temperatura (sensore che inverte una temperatura in una corrente elettrica) e le differenze di temperatura tra il pannello e il terminale a cui è collegata la termocoppia.

L'errore teorico commesso nella misurazione della temperatura può essere sommariamente stimato $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ compreso tra -0 a 40°C , $\pm 0.3^{\circ}$ da -25 a 50°C , e $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ da -55 a 85°C . Un migliore andamento dell'errore in funzione della temperatura è rappresentato nella figura sottostante. Le termocoppie sono state calibrate procedendo alla misurazione della stessa temperatura quando immerse in un bagno d'acqua-ghiaccio a temperatura costante (0°C). Una ragionevole stima

dell'errore ottenuta dalla calibrazione è quello di considerare l'incertezza per ogni sensore di $\pm 0.10^{\circ}\text{C}$.

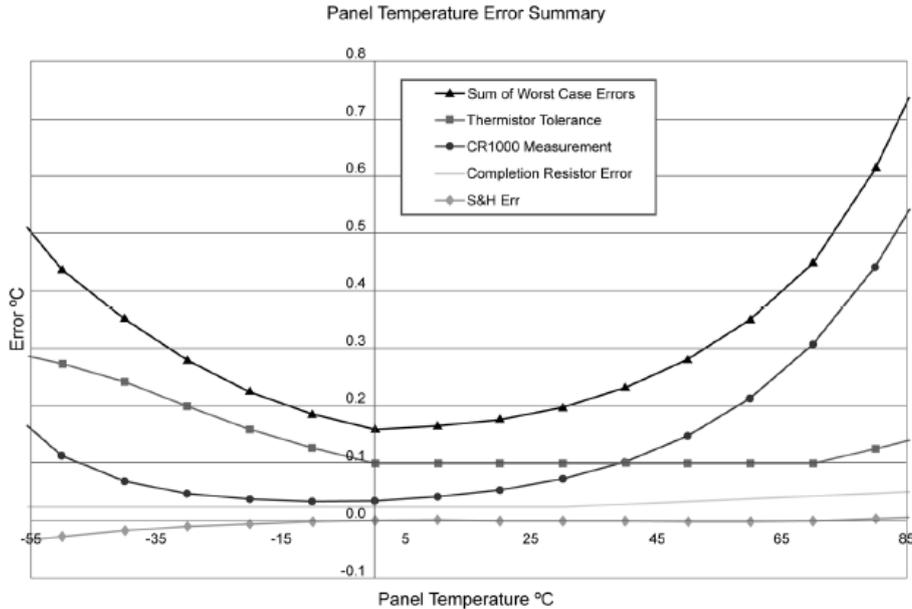


Figura 15 Errore della temperatura in funzione della temperatura del pannello

3.3.3 PT100

La termoresistenza, comunemente chiamata termometro a resistenza o RTD (*Resistance Temperature Detector*), è un sensore di temperatura che sfrutta la variazione della resistività di alcuni materiali al variare della temperatura. In particolare per i metalli esiste una relazione lineare che lega resistività e temperatura. Il principale metallo utilizzato per questi sensori è il Platino (*Pt*) che ha un valore di resistenza nominale di 100 Ohm a 0°C . PT100 è uno strumento sufficientemente preciso $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e relativamente economico, con esso sono state eseguite diverse misurazioni della temperatura dell'acqua di falda durante l'esperimento.



Figura 16 PT100



Figura 17 Multimetro Digitale - 1000 V

3.3.4 Fluido termovettore

Un fluido termovettore è una sostanza allo stato fluido che accumula e trasporta il calore. Per il nostro caso abbiamo un fluido acqua – glicole propilenico (anticongelante) per raggiungere basse temperature durante il TRT nella fase di estrazione di calore. Il primo obiettivo è stato quello di determinare la percentuale di glicole presente all'interno del fluido termovettore nella macchina e nel geoscambiatore. Sono stati adottati più metodi per ottenere tali informazioni:

- 1) Misura della densità del fluido e della sua temperatura prendendo in considerazione come riferimento l'acqua.

$$\begin{array}{ll} \rho_{\text{fluido}} = 1013.1 \text{ kg/m}^3 & T_{\text{fluido}} = 14.0 \text{ }^\circ\text{C} \\ \rho_{\text{water}} = 1002 \text{ kg/m}^3 & T_{\text{water}} = 24.1 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

- 2) Misura del punto di congelamento mediante rifrattometro prendendo come riferimento l'acqua.

$$\begin{array}{l} P_c \text{ fluido} = -2.5 / -2 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_c \text{ water} = 0 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

- 3) Raggiungimento del punto di congelamento eseguendo un TRT di prova. Nella figura a seguire si ha l'andamento della temperatura del serbatoio individuando il punto di congelamento a una temperatura di $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Da tenere presente che all'interno della pompa di calore si raggiungeranno sempre temperature più basse rispetto alla temperatura del serbatoio. Possiamo considerare accettabile un valore della temperatura di congelamento intorno a $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

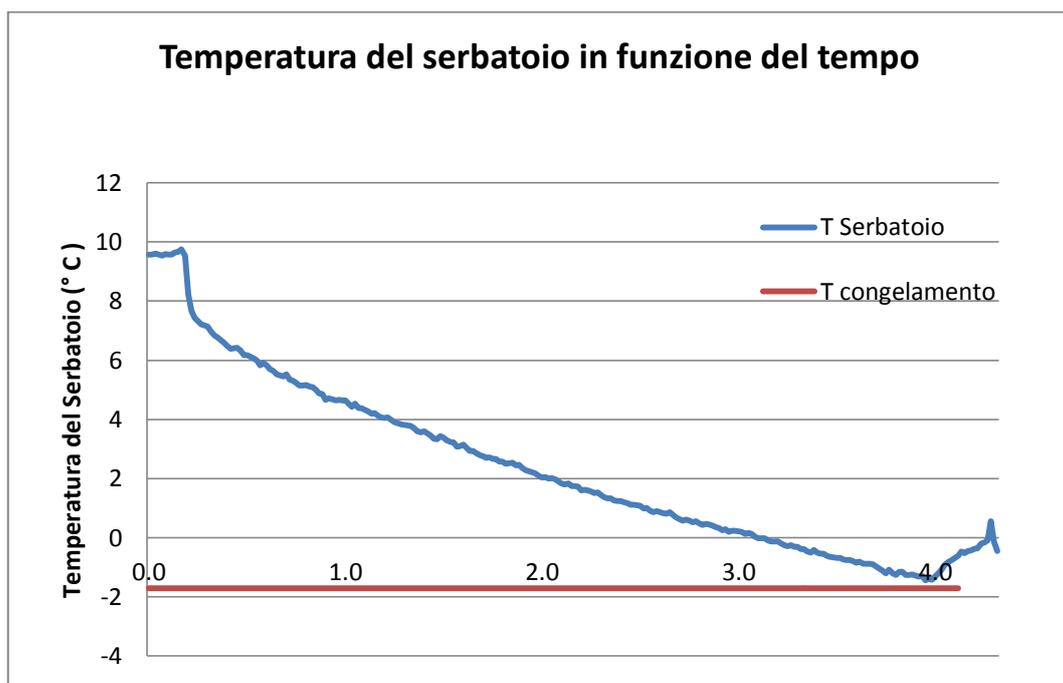


Figura 18: Temperatura del serbatoio in funzione del tempo fino al raggiungimento della T. congelamento

Conoscendo tutte queste informazioni, adoperando tabelle e formule si determina che all'interno della macchina abbiamo un fluido termovettore costituito da acqua e 9 % di glicole propilenico.

E' nostro interesse che il Test di risposta termico non fallisca raggiungendo temperature di congelamento, per soddisfare tale requisito e operare entro un margine di sicurezza è stato deciso di raggiungere una percentuale di glicole propilenico pari al 15 % del fluido termovettore. Per cui, conoscendo la volumetria del serbatoio (pari a 500 litri) e la capacità dello scambiatore di calore

(pari a 30 litri), sono stati aggiunti 25 litri di glicole propilenico per ottenere tale percentuale di fluido nella macchina.

Le caratteristiche del fluido termovettore quali densità, capacità termica, conduttività termica e viscosità, sono in funzione della temperatura in cui si sta operando. In tabella valori operativi di tali caratteristiche.

Properties Monopropylene Glycol, 15 %	Temperature (°C)					
	-5	0	5	10	20	30
Density (kg/m ³)	1021.7	1020.4	1019.1	1017.6	1014.2	1015.1
Heat Capacity (J/(Kg.K))	3987	3996	4005	4015	4033	4052
Conductivity (W/m.K)	0.481	0.489	0.498	0.506	0.520	0.533
Viscosity (mPa.s)	3.78	3.10	2.58	2.18	1.62	1.25

Tabella 3 Valori caratteristici del fluido termovettore in funzione della temperatura

3.4 Presentazione del sito

3.4.1 Geografia

Il sito dove sono stati svolti i Test di Risposta Termica si trova ad Amsterdam, in Olanda, in via Valschermkade 26, sede della Groenholland Geo Energy systems con coordinate geografiche 52.3412°N e una longitudine 4.8458°E.

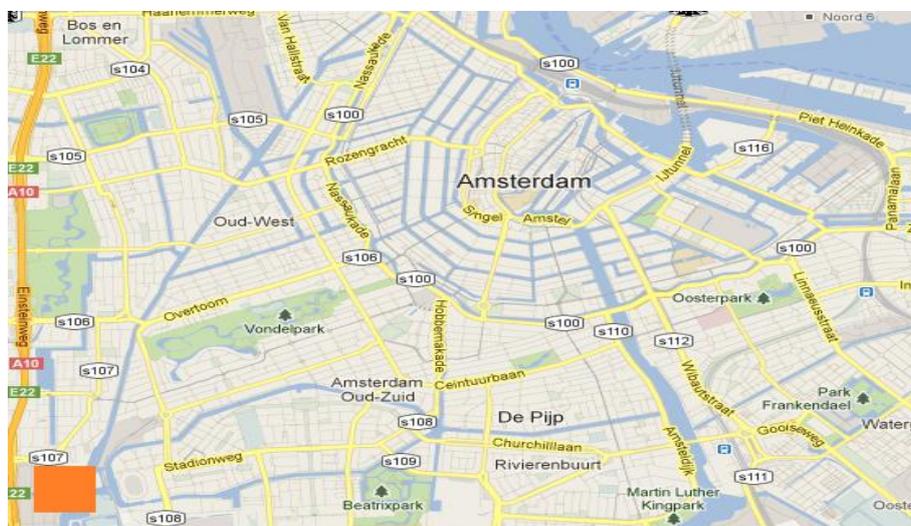


Figura 19 Individuazione del luogo in cui sono stati svolti i TRT

3.4.2 Geologia del suolo

Il modo tradizionale per ottenere informazioni sulle caratteristiche termiche del sito è accertare i differenti tipi di terreno e roccia che lo caratterizzano. Come precedentemente detto attenti studi sono stati realizzati in passato (Van Gelder, A.J., Witte, H.J.L., Kalma, S., Snijders, A. and R.G.A. Wennekes) che qui riporteremo parzialmente. Un profilo del suolo è stato realizzato durante la perforazione del pozzo come riportato nella tabella a seguire, il profilo è saturato ad una profondità di 1 m al di sotto della superficie. Per ottenere maggiori informazioni sui diversi tipi di terreno che caratterizzano il suolo, una particolare analisi granulometrica è stata realizzata su diversi campioni e un'analisi mediante il cono di penetrazione (che fornisce la resistenza alla punta e l'attrito laterale in funzione della profondità indicando lo stato di compattazione o densità dei differenti strati del suolo) è stato realizzato.

Sulla base di queste dettagliate informazioni geologiche è stato ottenuto dalla letteratura il “miglior valore” applicando un opportuna media pesata delle caratteristiche termiche del terreno. Sono evidenti, applicando questo metodo, due limiti. Il primo, che è particolarmente difficile ottenere il tipico valore per i differenti tipi di suolo a questa scala di dettaglio, in particolare quando non si hanno ben definite distinzioni di suolo come argilla o limo. Il secondo problema è quello che il range di valori è abbastanza ampio, infatti la capacità termica del suolo potrà variare tra 1.19 W/(mK) a 3.40 W/(mK). Un progettista prudente andrà a usare così il valore più basso ma di conseguenza la lunghezza dello scambiatore sarà più grande comportando un sistema notevolmente più costoso.

**al di sotto di 1m di profondità, il suolo risulta saturo d'acqua*

Depth (m)	Texture	Consolidation	Conductivity (λ), W/ mK			Volumetric heat capacity (c), MJ/ m ³ K		
			Min	Max	Avg	Min	Max	Avg
0	Pavement	-	-	-	-	-	-	-
0 - 1	Sandy supplementation layer	Mixed, low	1.11	1.25	1.20	-	-	1.70
1 - 4	Fine grained sand, shells	Low	0.58	1.75	1.00	1.23	2.12	1.80
4 - 6	Peaty and clayey	Medium	0.90	1.32	0.80	1.10	3.6	1.90
6 -13	Fine sand, silty clay with organic matter	Medium	-	-	1.30	-	-	2.30
13 - 16	Medium coarse sand with fine gravel	Medium	1.73	5.02	2.40	2.20	2.72	2.50
16 - 18	Medium coarse sand with fine gravel	Medium	1.73	5.02	2.40	2.20	2.72	2.50
18 - 27	Medium coarse sand with fine gravel	Layered, high	1.73	5.02	2.40	2.20	2.72	2.50
27 - 29	Fine sand, clayey	Medium	1.34	4.8	1.8	1.90	2.60	2.30
29 - 30	Medium coarse sand with fine gravel	High	1.73	5.02	2.40	2.20	2.72	2.50
30 - 31	Fine sand with clay and silt lenses	Medium	1.34	4.8	1.80	1.90	2.60	2.30
31 - 35	Medium coarse sand	High	1.73	5.02	2.40	2.20	2.72	2.50
Weighted average			1.19	3.40	1.88	1.53	2.09	2.33

Tabella 4 : caratteristiche geologiche e termiche del profilo del suolo

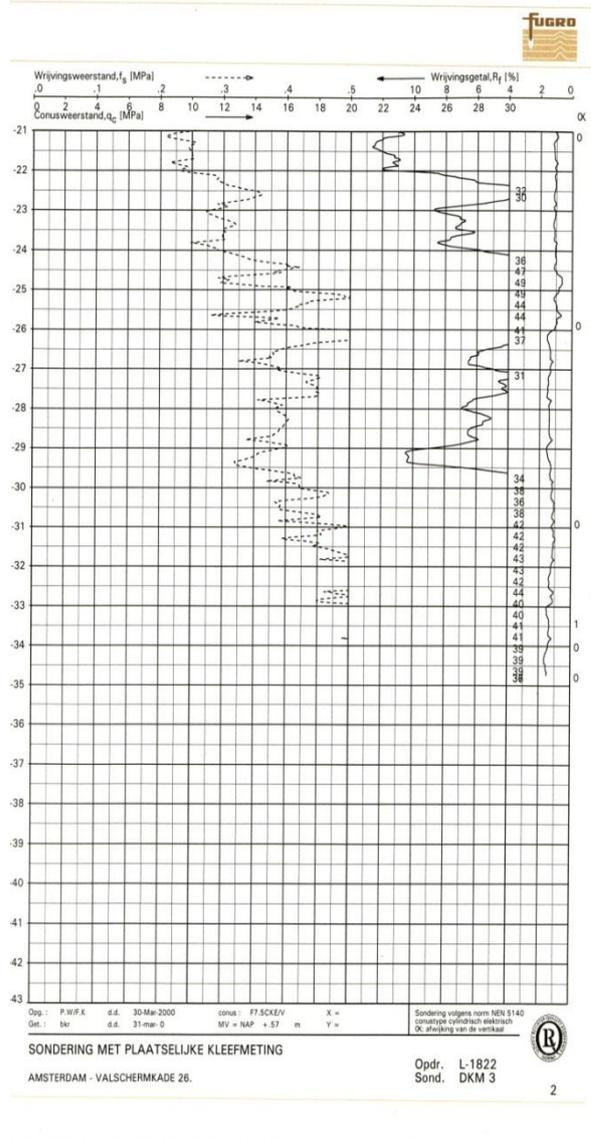
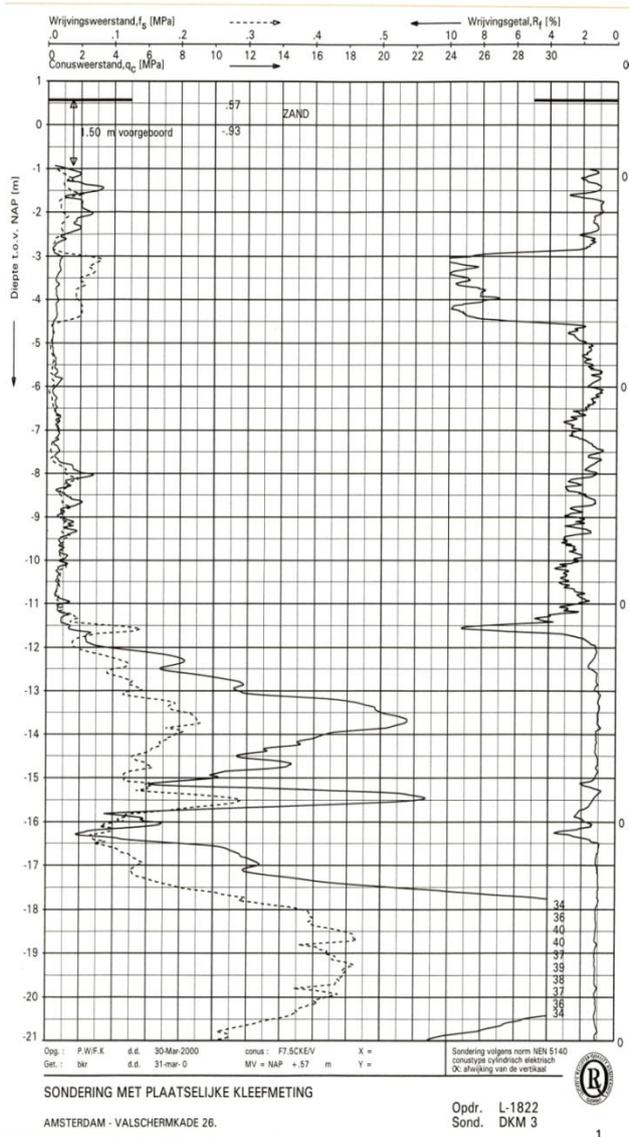


Figura 20 : Prova del cono a penetrazione

3.4.3 Stima delle conduttività termica del suolo usando il metodo “Non-Steady-State Probe”

Dal profilo del suolo, sono stati presi nove campioni e analizzati da un gruppo di fisica applicata dell’Università di Wageningen. In funzione della struttura del campione, le analisi sono state realizzare due o tre volte, i risultati sono presentati nella tabella a seguire. Sommarimente le imprecisioni risultano essere inferiori del 5%. Solamente il campione 6, ha prodotto risultati dell’ordine inferiore rispetto a quelli tipici conseguentemente è stato escluso dall’applicazioni di questo metodo. Il range di valore della conducibilità termica del terreno risulta

evidentemente ampio, infatti il risultato risulta essere compreso tra 1.09 W/(mK) e 2.868 (W/mK) .

Depth, (m)	n	Texture	Conductivity (k), W/m ·K			
			1	2	3	Average
0.8	1	Sandy suppletion layer	2.155	2.375	-	2.265
1.4	2	Fine grained sand, shells	2.486	2.583	-	2.535
4	4	Peaty and clayey	1.143	1.127	1.128	1.135
6	5	Fine sand, silty clay with organic matter	1.659	-	-	1.659
8	6	Fine sand, silty clay with organic matter	0.191	-	-	-
10	7	Fine sand, silty clay with organic matter	1.165	1.016	-	1.091
14	9	Medium coarse sand with fine gravel	2.588	2.306	2.587	2.447
22	11	Medium coarse sand with medium coarse gravel	2.809	2.75	-	2.780
30	13	Fine sand with clay and silt lenses	2.801	2.934	-	2.868
Average						2.097

Tabella 5 Stima delle conducibilità termica del suolo applicando il metodo “Non-steady Probe method“

3.4.4 Caratteristiche del geo scambiatore e impostazioni dell’esperimento

La sonda geotermica è profonda 30 metri, con singolo tubo a configurazione U di materiale HDPE (*high-density polyethylene*) con diametro esterno di 25 mm. Le due gambe del tubo U sono distanziate a 10 cm. Il diametro del pozzo è di 0.25 m e come materiale di riempimento è stato usato il materiale del sito stesso. Il pozzo è stato realizzato nel 1997 di conseguenza si aspetta che le caratteristiche termiche del materiale del riempimento siano variate nel tempo.

In aggiunta ai dati ottenuti dall’apparecchiatura del Test, altre misure sono state ottenute adoperando 2 pozzi di osservazioni di lunghezza di 30 metri in un tubo in

PVC (*Polyvinyl chloride*) con un diametro di 40 mm, uno collocato all'interno della sonda stessa mentre l'altro posto a una distanza di 0.75 m. Il tubo di osservazione installato all'interno del pozzo ha il filtro compreso tra 28 m e 30 m di profondità; il pozzo di osservazione posto a una distanza di 0.75 m consiste in un tubo chiuso con all'interno acqua statica. Misurazioni di temperatura sono state effettuate ogni minuto, andando a memorizzare la media per intervalli di 6 minuti a differenti profondità indicate in tabella.

In BHE Observation	3 m	5 m	12 m	15 m	25 m	28 m
0.75 m Observation	4m			15m		

Tabella 6: Profondità delle termocoppie nei pozzi di osservazione

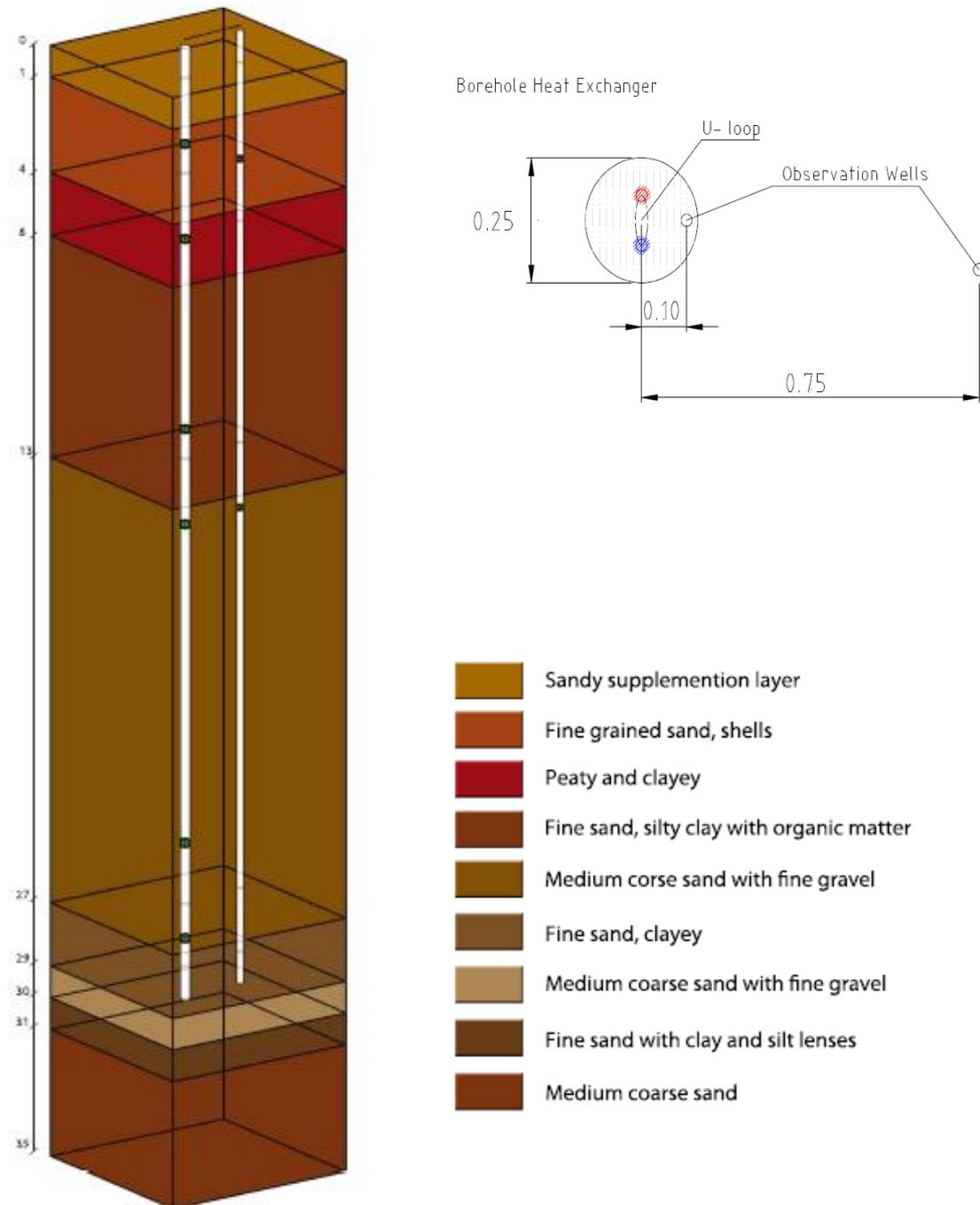


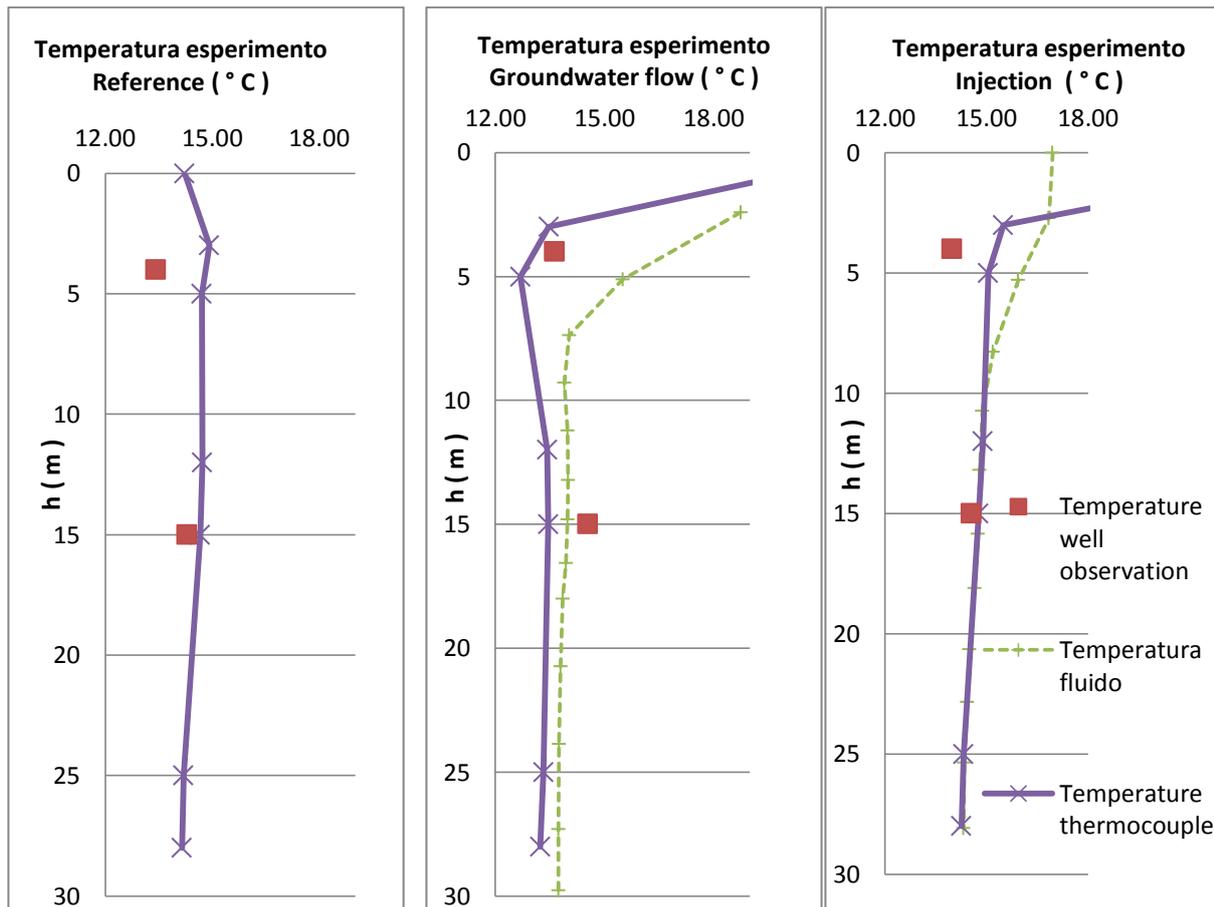
Figura 21 Schema della sonda nel terreno e dei pozzi di osservazione

3.5 Temperatura iniziale del profilo del suolo

La temperatura indisturbata del suolo è un parametro molto importante per la determinazione delle caratteristiche del suolo come descritto nei primi capitoli. Per ottenere un maggior numero d'informazioni su questo parametro si applicano due diversi metodi.

- 1) Ottenendo informazioni dal fluido termovettore all'interno della sonda essendo dopo un certo intervallo di tempo in equilibrio termico con il suolo circostante. Conoscendo la portata del fluido, la sezione del tubo e il tempo di registrazione dei dati (ogni 10 secondi) si costruisce un profilo di temperature del suolo. Considerando con questo metodo solo il fluido presente nella metà del tubo a U, tenendo presente la possibilità di alte incertezze della misurazione della temperature del suolo dovute a diversi elementi quali: energia termica fornita dalla pompa di circolazione, fenomeni di attrito fluido-parete sonda geotermica, imprecisioni sulla profondità ,ecc.
- 2) Adoperando le termocoppie installate nei pozzi di osservazione, dando un maggiore peso alle informazioni al tubo collocato all'interno del pozzo, costruendo il profilo della temperatura del suolo.

Nella figura a seguire, i tre profili di temperatura per i principali esperimenti riportati in questo studio di tesi. Le temperature del suolo indisturbato prima dell'inizio degli esperimenti saranno rispettivamente per Reference TRT 14.4 °C, Groundwater flow TRT 13.8 °C e Injection TRT 14.8°C.



Temperatura iniziale 14.4°C Temperatura iniziale 13.8°C Temperatura iniziale 14.8°C

Figura 22 Temperatura iniziale del profilo del suolo per i diversi TRT (Reference- Groundwater flow – Injection)

3.6 Estrazione d'acqua di falda

Uno degli obiettivi principali di questi esperimenti è vedere, come detto più volte, gli effetti che il movimento d'acqua di falda ha sui risultati dei Test di Risposta Termica. Per analizzare questo effetto si è movimentata l'acqua di falda mediante estrazione di questa con una portata, compresa tra 0.46 – 0.56 m³/h, attraverso un pozzo caratterizzato da un filtro collocato a una profondità compresa tra 11 e 14m.

Pozzi di osservazioni sono presenti a diverse distanze radiali caratterizzati da diverse lunghezze e quindi diverse profondità dei filtri, una rappresentazione schematica della loro geometria e collocazione nella figura sottostante.

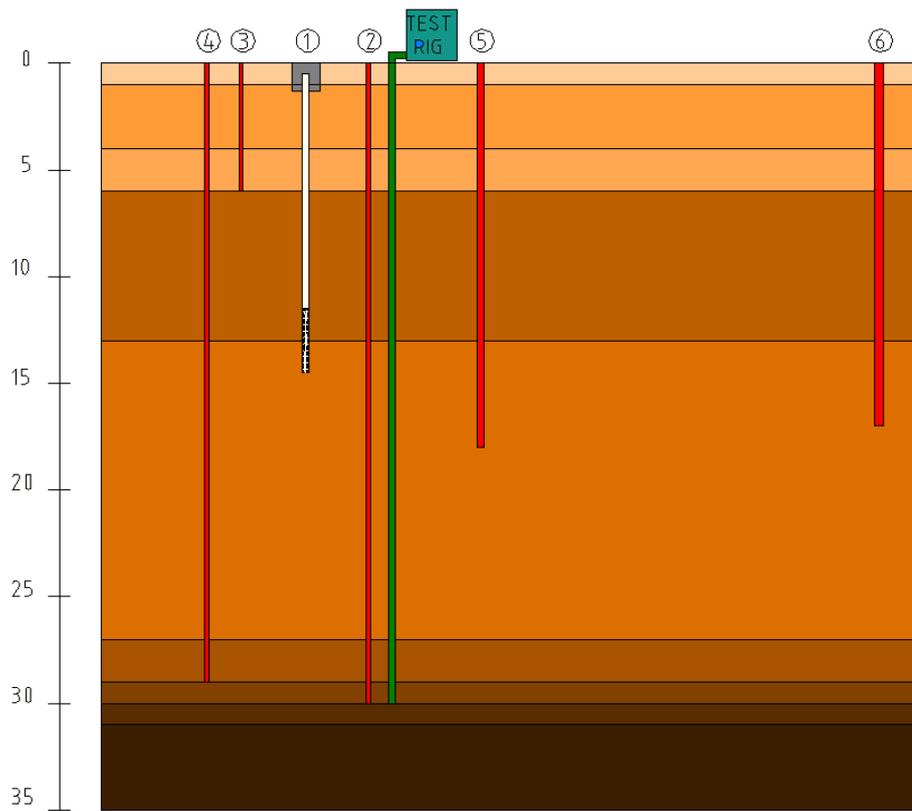


Figura 23 Sezione del suolo – BHE – pozzo d'estrazione d'acqua – pozzi di osservazione

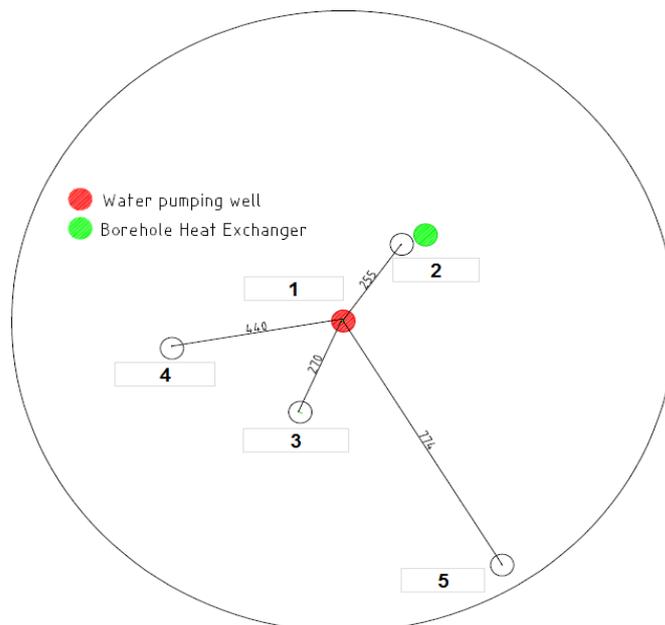


Figura 24 Distanza radiale dei pozzi di osservazione dal pozzo di estrazione d'acqua

Dovuto alla bassa portata d'estrazione e diversa profondità dei filtri, solo i pozzi 1 e 5 sembrano essere influenzati dall'estrazione d'acqua di falda andando così a variare il livello della tavola d'acqua

L'acquifero è principalmente confinato così che l'estrazione della portata d'acqua non fa cambiare il carico freatico. La tavola d'acqua raggiunge una condizione di semi-stabilità dopo pochi minuti d'estrazione della portata d'acqua per poi cambiare pochi cm nelle ore successive.

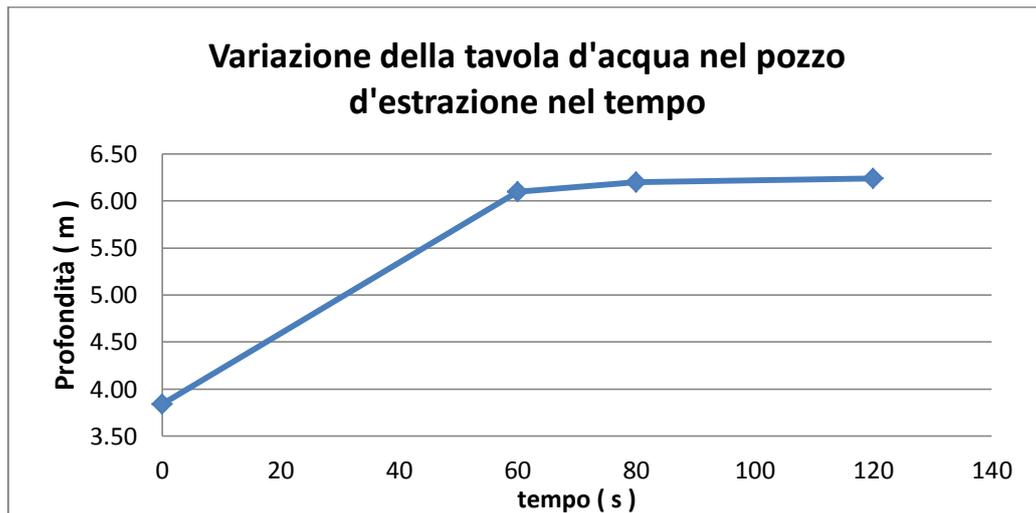


Figura 25 Variazione della tavola d'acqua nel pozzo d'estrazione con l'estrazione della portata d'acqua in funzione del tempo

I problemi che si sono avuti durante l'estrazione d'acqua sono fondamentalmente due. La prima è legata alla riduzione della portata d'acqua nel tempo in funzione all'abbassamento della tavola d'acqua. La seconda problematica è stata nell'arresto della pompa per un paio di ore durante l'esperimento. Questi effetti, tuttavia mostrano interessanti risultati sui sensori di temperatura.

3.7 Simulazione degli esperimenti

Mediante l'ausilio di TRNSYS (*Transient System Simulation*), programma di simulazione componibile, si è riprodotto il funzionamento della macchina per il Test di Risposta Termica per meglio comprendere i procedimenti che avvengono durante l'esperimento. Grazie alla struttura modulare del programma consente di avere un sistema estremamente flessibile dando la possibilità di affiancare dei modelli matematici che non sono presenti nella libreria di base del programma. Il sistema sarà costituito da diversi componenti, interconnessi tra di loro, in maniera tale da svolgere un determinato compito. Le performance del sistema dipenderanno da alcuni parametri fissati, dagli output di alcuni componenti o anche da funzioni legate all'andamento del tempo. Ogni componente viene adattato, modificando i parametri iniziali in maniera da rappresentare al meglio la situazione reale.

A seguire lo schema generale dei componenti che caratterizzano il sistema macchina.

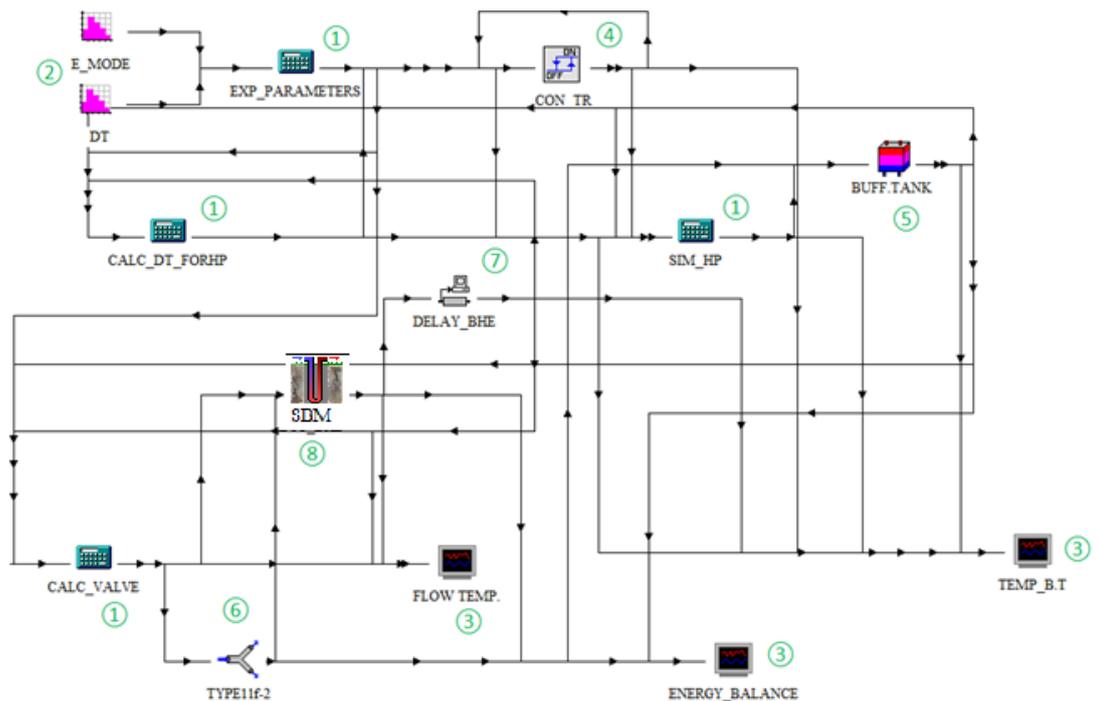


Figura 26 Display in TRNSYS - Componenti che caratterizzano la macchina TRT

Si procede a una rapida introduzione dei singoli componenti, opportunamente raggruppati.

EQUATIONS (1) consente al programma di definire gli INPUT del sistema, alcuni valori iniziali e variabili mediante funzioni algebriche. In particolare nello schema distinguiamo:

Exp_parameters, definiscono i parametri quali: portata del fluido (Q), banda di operatività delle temperatura della pompa di calore (ΔT_{ON} e ΔT_{OFF}) e inoltre due funzioni variabili quali: tipo di modo operativo ($EMODE$) e differenza di temperatura tra il fluido in ingresso e uscita (ΔT_f).

Calc_dt_forHP, equazione che individua la differenza di temperatura tra il fluido uscente tra la sonda geotermica e il serbatoio.

Sim_HP, equazione che simula il comportamento della pompa di calore con caratteristiche 3.5 kW e una portata di 0.5 m³/h adoperando come INPUT la banda di operatività della pompa di calore e la temperatura del serbatoio .

Calc_Valve, equazione che simula la posizione della 3 way_valve in funzione della temperatura del serbatoio e della temperatura in uscita dalla sonda tale da mantenere costante ΔT . Inoltre all'interno di questo componente vi è anche l'equazione che determina la temperatura del fluido miscelato.

TYPE 14 TIME DEPENDENT FORCING FUCTION (2) è un componente che forza temporalmente una funzione sulla base di dati discreti il quale indica il valore della funzione in certi istanti di tempo. In particolare vengono adoperati per passare da estrazione a iniezione di calore e cambiare le ΔT durante l'esperimento.

TYPE 65 ONLINE GRAPHICS (3) questo componente consente di visualizzare l'andamento delle variabili durante la simulazione. Si evidenziano la temperatura in ingresso e uscita dalla sonda geotermica, l'andamento della temperatura del serbatoio e il bilancio dell'energia del sistema.

TYPE 2 ON/OFF DIFFERENTIAL CONTROLLER (4) questo controller genera un controllo di funzione che varia tra 0 e 1. Tale funzione sarà strettamente legato alla temperatura superiore e inferiore in relazione alla banda di temperatura di operatività ΔT_h e ΔT_l . In particolare, in funzione della banda di operatività della pompa di calore, determina quando la pompa di calore è in funzione.

TYPE 521° (5) questo elemento descrive il comportamento di un serbatoio facendo attenzione agli apporti energetici, fenomeni di stratificazione termica, isolamento del serbatoio, ecc. Vengono dati come INPUT i due fluidi provenienti dalla pompa di calore e dal terreno che determineranno la temperatura del serbatoio. Il serbatoio è dunque un mezzo di stoccaggio per l'energia.

TYPE 11 FLOW MIXER (6) questo componente ha diversi modi di operare e può essere settato in diversi aspetti a secondo del numero di condotti che entrano e escono, secondo tipi di fluidi e in funzione delle variabili che controlla (portata fluido, temperatura, umidità). Nel nostro caso vengono dati come INPUT la portata totale, la posizione della valvola e la temperatura così esso divide il fluido in due parti di cui una entrerà nel serbatoio andando ad incidere sulla sua temperatura.

TYPE 93 INPUT VALUE RECALL (7) questo elemento consente di memorizzare i valori delle variabili precedenti, in particolare adoperato per operazioni di controllo strategiche così da essere un valore di INPUT nel componente EQUATION. Viene considerato il ritardo che si ha nelle registrazioni (il tempo percorso dal fluido all'interno del U tube).

TYPE 557b-2 (8) componente che rappresenta le interazioni della sonda geotermica verticale con il terreno. Elemento realizzato dal Dr. P. Eskilson, dipartimento di matematica e fisica dell'Università di Lund in Svezia. Tale modello *Superposition Borehole Model* viene considerato uno stato dell'arte per la simulazione dinamica dei geo scambiatori di calore. Il modello calcola il campo della temperatura su una scala tridimensionale per un sistema con un numero arbitrario di pozzi verticale. I problemi di flusso di calore, assumendo un trasferimento di pura conduzione nel mezzo, è risolto attraverso l'utilizzo del

metodo delle differenze finite (FDM). Dovuto alla rapida variazione dei gradienti di temperatura del pozzo e alla complicata tridimensionale geometria del terreno, una fitta maglia di mesh sarebbe richiesta rendendo il sistema ingombrante da maneggiare. Tuttavia adottando le simmetrie intrinseche del processo, mediante l'applicazione del principio di sovrapposizione degli effetti, si semplifica tale sistema. In particolare con questo modello sono prese in considerazione le interazioni tra il sistema del pozzo e la pompa di calore. Il concetto di resistenze equivalente del pozzo, come descritto da Hellström (1991), che incide sulla quantità di calore trasferito, viene considerato da questo modello. Tale per cui vengono individuati due valori di resistenza termiche, una resistenza termica del pozzo R_b e una resistenza termica apparente R_a , che possono essere considerate costanti oppure lette in un file tale da riflettere la dipendenza dalla portata e temperatura del fluido termovettore. Dati in ingresso per il modello saranno le caratteristiche termiche del suolo quali: conducibilità termica del suolo, capacità termica volumetrica, resistenza del pozzo, raggio del pozzo, lunghezza della sonda, numero di sonde, ecc.. Dati di uscita dal modello possono essere: la velocità di estrazione del calore, l'energia immessa ed estratta, l'energia estratta da ogni pozzo, il valore complessivo medio della temperatura variabile lungo le pareti pozzo, la temperatura del fluido in ingresso e uscita da ciascun pozzo e infine i campi di temperatura possono essere ottenuti in piani orizzontali e verticali.

Di seguito riportiamo la simulazione di un Test di Risposta Termica per 140 ore impostando una portata di fluido (Q) pari a $0.50 \text{ m}^3/\text{h}$, una differenza di temperatura (ΔT) di $-2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ durante l'estrazione di calore e di $3 \text{ }^\circ\text{C}$ durante l'iniezione di calore, fissando un range di operatività (ΔT_{ON} e ΔT_{OFF}) della pompa di calore compresa tra 5 e $8 \text{ }^\circ\text{C}$.

La prima parte della simulazione rappresenta l'estrazione di calore, l'ultima parte l'iniezione di calore, nel mezzo un'evidente fase di recupero di terreno necessaria per invertire le fasi e dare tempo alla temperatura del serbatoio di raggiungere le condizioni di operatività. Nel bilancio dell'energia, necessaria condizione per validare il modello, distinguiamo nettamente tre elementi che devono equilibrarsi

tra di loro che sono: la pompa di calore che fornisce o sottrae energia, il terreno che assorbirà o cederà del calore e infine il ritorno del fluido termovettore nel serbatoio con temperature più basse o alte apportando così variazioni di energia. Si osserva che l'energia apportata dal terreno e dal fluido termovettore di ritorno al serbatoio tendono a stabilizzarsi nel tempo dopo un breve transitorio mentre l'andamento dell'energia della pompa di calore è legata al suo funzionamento ed avrà quantità costanti nel tempo. Nel serbatoio avviene lo stoccaggio dell'energia proveniente dalla pompa di calore.

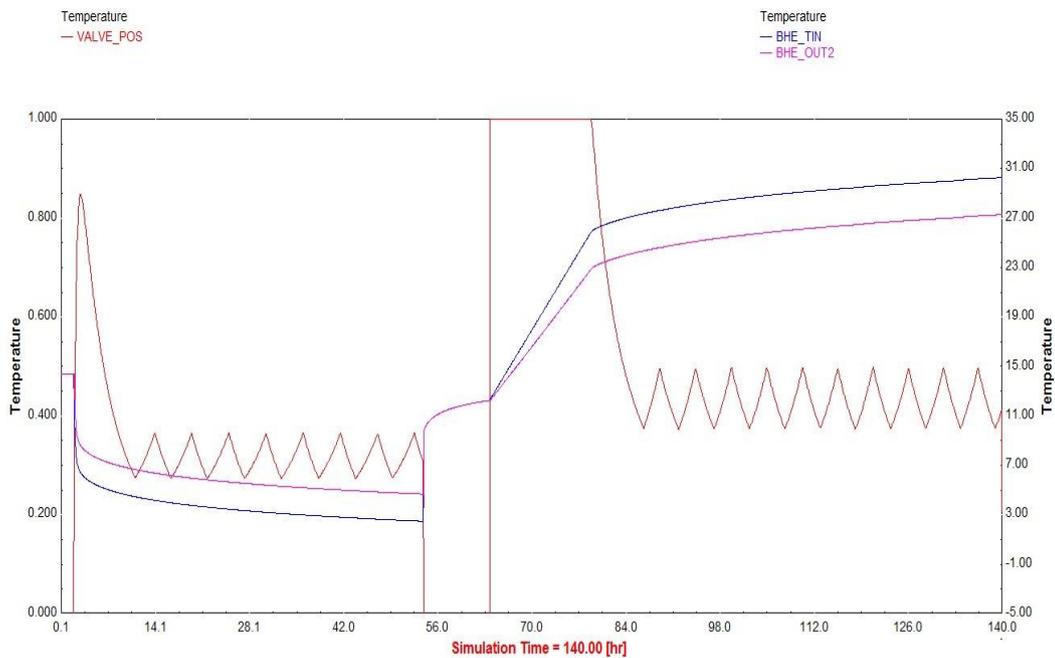


Figura 27 TRNSYS simulazione - Temperatura in ingresso e uscita della sonda geotermica e posizione della 3 Way Valve

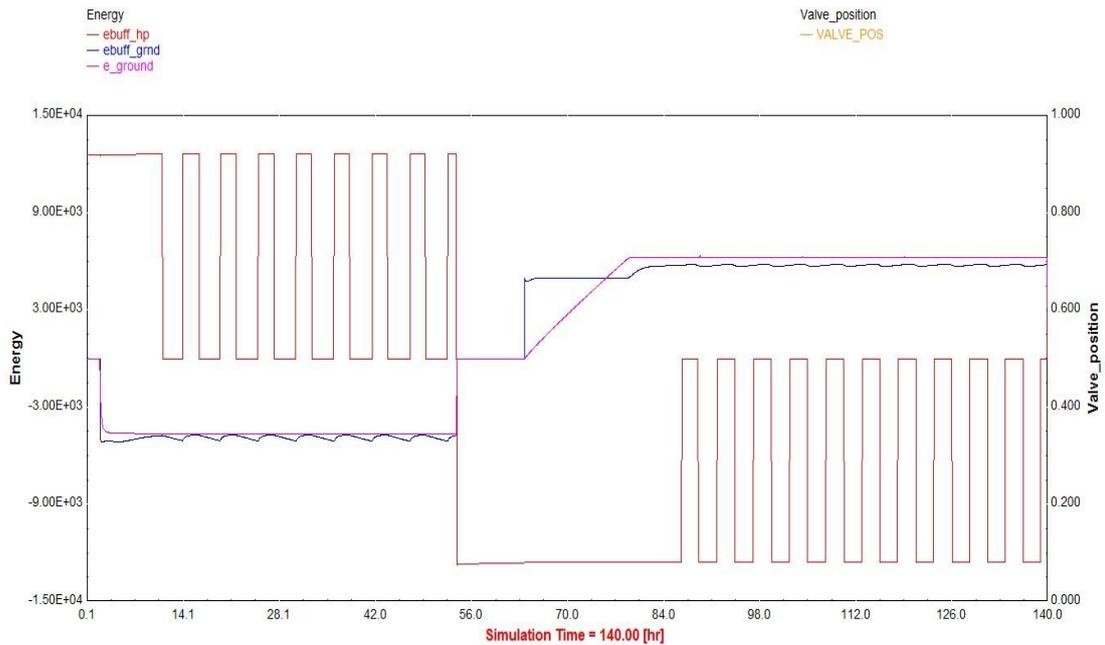


Figura 28 TRNSYS simulazione - Bilancio dell'energia del sistema: energia proveniente dalla pompa di calore – energia del terreno – energia proveniente dal fluido termovettore

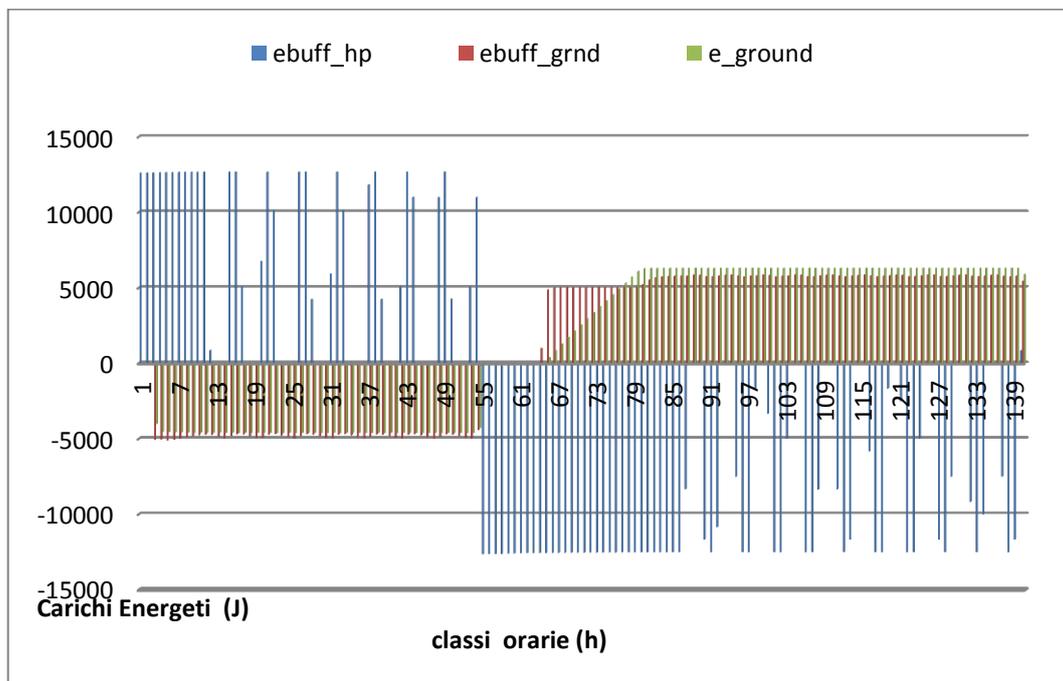


Figura 29 Carichi energetici rappresentata in classi orarie mediante grafici in Excel

Nell'ultimo diagramma vengono riportate la temperatura del serbatoio, la temperatura del fluido in ingresso nella BHE, la temperatura della pompa di calore e i momenti in cui la pompa di calore è in funzione.

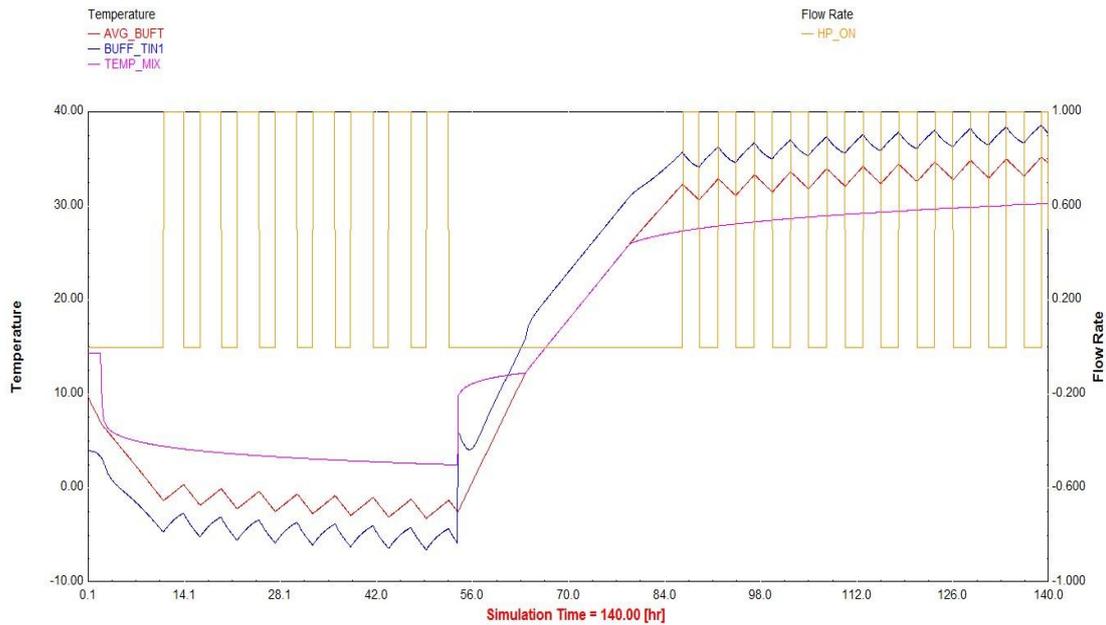


Figura 30 TRNSYS simulazione - Andamento della temperatura nel serbatoio , temperatura in ingresso nella BHE, temperatura della pompa di calore e funzione che indica quando la pompa di calore è in funzione

Diverse simulazioni sono state realizzate prima dell'esecuzione dell'esperimento per meglio individuare i parametri caratteristici quali: portata del fluido, differenza di temperatura e range di operatività della pompa di calore.

3.8 Test di Risposta Termica effettuati

Come precedentemente detto sono stati realizzati tre Test di Risposta Termica in diverse modalità operative, estrazione e iniezione di calore, con e senza movimento d'acqua di falda. Si riporta in tabella un confronto dei parametri caratteristici dei test prima di analizzarli singolarmente uno ad uno.

Experimental Parameters	Pulse #1-1 (heat extraction)	Pulse #1-2 (heat injection)	Pulse #2-1 (heat extraction)	Pulse #2-2 (heat injection)	Pulse #3 (heat injection)
Name	Reference		Groundwater flow		Injection
Date	13/07/2012	15/07/2012	04/07/2012	07/07/2012	23/07/2012
Pulse Duration (hours)	48	52	48	57	52
Loop type	single U-loop PE, 0.025 m diameter				
Length (m)	30				
Borehole Radius	0.125				
Circulation Medium	Monopropylene glycol, 15 %				

Flow rate (m ³ /h)	0.46 ± 0.02	0.48 ± 0.02	0.45 ± 0.02	0.46 ± 0.02	0.47 ± 0.02
ΔT (° C)	-2.20 ± 0.18	3.00 ± 0.15	-2.20 ± 0.15	3.00 ± 0.19	2.20 ± 0.07
Energy Flux (W)	-1139 ± 102	1630 ± 100	-1121 ± 97	1705 ± 140	1173 ± 65
Energy flux per meter (W/m)	-38.0 ± 3.4	54.3 ± 3.2	-37.0 ± 3.2	56.8 ± 4.7	39.0 ± 2.2
Logging interval(s)	60	60	60	60	60
Recovery time (h)	3		1		-
Groundwater flow	NO		YES		YES

Tabella 7 Overview dei parametri caratteristici per i diversi TRT

3.8.1 TRT senza movimento d'acqua di falda – Reference

L'esperimento è stato avviato il 13/07/2012 nella Groenholland Geo Energy systems e concluso il 17/07/2012. Dopo aver proceduto alla misurazione della temperatura del profilo del suolo si è aperta la pompa per la circolazione del fluido termovettore all'interno della sonda per raggiungere uno stato di equilibrio termico tra il fluido e il suolo. In seguito si è aperta la 3 Way-Valve iniziando l'estrazione di calore per 48 ore, a seguire una fase di estrazione di calore per 52 ore. Tra le due fasi, iniezione e estrazione di calore, un tempo di recupero è stato necessario per l'inversione delle due fasi e per il raggiungimento della temperatura operativa del serbatoio. A seguire una tabella dove vengono riportati i valori settati dell'esperimento per le due fasi .

Parameter	Extraction	Injection
Flow rate (m ³ /h)	0.46 ± 0.02	0.48 ± 0.02
ΔT (° C)	-2.20 ± 0.18	3.00 ± 0.15
Energy Flux (W)	-1139 ± 102	1630 ± 100
Energy flux per meter (W/m)	-38.0 ± 3.4	54.3 ± 3.2

Tabella 8 Overview dei parametri che caratterizzano il Reference TRT

Applicando la teoria classica, il modello della sorgente lineare infinità, otteniamo i valori per la conducibilità termica equivalente del suolo e la resistenza termica del pozzo adoperando le equazioni (2.12) e (2.13) , i risultati sono riportati nella tabella sottostante.

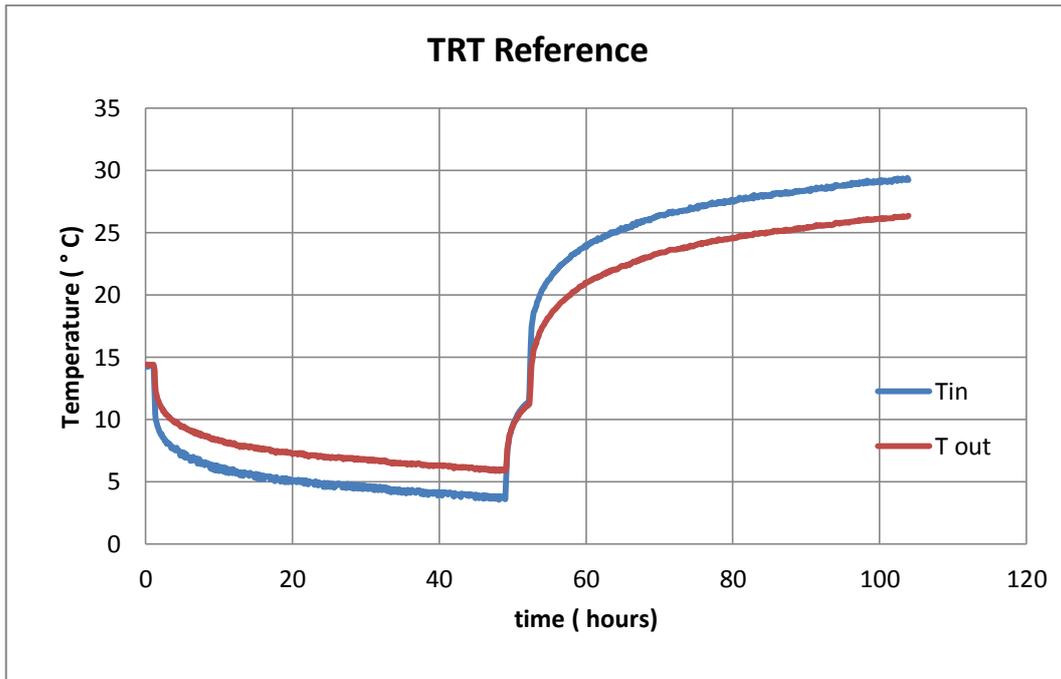


Figura 31 Temperatura in ingresso e temperatura in uscita dal BHE in funzione del tempo – Reference TRT

Non ci sono differenze nei risultati per la conducibilità termica e la resistenza del pozzo mediante l'applicazione dei diversi metodi per il calcolo della temperatura del fluido termovettore. Si stima che la conducibilità termica equivalente (λ) sarà compresa (1.98 – 2.40) W/(m K) e la resistenza termica del pozzo (R_b) (0.10 – 0.16) K/(W/m) che sono all'interno di intervalli accettabili. Non è corretto adoperare il modello della sorgente lineare infinita nella seconda parte del test, come è risaputo dalla teoria, in quanto i valori risulteranno affetti dall'energia estratta precedentemente, tuttavia, questo fornisce delle interessanti informazioni sul comportamento del suolo durante il test.

Experimental Results	Extraction		Injection	
	$\lambda \pm d\lambda$ W/(m K)	$R_b \pm dR_b$ K/(W/m)	$\lambda \pm d\lambda$ W/(m K)	$R_b \pm dR_b$ K/(W/m)
Normal Mean	2.19 ± 0.21	0.13 ± 0.03	1.53 ± 0.11	0.11 ± 0.08
Log Mean	2.18 ± 0.21	0.13 ± 0.03	1.52 ± 0.11	0.11 ± 0.08
P-lin Mean	2.16 ± 0.21	0.12 ± 0.03	1.51 ± 0.11	0.11 ± 0.08

Tabella 9 Risultati della conducibilità termica equivalente del suolo e la resistenza del pozzo per i diversi metodi per il calcolo della temperatura del fluido – Reference TRT

A seguire vengono riportate la regressione lineare per la temperatura media del fluido su scala logaritmica e l'andamento delle temperature impostando la conducibilità termica del suolo e la resistenza termica del pozzo scartando le prime 10 ore del test .

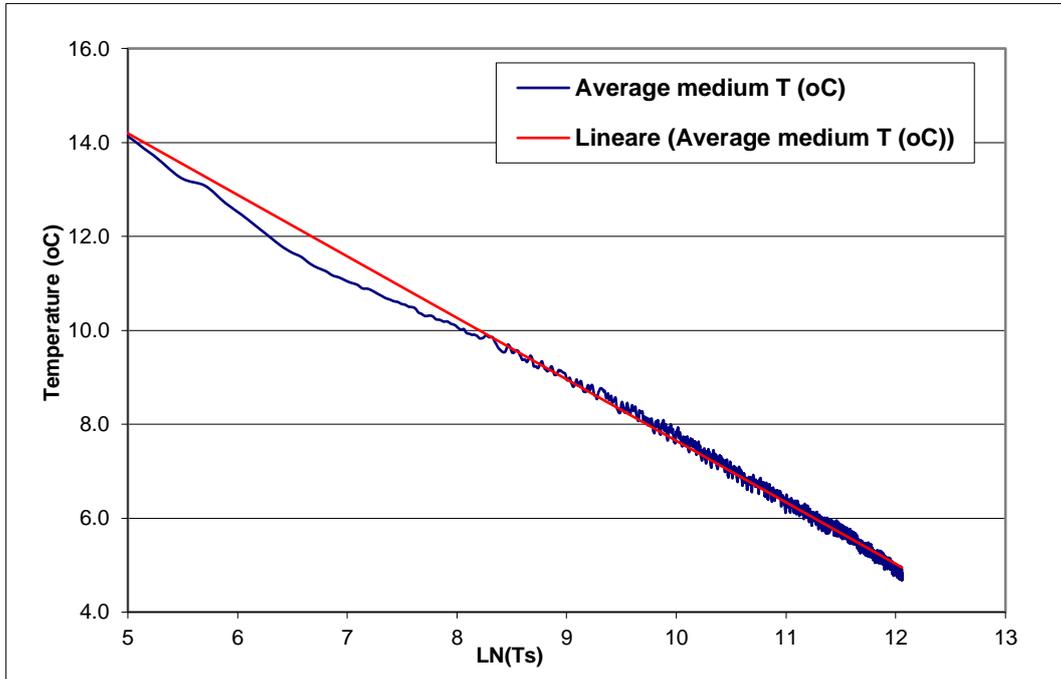


Figura 32 Regressione lineare della temperature media del fluido su scala logaritmo del tempo – Reference TRT

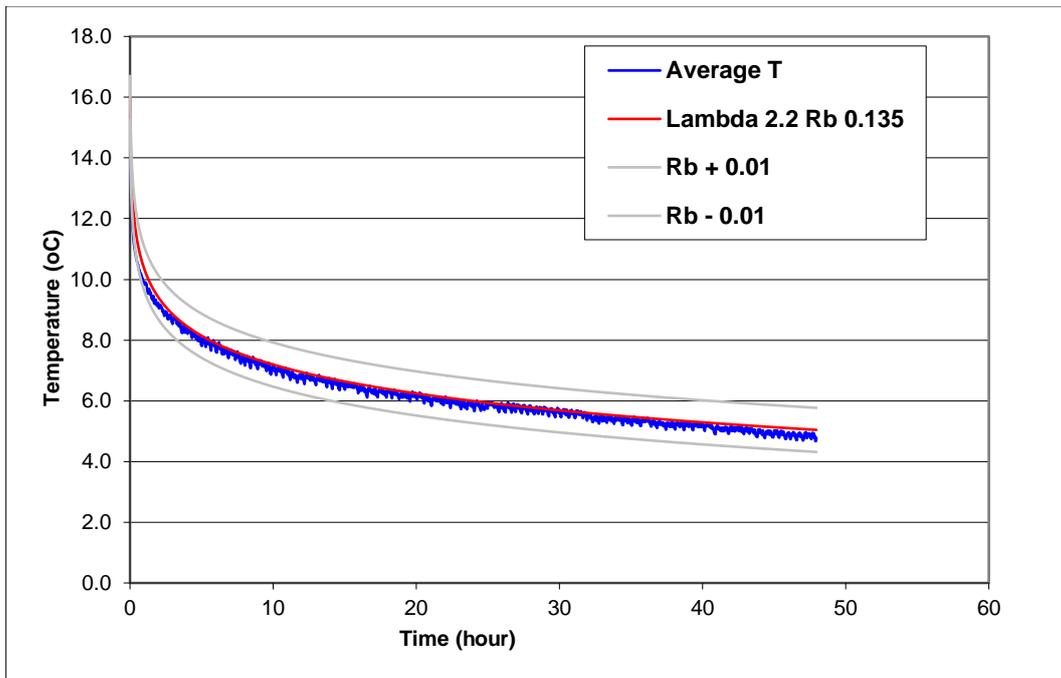


Figura 33 Temperatura media del fluido misurata e temperatura del fluido calcolata impostando la conducibilità termica del suolo e la resistenza termica del pozzo- Reference TRT

La stabilità e la convergenza dei risultati per la conducibilità termica del suolo sono in funzione del tempo di selezione dei dati e del numero di dati presi in considerazione e possono essere rappresentati graficamente mediante il metodo CUSUM test (*Brown e altri, 1975*). Questi grafici sono costruiti stimando la conducibilità termica del suolo con un numero di dati aggiunti contenuti all'interno di un passo di tempo, definito in precedenza (esempio 2 ore). La sensibilità del punto di partenza dei dati può essere calcolato costruendo diverse serie, ognuna delle quali a un diverso tempo di partenza (esempio 10 ore).

Con il metodo CUSUM il valore della conducibilità termica converge all'interno di un valore compreso tra 2.10 – 2.30 W/ (m K) dopo 48 ore.

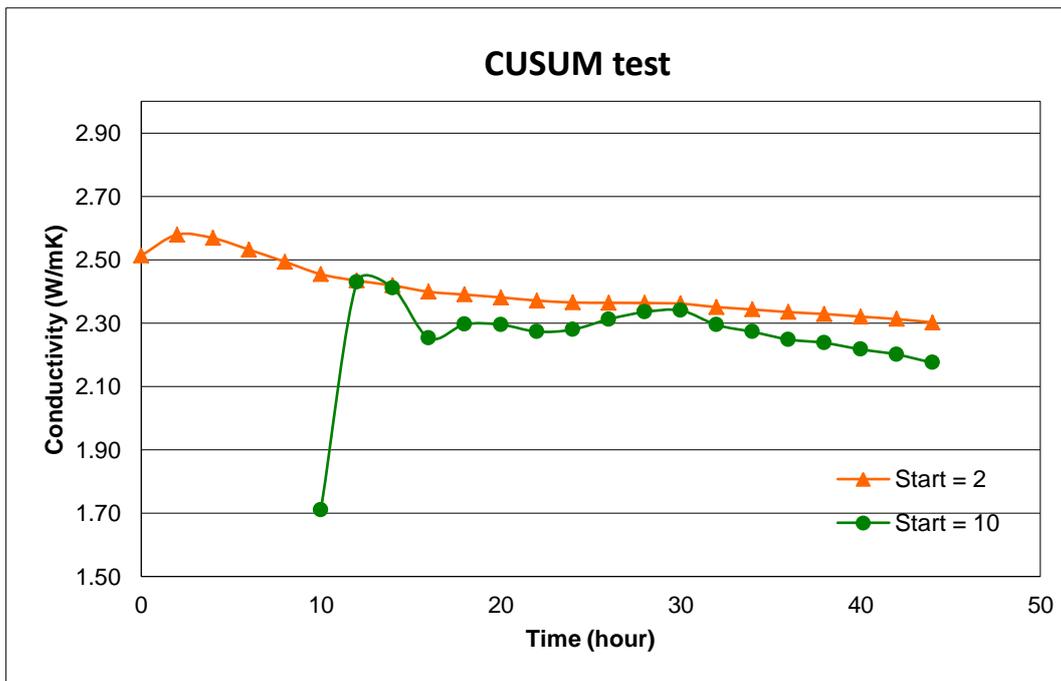


Figura 34 CUSUM method – Rappresentazione della conducibilità termica adottando finestre temporali di 2 h e un tempo iniziale 0 e 10 h – Reference TRT

Durante la fine della seconda fase dell'esperimento, durante l'iniezione di calore, si attiva la pompa per l'estrazione dell'acqua per osservare le influenze sull'andamento del test; i dati del test sono stati analizzati, adottando come riferimento una finestra di 3 ore, prima e dopo che la pompa per l'estrazione d'acqua sia stata attivata. La pendenza della temperatura media del fluido, prima che l'estrazione d'acqua sia avviata, è compresa tra (0.05518-0.07208) dopo aver attivato la pompa è (0.03386-0.05193), avendo un 95% di probabilità che i dati

risultino compresi all'interno di questi intervalli usando una distribuzione di Gauss. Questo conferma che il movimento d'acqua di falda influisce le misure del test.

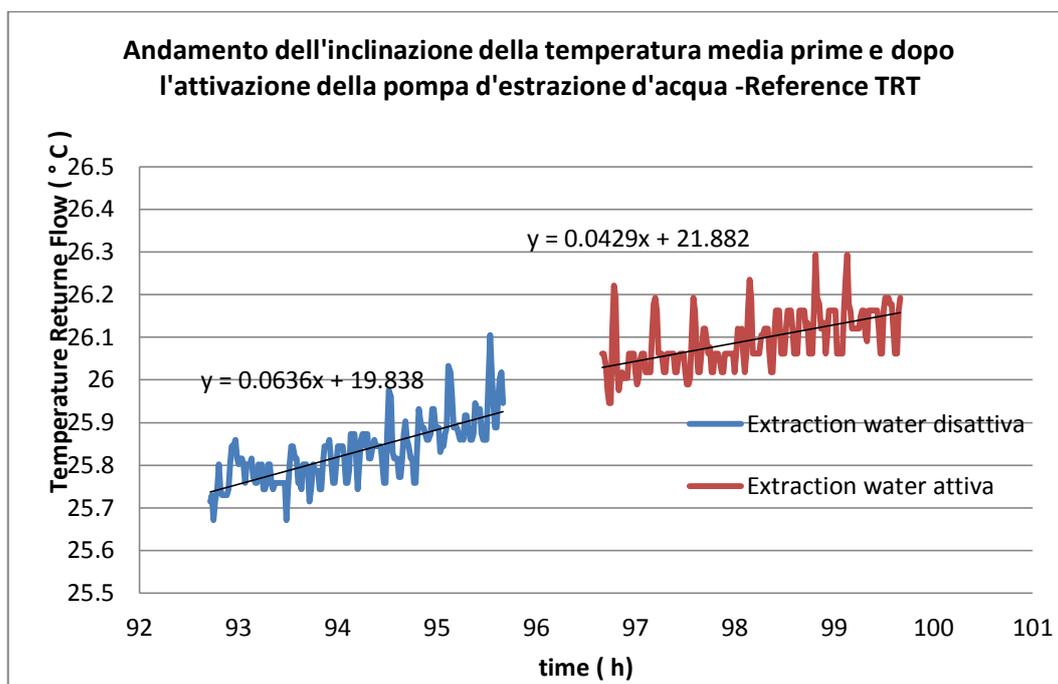


Figura 35 Analisi della temperatura in funzione del tempo considerando finestre di tempo di 3 ore prima e dopo che la pompa per l'estrazione d'acqua sia attiva – TRT Reference

Delle misure della temperatura a diverse profondità sono state eseguite durante il test da delle termocoppie posti in pozzi di osservazioni vicine la sonda geotermica. Le misure sono state eseguite ogni 60 secondi e riportate in una media di 6 minuti. Una volta raggiunta uno stato di stabilità, si è ottenuta la pendenza della temperatura su una scala logaritmo del tempo per entrambe le fasi fornendo così importanti informazioni sul comportamento dei vari strati. Non è possibile applicare il modello della sorgente lineare infinita poiché la sorgente è collocata ad una distanza all'incirca di 10 cm dal pozzo in cui vengono eseguite le misurazioni.

Extraction (35 h - 45h)			Injection (78 -90 h)		
h (m)	k	dk (95 %)	Type	k	dk (95 %)
3	-1.761	0.059	A	2.715	0.035
5	-2.130	0.050	B	3.727	0.037
12	-1.857	0.053	A	2.913	0.103
15	-1.731	0.049	A	2.608	0.031
25	-1.567	0.050	C	2.568	0.035

28	-1.542	0.062	C	2.648	0.060
Average	-1.73	0.05		2.76	0.05

A = Dry and fine grained sand B = peaty and clayey C = Medium coarse sand

Tabella 10 Risultati della pendenza della temperatura su scala logaritmo del tempo per le diverse termocoppie – TRT Reference

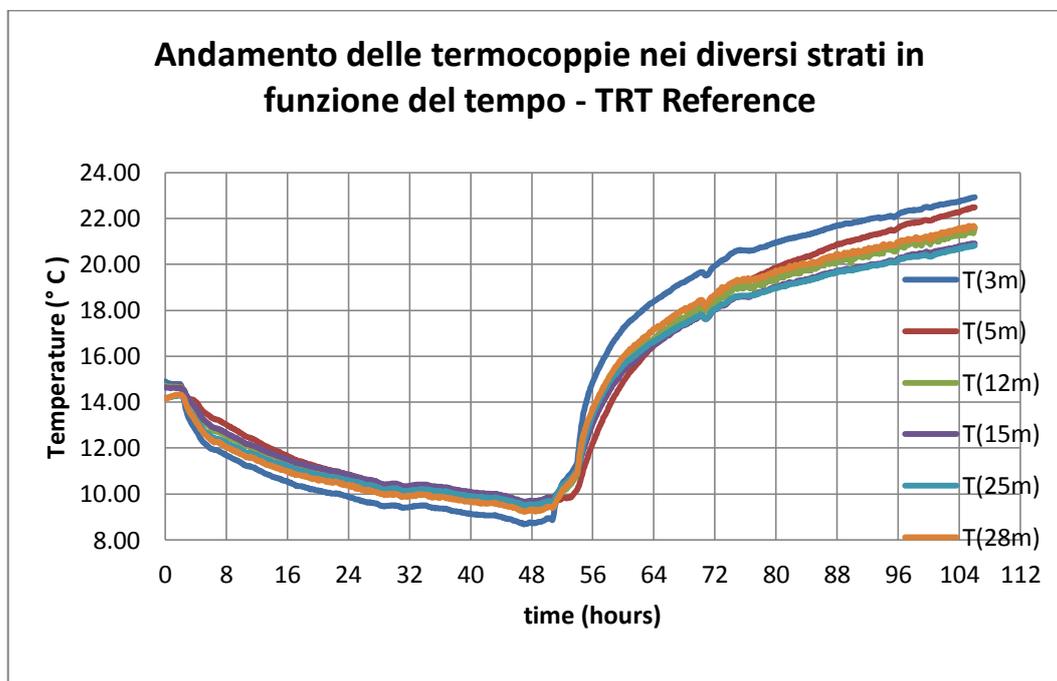


Figura 36 Andamento della temperatura per le diverse termocoppie nel pozzo di osservazione collocato a 10 cm di distanza - TRT Reference

Il valore medio è individuato applicando una serie di pesi alle termocoppie a seconda degli strati di terreno che rappresentano. Anche se non è possibile applicare la teoria, risulta sempre valido il concetto tanto più alto è la pendenza della curva della temperatura tanto più basso risulterà la conducibilità termica di quello strato.

I risultati sono conformi alle informazioni geologiche a noi note, infatti, il più alto valore della pendenza (k) è in prossimità dello strato argilloso a 5 metri di profondità mentre il più basso valore è in corrispondenza degli ultimi strati composti da sabbia grossolana .

Si riportano le differenze di temperatura tra la temperatura iniziale e la temperatura dopo 36 ore di estrazione di calore del suolo e dopo 36 ore di iniezione di calore dal suolo. Negli strati argillosi è maggior evidente la differenza di temperatura durante le fasi di estrazione o iniezione di calore.

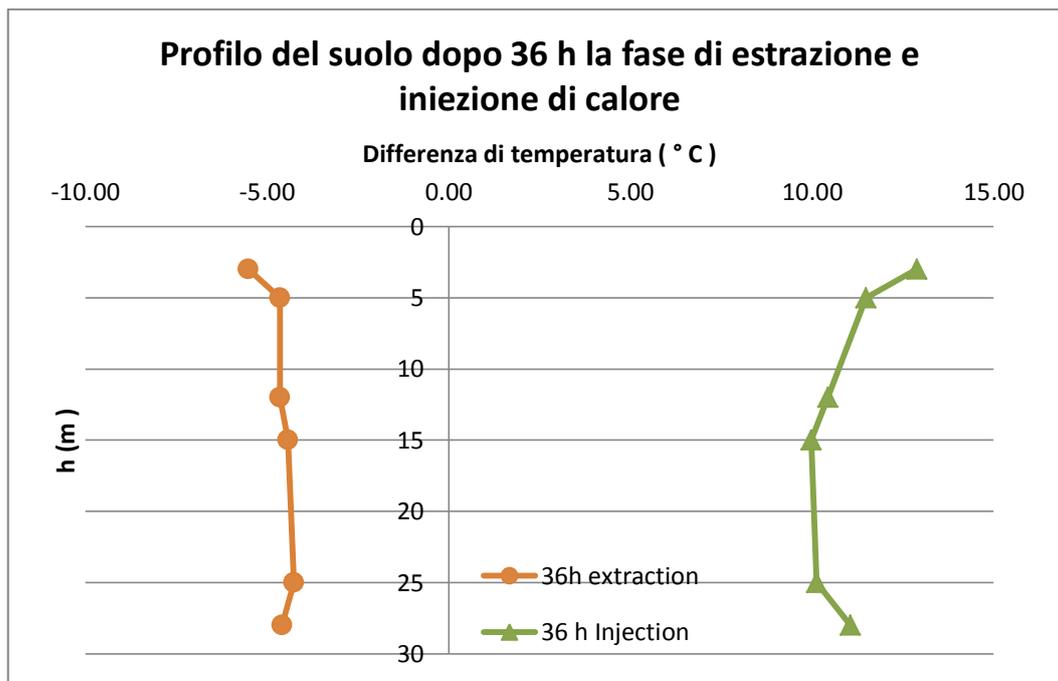


Figura 37 Differenza di temperatura tra temperatura dopo le fasi d'iniezione e estrazione rispetto alla temperatura iniziale in funzione della profondità – TRT Reference

3.8.2 TRT con movimento d'acqua di falda – Groundwater flow

L'esperimento è stato avviato il 04/07/2012 nella Groenholland Geo Energy Systems, è concluso il 07/07/2012. Dopo aver proceduto alla misurazione della temperatura del profilo del suolo si è aperta la pompa per la circolazione del fluido termovettore all'interno della sonda per raggiungere uno stato di equilibrio termico tra il fluido e il suolo. In seguito si è aperta la 3 Way-Valve iniziando l'estrazione di calore per 48 ore, per concludere con una fase di estrazione di calore per 57 ore. Tra le due fasi, iniezione e estrazione di calore, un tempo di recupero è stato necessario per l'inversione delle due fasi e per il raggiungimento della temperatura operativa del serbatoio. Durante il test una portata d'acqua compresa tra 0.46 – 0.56 m³/h è stata estratta da un pozzo posto ad una distanza radiale di 3 m.



Figura 38 Foto della pompa d'estrazione d'acqua durante il Groundwater Flow TRT

A seguire un tabella dove vengono riportati i valori settati dell'esperimento per le due fasi .

Parameter	Extraction	Injection
Flow rate (m ³ /h)	0.45 ± 0.02	0.46 ± 0.02
ΔT (° C)	-2.20 ± 0.15	3.00 ± 0.19
Energy Flux (W)	-1121 ± 97	1705 ± 141
Energy flux per meter (W/m)	-37.0 ± 3.2	56.8 ± 4.7

Tabella 11 Overview dei parametri che caratterizzano il Groundwater Flow TRT

Applicando la teoria classica, il modello della sorgente lineare infinità, si ottengono i valori per la conducibilità termica equivalente del suolo e la Resistività del pozzo adoperando le equazioni (2.12) e (2.13), i risultati sono riportati nella tabella sottostante.

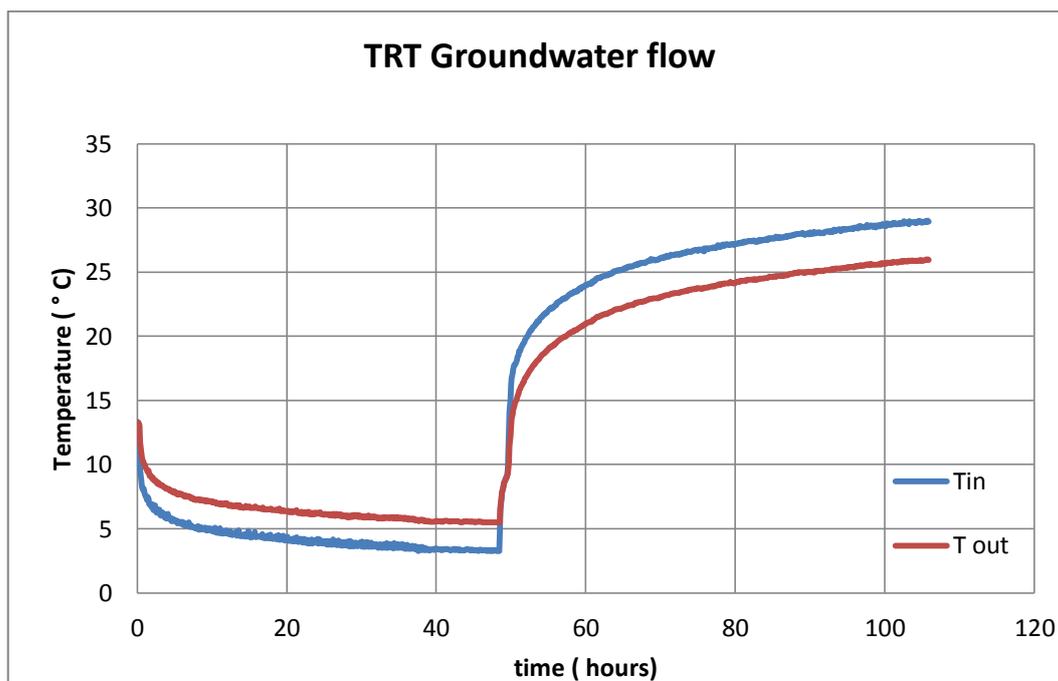


Figura 39 Temperatura in ingresso e temperatura in uscita dal BHE in funzione del tempo – Groundwater flow TRT

Non ci sono differenze nei risultati per la conducibilità termica del suolo e la resistenza termica del pozzo mediante l'applicazione dei diversi metodi per il calcolo della temperatura del fluido termovettore. Si stima che la conducibilità termica equivalente (λ) sarà compresa tra (2.60 – 3.15) W/(m K) e la resistenza termica del pozzo (R_b) tra (0.13-0.19) K/(W/m) che sono all'interno di intervalli accettabili. E' sbagliato adoperare il modello della sorgente lineare infinita nella seconda parte del test, com'è risaputo dalla teoria, poiché i valori saranno affetti dall'energia estratta precedentemente, tuttavia, questo fornisce delle interessanti informazioni sul comportamento del suolo durante il test.

Experimental Results	Extraction		Injection	
	$\lambda \pm d\lambda$ W/(m K)	$R_b \pm dR_b$ K/(W/m)	$\lambda \pm d\lambda$ W/(m K)	$R_b \pm dR_b$ K/(W/m)
Normal Mean	2.89 ± 0.27	0.16 ± 0.03	1.45 ± 0.12	0.12 ± 0.06
Log Mean	2.87 ± 0.27	0.16 ± 0.03	1.44 ± 0.12	0.12 ± 0.06
P-lin Mean	2.86 ± 0.26	0.15 ± 0.03	1.44 ± 0.12	0.12 ± 0.06

Tabella 12 Risultati della conducibilità termica equivalente del suolo e la resistenza del pozzo per i diversi metodi per il calcolo della temperatura del fluido – Groundwater flow TRT

A seguire vengono riportate la regressione lineare per la temperatura media del fluido su scala logaritmica e l'andamento delle temperature impostando la conducibilità termica del suolo e la resistenza termica del pozzo scartando le prime 10 ore del test.

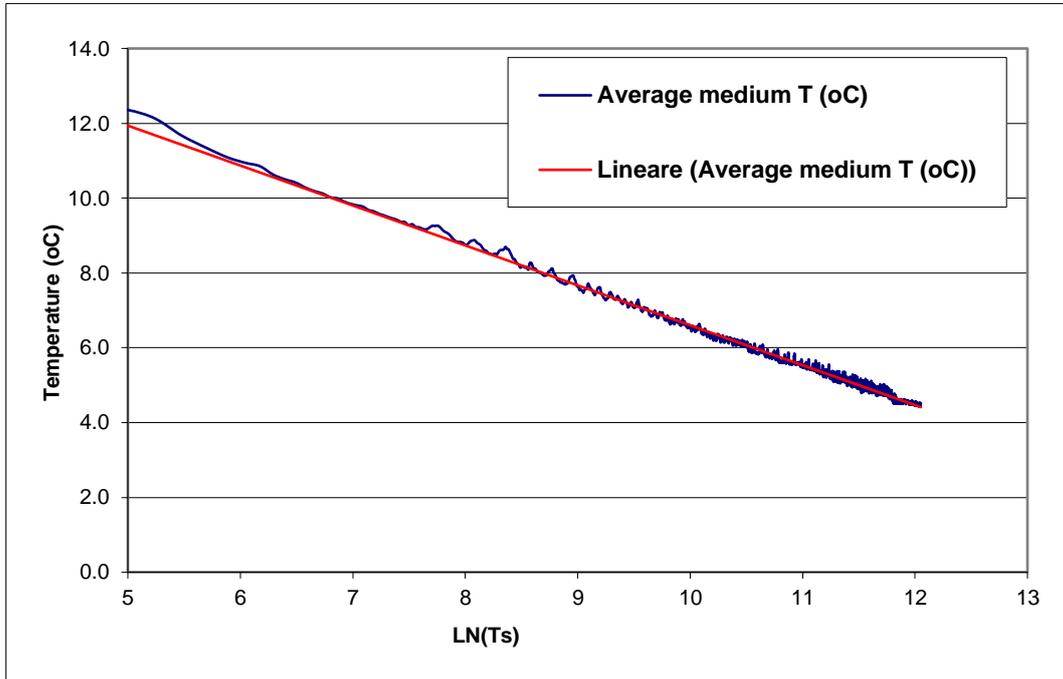


Figura 40 Regressione lineare della temperature media del fluido su scala logaritmo del tempo - Groundwater flow TRT

La stabilità e la convergenza dei risultati per la conducibilità termica del suolo sono in funzione del tempo di selezione dei dati e del numero di dati presi in considerazione e possono essere rappresentati graficamente mediante il metodo CUSUM test (Brown et al., 1975). Questi grafici sono costruiti stimando la conducibilità termica del suolo con un numero di dati aggiunti contenuti all'interno di un passo di tempo, definito in precedenza (esempio 2 ore). La sensibilità del punto di partenza dei dati può essere calcolato costruendo diverse serie, ognuna delle quali a un diverso tempo di partenza (esempio 10 ore).

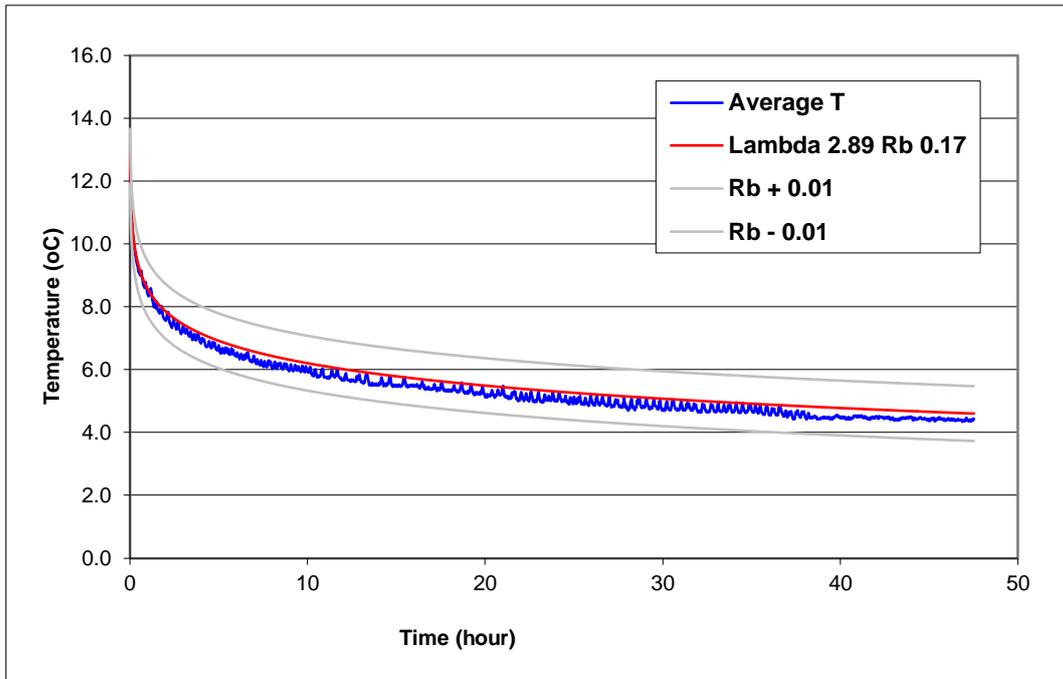


Figura 41 Temperatura del fluido e temperatura del fluido calcolata impostando la conducibilità termica del suolo e la resistenza termica del pozzo - Groundwater flow TRT

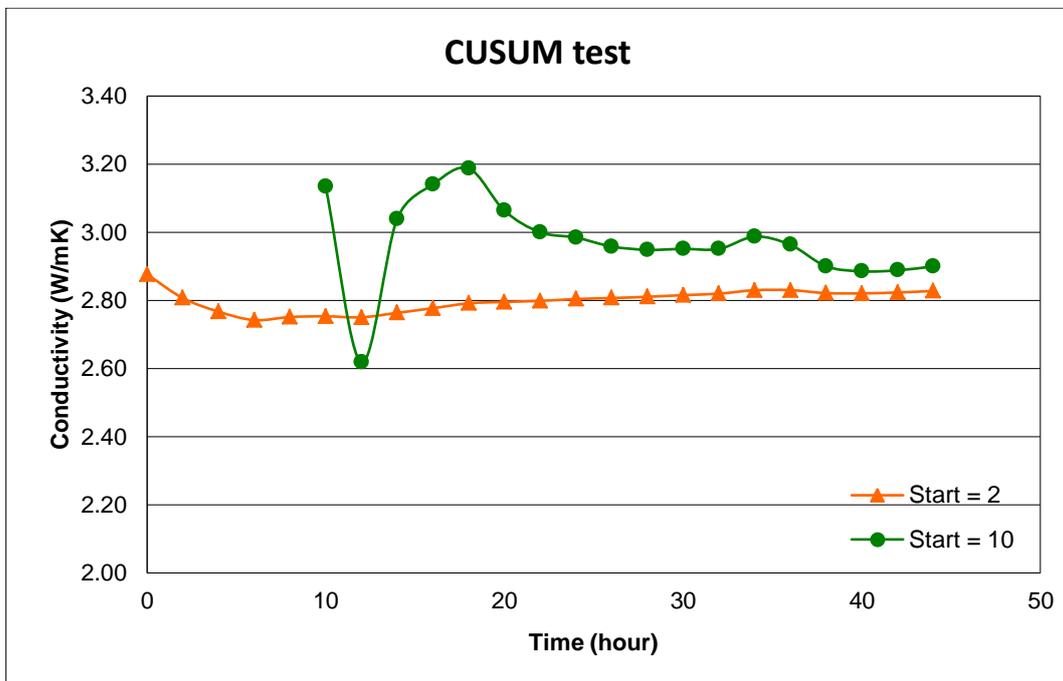


Figura 42 CUSUM method - Rappresentazione della conducibilità termica adottando finestre temporali di 2 h e un tempo iniziale 0 e 10 h - Groundwater flow TRT

Con il metodo CUSUM il valore della conducibilità termica converge all'interno di un valore compreso tra 2.70 – 2.90 W/ (m K) dopo 48 ore. L'effetto del movimento d'acqua di falda è presente ma non facilmente osservabile da questo grafico. Si può notare nell'intorno della 40esima ora un decremento lievissimo

della conducibilità termica dovuta alla disattivazione della pompa (per 1 ora) per poi riattivarla successivamente .

In particolare durante la fine della seconda fase dell'esperimento, durante l'iniezione di calore, si disattiva la pompa per l'estrazione dell'acqua per osservare le influenze sull'andamento del test, facendo il contrario dell'esperimento "Reference". Analizzando i dati del test, adottando come riferimento una finestra di 3 ore , prima e dopo che la pompa per l'estrazione d'acqua sia stata disattivata. La pendenza della temperatura prima che l'estrazione d'acqua sia disattivata è compresa tra (0.0347-0.0555) mentre dopo aver disattivato la pompa è (0.0730-0.0865), avendo un 95% di probabilità che i dati risultino compresi all'interno di questi intervalli usando una distribuzione di Gauss. Questo conferma che il movimento d'acqua di falda influisce le misure del test.

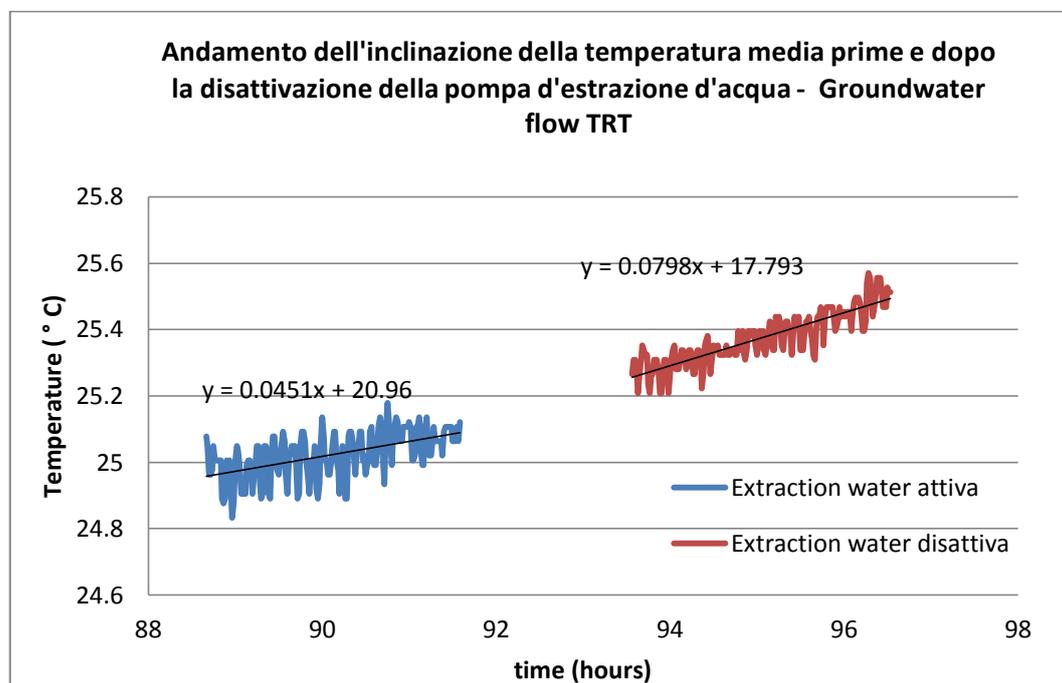


Figura 43 Analisi delle temperatura in funzione del tempo considerando finestre di tempo di 3 ore prima e dopo che la pompa per l'estrazione d'acqua sia disattivata - Groundwater flow TRT

Delle misure della temperatura a diverse profondità sono state eseguite durante il test da delle termocoppie posti in pozzi di osservazioni vicine la sonda geotermica. Le misure sono state eseguite ogni 60 secondi e riportate in una media di 6 minuti.

Una volta raggiunta uno stato di stabilità, si è proceduto ad ottenere la pendenza della temperatura su una scala logaritmo del tempo per entrambe le fasi fornendo così importanti informazioni sul comportamento dei vari strati. Si è preferito dividere la finestra dei dati in due parti in quanto uno strano comportamento si è registrato nell'intermedio. Non è possibile applicare il modello della sorgente lineare infinita poiché la sorgente è collocata ad una distanza all'incirca di 10 cm dal pozzo in cui vengono eseguite le misurazioni.

h	Extraction (24 - 38 h)			Extraction(44-48 h)		Injection(78-90 h)	
	Type	k	dk (95%)	k	dk (95%)	k	dk (95 %)
3	A	-1.223	0.056	-1.460	0.112	2.317	0.057
5	B	-1.557	0.049	-1.781	0.092	3.197	0.057
12	A	-1.357	0.050	-1.564	0.164	2.395	0.229
15	A	-1.210	0.046	-1.381	0.105	2.252	0.049
25	C	-1.147	0.046	-1.347	0.193	2.153	0.043
28	C	-1.209	0.054	-1.365	0.353	2.271	0.089
Average		-1.26	0.05	-1.45	0.17	2.34	0.10

A = Dry and fine grained sand B = peaty and clayey C = Medium coarse sand

Tabella 13 Risultati della pendenza della temperatura su scala logaritmo del tempo per le diverse termocoppie

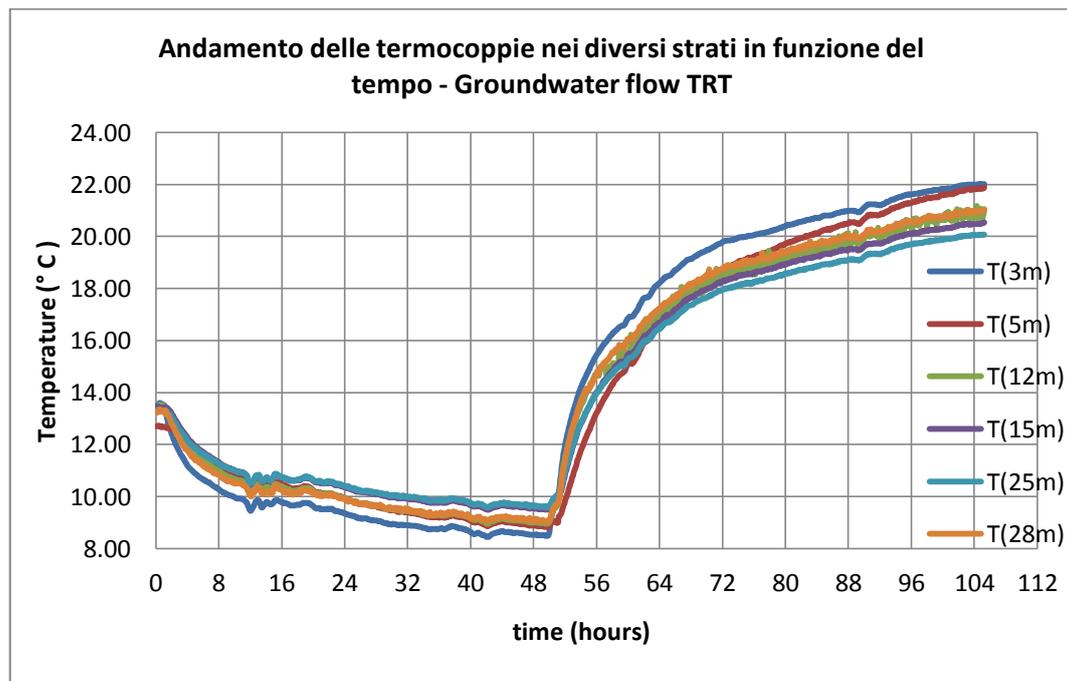


Figura 44 Andamento della temperatura per le diverse termocoppie nel pozzo di osservazione collocato a 10 cm di distanza- Groundwater flow TRT

Il valore medio è individuato applicando una serie di pesi alle termocoppie a seconda degli strati di terreno che rappresentano. Anche se non è possibile applicare la teoria, risulta sempre valido il concetto tanto più alto è la pendenza della curva della temperatura tanto più basso risulterà la conducibilità termica del suolo.

I risultati risultano conformi alle informazioni geologiche a noi note, infatti il più alto valore della pendenza k è in prossimità dello strato argilloso a 5 metri di profondità mentre il più basso valore è in corrispondenza degli ultimi strati composti da sabbia grossolana.

Viene riportato a seguire la differenza di temperatura tra la temperatura iniziale e la temperatura dopo 36 ore di estrazione di calore del suolo e dopo 36 ore la fase di iniezione di calore del suolo. Negli strati argillosi è maggior evidente la differenza di temperatura durante le fasi di estrazione o iniezione di calore.

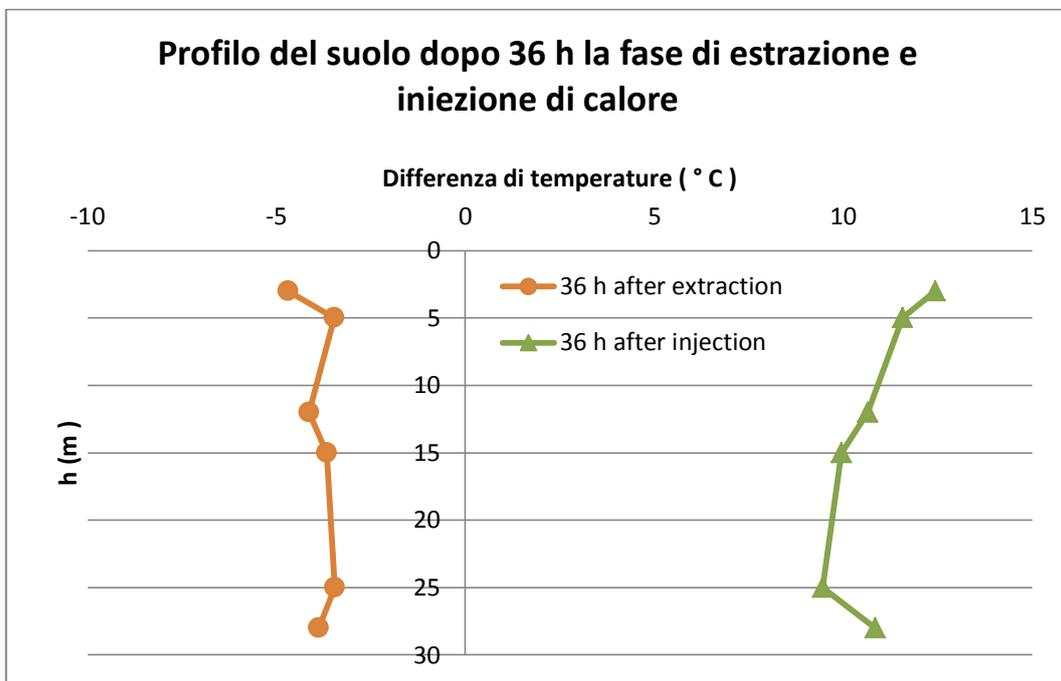


Figura 45 Differenza di temperatura tra temperatura dopo le fasi di iniezione e estrazione rispetto alla temperatura iniziale in funzione della profondità- Groundwater flow TRT

Si osserva che negli strati compresi tra 9 – 15 m si hanno maggiori fluttuazioni sulle registrazioni della temperatura, questo dovuto ad un maggiore flusso di calore mobilitato dal movimento d'acqua di falda.

Come detto precedentemente l'estrazione di acqua di falda è stata interrotta due volte per un'ora dopo 10 ore e dopo 40 ore l'inizio dell'esperimento durante la fase di estrazione mentre è stata disattivata 10 ore prima la fine dell'esperimento nella fase di iniezione (94esima ora dell'esperimento).

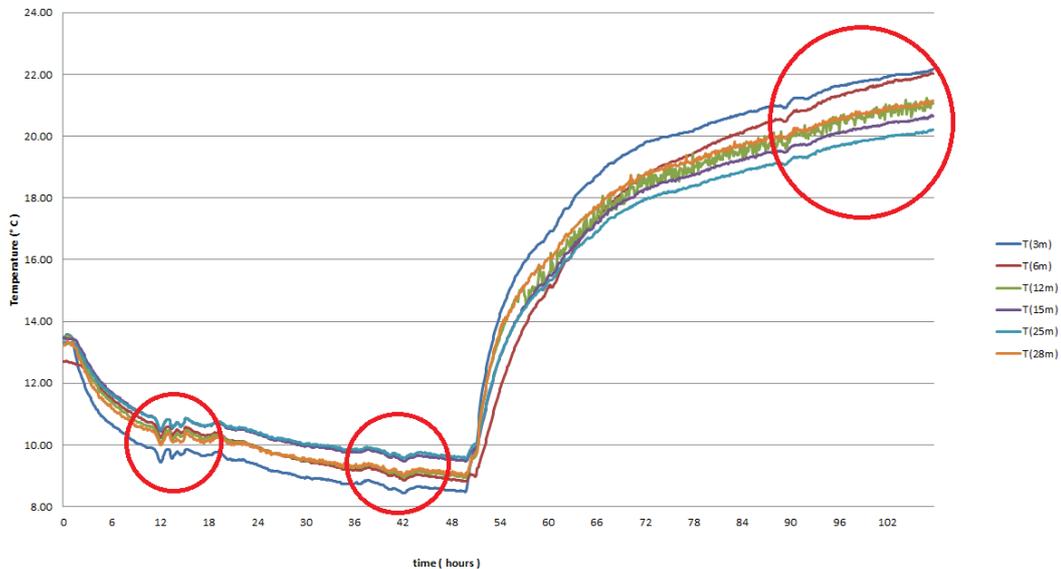


Figura 46 Andamento della temperatura per le termocoppie. Il cerchio rosso evidenzia gli effetti della chiusura della pompa d'estrazione d'acqua - Groundwater flow TRT

3.8.3 TRT con movimento d'acqua di falda – Injection

L'esperimento è stato avviato il 23/07/2012 nella Groenholland Geo Energy Systems e concluso il 25/07/2012. Dopo aver proceduto alla misurazione della temperatura del profilo del suolo si è aperta la pompa per la circolazione del fluido termovettore all'interno della sonda per raggiungere uno stato di equilibrio termico tra il fluido e il suolo. In seguito si è aperta la 3 Way-Valve iniziando l'iniezione di calore per 52 ore. Durante il test una portata d'acqua variabile compresa tra 0.40 – 0.52 m³/h è stata estratta da un pozzo posto ad una distanza radiale di 3 m, inoltre la pompa si è disattivata durante l'esperimento dovuto ad un malfunzionamento.

A seguire una tabella dove vengono riportati i valori settati dell'esperimento.

Parameter	Injection
Flow rate (m ³ /h)	0.47 ± 0.02
ΔT (° C)	2.20 ± 0.07
Energy Flux (W)	1173 ± 65
Energy flux per meter (W/m)	39.0 ± 2.2

Tabella 14 Overview dei parametri che caratterizzano l'esperimento

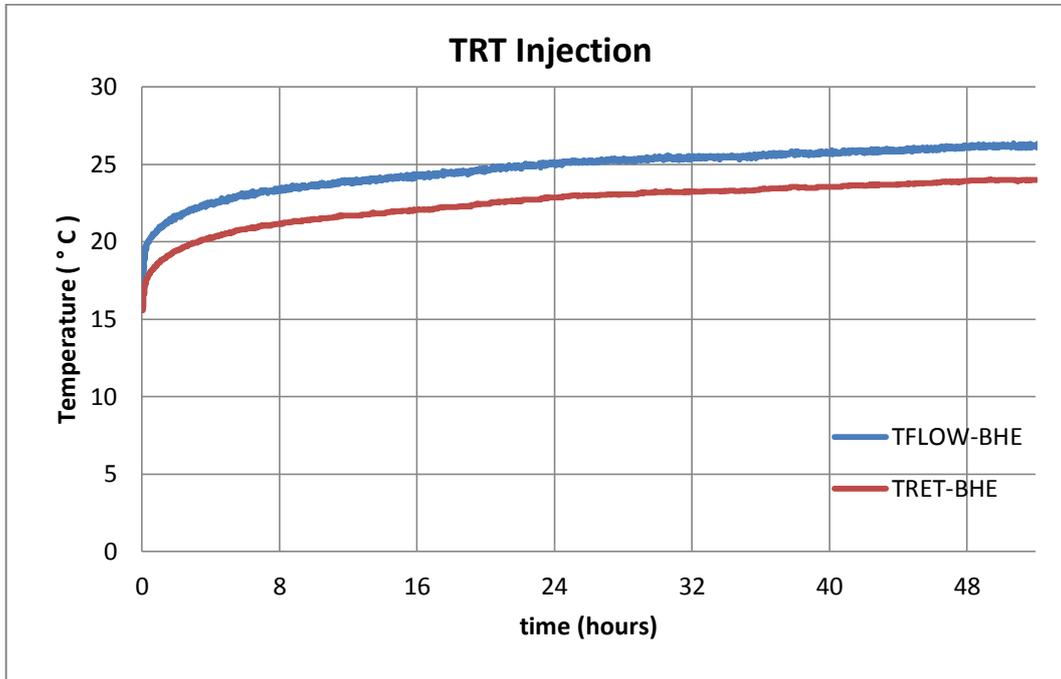


Figura 47: Temperatura in ingresso e uscita dalla BHE in funzione del tempo - Injection TRT

Applicando la teoria classica, il modello della sorgente lineare infinita, otteniamo i valori per la conducibilità termica equivalente del suolo e la resistenza termica del pozzo adoperando le equazioni (2.12) e (2.13), i risultati sono riportati nella tabella sottostante.

Experimental Results	Injection	
	$\lambda \pm d\lambda$ W/(m K)	Rb ±dRb K/(W/m)
Normal Mean	1.94 ± 0.12	0.14 ± 0.03
Log Mean	1.93 ± 0.12	0.14 ± 0.03
P-lin Mean	1.93 ± 0.12	0.13 ± 0.03

Tabella 15 Risultati della conducibilità termica equivalente del suolo e la resistenza del pozzo per i diversi metodi per il calcolo della temperatura del fluido – Injection TRT

Non ci sono differenze nei risultati per la conducibilità termica e la resistenza del pozzo mediante l'applicazione dei diversi metodi per il calcolo della temperatura del fluido termovettore. Si stima che la conducibilità termica equivalente (λ) sarà compresa (1.82–2.06) W/(m K) e la resistenza termica del pozzo (R_b) (0.11-0.17) K/ (W/m) che sono all'interno di intervalli accettabili.

A seguire vengono riportate la regressione lineare per la temperatura media del fluido su scala logaritmo e l'andamento delle temperature individuando così la conducibilità termica del suolo e la resistenza termica del pozzo scartando le prime 10 ore del test.

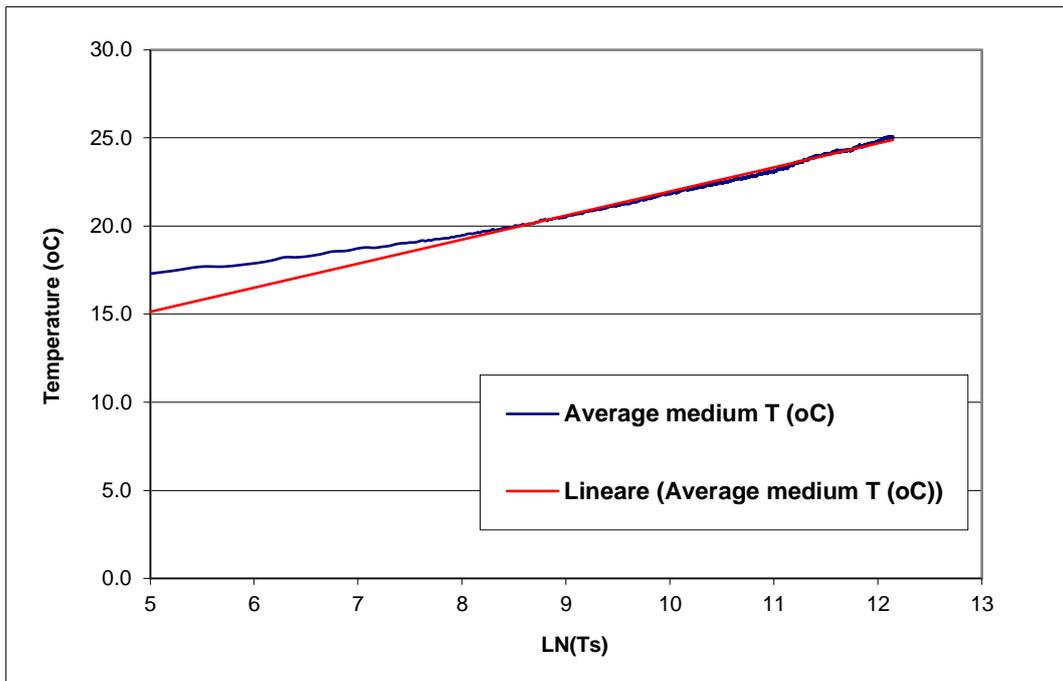


Figura 48 Regressione lineare della temperature media del fluido su scala logaritmo del tempo – Injection TRT

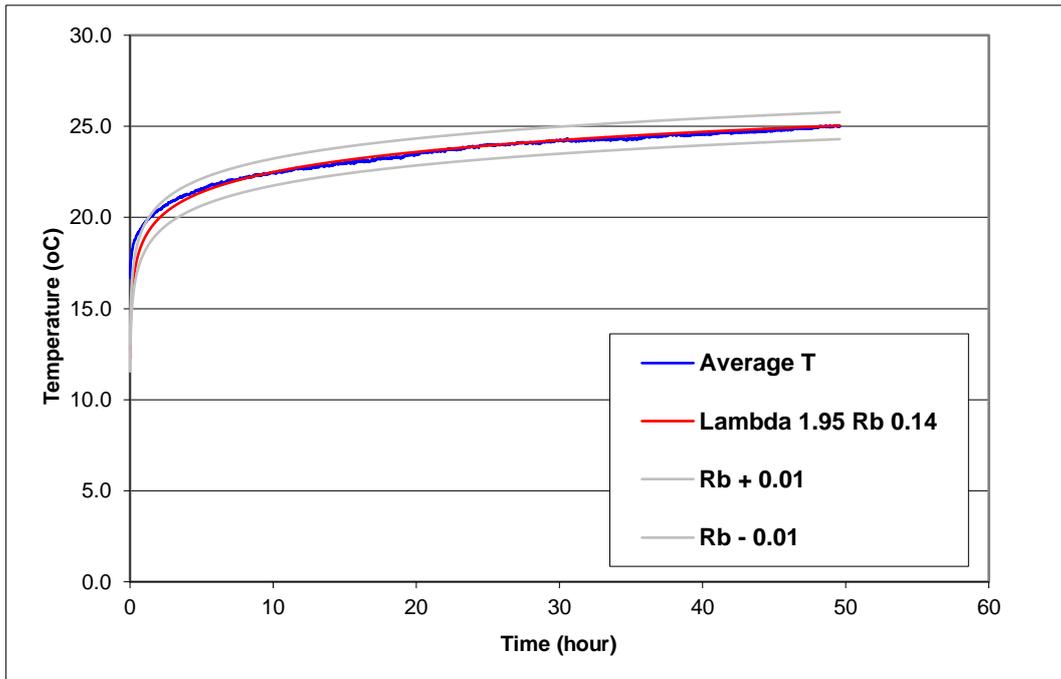


Figura 49 Temperatura media del fluido misurata e temperatura del fluido calcolata impostando la conducibilità termica del suolo e la resistenza termica del pozzo – Injection TRT

La stabilità e la convergenza dei risultati per la conducibilità termica del suolo sono in funzione del tempo di selezione dei dati e del numero di dati presi in considerazione e possono essere rappresentati graficamente mediante il metodo CUSUM test (Brown et al., 1975). Questi grafici sono costruiti stimando la conducibilità termica del suolo con un numero di dati aggiunti contenuti all'interno di un passo di tempo, definito in precedenza (esempio 2 ore). La sensibilità del punto di partenza dei dati può essere calcolato costruendo diverse serie, ognuna delle quali a un diverso tempo di partenza (esempio 10 ore).

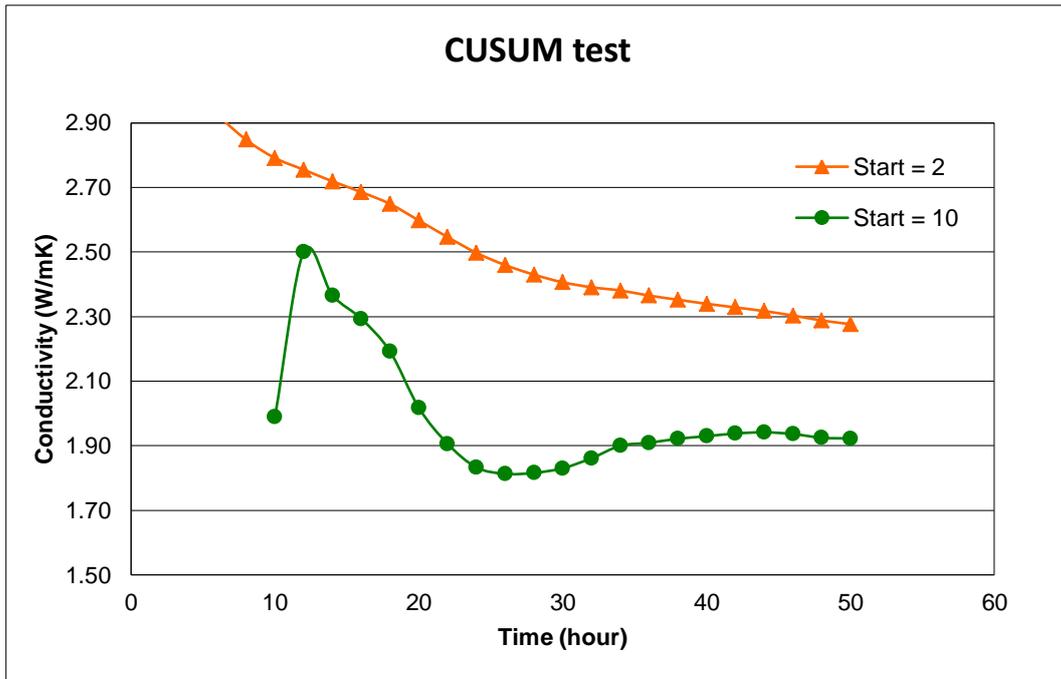


Figura 50 CUSUM method – Rappresentazione della conducibilità termica adottando finestre temporali di 2 h con un tempo iniziale 0 e 10 ore – Injection TRT

Con il metodo CUSUM il valore della conducibilità termica converge all'interno di un valore compreso tra 1.90 – 2.10 W/ (m K) dopo 52 ore. L'effetto del movimento d'acqua di falda è presente ma non facilmente osservabile da questo grafico, infatti, si può notare un costante, anche se lieve, incremento della conduttività termica tra la 32esima fino alla 48esima per poi decrescere in coincidenza della disattivazione della pompa per l'estrazione d'acqua. Questo scarso effetto può essere dovuto ad una bassa portata d'acqua estratta.

Delle misure della temperatura a diverse profondità sono state eseguite durante il test da delle termocoppie poste in pozzi di osservazione vicine la sonda geotermica. Le misure sono state eseguite ogni 60 secondi e riportate in una media di 6 minuti.

Una volta raggiunto uno stato di stabilità, si è proceduto ad ottenere la pendenza della temperatura su una scala logaritmo del tempo dei vari strati. Non è possibile applicare il modello della sorgente lineare infinita poiché la sorgente è collocata ad una distanza all'incirca di 10 cm dal pozzo in cui vengono eseguite le misurazioni.

Extraction (31 h - 44h)			
h (m)	Type	k	dk (95 %)
3	A	0.244	0.023
5	B	0.701	0.026
12	A	0.425	0.072
15	A	0.258	0.025
25	C	0.329	0.036
28	C	0.385	0.056
	Average	0.36	0.04

A = Dry and fine grained sand B = peaty and clayey C = Medium coarse sand

Tabella 16 Risultati della pendenza della temperatura su scala logaritmo del tempo per le diverse termocoppie – Injection TRT

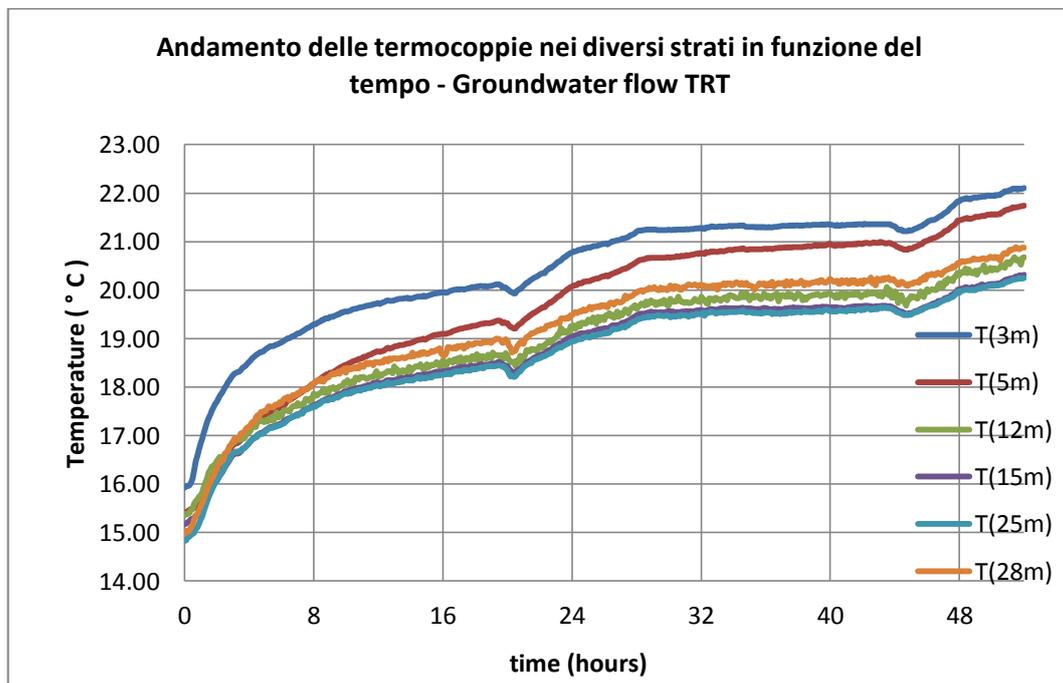


Figura 51 Andamento della temperatura per le diverse termocoppie nel pozzo di osservazione collocato a 10 cm di distanza – Injection TRT

Il valore medio è individuato applicando una serie di pesi alle termocoppie a seconda degli strati di terreno che rappresentano. Anche se non è possibile applicare la teoria, è sempre valido il concetto tanto più alto è la pendenza della curva della temperatura tanto più basso risulterà la conducibilità termica del suolo. I risultati sono conformi alle informazioni geologiche a noi note, infatti il più alto valore della pendenza (k) è in prossimità dello strato argilloso a 5 metri di

profondità mentre il più basso valore in questo caso è in prossimità di 15 metri dove è collocato il filtro del pozzo d'estrazione, successivamente sono collocati gli strati composti da sabbia grossolana .

3.8.4 Overview dei risultati dei TRT

Sullo stesso sito sono stati realizzati 3 diversi Test di Risposta Termica con e senza movimento d'acqua di falda e con fasi invertite di iniezione a quella di estrazione di calore. Applicando il modello della sorgente lineare infinita al solo primo impulso vengono individuati risultati diversi di conducibilità termica equivalente λ_{eq} e resistenza termica equivalente del pozzo (R_b) :

TRT REFERENCE		TRT GROUNDWATER FLOW		TRT INJECTION	
λ W/(m K)	R_b (K/(W/m))	λ W/(m K)	R_b (K/(W/m))	λ W/(m K)	R_b (K/(W/m))
1.98 – 2.40	0.10-0.16	2.60 – 3.15	0.13-0.19	1.82 – 2.06	0.11 - 0.17

Tabella 17 Risultati della conducibilità termica equivalente del suolo e resistenza termica equivalente del pozzo per i diversi TRT

Questo dovuto alle diverse fluttuazioni e condizioni che interessano il sito, infatti variando le condizioni al contorno i flussi di calore che si instaurano interagiscono con volumi differenti.

Applicando il metodo analitico per il calcolo della resistenza termica proposto da *Bauer* si individua un valore della resistenza termica della sonda pari a 0.13 (K/(W/m)) mentre applicando la formula semplificata presente nella normativa tecnica UNI approvata del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) si individua un valore di resistenza termica pari a 0.14 (K/(W/m)). Entrambi i metodi forniscono risultati compresi all'interno dei range di valori individuati dai TRT.

Riportando i risultati delle pendenze delle temperatura su scala logaritmo del tempo per le diverse termocoppie per ogni esperimento, si hanno comportamenti simili degli strati e coincidente con le informazioni geologiche note.

I dati delle termocoppie per i TRT, essendo le finestre di tempo analizzate diverse, vanno confrontati unicamente tra gli esperimenti; osservando che gli incrementi o decrementi che si hanno sono gli stessi per i diversi strati del terreno.

h	Type of Soil	Extract. Ref.	Inject. Ref.	Extract. GW	Extrac. GW	Inject. GW	Inject. Inj.
		k ± dk (35- 45)	k ± dk (78- 90)	k ± dk (24- 38)	k ± dk (44- 48)	k ± dk (78- 90)	k ± dk (31- 44)
3	A	-1.761 ± 0.059	2.715 ± 0.035	-1.223 ± 0.056	-1.460 ± 0.112	2.317 ± 0.057	0.244 ± 0.023
5	B	-2.120 ± 0.050	3.727 ± 0.037	-1.557 ± 0.049	-1.781 ± 0.092	3.197 ± 0.057	0.701 ± 0.026
1 2	A	- 1.857 ± 0.053	2.913 ± 0.103	-1.357 ± 0.050	-1.564 ± 0.164	2.395 ± 0.229	0.425 ± 0.072
1 5	A	-1.731 ± 0.049	2.608 ± 0.031	-1.210 ± 0.046	-1.381 ± 0.105	2.252 ± 0.049	0.258 ± 0.025
2 5	C	-1.567 ± 0.050	2.568 ± 0.035	-1.147 ± 0.046	-1.347 ± 0.193	2.153 ± 0.043	0.329 ± 0.036
2 8	C	-1.542 ± 0.062	2.648 ± 0.060	-1.209 ± 0.054	-1.365 ± 0.353	2.271 ± 0.089	0.385 ± 0.056
Average		-1.730 ± 0.05	2.740 ± 0.050	-1.260 ± 0.05	-1.450 ± 0.17	2.340 ± 0.10	0.36 ± 0.04

A = Dry and fine grained sand B = peaty and clayey C = Medium coarse sand

Tabella 18 Risultati pendenze (k) delle temperatura misurate dalle termocoppie su scala logaritmo del tempo per i diversi TRT

A seguire un confronto dei Test di Risposta Termica per il “Reference” e per il “Groundwater flow” che sono caratterizzate dallo stesso ordine delle fasi, estrazione e iniezione rispetto alla temperatura iniziale prima dell’inizio dell’esperimento.

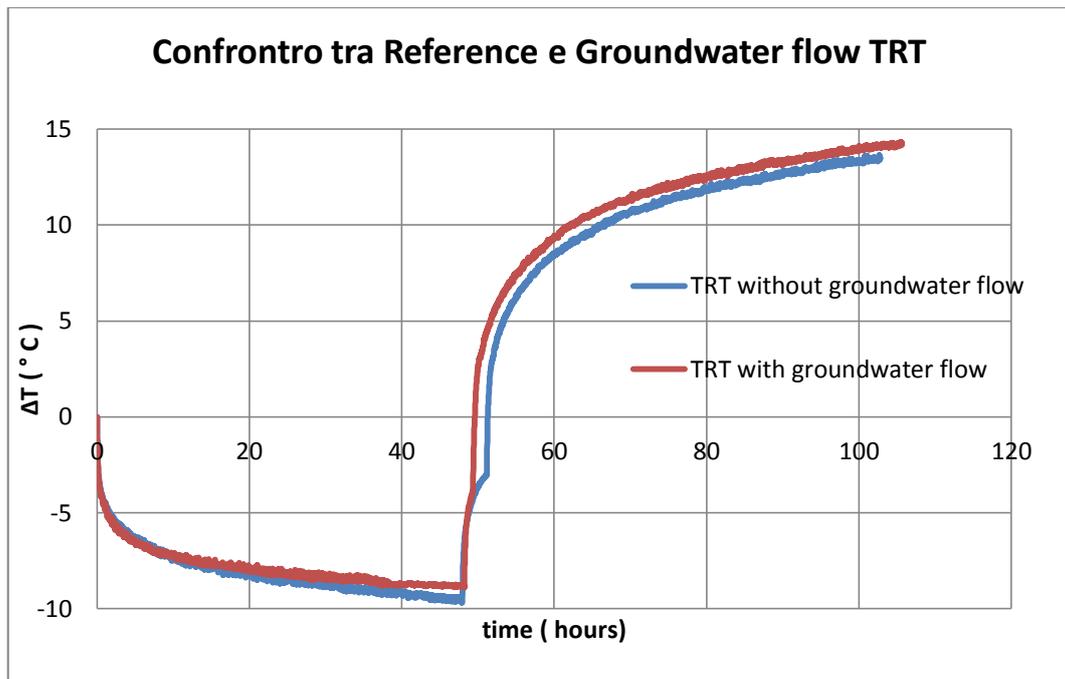


Figura 52 Confronto dei TRT per gli esperimenti Reference e Groundwater flow

Nel confronto si osserva nella prima parte del grafico il TRT senza movimento d'acqua di falda, come da aspettativa, da una risposta di temperatura più alta rispetto al test con movimento d'acqua di falda, dovuto alla dispersione termica determinato dai fenomeni convettivi. Mentre nella seconda parte, durante l'iniezione di calore, si attendeva una risposta diversa caratterizzata da una temperatura del fluido più alta nel test senza movimento d'acqua. Soprattutto perché maggiore è la differenza di temperatura tra il fluido all'interno del geo scambiatore e la temperatura della falda tanto più calore dovrebbe essere disperso per convezione. Si vede necessario studiare più attentamente i fenomeni legati al cambiamento di fase tra estrazione e iniezione di calore per interpretare meglio tale aspetto.

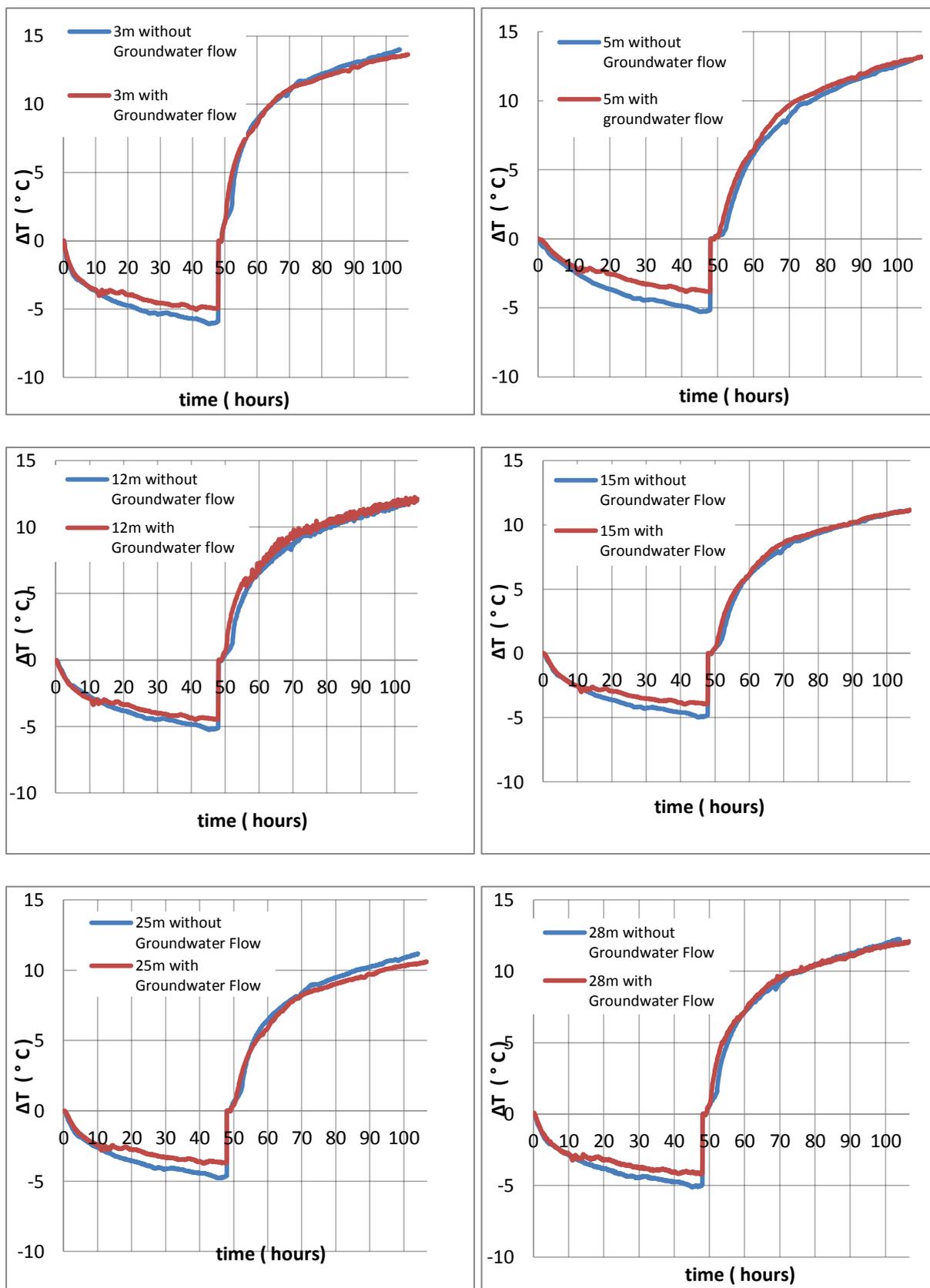


Figura 53 Confronto delle misure eseguite dalle termocoppie rispetto alla temperatura iniziale per gli esperimenti Reference e Groundwater Flow TRT

Per le termocoppie collocate ad una profondità di 4 e 15 m nel pozzo di osservazione posto ad una distanza di 0.75 m dalla sonda geotermica non si registrano variazioni di temperatura in nessuno dei 3 TRT, che possono essere attribuite all'estrazione o all'iniezione di calore. Viene riportato a seguire l'andamento delle termocoppie posto nei due pozzi di osservazioni alla stessa profondità di 15 m. Questo fornisce indicazione sui volumi interessati durante il test.

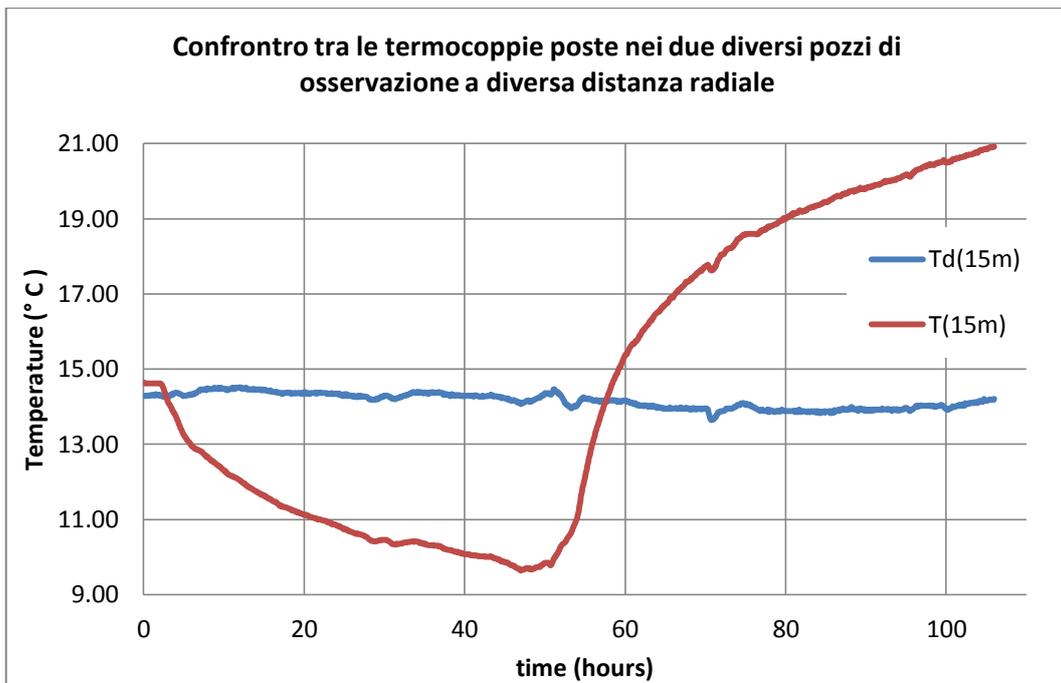


Figura 54 Andamento della temperatura per le termocoppie collocate ad una distanza radiale 0.10 cm e 0.75 m dal pozzo di estrazione e ad una profondità di 15 m

IV ANALISI GEOSTATISTICA DEI DATI SPERIMENTALI

4.1 Approccio probabilistico all'analisi dei TRT

La Geostatistica studia i fenomeni naturali che si sviluppano su base spaziale a partire dalle informazioni derivanti da un loro campionamento. In particolare studia la variabilità spaziale dei parametri che descrivono i suddetti fenomeni estraendone le regole in un quadro modellistico di riferimento e usandole per effettuare le operazioni volte a dare soluzione a specifiche problematiche riguardanti la caratterizzazione e la stima dei fenomeni stessi. I metodi della geostatistica sono attuabili in tutti quei settori delle scienze applicate in cui i fenomeni di studio hanno carattere spaziale. In relazione alle applicazioni registrate negli ultimi tre decenni, tra i settori applicativi si possono citare: le scienze geologiche e minerarie, l'idrologia, l'idrogeologia, la scienza dei suoli, l'agronomia, la geotecnica, la geofisica, il telerilevamento, la climatologia, la meteorologia, l'oceanografia, le scienze forestali, la zoologia, l'epidemiologia, l'igiene ambientale e la geotermia.

Questo lavoro, prevede l'utilizzo di questi strumenti per lo studio delle varie proprietà termiche che caratterizzano un reservoir geotermico e l'analisi delle fluttuazioni che caratterizzano le misure dei test. Le grandezze principali per la caratterizzazione di un serbatoio geotermico sono la conduttività termica (λ), la capacità termica volumetrica (c), la resistenza termica del pozzo (Rb) e la temperatura del suolo indisturbata (Tg).

Tutti questi parametri ad eccezione della resistenza termica del pozzo (Rb), necessari per il corretto dimensionamento degli geo-scambiatori, possono essere considerati come delle Variabili Regionalizzate (VR), nello spazio o nello spazio-tempo e possono essere modellizzate attraverso gli strumenti geostatistici come Funzioni Aleatorie (FA). In particolare vengono analizzate:

- Le diverse proprietà termiche dal punto di vista geostatistico in modo che queste possono essere considerate delle VR in maniera tale da poter essere modellizzate come FA ,
- qualità della stima dei parametri ottenuti dai diversi Test di Risposta Termica su uno stesso pozzo variando alcune delle condizioni al contorno,

- analisi delle fluttuazioni che caratterizzano il sistema macchina e il sistema reservoir.

Un approccio probabilistico sui Test di Risposta Termica è stato già applicato da Bruno, Tinti e Focaccia tenendo in conto degli aspetti aleatori del test dei dati sperimentali del TRT, introducendo il modello a residui spiegato nel capitolo a seguire.

4.2 Strumenti geostatistici disponibili

Come qualunque analisi dei dati si studiano le statistiche elementari quali: media; varianza; deviazione standard, è la misura che indica quanto i valori si discostano dal valore medio; il valore minimo, è il valore più piccolo della serie di dati; massimo, si individua il valore più grande della serie di dati. Una maggiore attenzione si pone alla media, anche definita momento primo di una VA variabile aleatoria, e alla varianza, anche definita momento centrato dell'ordine 2 di una VA variabile aleatoria.

Altro mezzo importante è l'istogramma di frequenza che permette una rappresentazione grafica delle distribuzioni delle frequenze in classi.

Nella teoria della sorgente lineare infinita si riferisce alla ben nota relazione che permette di rapportare la temperatura del fluido T_f al tempo logaritmico, $\ln(t)$:

$$T_f(t) = b \cdot \ln(t) + a \quad (3.1)$$

Una regressione permette di stimare la costante b e quindi la conducibilità termica del terreno λ , mediante dei parametri ben noti quali la potenza iniettata Q e la lunghezza del foro H . La prima considerazione consiste nel fatto che si sta affrontando un classico problema di stima dei parametri, perché non si sa, e non si saprà mai, il vero parametro di servizio b , ma solo la sua stima, b^* . Si produce quindi un errore di stima, che può essere solamente considerato come una variabile aleatoria.

Inoltre, le temperature registrate dal *TRT* sperimentale sono realmente influenzate da diversi fattori come riportato nei paragrafi precedenti. Le temperature, infatti, fluttuano intorno ad un valore medio il cui comportamento dovrebbe essere quello imposto dalla teoria *ILS* se non è presente nessuna deviazione sistematica causata

da scambi di calore differenti da quello conduttivo. Riguardo alle fluttuazioni, occorre considerare che ripetendo una registrazione di *TRT*, il profilo di *Tf* non riprende esattamente i precedenti profili, ma ne riprende solo la media. Questo si spiega dal fatto che i fattori secondari variano e non possono essere controllati.

L'approccio geostatistico proposto considera la temperatura del fluido *Tf* come una funzione aleatoria (FA) non stazionaria nel tempo con un trend definito (Chiles, 1999). Si considera quindi un classico modello a residuo; modellizzata come la somma di una funzione media (il valore atteso) $m(t)$, deterministico, e una fluttuazione aleatoria, $Y(t)$, con media zero. La funzione media della temperatura del fluido, che rappresenta il comportamento medio della funzione aleatoria, è definita in accordo alla teoria:

$$T(t) = m(t) + Y(t) \quad (3.2)$$

$$E[T(t)] = m(t) = a + b \ln t \quad (3.3)$$

Una registrazione *TRT* è quindi considerata come una realizzazione della variabile aleatoria non stazionaria, uno dei possibili risultati. La natura aleatoria dei risultati del test è trasferita alle fluttuazioni. Mentre le variabili portata (*Q*) e potenza (*P*) sono considerate nell'approccio geostatistico come delle funzioni aleatorie stazionarie.

Uno strumento della geostatistica molto importante è il variogramma, che rappresenta la semivarianza dell'accrescimento. Il variogramma delle fluttuazioni è:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var} \{T(t+h) - T(t)\} = \frac{1}{2} E[(Y(t+h) - Y(t))^2] \quad (3.4)$$

In pratica, il variogramma sperimentale è calcolato sui residui ottenuti sottraendo la media stimata dalle temperature registrate. La media può essere stimata da un classico metodo di regressione, che, per gli scopi dell'analisi del variogramma, è considerato abbastanza robusto in quanto è disponibile un elevato numero di dati. Inoltre la varianza dei residui sperimentali è molto simile alla varianza delle fluttuazioni teoriche. Conseguentemente il variogramma sperimentale è molto stabile e insensibile alla qualità di stima della media. L'andamento del

variogramma esprime quasi sempre il tipo di variabilità della variabile in esame. Mediante nuvola di correlazione fra 2 variabili si visualizza il legame esistente fra queste, evidenziandone i valori estremi e popolazioni diverse. Inoltre aiuta nell'identificazione delle distribuzioni e medie per classi.

Il coefficiente di correlazione misura la dipendenza lineare presente fra le variabili X e Y in gioco, nonché la loro correlazione. Avendo due variabili aleatorie X e Y con i momenti m_x, m_y e $\sigma_{xy}, \sigma_x, \sigma_y$ avremo :

$$\rho_{xy} = \frac{E[(X-m_x)*(Y-m_y)]}{\sigma_{xy}} \quad (3.5)$$

Un altro strumento che fornisce informazioni sul comportamento del sistema è la covarianza incrociata delle fluttuazioni, che ci aiuta a comprendere le differenze che caratterizzano i diversi test .

Utilizzando il metodo della covarianza incrociata è possibile definire quantitativamente il grado di correlazione tra le diverse variabili del sistema. La formula generale per la covarianza incrociata è:

$$Cov [Z_1(x), Z_2(x+h)] = C_{12}(h) = E[Z_1(x), Z_2(x+h)] - m_1 m_2 \quad (3.6)$$

Dove $Z_1(x)$ e $Z_2(x)$ rappresentano le variabili aleatorie e m_1 e m_2 saranno le loro medie.

4.3 Analisi dei dati

Tre diversi Test di Risposta Termica, con estrazione e iniezione di calore, sono stati realizzati nello stesso pozzo con e senza movimenti d'acqua di falda indotti. A seguire una tabella riassuntiva dell'ordine degli impulsi, tempistiche e valori medi dei parametri caratteristici dei test e loro deviazioni standard.

Sono state studiate in queste analisi geostatistica solamente i primi impulsi dei Test, in quanto non risulta possibile applicare la soluzione della sorgente lineare infinita poiché non rispetta le condizioni del modello. Quest'analisi dei dati è stata scomposta fondamentalmente in tre parti:

- nello studio delle fluttuazioni delle temperature medie del TRT;

- analisi separata per i singoli parametri caratteristici del test quali temperatura in ingresso, temperatura in uscita, portata e potenza.
- calcolo delle correlazioni tra i singoli parametri per la determinazione del ritardo del test.

Experimental Parameters	Pulse #1-1 heat extraction	Pulse #1-2 heat injection	Pulse #2-1 heat extraction	Pulse #2-2 heat injection	Pulse #3 heat injection
Name	Reference		Groundwater Flow		Injection
Date	04/07/2012	07/07/2012	13/07/2012	15/07/2012	23/07/2012
Pulse Duration (hours)	48	57	48	52	52
Loop type	single U-loop PE, 0.025 m diameter				
Length (m)	30				
Borehole Radius	0.125				
Circulation Medium	Monopropylene glycol, 15 %				
Flow rate (m ³ /h)	0.45 ± 0.02	0.46 ± 0.02	0.46 ± 0.02	0.48 ± 0.02	0.47 ± 0.02
ΔT (° C)	-2.20 ± 0.15	3.00 ± 0.19	-2.20 ± 0.18	3.00 ± 0.15	2.20 ± 0.07
Energy Flux (W)	-1121 ± 97	1705 ± 140	-1139 ± 102	1630 ± 100	1173 ± 65
Energy flux per meter (W/m)	-37.0 ± 3.2	56.8 ± 4.7	-38.0 ± 3.4	54.3 ± 3.2	39.0 ± 2.2
Logging interval (s)	60	60	60	60	60
Recovery time (h)	1		3		-
Groundwater flow	No		Yes		Yes

Tabella 19 Overview dei parametri per i diversi esperimenti e le caratteristiche del pozzo

4.3.1 Analisi della temperatura media del fluido per i diversi TRT

Viene riportato, per il Reference TRT, l'andamento della temperatura in ingresso e uscita del fluido termovettore all'interno del geo scambiatore in funzione del tempo e gli istogrammi di frequenza della temperatura media del fluido per diverse classi di temperatura.

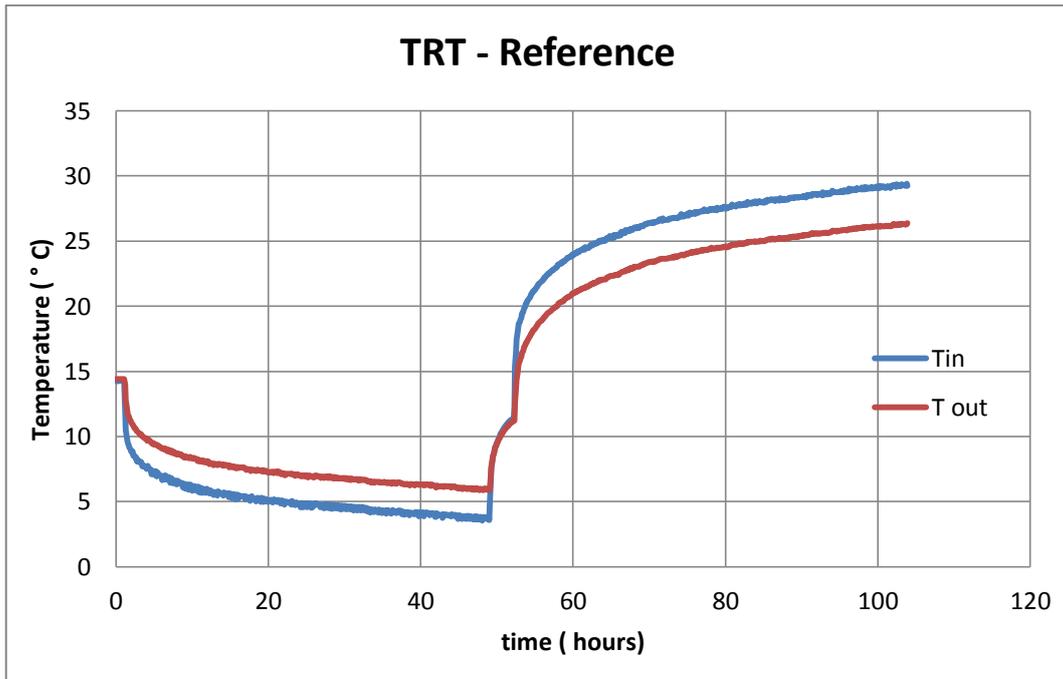


Figura 55 TRT - Reference test

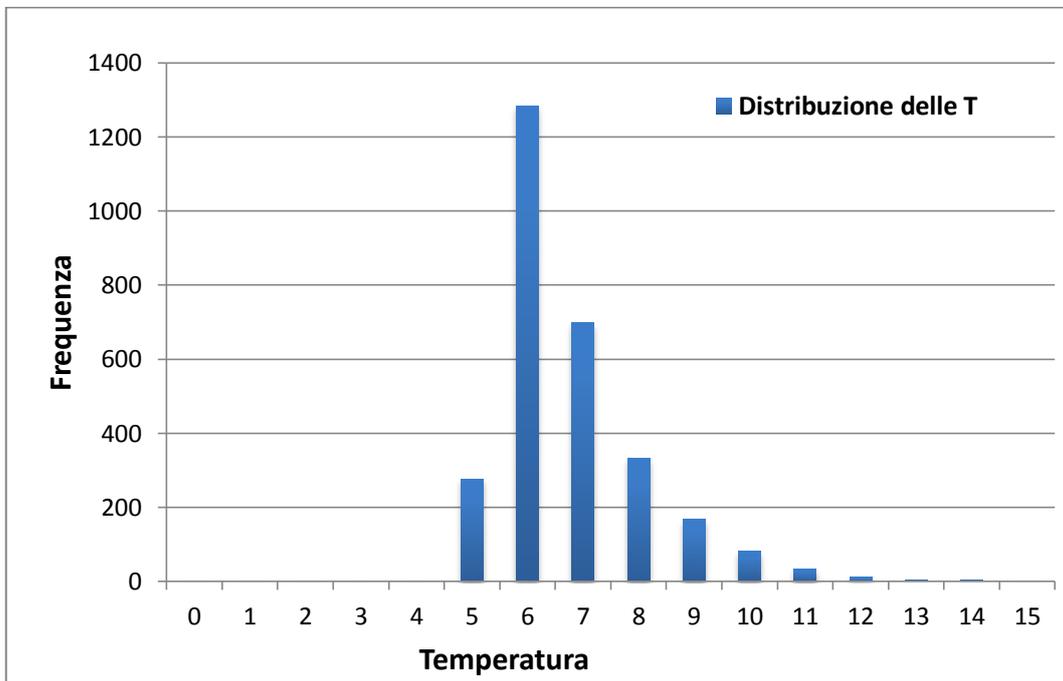


Figura 56 Istogrammi di frequenza per le temperature medie del fluido – Reference TRT

Si è proceduto alla stima dei parametri b^* e a^* considerando diversi tempi iniziali t_0 quali 0, 10, 15 e 20 ore realizzando così diverse regressioni lineari per i relativi dati. Successivamente si è determinata la fluttuazione $Y(t)$, come la differenza tra il valore individuato dalla regressione lineare $m(t)$ e il valore misurato nel test,

per i diversi tempi iniziali. Non riscontrando elementi fondamentali si è scelto di adottare come tempo iniziale di riferimento un tempo iniziale pari a 10 ore.

Si rappresenta l'andamento della temperatura del fluido medio su una scala logaritmo con la retta di regressione lineare e l'andamento delle fluttuazioni per il Reference test. L'attesa era quello di individuare una fluttuazione costante intorno alla media. Invece da come si può evincere dal grafico si distinguono tre diverse parti. Una prima compresa tra 10 – 25 ore che ha un andamento costante, una compresa tra 25 – 32 ore che ha un andamento costante simile a quello precedente ma caratterizzata da un certo innalzamento di temperatura e un' ultima compresa tra 32 – 48 ore che è caratterizzata da un trend crescente.

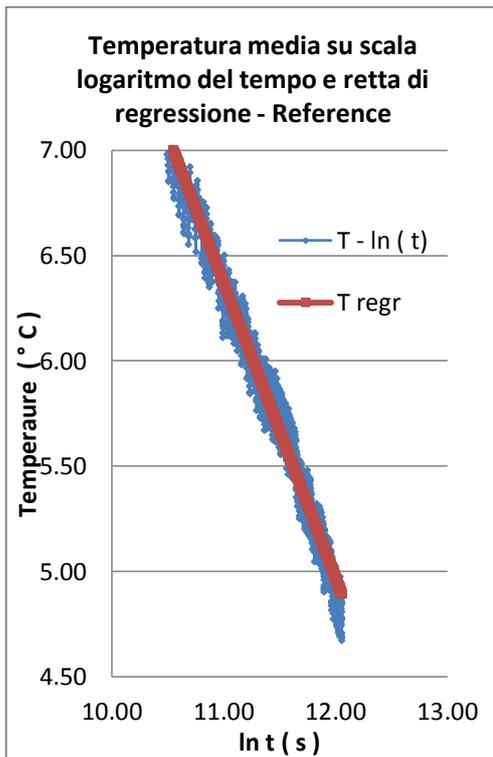


Figura 57: Regressione lineare Temperatura - $\ln(t)$ Reference TRT

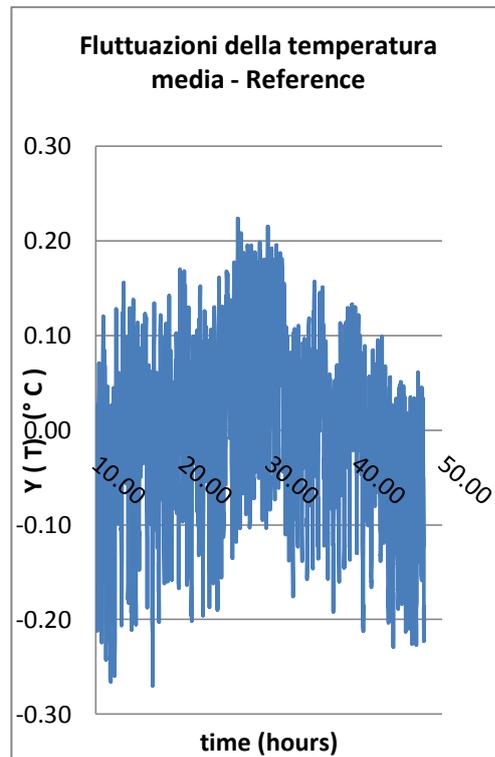


Figura 58 : Andamento delle fluttuazioni nel tempo (10- 48)h Reference TRT

Si è calcolato il variogramma sperimentale adottando un passo 600 secondi e un passo 60 secondi delle fluttuazioni per le tre diverse zone individuate, (10-25) (25-32) e (32-48), e il relativo modello. Adottando un passo 600 secondi, si perdono delle ciclicità e degli aspetti che caratterizzano il test. Per questo si è preferito soffermarsi e concentrarsi nello studio dei variogrammi con passo più corto.

A seguire una tabella con i valori della conducibilità termica equivalente e Resistenza termica equivalente del pozzo per il Reference test considerando l'intervallo globale e per i singoli intervalli, oltre alle caratteristiche del modello del variogramma adottato.

	Reference			
	10 - 48	10-25	25-32	32-48
λ (W/(m K))	2.16	2.26	2.22	1.87
Rb (mK /W)	0.12	0.12	0.12	0.11
Tipo di Modello c=soglia a=portata T=periodo		Sferico	Gaussiano	Sferico
		c=0.00455 a=350	c=0.0043 a=210	c=0.0031 a=300
		Effetto Buco	Effetto Buco	Effetto Buco
		c=0.001 a=1500 T=360	c=0.001 a=1200 T=370	c=0.0006 a=2900 T=370
		Effetto Buco	Effetto Buco	Effetto Buco
	c=0.0019 a=2900 T=1800	c=0.0025 a=3000 T=1500	c=0.0017 a=3000 T=2000	

Tabella 20 Risultati di conducibilità termica e Resistenza Termica del pozzo per i diversi intervalli di tempo considerati nel TRT Reference e strutture e valori del variogramma modello

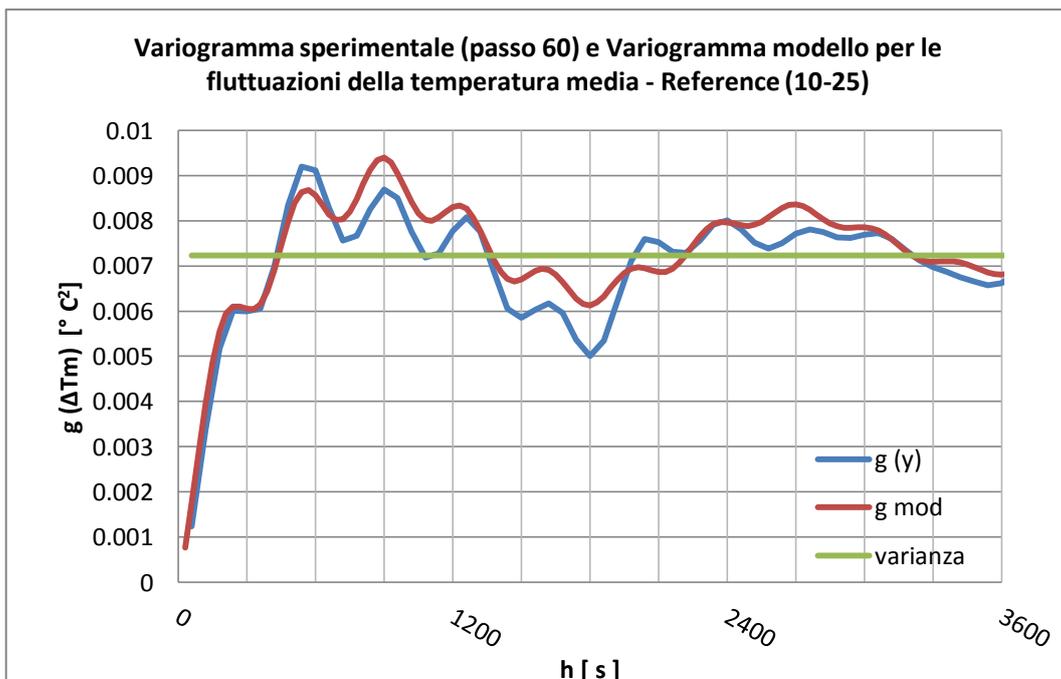


Figura 59 Variogramma delle fluttuazioni e modello comprese tra 25-32 h – Reference TRT

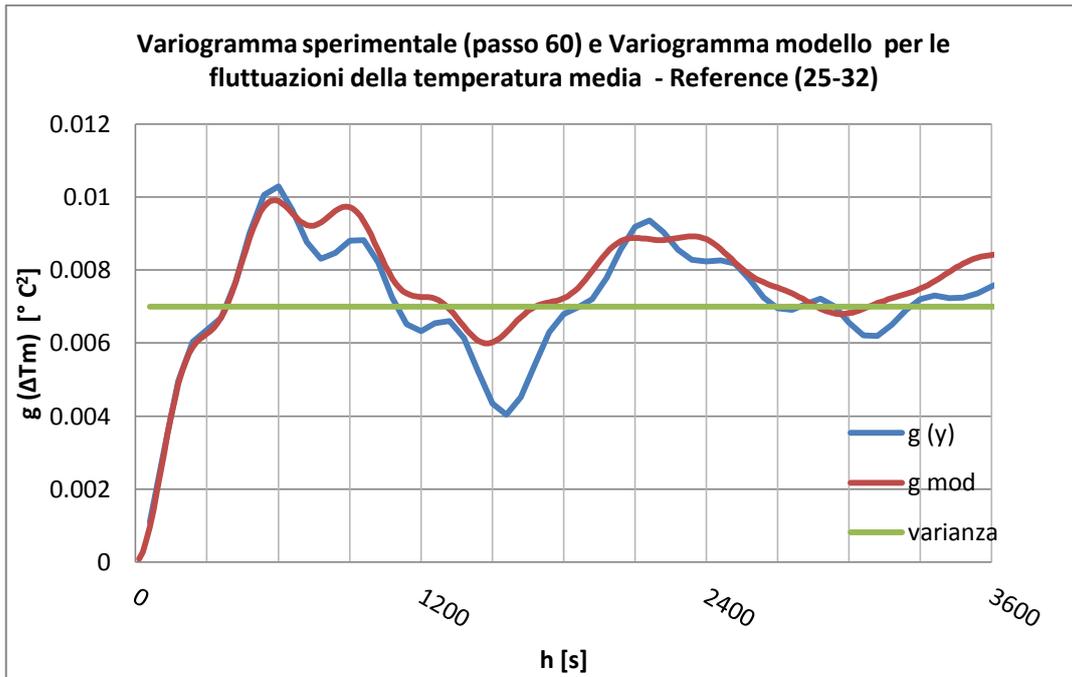


Figura 60 Variogramma delle fluttuazioni e modello comprese tra 25-32 h –Reference TRT

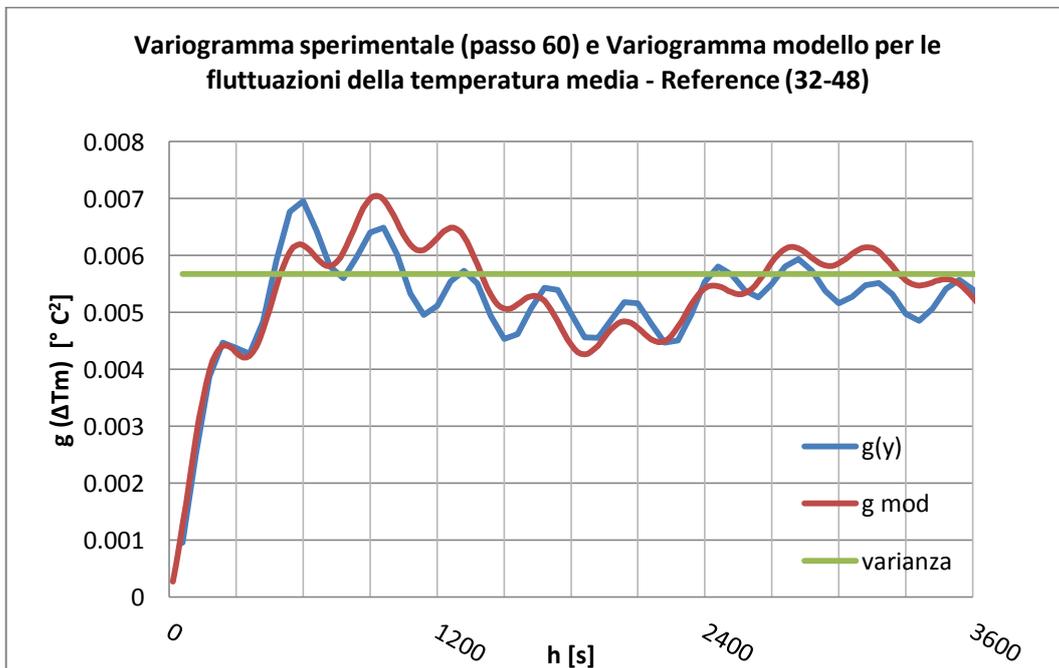


Figura 61 Variogramma delle fluttuazioni e modello comprese tra 32-48 h – Reference TRT

Nei primi due intervalli di tempo (10-25), (25-32) si hanno risultati simili di conducibilità termica equivalente e resistenza termica del pozzo. Anche il variogramma sperimentale e dunque il variogramma modello hanno strutture simili, caratterizzati da un valore di soglia intorno a $(0.007 - 0.008) [^{\circ}C^2]$. Mentre nell'ultimo intervallo oltre a fornire un valore della conducibilità termica

equivalente inferiore pari a un 12% in meno rispetto al valore individuato nell'intervallo globale è caratterizzato da un variogramma modello che solo in parte conserva le strutture rispetto a quelle precedenti anche se è caratterizzato da una soglia leggermente più bassa. E' interessante osservare le ciclicità delle strutture del modello per un tempo intorno ai 360-370 secondi ed una ai 1500-1800 secondi. Queste ciclicità vengono attribuite al funzionamento del sistema della macchina. La prima ciclicità con un periodo di 370 secondi è legata al controllo della 3 Way valve che apre o chiude la valvola a seconda della temperatura del serbatoio e della temperatura del fluido di ritorno dal geo scambiatore infatti questa risulta essere legata in parte al tempo necessario del fluido per percorrere la sonda, all'incirca 180 secondi. La seconda ciclicità con periodo più ampio è indotta dall'esercizio della pompa di calore necessaria per poter svolgere il test. Per il TRT si ha bisogno di una differenza di temperatura costante tra il fluido in ingresso e in uscita, tale energia è fornita da una pompa di calore che raffredda o riscalda il fluido all'interno del serbatoio. Questa pompa di calore verrà attivata solamente quando il fluido del serbatoio sarà inferiore a un certo range prestabilito, tale da indurre delle periodicità asimmetriche.

Viene riportato, per il Groundwater flow TRT, l'andamento della temperatura in ingresso e uscita del fluido termovettore all'interno del geo scambiatore in funzione del tempo e gli istogrammi di frequenza della temperatura media del fluido per diverse classi di temperatura. Si è proceduto alla stima dei parametri b^* e a^* considerando diversi tempi iniziali t_0 quali 0, 10, 15 e 20 ore realizzando così diverse regressioni lineari per i relativi dati. Successivamente si è determinata la fluttuazione $Y(t)$, come la differenza tra il valore individuato dalla regressione lineare $m(t)$ e il valore misurato nel test, per i diversi casi.

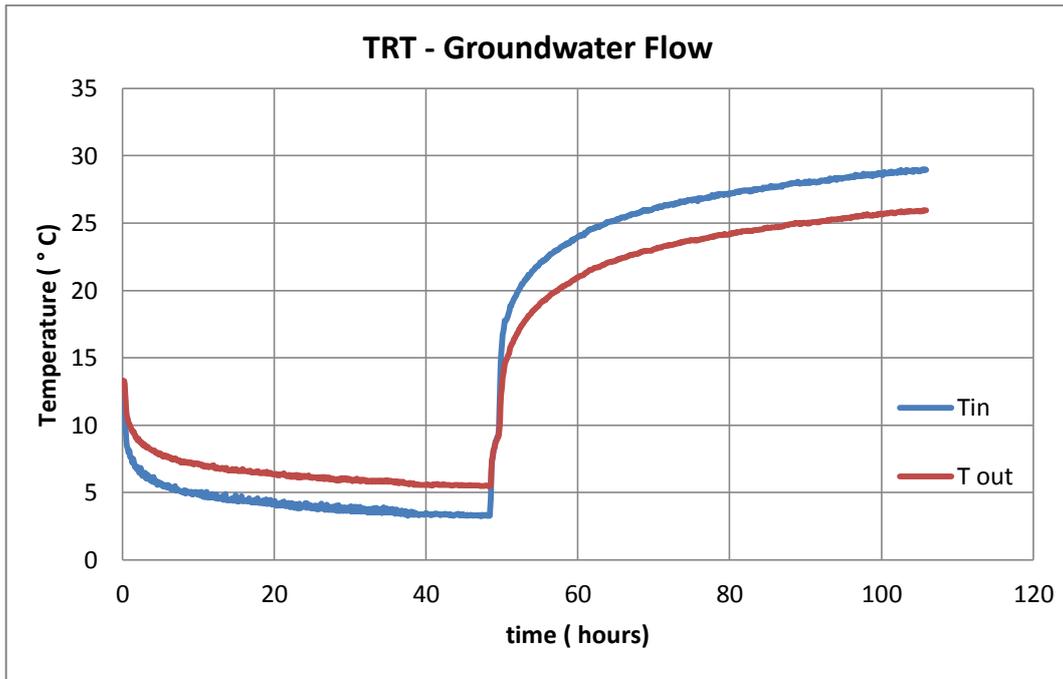


Figura 62 TRT Groundwater flow

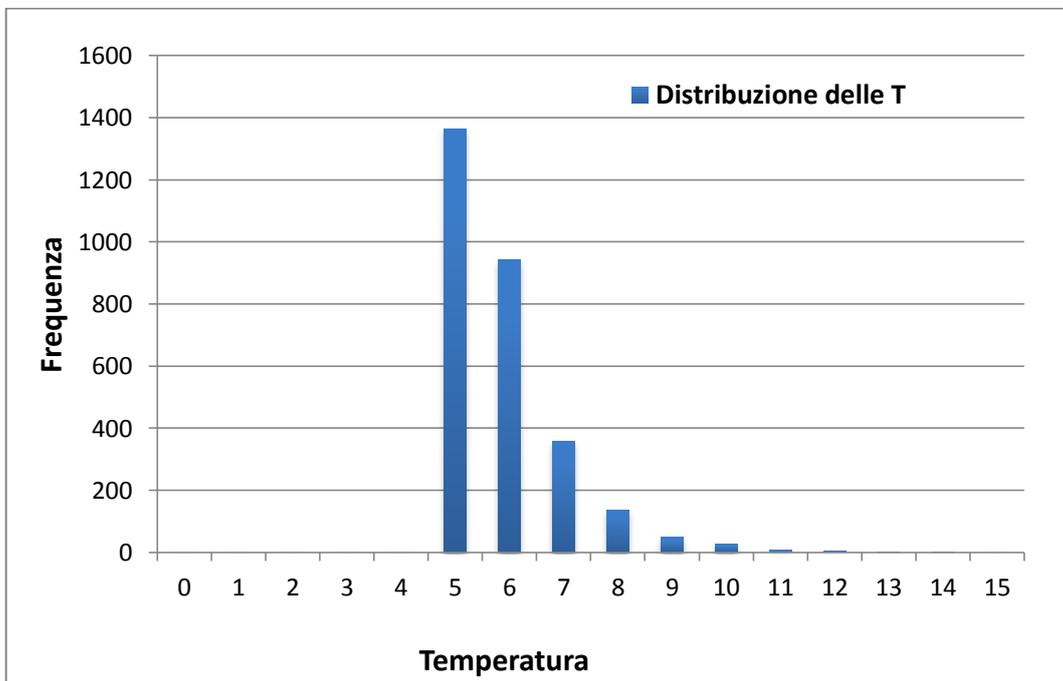


Figura 63 Istogrammi di frequenza per le temperature medie del fluido

Si rappresenta l'andamento della temperatura del fluido medio su una scala logaritmo con la retta di regressione lineare e l'andamento delle fluttuazioni per il Groundwater flow test. L'andamento delle fluttuazioni è semi costante fino alla 39esima ora, coincidente con la disattivazione della pompa per l'estrazione d'acqua per un'ora, assumendo così un trend crescente .

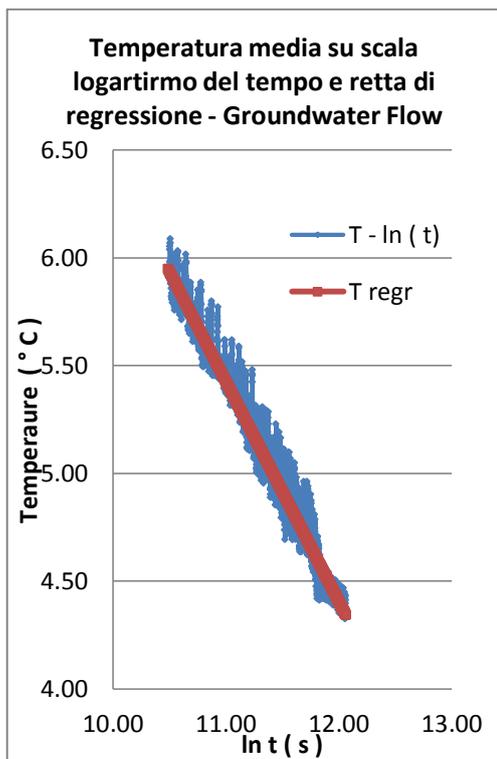


Figura 64 Regressione lineare Temperatura - $\ln(t)$ - Groundwater Flow TRT

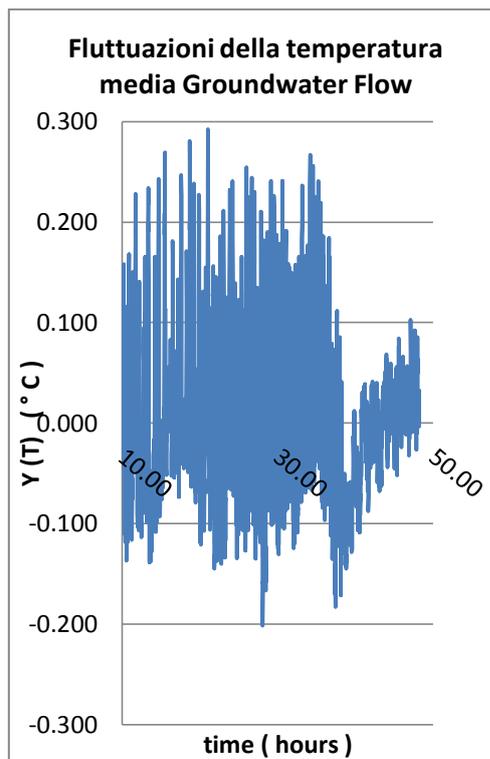


Figura 65 Andamento delle fluttuazioni nel tempo (10- 48) h - Groundwater flow TRT

Si sono scartate le ultime ore dell'esperimento studiando l'intervallo (10-39) ore per il calcolo del variogramma sperimentale adottando un passo 60 secondi.

	Groundwater flow	
	10-48	10-39
λ (W/(m K))	2.91	2.97
Rb (mK /W)	0.15	0.15
Tipo di Modello		Sferico
c=soglia		c=0.00375 a=500
a=portata		Effetto Buco
T=periodo		c=0.0046 a=1800 T=1420

Tabella 21 Risultati conducibilità termica e Resistenza Termica del pozzo per i diversi intervalli di tempo considerati nel TRT Groundwater flow e strutture e valori del variogramma modello

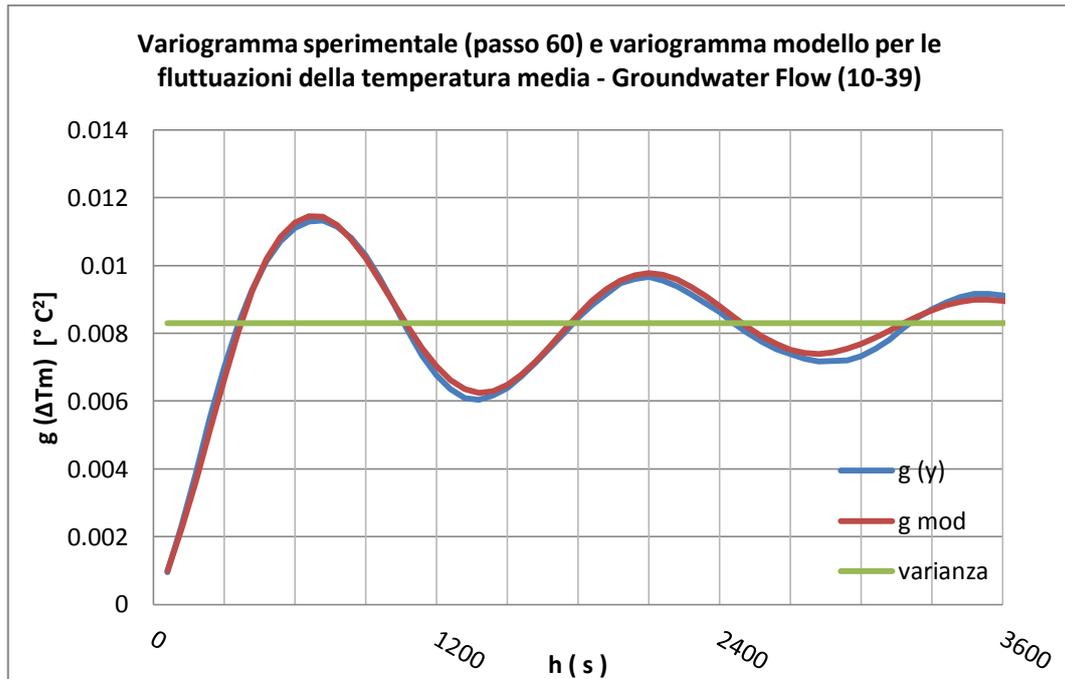


Figura 66 Variogramma delle fluttuazioni comprese tra 10-39 h e variogramma modello Groundwater flow

Si perde la periodicità dei 370 secondi, ma è più accentuata la periodicità ai 1435 secondi legata al funzionamento della pompa di calore. Inoltre il valore della soglia rispetto al variogramma del Reference Test è leggermente più grande. Si suppone che tutto questo sia dovuto alla dispersione del movimento d'acqua di falda, che portando via maggiore calore dal fluido, richiede un maggior reintegro di energia da parte della pompa di calore per mantenere costante la differenza di temperatura tra la mandata e il ritorno. Questa dispersione tende a rimuovere la piccola periodicità dovuta alla circolazione del fluido all'interno della sonda.

A differenza degli altri test, l'Injection TRT è un esperimento con iniezione di calore per 52 ore con movimento d'acqua di falda indotta. Si sono verificati dei problemi con il funzionamento della pompa che non hanno consentito un'estrazione costante d'acqua. Viene riportato l'andamento della temperatura in ingresso e uscita del fluido termovettore all'interno del geo scambiatore in funzione del tempo e gli istogrammi di frequenza della temperatura media del fluido per diverse classi di temperatura.

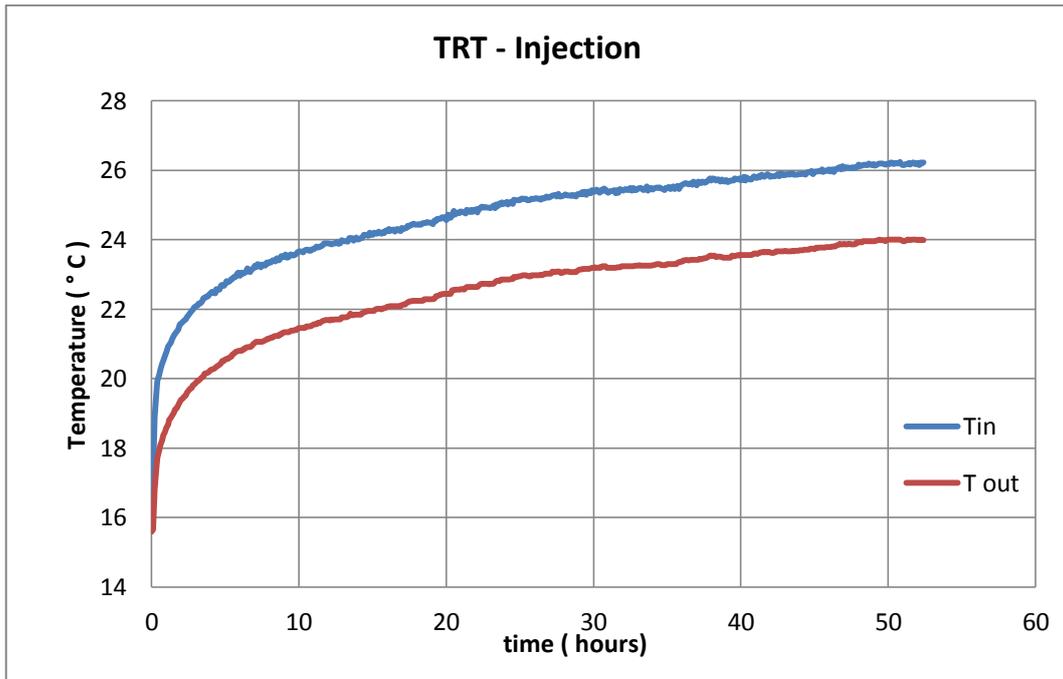


Figura 67 TRT Injection

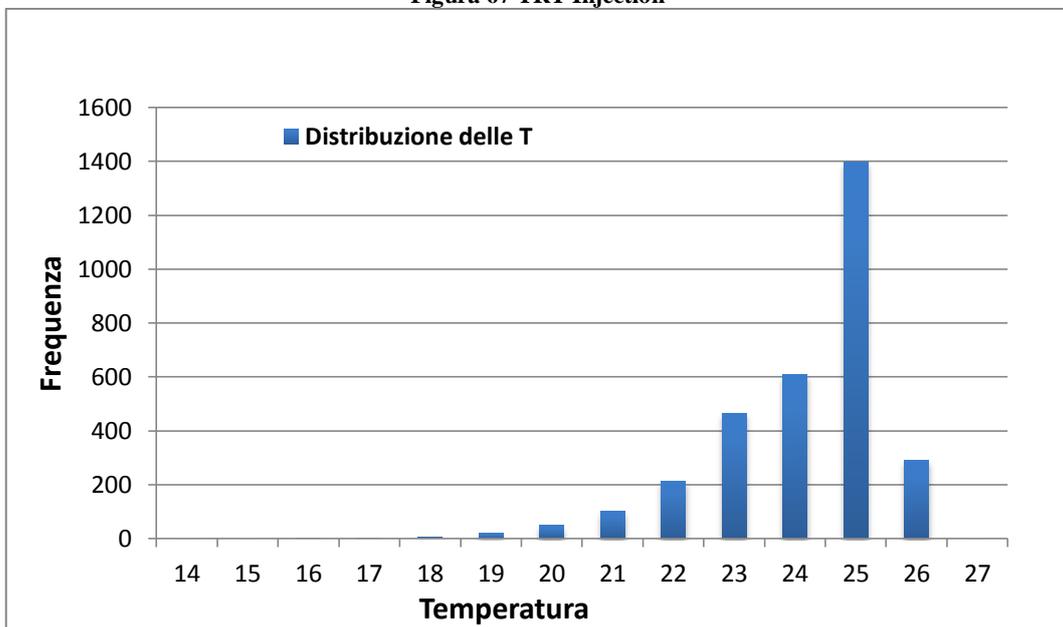


Figura 68 Istogrammi di frequenza per la Tm del fluido - Injection TRT

Si è proceduto alla stima dei parametri b^* e a^* considerando diversi tempi iniziali t_0 quali 0, 10, 15 e 20 ore realizzando così diverse regressioni lineari per i relativi dati. Successivamente si è determinata la fluttuazione $Y(t)$, come la differenza tra il valore individuato dalla regressione lineare $m(t)$ e il valore misurato nel test, per i diversi casi.

Si rappresenta l'andamento della temperatura del fluido medio su una scala logaritmo con la retta di regressione lineare e l'andamento delle fluttuazioni per Injection test . L'andamento delle fluttuazioni è intorno alla media anche se assume un andamento ondulante con intensità inferiore a quella precedente. Si è studiato l'intervallo (10-48) ore per il calcolo del variogramma sperimentale adottando un passo 60 secondi.

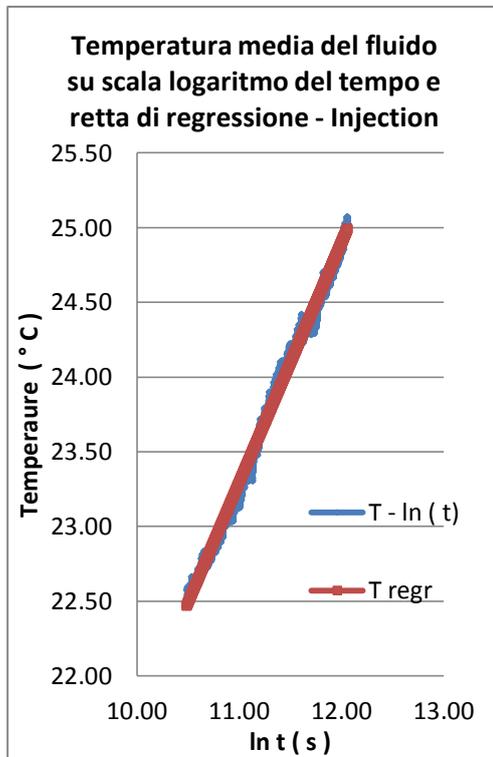


Figura 69 Regressione lineare temperatura -ln (t) Injection TRT

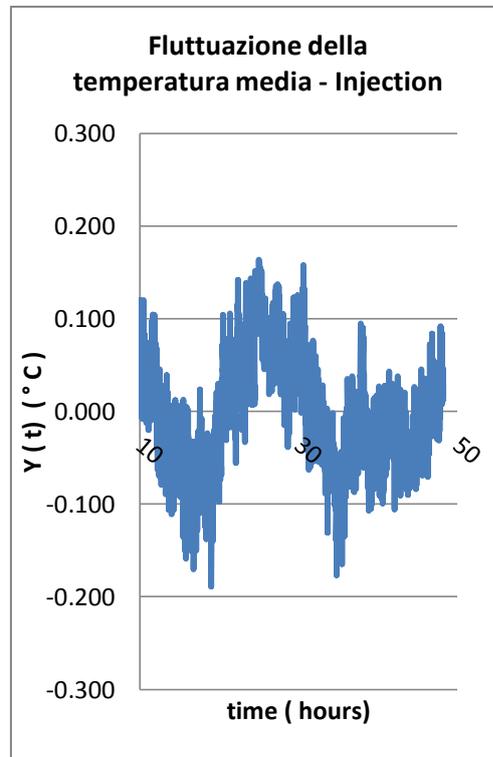


Figura 70 Andamento delle fluttuazioni nel tempo (10- 48)h Injection TRT

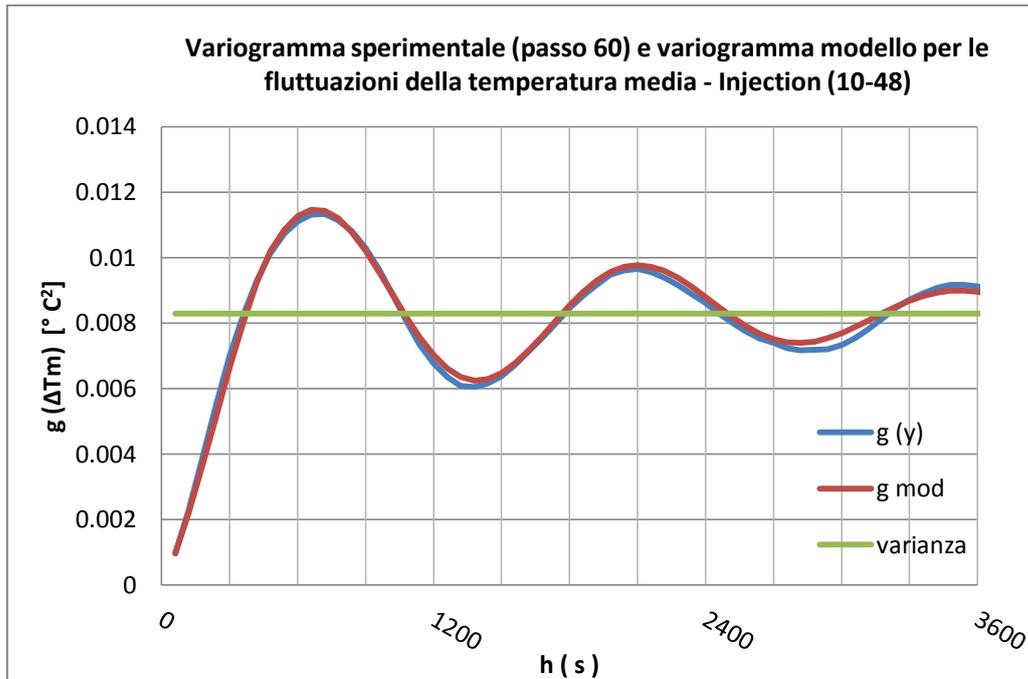


Figura 71: Variogramma sperimentale e variogramma modello per Injection TRT

	Injection
	10-48
λ (W/(m K))	1.94
Rb (mK /W)	0.12
Tipo di Modello c=soglia a=portata T=periodo	Pepitico
	c= 0.00027
	Sferico
	c=0.0001 a=180
	Effetto Buco
	c=0.00021 a=600 T=280
Esponenziale	
	c=0.001 a=1500

Tabella 22 :Risultati conducibilità termica e Resistenza Termica del pozzo per TRT Injection, strutture e valori del variogramma modello

Le strutture del variogramma modello per il Test di Risposta Termica con iniezione di calore sono molto diverse rispetto a quelle precedentemente viste per l'estrazione di calore. Si ha una struttura periodica intorno ai 280 secondi con una piccola soglia che rappresenta come detto precedentemente il funzionamento della 3 way valve e legato in qualche modo alla circolazione del fluido termovettore. In

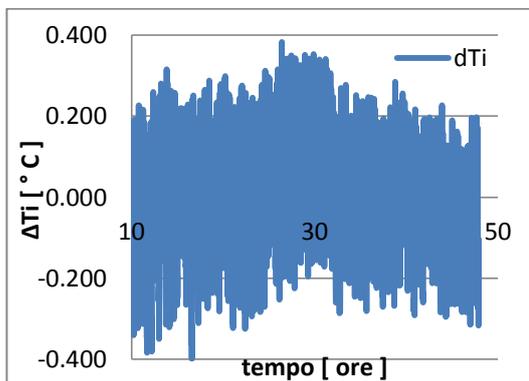
questo caso a differenza del Groundwater flow test, non è del tutto sparita anche se è fortemente ridotta, dovuto al non costante funzionamento della pompa d'estrazione d'acqua.

La periodicità del funzionamento della pompa di calore è sparita poiché non essendo presente nessun limite operativo, quale il punto di congelamento del fluido, si è impostato un range di temperature più elevate che hanno dilatato gli intervalli di tempo in cui la pompa di calore è disattivata. Un'altra osservazione molto importante è il valore di soglia raggiunto nel test, è inferiore rispetto agli esperimenti in estrazione pari all'incirca della metà. Questo significa che il test risulta essere molto più preciso durante l'iniezione di calore rispetto all'estrazione di calore.

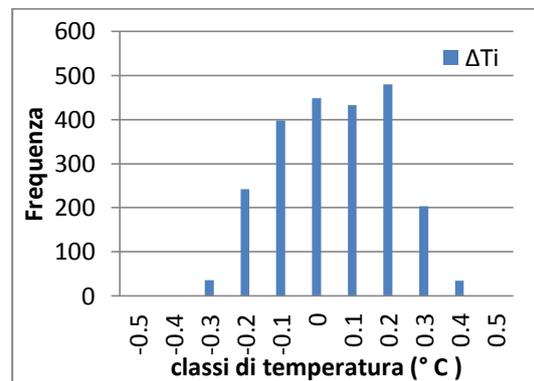
4.3.2 Studio delle fluttuazioni per le singole variabili per i diversi TRT

Per meglio comprendere le fluttuazioni che caratterizzano il sistema macchina e il sistema reservoir si è proceduto all'analisi delle singole variabili aleatorie quali: portata del fluido, potenza iniettata o estratta, temperatura in ingresso e temperatura in uscita del fluido per il Reference TRT.

Fluttuazioni



Istogrammi di frequenza per classi



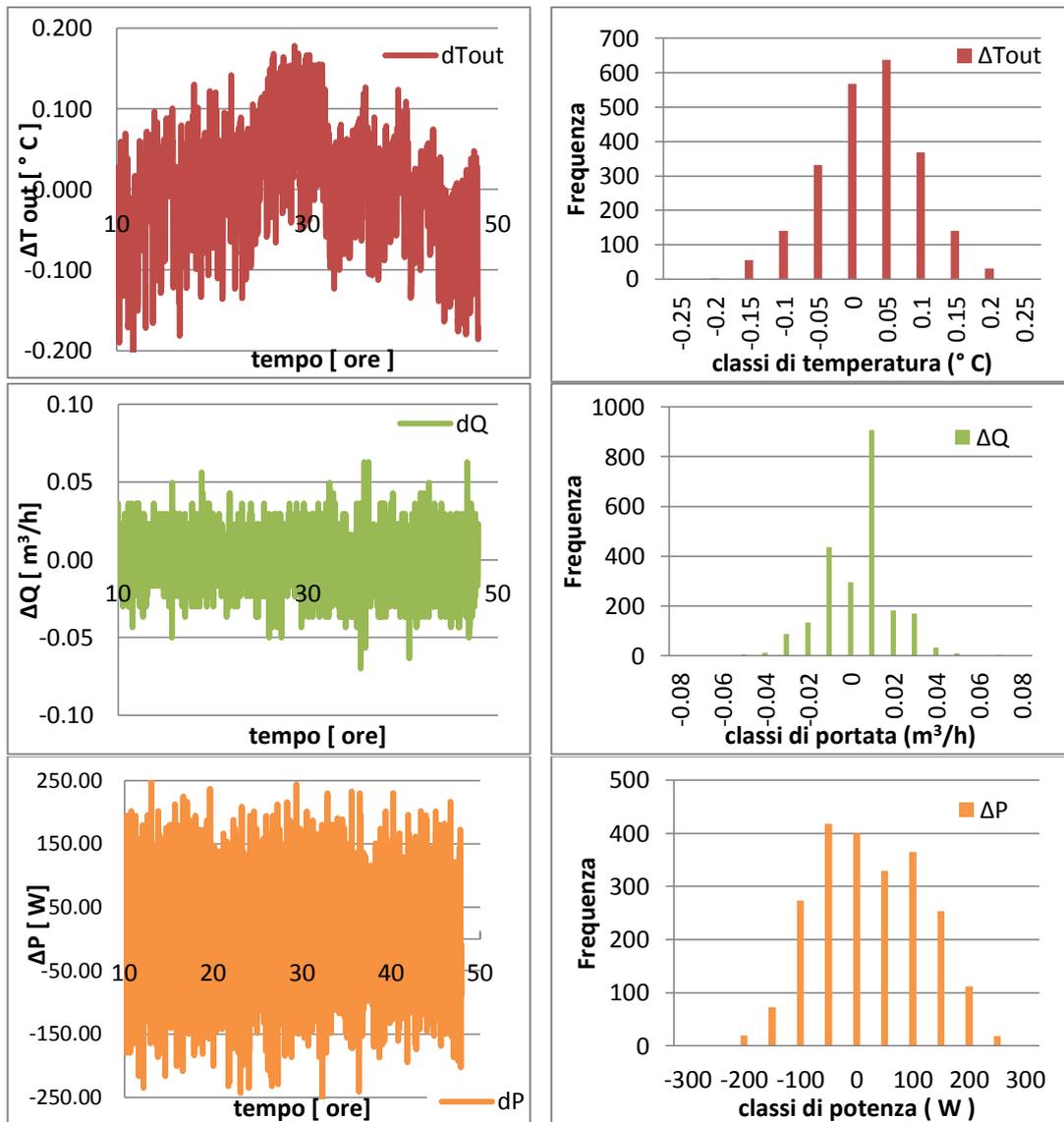


Figura 72 Andamento delle fluttuazioni e istogrammi di frequenza per tutte le variabili T_i , T_{out} , Q e P per il Reference TRT

A seguire i variogrammi sperimentali e i variogrammi modello per i 3 diversi intervalli di tempo:(10-25), (25-32) e (32-48) ore per le fluttuazioni della temperatura in ingresso e uscita.

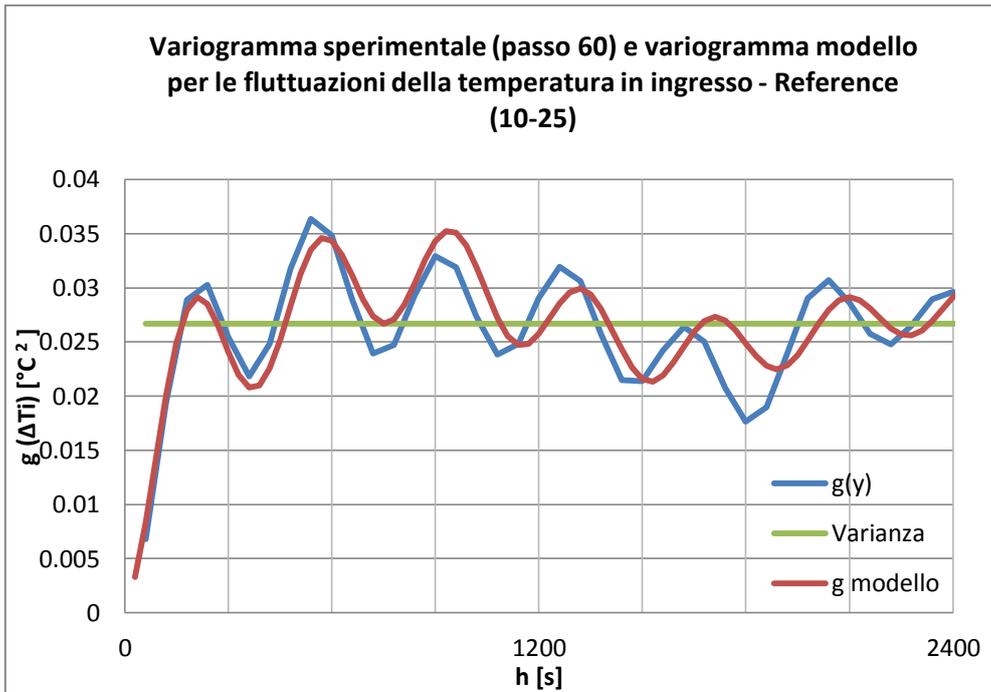


Figura 73 Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in ingresso nell'intervallo (10-25) –Reference TRT

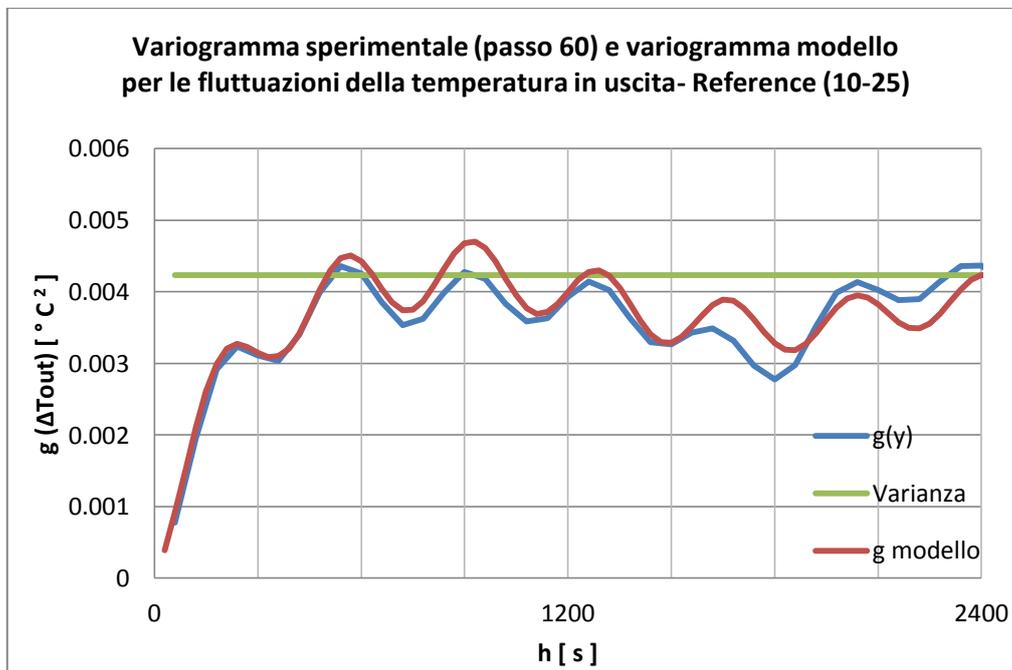


Figura 74: : Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in uscita nell'intervallo (10-25) – Reference TRT

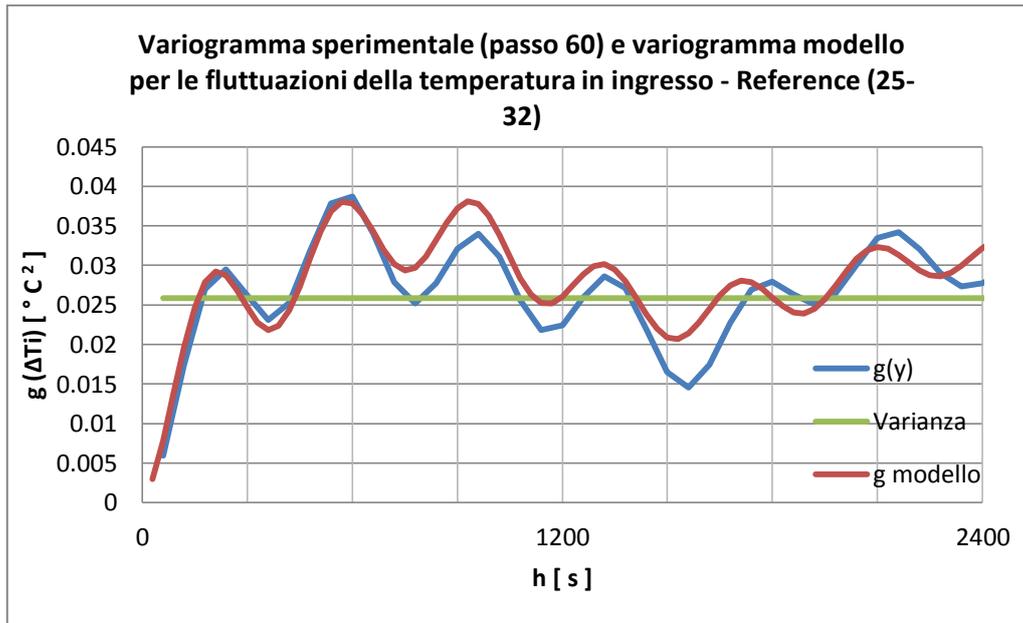


Figura 75: : Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in ingresso nell'intervallo (25-32) – Reference TRT

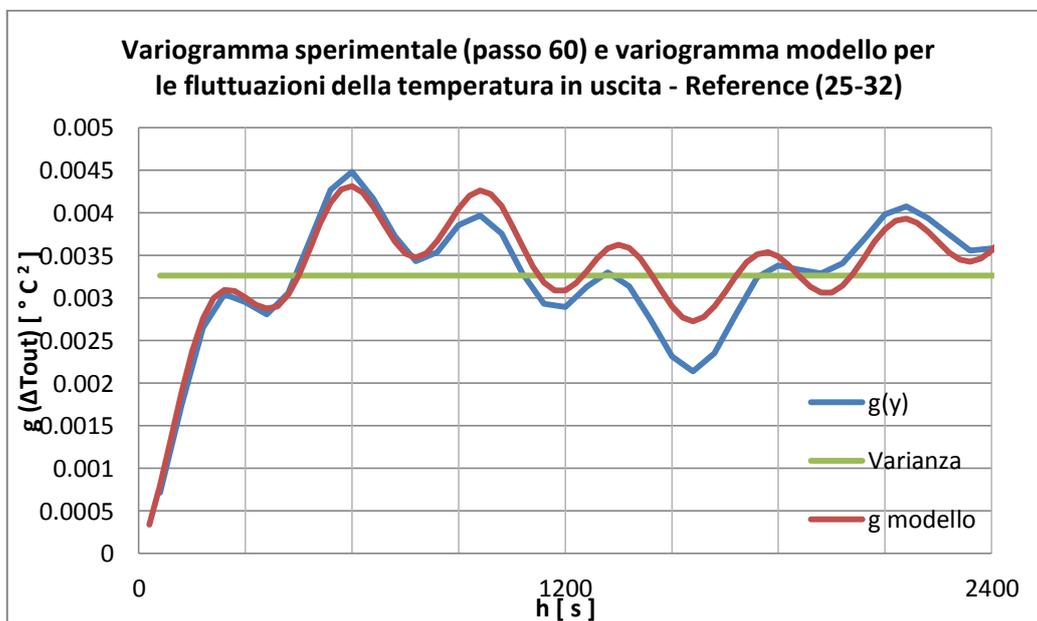


Figura 76: : Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in uscita nell'intervallo (25-32) – Reference TRT

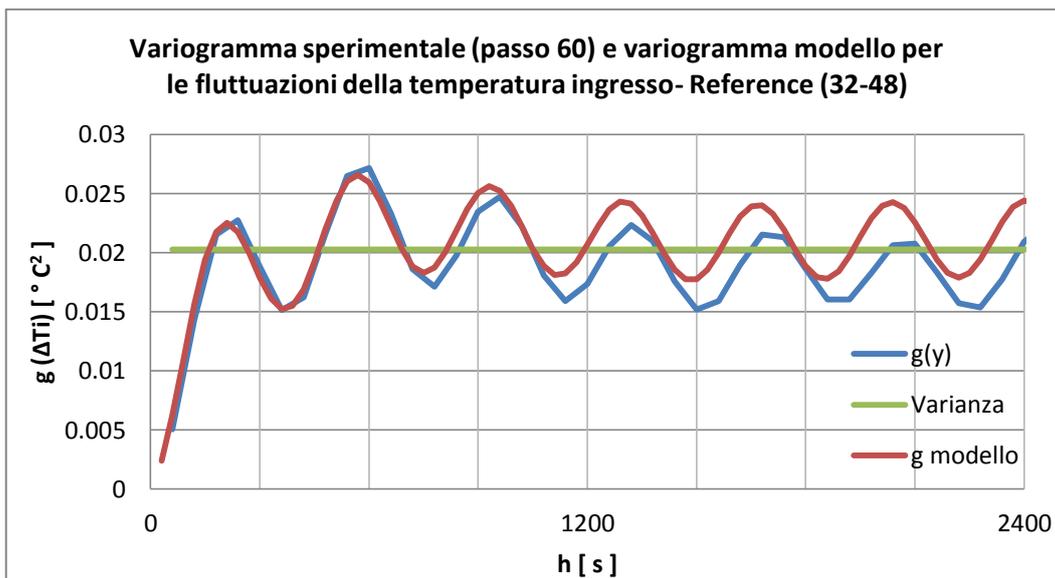


Figura 77: Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in ingresso nell'intervallo (32-48) – Reference TRT

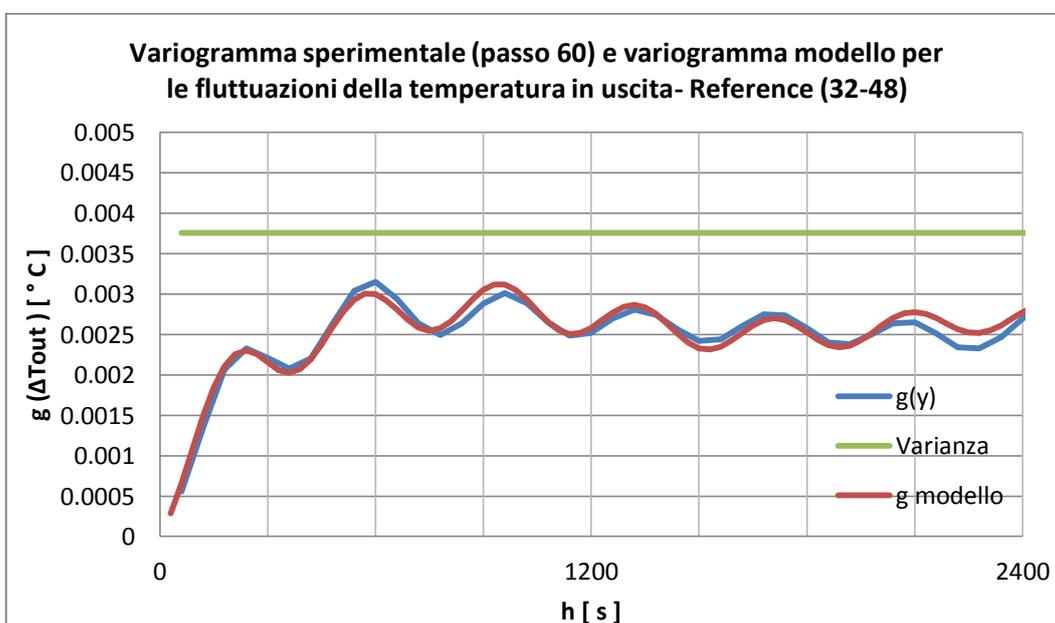


Figura 78: Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in uscita nell'intervallo (32-48) – Reference TRT

Nella tabella a seguire una descrizione delle strutture caratteristiche del variogramma modello per i diversi intervalli di tempo.

Reference		10-25	25-32	32-48
Tipo di Modello	Ti	Sferico	Sferico	Sferico
		c=0.049 a=250	c=0.049 a=430	c=0.008 a=400
		Effetto Buco	Effetto Buco	Sinusoidale
		c=-0.007 a=2000 T=380	c=-0.0077 a=2000 T=380	c=-0.0033 T=370
		Effetto Buco	Effetto Buco	Effetto Buco
		c=-0.008 a=1500 T=1700	c=-0.009 a=2100 T=1600	c=-0.005 a=550 T=1700
		Effetto Buco	Effetto Buco	Effetto Buco
		c=-0.007 a=200 T=600	c=-0.0068 a=200 T=600	c=-0.0048 a=500 T=400
	Tout	Sferico	Sferico	Sferico
		c=0.0026 a=390	c=0.0022 a=390	c=0.0014 a=300
		Effetto Buco	Effetto Buco	Effetto Buco
		c=-0.0006 a=3300 T=370	c=-0.0006 a=3300 T=390	c=-0.0004 a=2500 T=380
		Effetto Buco	Effetto Buco	Effetto Buco
		c=-0.00062 a=2600 T=1800	c=-0.00066 a=2600 T=1600	c=-0.00062 a=1200 T=1800
			Esponenziale	
			c=0.0003 a=1300	

Tabella 23 Valori caratteristici del variogramma modello per le fluttuazioni della temperatura in ingresso e uscita per i diversi intervalli di tempo – Reference TRT

Nel confronto con i vari modelli si evidenzia la periodicità a 370 secondi, stessa sulle fluttuazioni della temperatura media, con soglie più alte nell'ingresso del fluido rispetto all'uscita com'era previsto. Infatti l'input di energia viene fornito dal serbatoio che miscela il fluido di ritorno, con fluido più freddo all'interno del serbatoio. Così il sistema terreno, riscalderà il fluido iniettato assorbendo parte di questo input. La seconda ciclicità sempre legata al sistema di funzionamento della macchina quale pompa di calore caratterizzata da periodi asimmetrici compresi in un range 1600-1800 secondi. Anche il variogramma modello della potenza conserva di fatto queste periodicità.

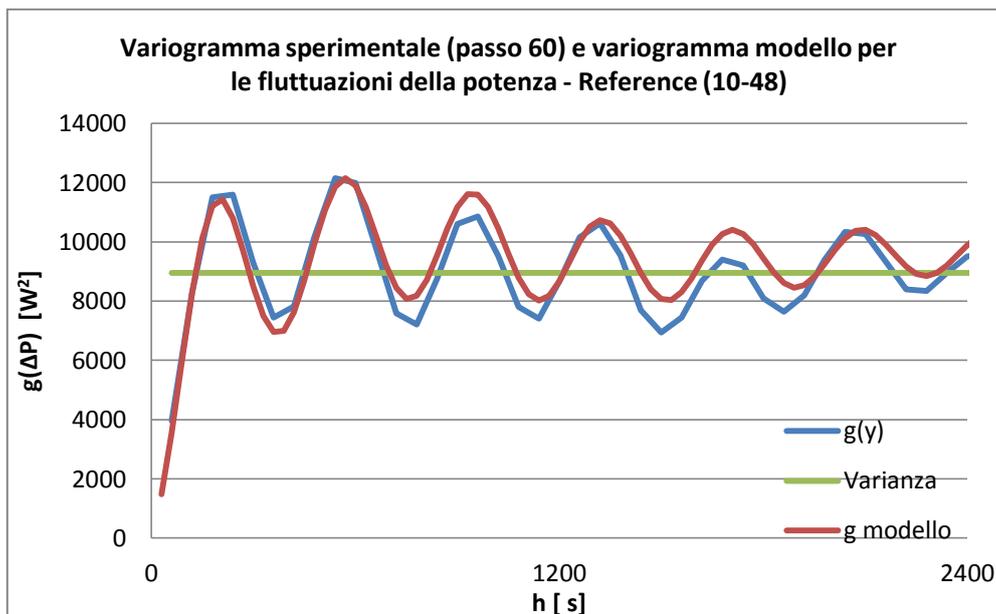


Figura 79 Variogramma sperimentale e modello per la fluttuazioni della potenza – Reference TRT

Sferico	Effetto Buco	Effetto Buco
c= 5100 T = 230	c=3200 a= 1600 T =380	c=1200 a= 1000 T =1600

Tabella 24 Valori caratteristici variogramma modello per la fluttuazioni della potenza – Reference TRT

La portata risulta essere una variabile indipendente, infatti la struttura del variogramma modello è una struttura pepitica.

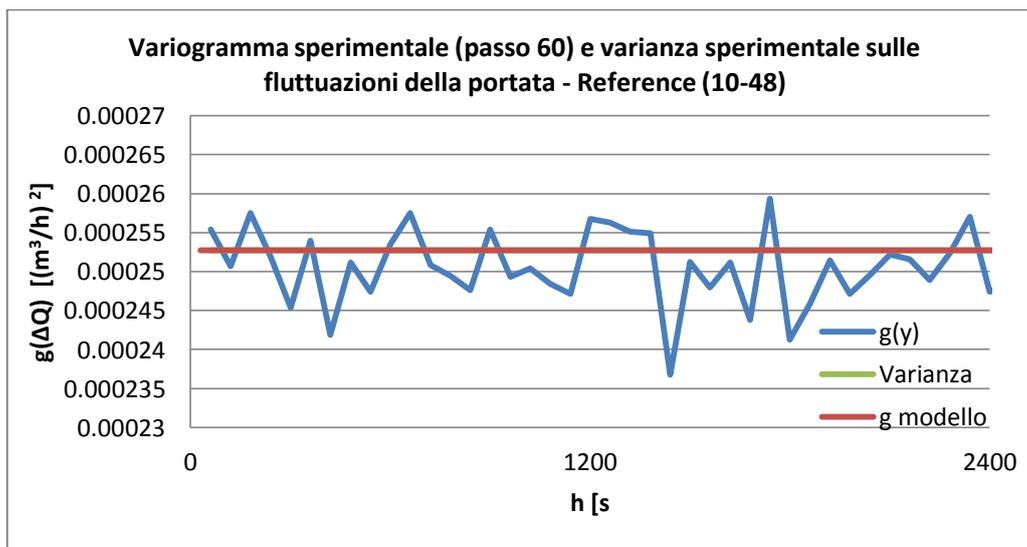


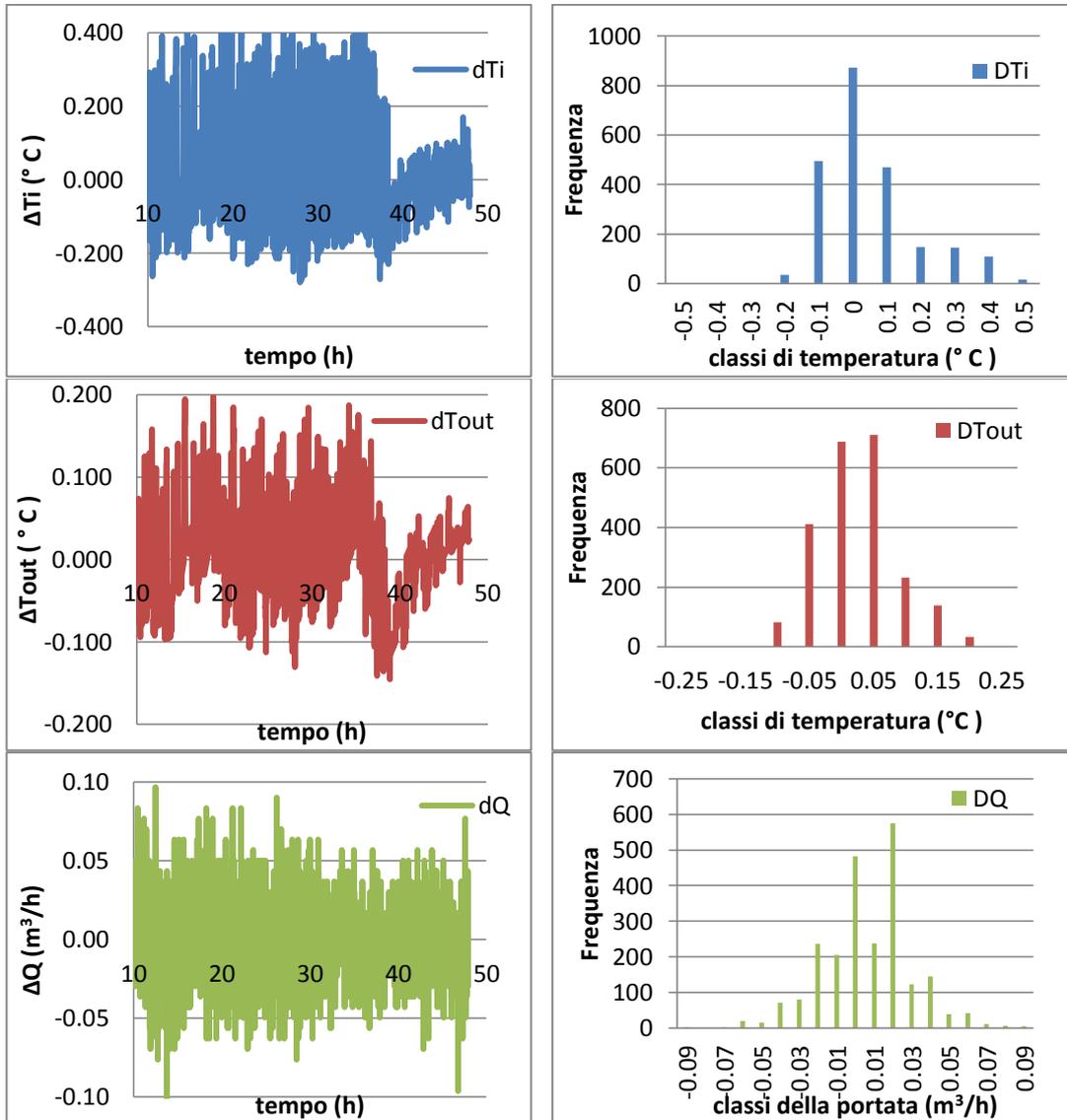
Figura 80 Variogramma sperimentale e variogramma modello sulla fluttuazioni della portata – Reference TRT

Per meglio comprendere le fluttuazioni che caratterizzano il sistema macchina e il sistema reservoir si è proceduto all’analisi delle singole variabili aleatorie quali:

portata del fluido, potenza iniettata o estratta, temperatura in ingresso e temperatura in uscita del fluido per il Groundwater flow TRT

FLUTTUAZIONI

ISTOGRAMMI DI FREQUENZA PER CLASSI



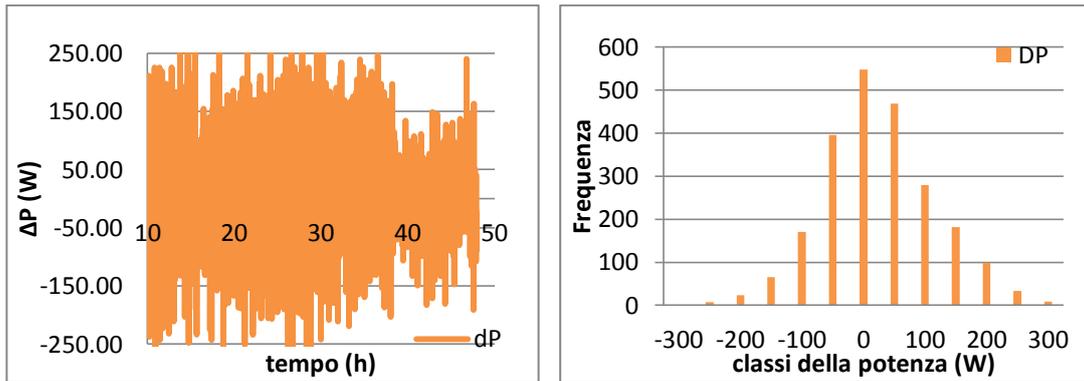


Figura 81 Andamento delle fluttuazioni e istogrammi di frequenza per tutte le variabili T_i , T_{out} , Q e P - Groundwater flow TRT

A seguire i variogrammi sperimentali e i variogrammi modello per le fluttuazioni delle temperatura in ingresso, uscita, della potenza estratta e della portata per il Groundwater flow TRT.

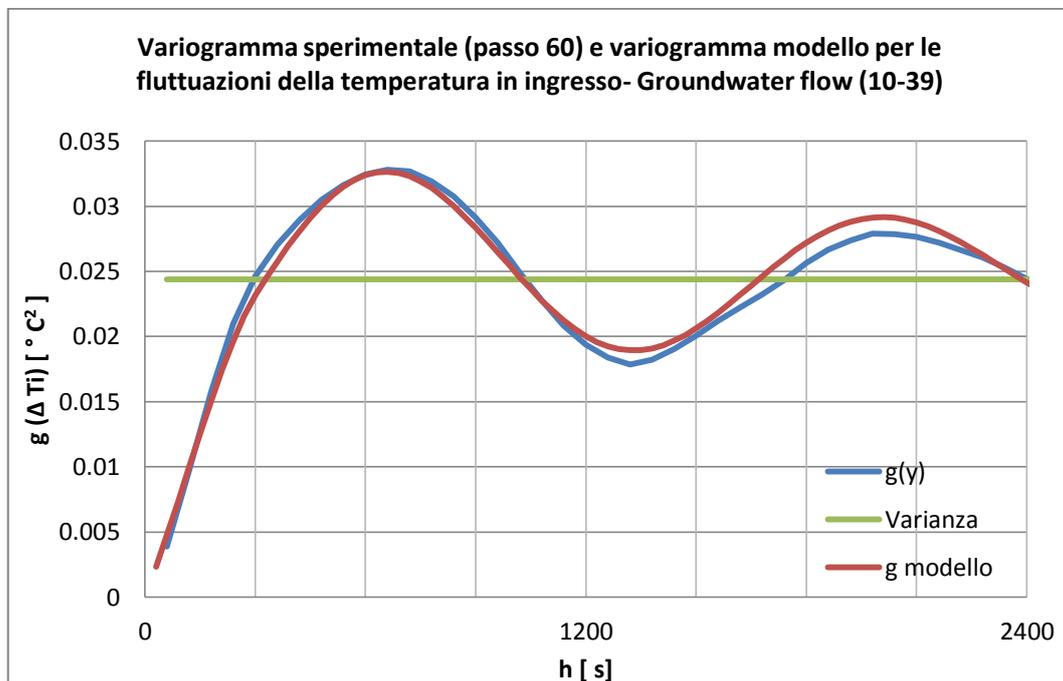


Figura 82: Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in ingresso - Groundwater flow TRT

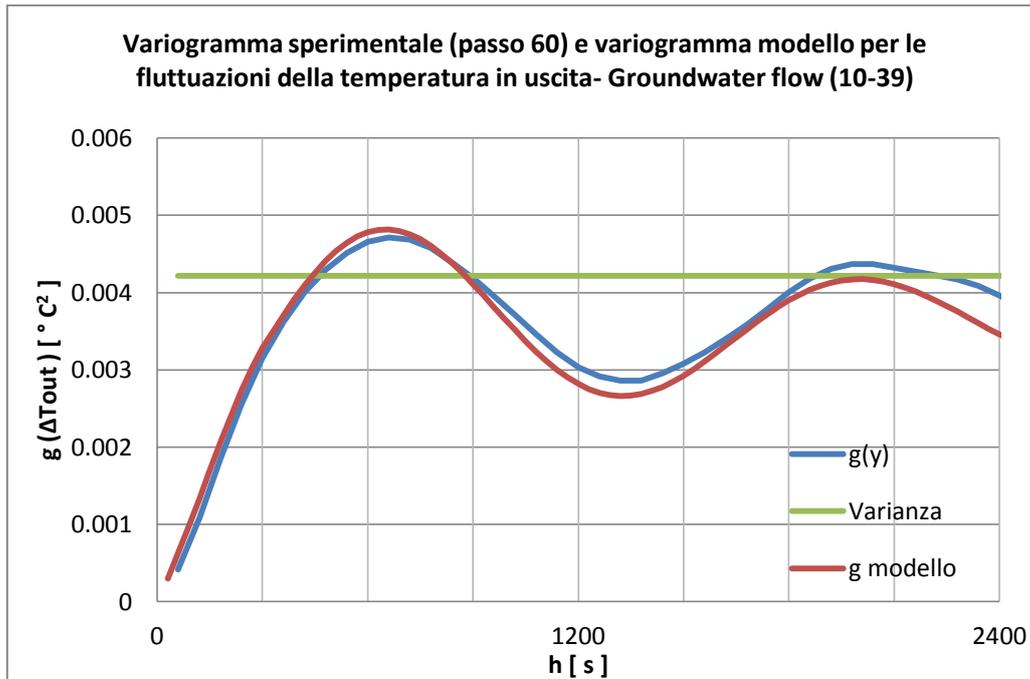


Figura 83 Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in uscita – Groundwater flow TRT

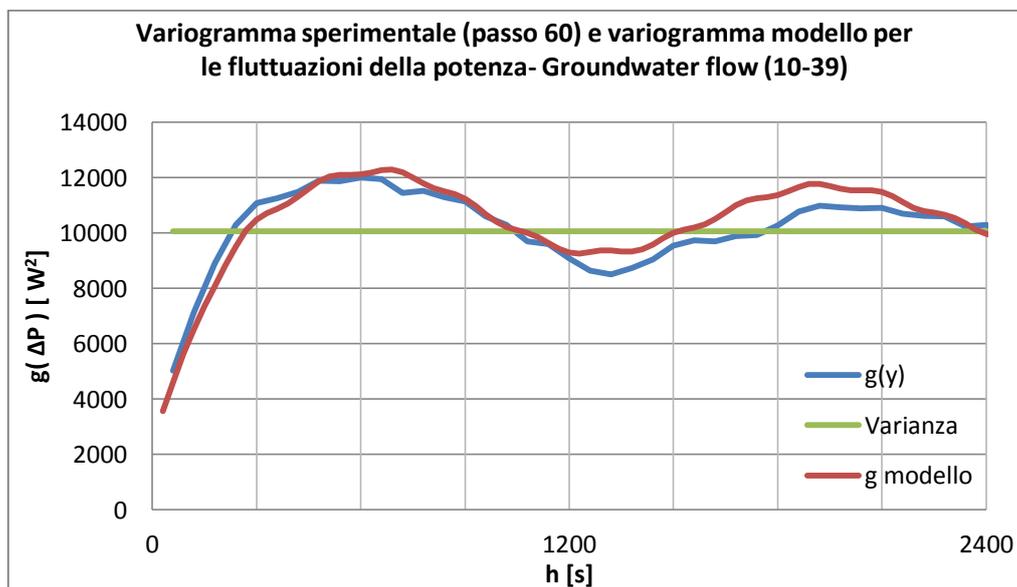


Figura 84: Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della potenza – Groundwater flow TRT

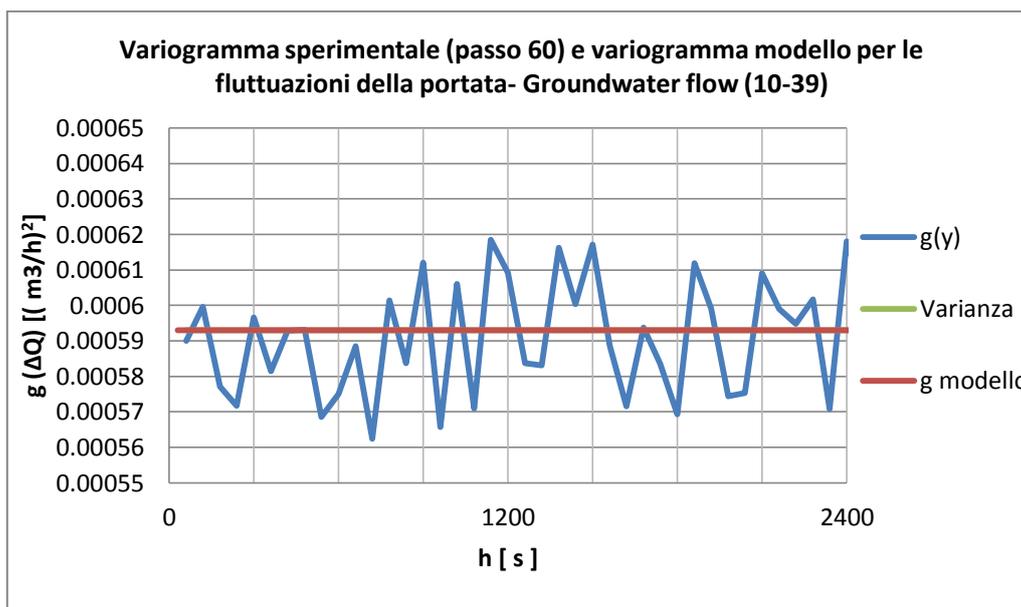


Figura 85: Variogramma sperimentale e modello della portata –Groundwater flow TRT

Temperatura ingresso			
	Sferico	Effetto Buco	
	c=0.0143 a=310	c=0.0105 a=2300 T=1350	
Temperatura uscita			
	Sferico	Effetto Buco	
	c=0.00175 a=310	c=0.0018 a=1900 T=1350	
Potenza			
Pepitico	Sferico	Sinusoidale	Effetto Buco
c= 2600	c=5900 a= 300	c=100 T=200	c=2000 a=3200 T=1300

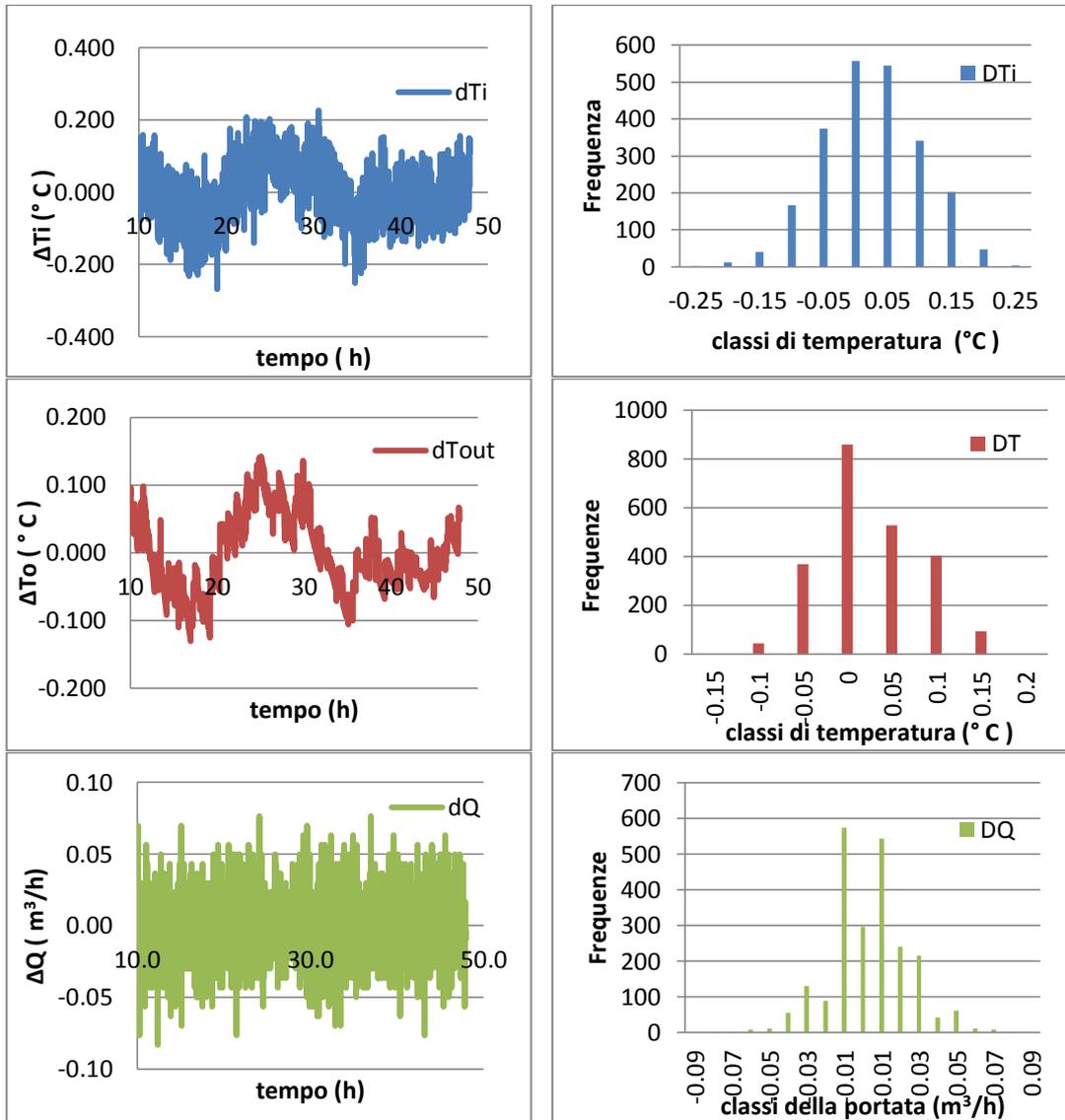
Tabella 25 Elementi caratteristici del variogramma modello per Groundwater flow TRT

Si enuncia dai variogrammi sperimentali la periodicità a 1300-1350 secondi dovuto all'effetto della pompa di calore, mentre viene meno la periodicità della circolazione del fluido all'interno della sonda. Le strutture del modello sono molto simili tra di loro per le diverse variabili, la semi-periodicità individuata a 200 secondi nelle fluttuazioni della potenza viene collegata ai picchi della pompa di circolazione. Anche qui vengono confermate le soglie più alte nel fluido in ingresso rispetto a quello in uscita. Come precedentemente detto la portata è una variabile indipendente caratterizzata da una struttura pepitica.

Per meglio comprendere le fluttuazioni che caratterizzano il sistema macchina e il sistema reservoir si è proceduto all'analisi delle singole variabili aleatorie quali: portata del fluido, potenza iniettata o estratta, temperatura in ingresso e temperatura in uscita del fluido per Injection TRT.

FLUTTUAZIONI

ISTOGRAMMI DI FREQUENZA PER CLASSI



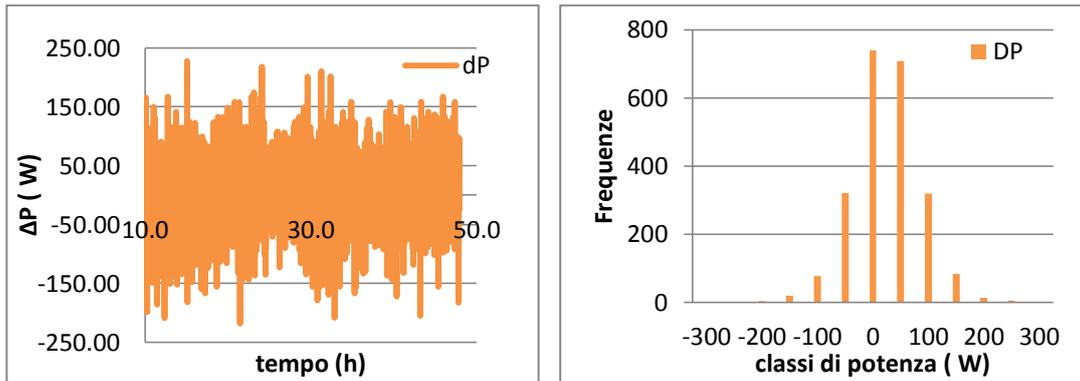


Figura 86: Andamento delle fluttuazioni e istogrammi di frequenza per tutte le variabili T_i , T_{out} , Q e P - Injection TRT

A seguire i variogrammi sperimentali e i variogrammi modello delle fluttuazioni delle temperature in ingresso, uscita, della potenza estratta e portata.

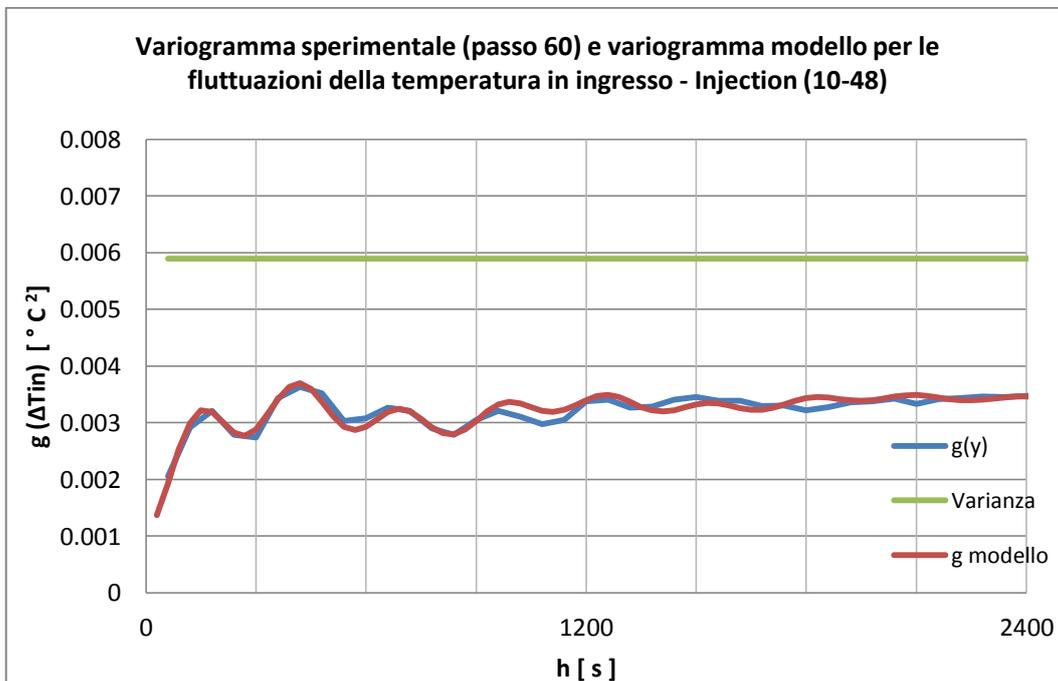


Figura 87: Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in ingresso - Injection TRT

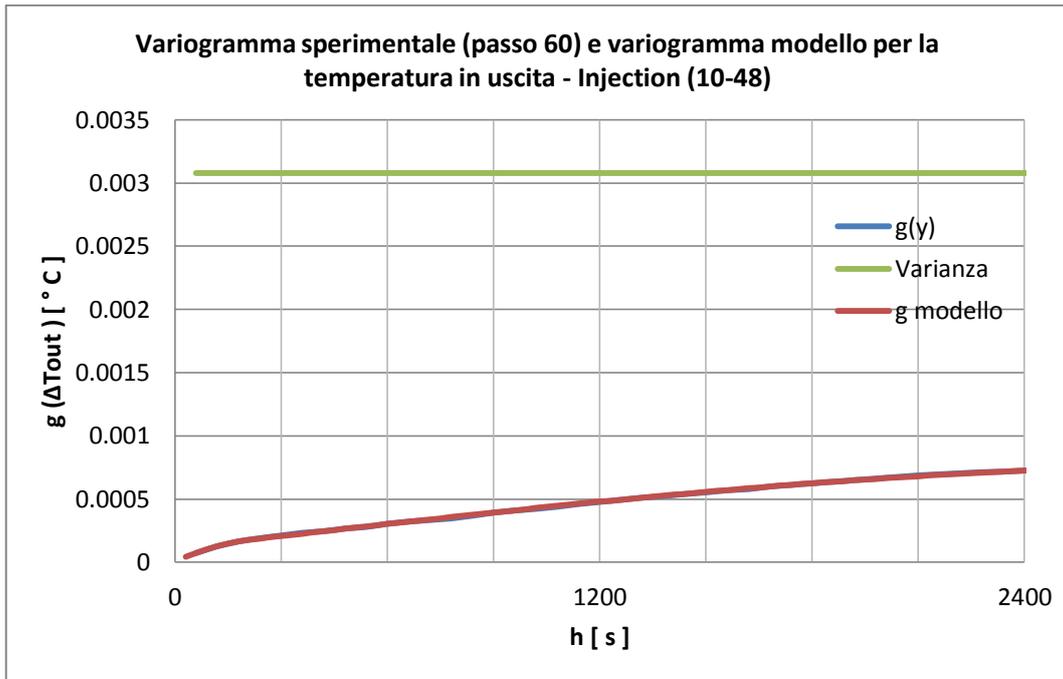


Figura 88: Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della temperatura in uscita – Injection TRT

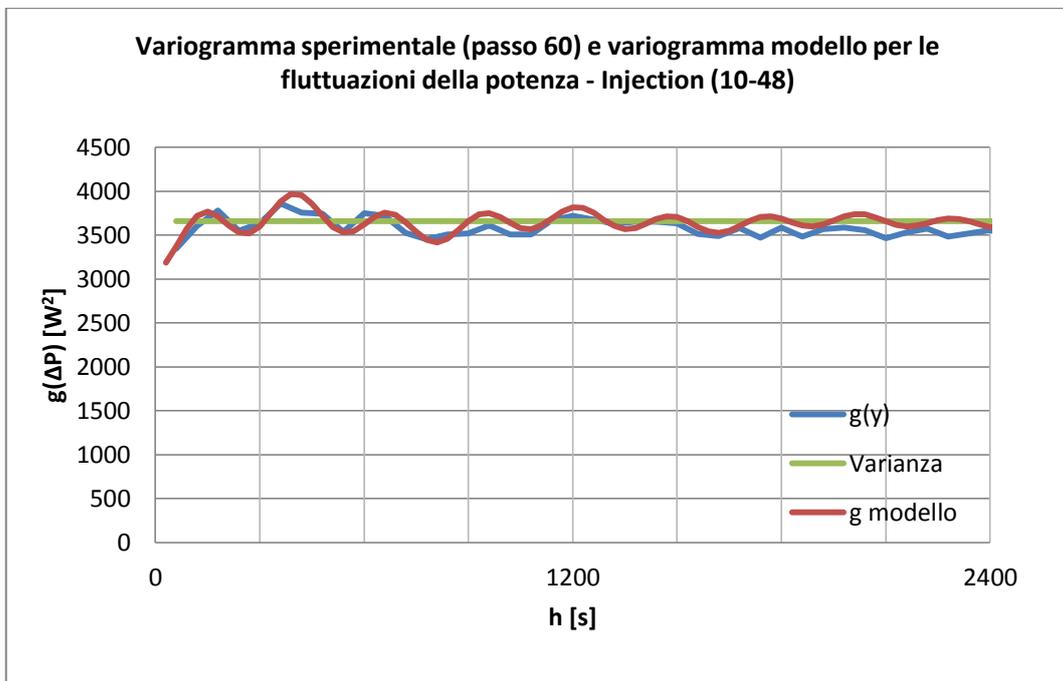


Figura 89: Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della potenza – Injection TRT

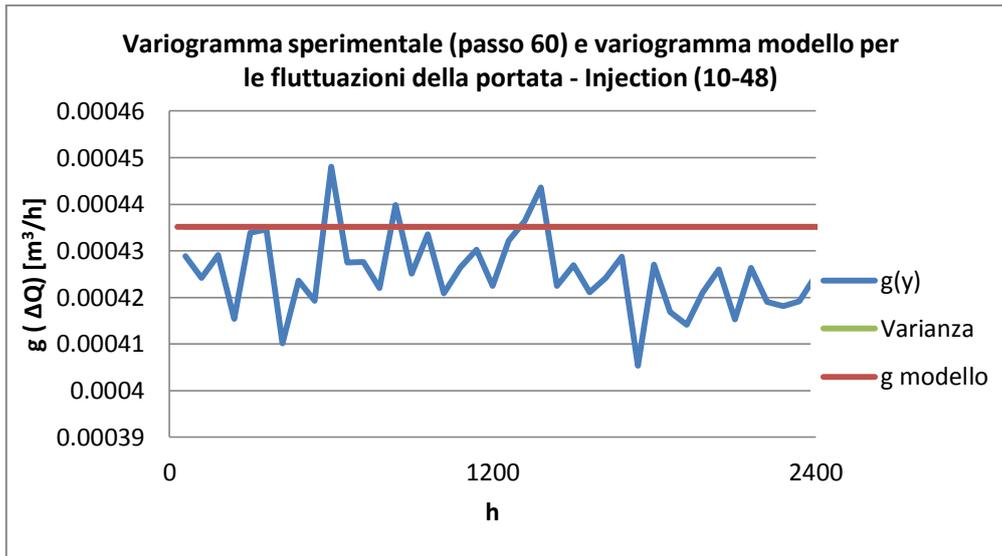


Figura 90 Variogramma sperimentale e modello per le fluttuazioni della portata – Injection TRT

Ti				
Pepitico	Sferico	Effetto Buco	Effetto Buco	Esponenziale
c= 0.001	c=0.0008 a=200	c=0.0006 a=800 T=280	c=0.0005 a=800 T=800	c=0.0008 a=2000
Tout				
Pepitico	Sferico	Sferico		Esponenziale
c= 0.00001	c=0.0001 a=200	c=0.00065 a=3000		c=0.001 a=1500
Potenza				
Pepitico	Sferico	Effetto Buco	Effetto Buco	
c= 3100	c=100 T=300	c=250 a=1500 T=270	c=200 a=1000 T=800	

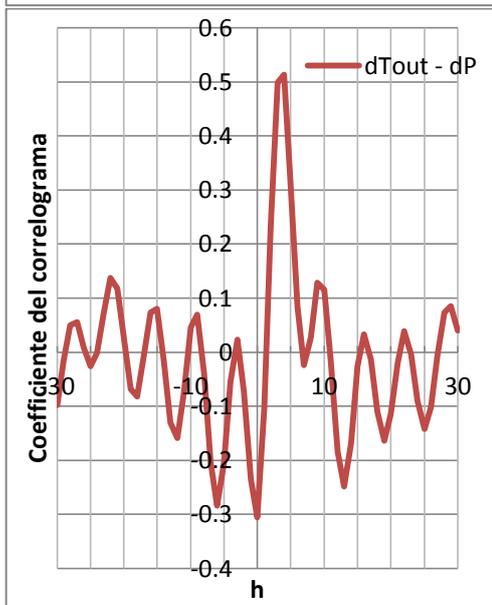
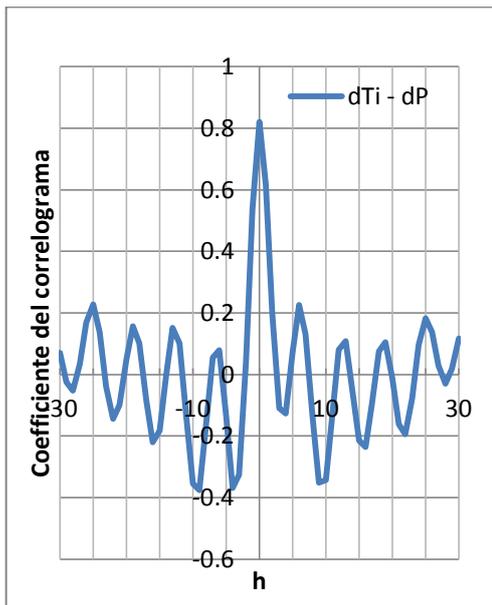
Tabella 26 Elementi caratteristici del variogramma modello per Ti, Tout, P – Injection TRT

Dai variogrammi modelli delle fluttuazioni della temperatura in ingresso e uscita si osserva chiaramente l'effetto di smorzamento dovuto all'elemento del terreno che fa perdere la periodicità degli impulsi della circolazione del fluido all'interno della sonda. La soglia del variogramma è notevolmente più bassa rispetto ai TRT con estrazione di calore. Altra osservazione: il variogramma modello per la potenza ha una struttura leggermente diversa rispetto alla temperatura, in quanto la componente della portata, che ha una struttura pepitica, ha un elemento qui incisivo.

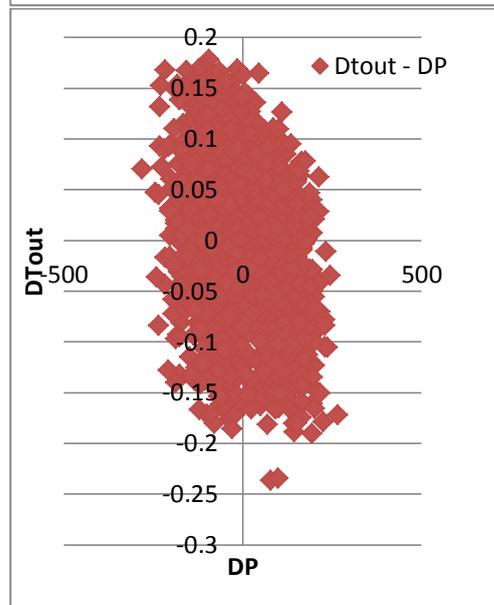
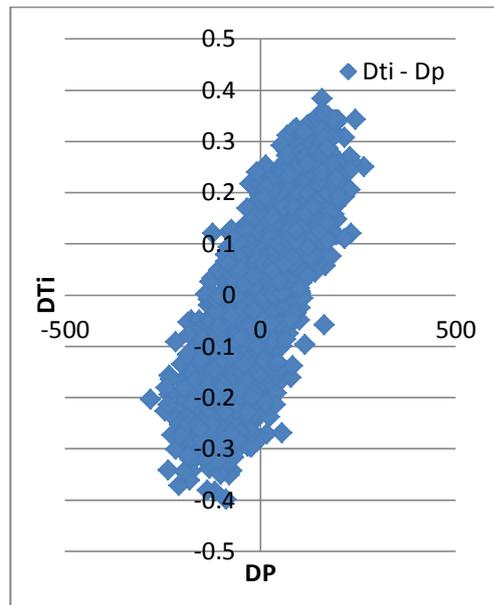
4.3.3 Correlazioni tra le variabili dei diversi TRT

Per una maggiore comprensione delle correlazioni che si hanno tra le varie componenti quali: temperatura in ingresso, temperatura in uscita, portata e potenza; si adoperano le covarianza incrociate, nuvole di correlazione e le matrici di correlazione per il Reference TRT.

CORRELOGRAMMI



NUVOLE DI CORRELAZIONE



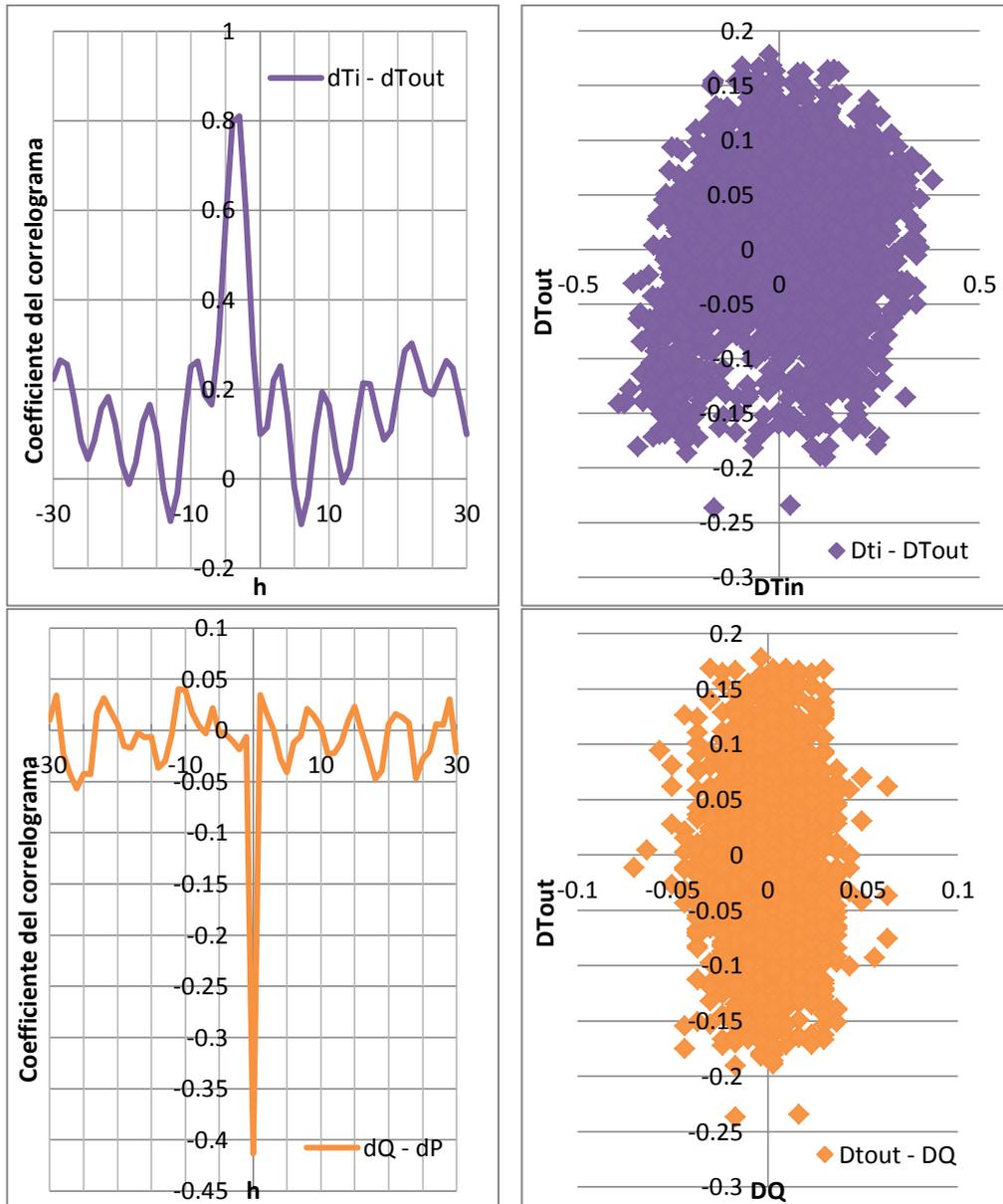


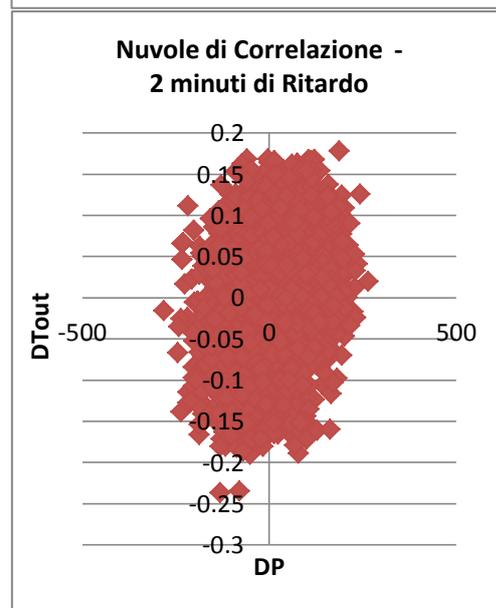
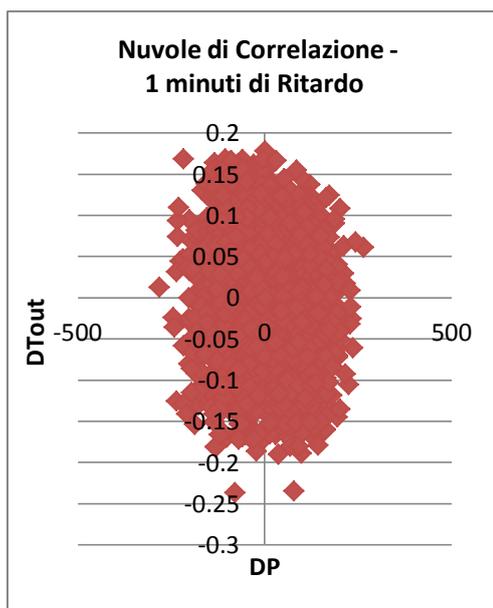
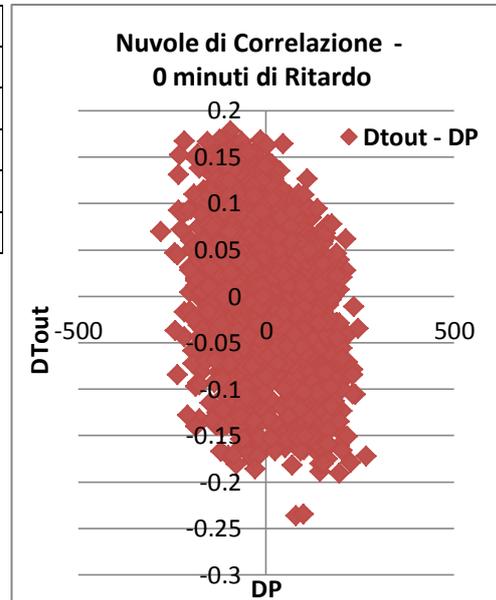
Figura 91: Covarianza incrociate e nuvole di correlazione tra T_i - P , T_{out} - P , Q - P , T_i - T_{out} – Reference TRT

Le covarianze incrociate mostrano una correlazione negativa immediata tra la portata e la potenza per poi perdersi immediatamente. La correlazione tra la potenza e temperatura in ingresso è molto alta per un tempo iniziale per poi diminuire, un andamento simile ma traslato si ha nella temperatura in uscita del fluido con la potenza che indica un evidente ritardo di (3-4) minuti, dovuto alla circolazione del fluido come anche confermato tra il correlogramma tra la temperatura in uscita e in entrata. Inoltre anche qui si ha periodicità a 6 e a 20 minuti come già evidenziata dai variogrammi diretti. Si riporta la matrice di correlazione, evidenziando i punti critici delle statistiche elementari. Di fatti si

osserva che la correlazione tra la temperatura di uscita e potenza ha una correlazione negativa, aspetto non vero, di fatti si riportano le nuvole di correlazione per la temperatura di uscita e la potenza traslandolo per diversi minuti mettendo in evidenza l'effetto che il ritardo dovuto alla circolazione del fluido ha sulla correlazione delle variabili in particolare sulla temperatura del fluido in uscita della sonda e potenza.

MATRICE DI CORRELAZIONE				
	Ti	Tout	Q	P
Ti	1	0.0989	0.0147	0.8203
Tout		1	0.0190	-0.3056
Q			1	-0.4133
P				1

Tabella 27 Matrice di correlazione tra Ti, Tout, Q e P - Reference TRT



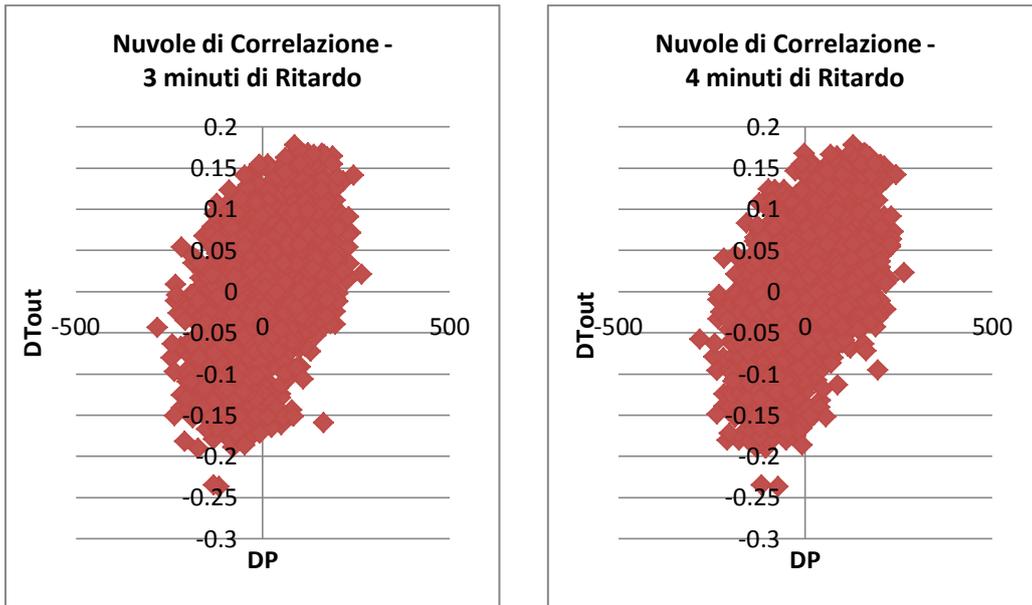
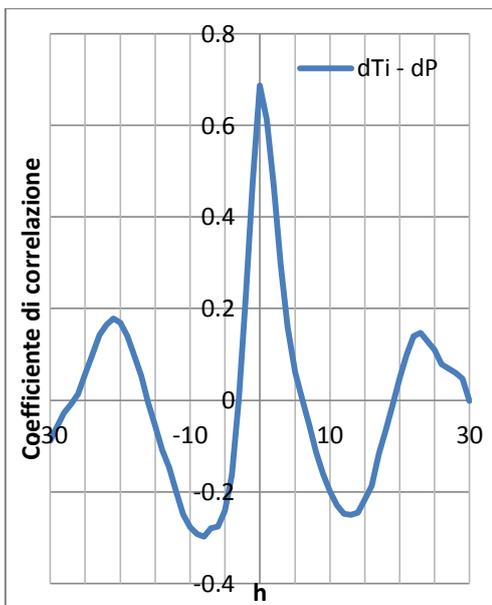


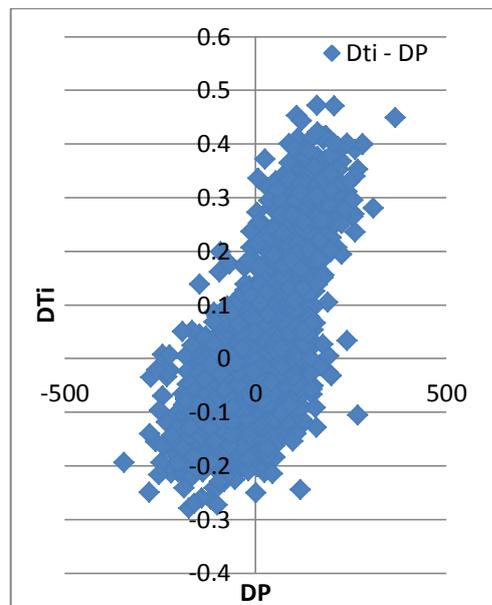
Figura 92 Nuvole di correlazione dT_{out}-dP per i diversi minuti di ritardo – Reference TRT

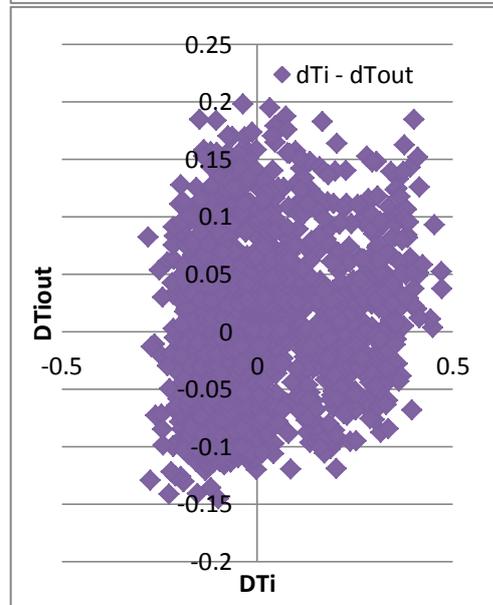
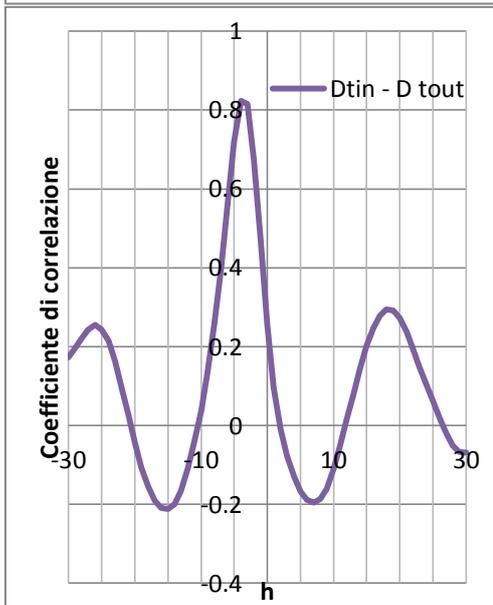
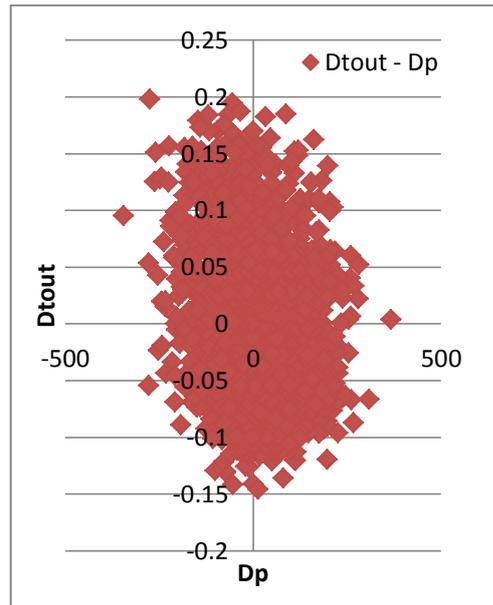
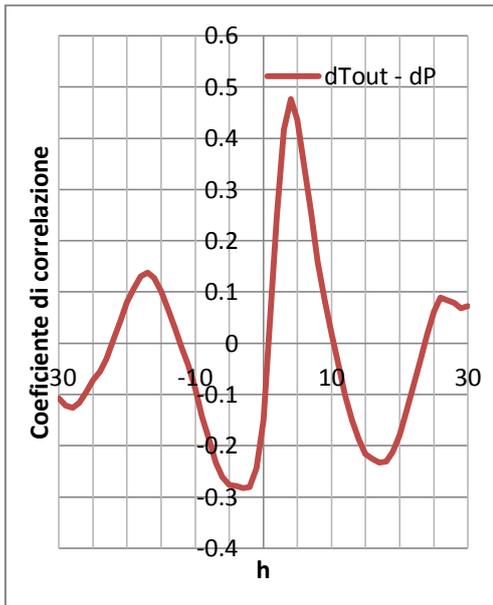
Per una maggiore comprensione delle correlazioni che si hanno tra le varie componenti quali: temperatura in ingresso, temperatura in uscita, portata e potenza; si adoperano le covarianza incrociate, nuvole di correlazione e le matrici di correlazione per il Groundwater flow TRT.

CORRELOGRAMMI



NUVOLE DI CORRELAZIONE





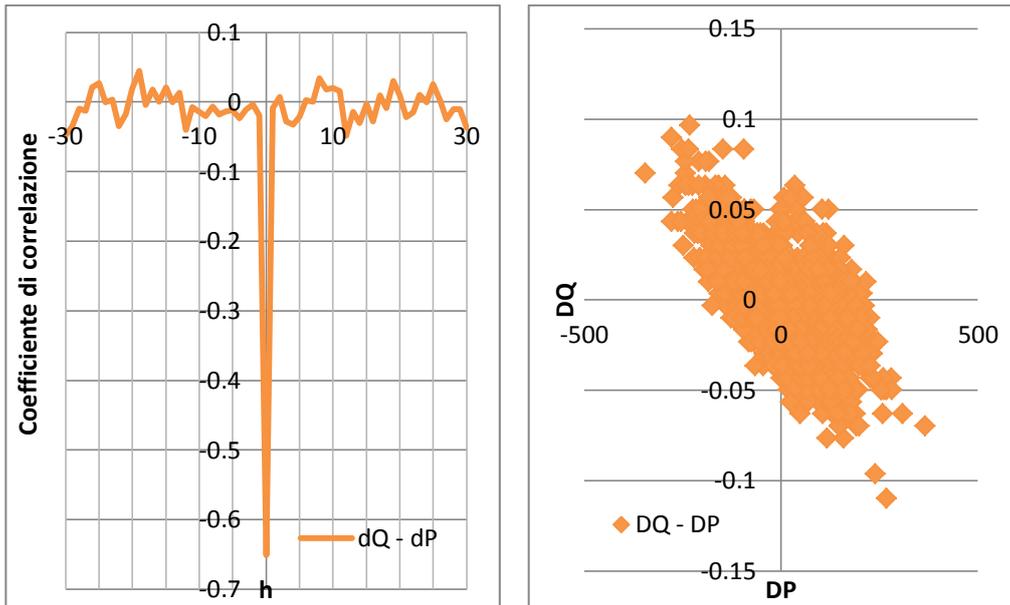
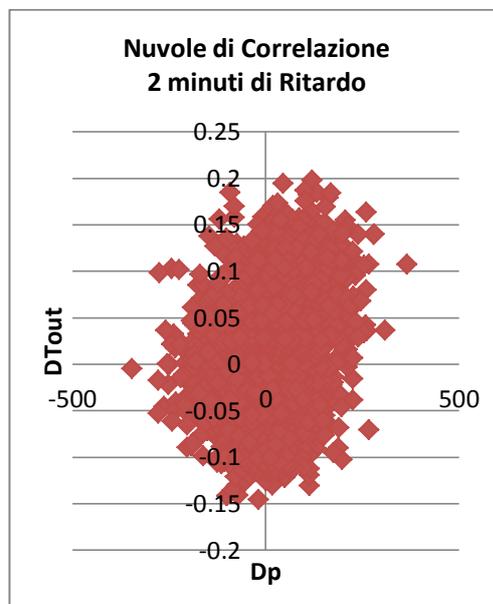
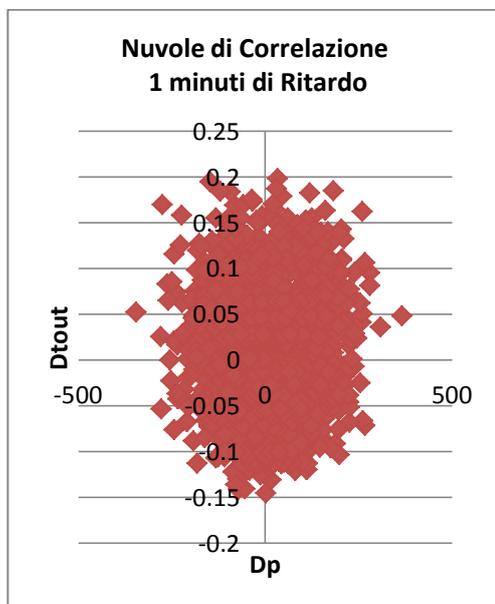
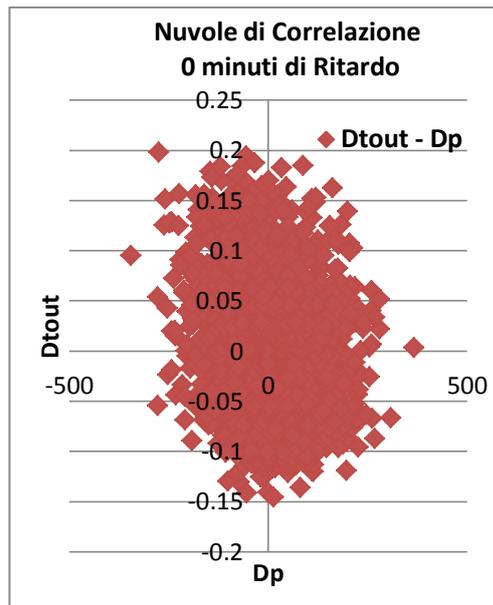


Figura 93 Covarianza incrociate e nuvole di correlazione tra T_i -P , T_{out} - P , Q-P, T_i - T_{out} - Groundwater flow TRT

Come per l'esperimento Reference le covarianze incrociate mostrano una correlazione negativa immediata tra la portata e la potenza per poi perdersi immediatamente. La correlazione tra la potenza e temperatura in ingresso è molto alta per un tempo iniziale per poi diminuire, un andamento simile ma traslato lo si ha nella temperatura in uscita del fluido con la potenza che indica un evidente ritardo di (3-4) minuti, dovuto alla circolazione del fluido come anche confermato tra il correlogramma tra la temperatura in uscita e in entrata. Si ha una ciclicità di 20 minuti come nei variogrammi diretti perdendo invece quella piccola a 6 minuti. Si riporta la matrice di correlazione, evidenziando i punti critici delle statistiche elementari. Di fatti si osserva che la correlazione tra la temperatura di uscita e potenza ha una correlazione negativa, aspetto non vero, di fatti si riportano le nuvole di correlazione per la temperatura di uscita e la potenza mettendo in evidenza l'aumento della correlazione in funzione di alcuni minuti di ritardo.

MATRICE DI CORRELAZIONE				
	Ti	Tout	Q	P
Ti	1	0.2547	-0.0047	0.6873
Tout		1	0.0158	-0.1502
Q			1	-0.6512
P				1

Tabella 28: Matrice di correlazione tra Ti, Tout, Q, P Groundwater flow TRT



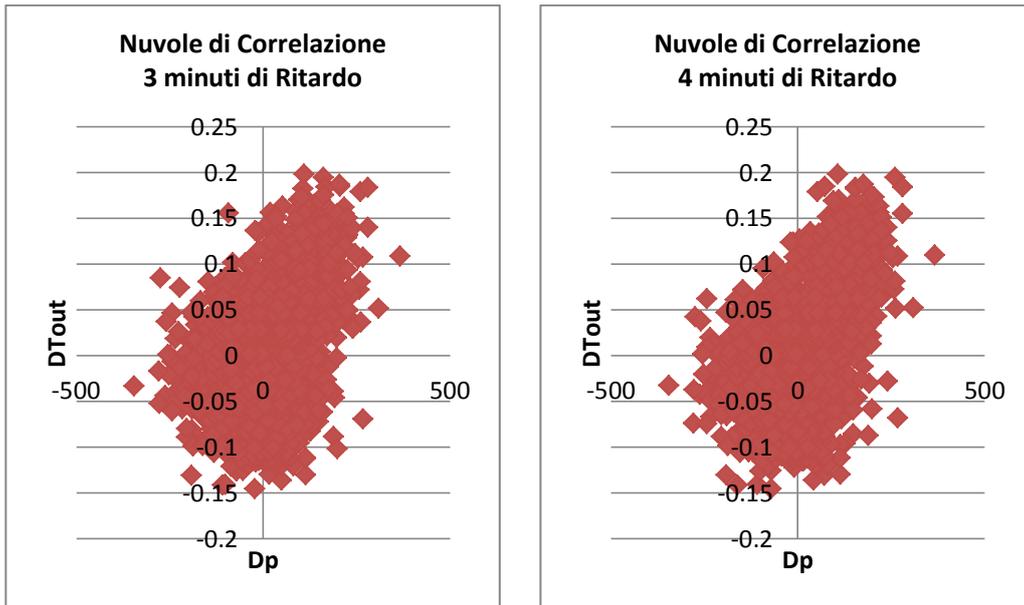
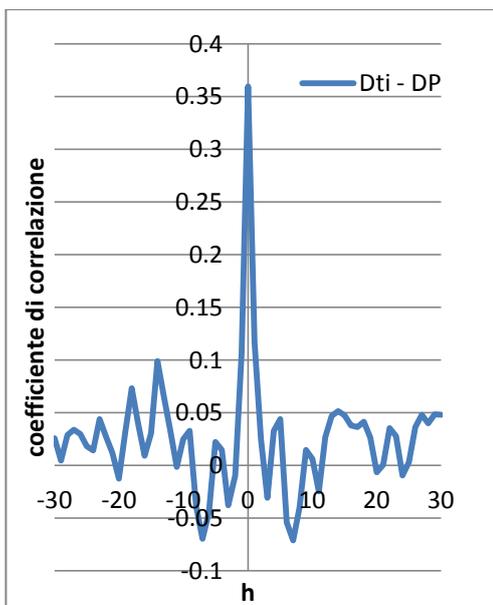


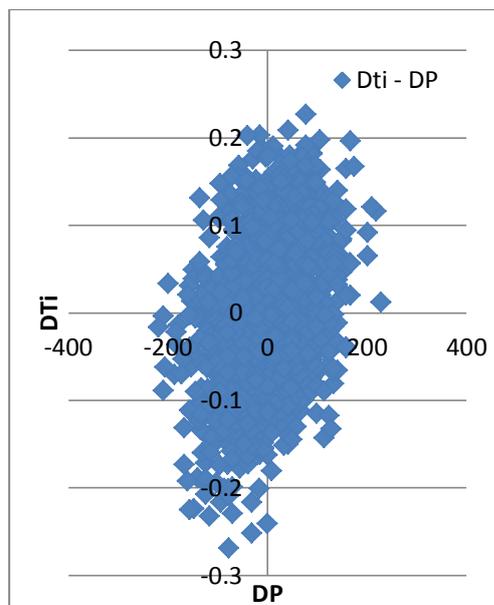
Figura 94 Nuvole di correlazione dT_{out} - dP considerando diversi minuti di ritardo – Groundwater flow TRT

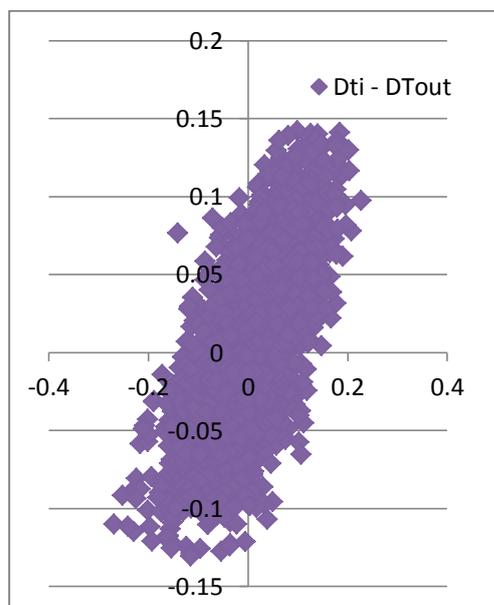
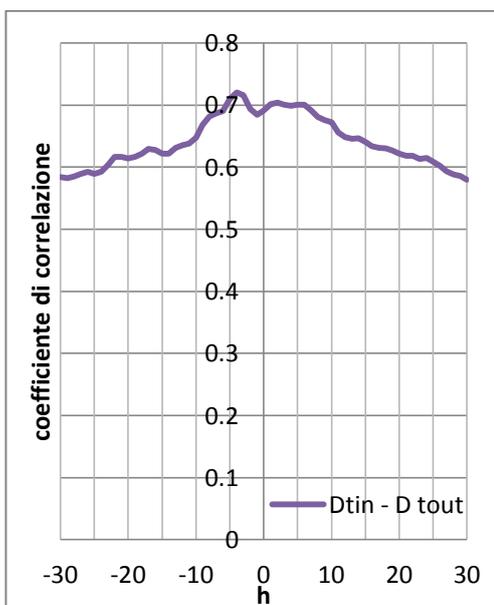
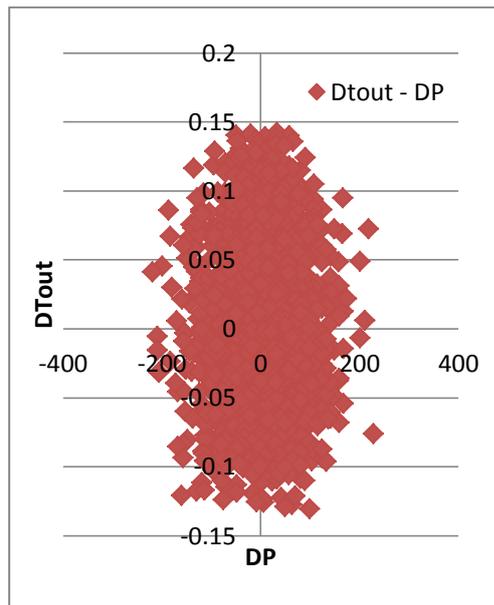
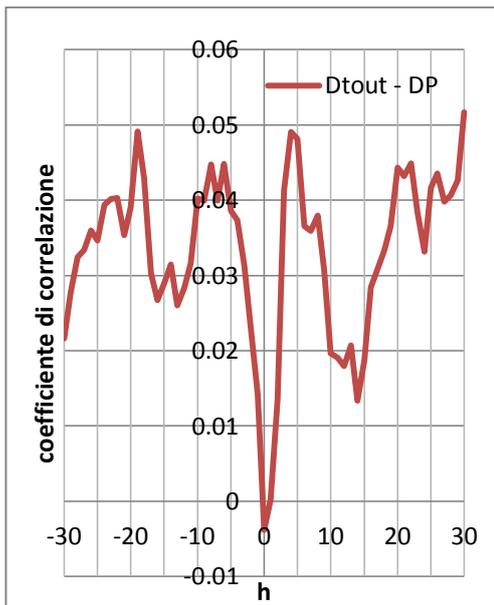
Per una maggiore comprensione delle correlazioni che si hanno tra le varie componenti quali: temperatura in ingresso, temperatura in uscita, portata e potenza; si adoperano le covarianza incrociate, nuvole di correlazione e le matrici di correlazione per il Injection TRT.

CORRELOGRAMMA



NUVOLE DI CORRELAZIONE





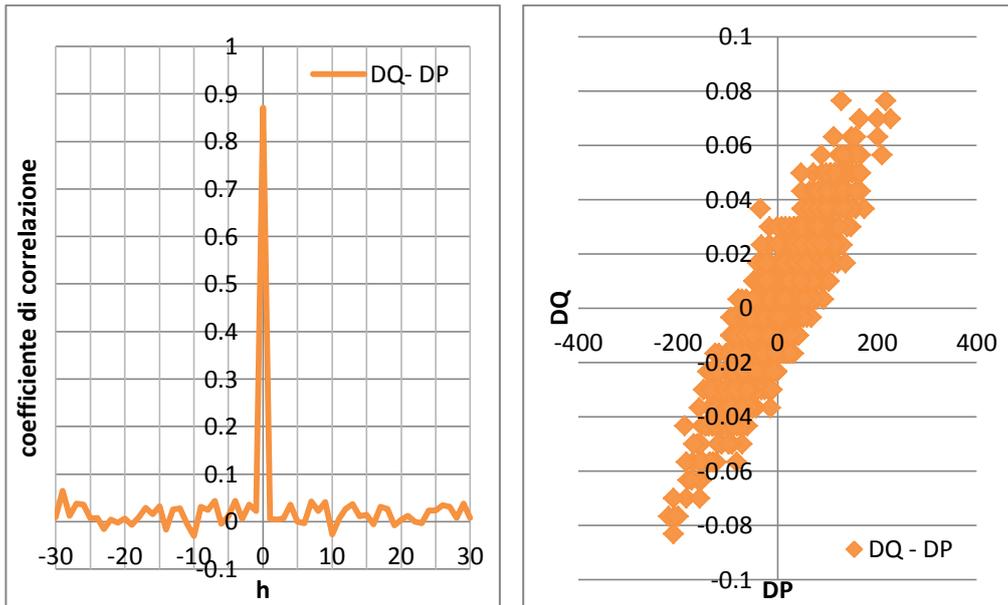


Figura 95 Covarianza incrociate e nuvole di correlazione tra T_i -P , T_{out} - P,Q-P, T_i - T_{out} – Injection TRT

Si ha una correlazione istantanea tra portata e potenza come nei casi precedenti, anche i ritardi tra la temperatura del fluido in ingresso e uscita e tra il fluido in uscita e la potenza sono simili. Si ha in questo caso un periodico a 4 e a 15 minuti ma con soglia molto piccola come d'altronde già evidenziato dai variogrammi diretti precedentemente descritti. Quello che cambia drasticamente sono i coefficienti di correlazione, in particolare con la variabile potenza. Infatti, vi è un aumento notevole della correlazione con la portata e una diminuzione con la temperatura. Questo probabilmente legato al trend disomogeneo delle fluttuazioni. Si riporta la matrice dei coefficienti di correlazione.

MATRICE DI CORRELAZIONE				
	Ti	Tout	Q	P
Ti	1	0.6911	0.0221	0.3589
Tout		1	0.0194	-0.0043
Q			1	0.8712
P				1

Tabella 29: Matrice dei coefficienti di correlazione tra T_i , T_u , Q e P - Injection TRT

4.3.4 Osservazione dai risultati ottenuti

Si mettono a confronto i variogrammi sperimentali per i diversi TRT, con e senza movimento d'acqua di falda (1), per l'estrazione e iniezione di calore (2), per le variabili temperatura in ingresso e uscita nel terreno (3) così evidenziando le differenze e le componenti caratteristiche dei test.

1) Nel confronto tra gli esperimenti con e senza movimento d'acqua di falda, Reference e Groundwater flow, si riesce a studiare l'effetto della componente acqua di falda sul TRT. In particolare si riporta il variogramma diretto della temperatura media per i due esperimenti, che operano in estrazione di calore, evidenziando aspetti e periodicità molto simili ad eccezione della componente periodica a piccola scala (370 secondi) che viene smorzata dal movimento d'acqua di falda. Mentre la periodicità a larga scala (1600-1800) secondi è con soglia più alta durante la movimentazione d'acqua di falda dovuta al maggior lavoro della pompa di calore per reintegrare l'energia dispersa per convezione dalla falda. Le varianze sperimentali sono coincidenti per i due test.

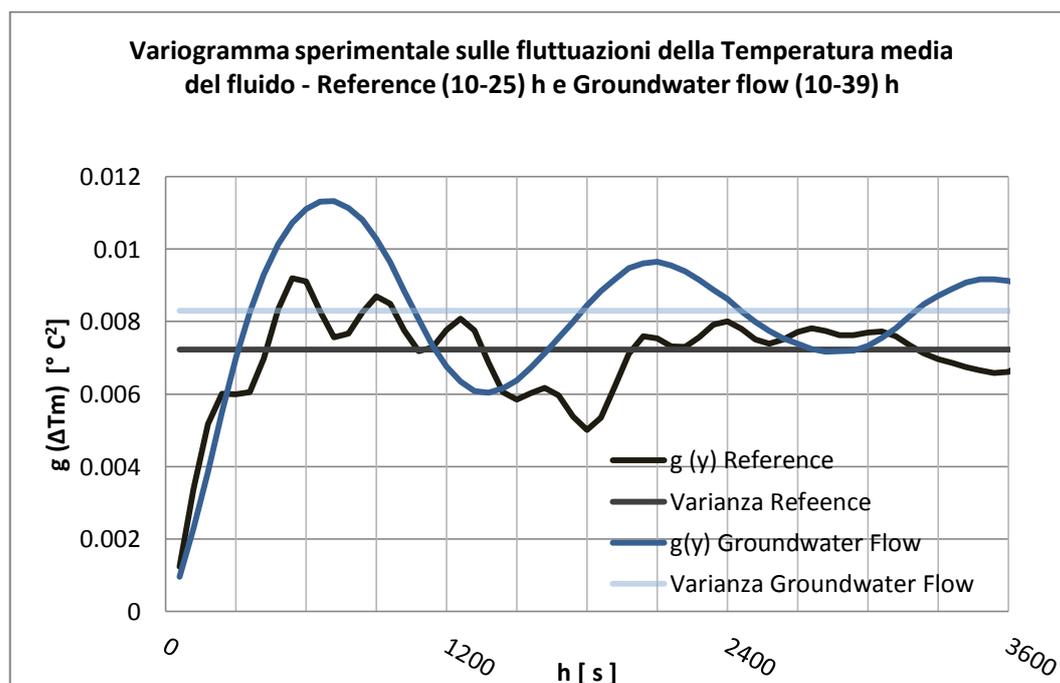


Figura 96: Variogramma sperimentale per Reference (10-25) h e Groundwater flow (10-39) h

2) Nel confronto tra gli esperimenti che operano in condizioni diverse quali estrazione e iniezione di calore con movimento d'acqua di falda, pure se non a flusso costante, si evincono enormi differenze. Nel confronto con i variogrammi diretti sulla temperatura media per i due esperimenti, Groundwater flow e Injection, si riscontrano dapprima strutture diverse, in particolare un periodico a 1400 secondi nell'estrazione di calore dovuto al funzionamento della pompa di calore che non è presente durante l'iniezione e una piccola periodicità nell'iniezione dovuto al funzionamento della 3 Way valve non sparita del tutto per il funzionamento non costante della pompa d'estrazione d'acqua. In secondo luogo si ha una varianza sperimentale per l'esperimento con iniezioni di calore notevolmente inferiore rispetto all'esperimento con estrazione di calore. Da tale elemento possiamo affermare che operare in iniezione di calore risulta essere più precisa per un TRT rispetto che operare in estrazione di calore.

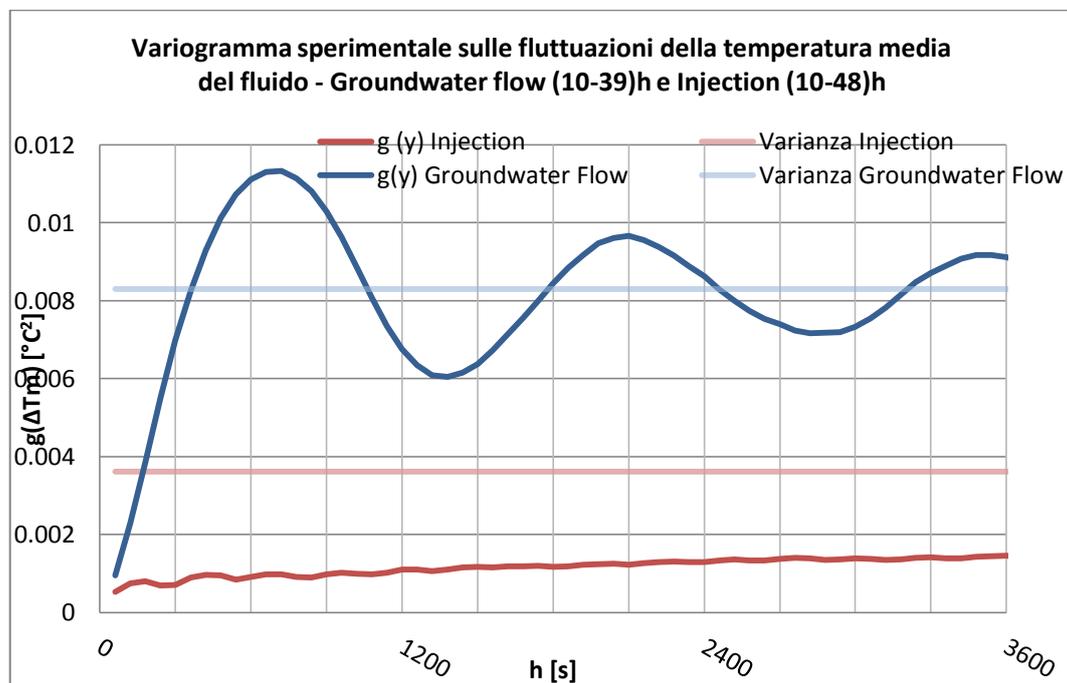


Figura 97: Variogramma sperimentale per Groundwater Flow e Injection TRT

3) Dall'analisi delle singole variabili quali temperatura del fluido in ingresso e uscita all'interno del geoscambiatore è stato confermato il fenomeno di smorzamento delle oscillazioni da parte del terreno. Si riporta il confronto dei variogrammi diretti sulla temperatura in ingresso e uscita per i diversi TRT,

evidenziando come le strutture siano quasi identiche ma con soglie dell'ordine di una decina inferiori. In particolare nell'iniezione di calore, le fluttuazioni della temperatura in uscita perdono la ciclicità a piccola scala che caratterizzano le fluttuazioni della temperatura in ingresso.

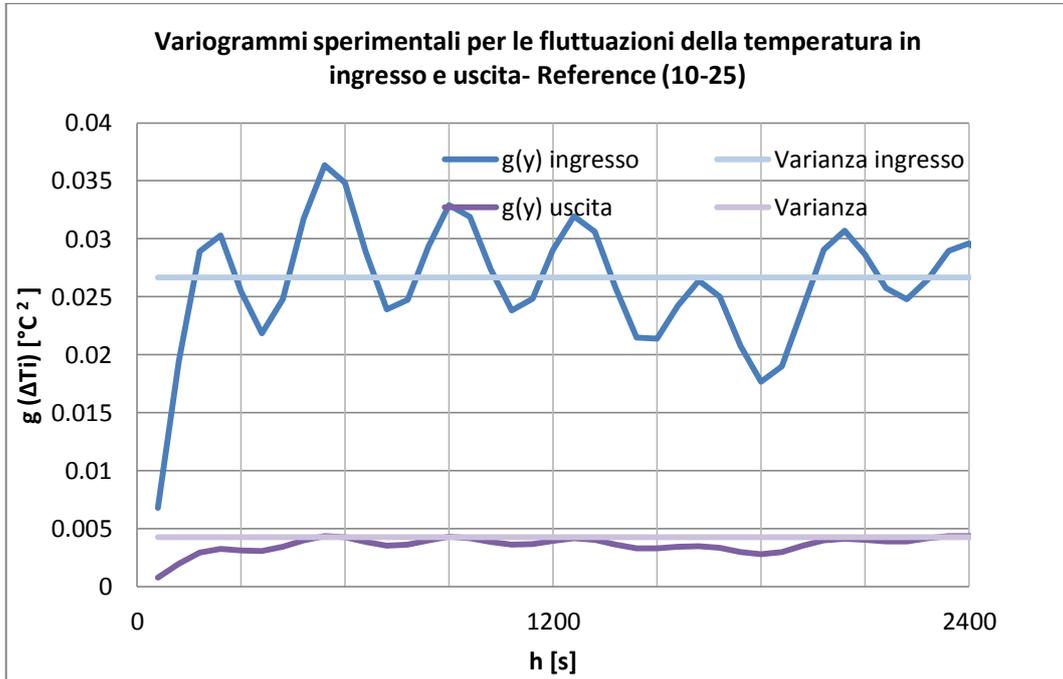


Figura 98: Variogramma sperimentale per la T_i e T_{out} Reference (10-25)h

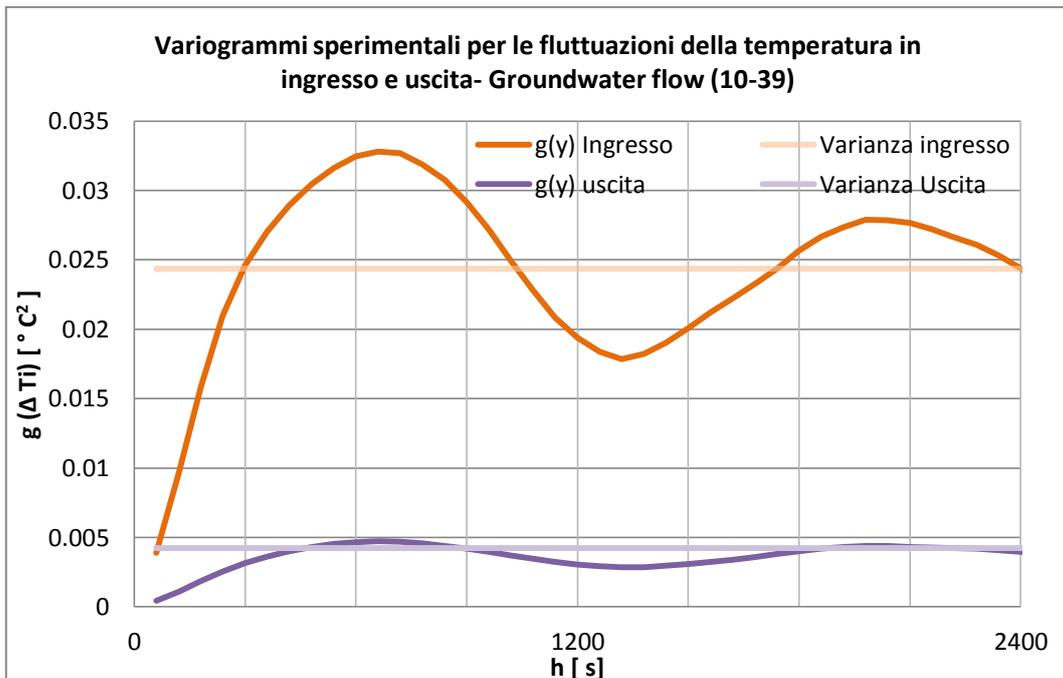


Figura 99: Variogramma sperimentale T_i e T_{out} per Groundwater Flow

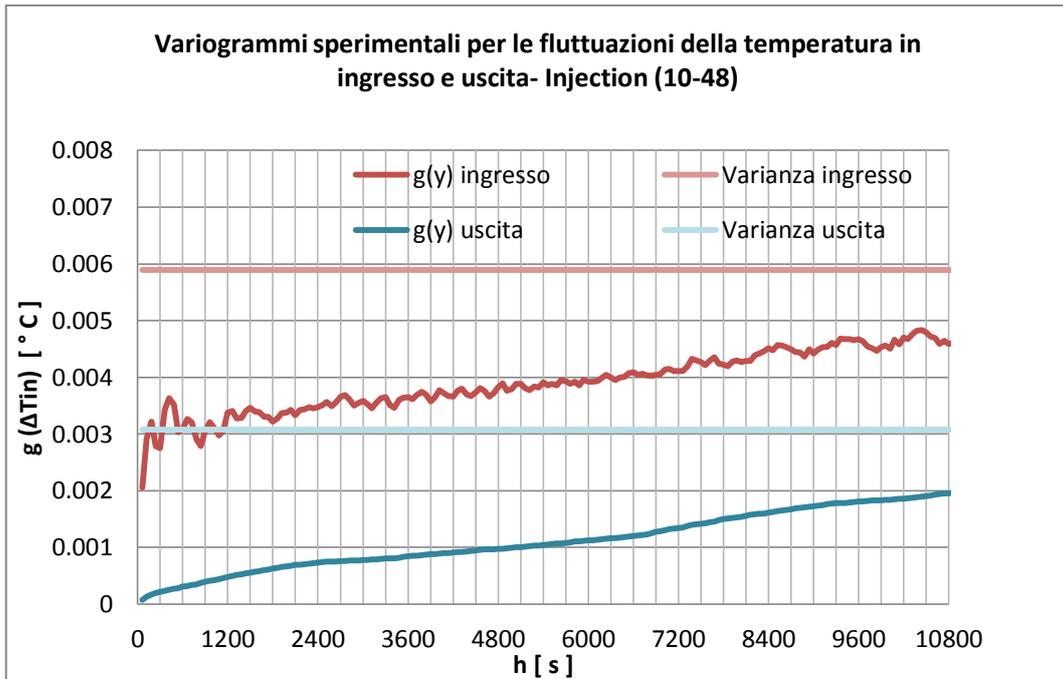


Figura 100: Variogramma sperimentale T_i e T_{out} per Injection

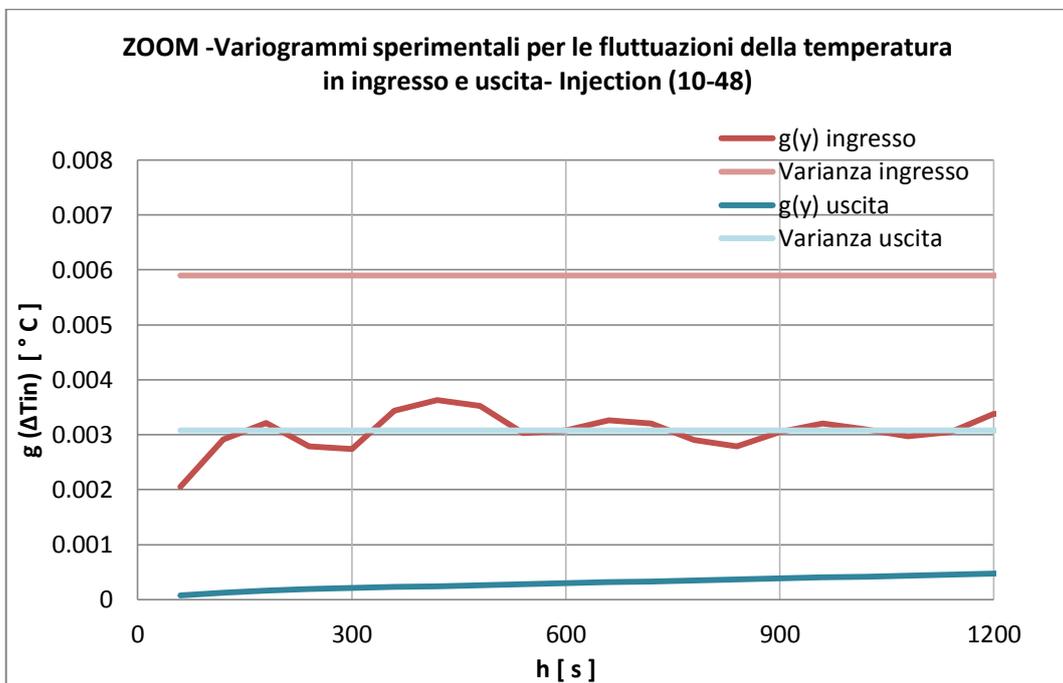


Figura 101 ZOOM Variogramma sperimentale T_i e T_{out} per Injection

V CONCLUSIONI

Si riportano in questo capitolo le conclusioni raggiunte dall'analisi geostatistica dei dati ottenuti con i diversi Test di Risposta Termica eseguiti nello stesso pozzo. Per i diversi test, applicando la teoria della sorgente lineare infinità, si ottengono risultati della conducibilità termica equivalente del terreno e resistenza termica equivalente del pozzo molto diversi. La varietà e la natura delle cause che generano questi risultati non possono essere studiate con gli strumenti di una modellistica deterministica. Per questo è interessante andare a concentrare l'analisi sulle fluttuazioni che caratterizzano il test con gli strumenti resi disponibili dalla geostatistica, tipicamente variogrammi sperimentali e covarianze incrociate.

Dall'analisi dei risultati della modellizzazione delle funzioni di autocorrelazione temporale dirette ed incrociate, discusse nel capitolo precedente, possono essere tratte le seguenti conclusioni principali

- 1) Maggiore precisione dei TRT in modalità iniezione: Tra gli esperimenti che operano in condizioni diverse quali estrazione e iniezione di calore con movimento d'acqua di falda, pure se non a flusso costante, si evincono significative differenze nella struttura dei variogrammi sperimentali. Risulta di particolare interesse nel test con iniezione di calore la più bassa soglia del modello di variogramma indice di varianze sperimentali delle fluttuazioni molto più basse. Questa circostanza è alla base della quantificazione della maggiore precisione dei risultati del TRT in modalità iniezione.
- 2) Potenzialità di analisi dell'interazione macchina-TRT-reservoir: I variogrammi delle variabili studiate consentono di evidenziare e quantificare sia periodicità a piccola scala delle fluttuazioni legate all'interazione fra circolazione del fluido termovettore all'interno della sonda e funzionamento della 3 Way Valve; sia periodicità a scala più ampia inerenti al funzionamento della pompa di calore in modalità estrazione. Nel confronto tra gli esperimenti con estrazione di calore con e senza movimento d'acqua di falda, Reference e Groundwater flow, si riesce a studiare l'effetto che la componente acqua di

falda ha sul TRT. Si conferma in primo luogo l'evidente incremento della conducibilità termica equivalente legata a fenomeni advettivi dovuti al movimento d'acqua di falda. Inoltre la componente advettiva ha un effetto di smorzamento sostanziale sulle piccole periodicità e invece un'amplificazione della periodicità a scala più ampia attribuita alla pompa di calore che dovrà fornire maggiore energia al sistema per bilanciare le dispersioni dovute al movimento d'acqua di falda.

Lo studio ha evidenziato la possibilità di ottenere anche altri risultati che confermano e quantificano dei fenomeni attesi. Così, ad esempio:

- 3) Smorzamento della variabilità: Dall'analisi delle singole variabili quali temperatura del fluido in ingresso e uscita all'interno del geoscambiatore è stato confermato il fenomeno di smorzamento da parte del terreno delle oscillazioni indotte dal funzionamento del sistema .
- 4) Indipendenza della variabilità della portata dalla variabilità delle temperature: Dall'analisi delle singole variabili del test (temperatura, potenza, portata) è stata confermata l'indipendenza temporale fra portate e temperature. Come evidenziato dalle diverse strutture dei variogrammi diretti e dalle covarianze incrociate prossime a zero.
- 5) Verifica indiretta dei tempi di circolazione: Mediante correlogrammi è anche possibile osservare sperimentalmente il tempo impiegato dal fluido termovettore per circolare all'interno della sonda e verificare la coerenza dei calcoli deterministici di progetto.

L'analisi geostatistica ha permesso quindi di studiare in dettaglio la sensitività dei risultati del TRT alle diverse condizioni al contorno, quelle legate al reservoir e quelle legate al funzionamento delle attrezzature

Integrando l'approccio geostatistico con il metodo classico si ha una maggiore comprensione dei risultati ottenuti dal test; tali informazioni risultano preziose nella fase progettuale dell'impianto geotermico consentendone così l'ottimizzazione del sistema con migliori efficienze energetiche.

5.1 Sviluppi futuri

Questo lavoro ha messo in luce alcuni punti che possono essere d'interesse per il settore della geotermia a bassa entalpia per circuiti chiusi, per tanto la ricerca può essere sviluppata tramite analisi e sperimentazioni direttamente correlate al lavoro svolto nella presente tesi. In particolare si individuano i seguenti sviluppi futuri:

Eseguire altri esperimenti sullo stesso sito con movimenti d'acqua di falda indotti più intensi e lievi, osservando la variazione di magnitudo dei fenomeni sui test.

Adottare l'approccio geostatistico per l'analisi dei Test di Risposta Termica in un maggior numero di pozzi, con e senza movimento d'acqua di falda, in diversi tipi di terreno, per osservare la ripetibilità di questi fenomeni a seconda della geologia del sito.

Applicare gli strumenti geostatistici sui dati raccolti in impianti in esercizio, per una maggiore comprensione dei fenomeni che avvengono durante il funzionamento dei sistemi geotermici a bassa entalpia.

BIGLIOGRAFIA

Articoli e pubblicazioni

Austin, III, W.A. 1998: Development of an in situ system for measurement for ground thermal properties. MSc Thesis, Oklahoma State University.

D. Bauer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen and H.-J. G. Diersch. 2010: Thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers- International Journal of Energy Research.

Brown, R.L., Durbin, J., and Evans, J.M. 1975. Techniques for Testing the Constancy of Regression Relationships Over Time. Journal of the Royal Statistical Society.

Bruno, R., Focaccia, S. e Tinti, F. 2010, "Test di Risposta Termica per la geotermia superficiale: un approccio geostatistico". Acque sotteranee n.122.

Bruno, R., Focaccia, S., e Tinti, F. 2010, "A probabilistic approach to the Thermal Response Test for shallow geothermal applications: the identification of useful temporal interval" International Association for Mathematical Geology, Environmental and Materials Engineering University of Bologna.

Eskilson, P. 1986. Superposition Borehole Model, Manual for Computer Code.

Gehlin, S. 1998: Thermal Response Test, In-Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock. Licentiate Thesis, LULEÅ University of Technology.

Incropera F, Dewitt D, Bergman T, Lavine A. 2007 Introduction to heat transfer. 5th ed. New York: Wiley;

Ingersoll, L.R. and Plass, H.J. 1948: Theory of the Ground Pipe heat Source for the Heat Pump. Heating, Piping & Air Conditioning. July.

Hellström G. 1989. Superposition Borehole Model, Supplement Manual for Computer Code.

Hellström G. 1991. Ground storage Thermal analysis of duct storage systems, theory ph.D thesis, Department of Mathematical Physics University of Lund, Sweden.

- Kavanaugh, S.P.* 1984: Simulation and experimental verification of vertical groundcoupled heat pump systems. ASHRAE Transactions
- Marcotte D. P. Pasquier* ,2007. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test
- Mogeson, P.*1983: Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Swedish Council for Building Research.
- Raspa G.*, “Dispense di Geostatistica Applicata”, Facoltà di Ingegneria dell’Università di Roma “La Sapienza”.
- Saluci E.*,2010. Caratterizzazione delle caratteristiche termiche fondamentali per la geotermia superficiale – Tesina Geostatica applicata M
- Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., Kohl, T.* 3D Numerical Modeling of Thermal Response Tests. Submitted to Geothermics
- Tinti F.*, 2012. La caratterizzazione probabilistica del sottosuolo come strumento per l’ottimizzazione della progettazione integrata dei sistemi geotermici.
- Van Gelder, A.J., Witte, H.J.L., Kalma, S., Snijders, A.* and R.G.A. Wennekes 1999. In-situ Messungen der thermische Eigenschaften des Untergrunds durch Wärmeentzug. IN: T. Hitziger (Ed): OPET Seminar “Erdgekoppelte Wärmepumpen zum heizen und Klimatisieren von Gebäuden.
- Witte, H.J.L.*, 2001. Geothermal Response Tests with Heat Extraction and Heat Injection: Examples of Application in Research and Design of Geothermal Ground Heat Exchangers.
- Witte, H.J.L., A.J. van Gelder, J.D. Spitler.* 2002. In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: The Dutch Perspective. ASHRAE Transactions,
- Witte, H.J.L.*, 2005. Advances in geothermal response testing. In Paksoy (ed): Nato Science Series: Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption – Fundamentals, Case Studies and Design.

Manuali

Groenholland BV - Groenholland's geothermal response test: practice, theory and data analysis

Geotrained - Geotrained manual for designers of shallow geothermal systems - Geo-Education for a sustainable geothermal heating and cooling market – www.geotrained.eu

Dr. Daniel Pahud : The Superposition Borehole Model for TRNSYS 16 or 17

Normative

UNI 11466:2012 — Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per il dimensionamento e la progettazione;

UNI 11467:2012 — Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per l'installazione;

UNI 11468:2012 — Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti ambientali.

Ringraziamenti

Voglio ringraziare il prof. Roberto e Francesco per il loro aiuto e per i loro insegnamenti datomi durante lo svolgimento di questo lavoro.

Un grosso grazie ai miei genitori che mi hanno permesso di fare questa esperienza universitaria e mi hanno supportato, anche in quelle scelte che non sempre sono riusciti a comprendere, dimostrazione del loro amore incondizionato. Per questo gli dico un sentito grazie e apro questa pagina per dirgli che, anche se non riesco a dimostrarlo quanto vorrei, li amo.

Un altro grazie bello grosso va alle persone che mi hanno accompagnato fino ad ora, i miei amici. Che hanno avuto la pazienza di sopportarmi, sempre presenti nei momenti del bisogno, disposti ad ascoltare i miei deliri, persone che hanno preso treni e aerei per essere qui in questo giorno, che non mi hanno mai fatto mancare un pasto sulla loro tavola o un grafico all'ultimo minuto, quelli che sono stati dei pilastri da quando li ho conosciuti, persone che anche dandomi dello scemo lo hanno fatto sempre abbracciandomi, persone che hanno perdonato i miei sbagli che pochi non sono stati. Un grazie va anche alle persone che non ci sono più e quelle che mi hanno deluso, perché anche questo infondo fa parte della vita e tutto sommato va apprezzato.

Also, I wish to thank all the international people that I have met over the last two years for the experience that I have shared with them, like the way that they loved me and the way that I loved them too, changed me.

So thanks guys for all this.

Quindi grazie, grazie per avermi accompagnato. Ho capito che non devo essere spaventato dai cambiamenti. Anche se saremmo fisicamente lontani, non ci perderemo. Il nostro rapporto cambierà, magari non sapremo cosa sta accadendo nelle vite degli altri ma il sentimento di amicizia e di amore rimarrà lì, fissa e immobile, imperturbabile come una montagna.

Grazie ancora,

Salvatore.