

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

Geingegneria, Georisorse e Ingegneria Geotecnica

Ciclo XXIV

Settore Concorsuale di afferenza: 08/A2

Settore Scientifico Disciplinare: ING-IND 28

***La caratterizzazione probabilistica del
sottosuolo come strumento per
l'ottimizzazione della progettazione integrata
dei sistemi geotermici***

Presentata da: FRANCESCO TINTI

Coordinatore Dottorato

Prof. Ing. Paolo Berry

Relatore

Prof. Ing. Roberto Bruno

Esame finale anno 2012

Abstract

L'utilizzo del reservoir geotermico superficiale a scopi termici / frigoriferi è una tecnica consolidata che permette di sfruttare, tramite appositi "geoscambiatori", un'energia presente ovunque ed inesauribile, ad un ridotto prezzo in termini di emissioni climalteranti. Pertanto, il pieno sfruttamento di questa risorsa è in linea con gli obiettivi del Protocollo di Kyoto ed è descritto nella Direttiva Europea 2009/28/CE (Comunemente detta: *Direttiva Rinnovabili*).

Considerato il notevole potenziale a fronte di costi sostenibili di installazione ed esercizio, la geotermia superficiale è stata sfruttata già dalla metà del ventesimo secolo in diversi contesti (geografici, geologici e climatici) e per diverse applicazioni (residenziali, commerciali, industriali, infrastrutturali). Ciononostante, solo a partire dagli anni 2000 la comunità scientifica e il mercato si sono realmente interessati ed affacciati all'argomento, a seguito di sopraggiunte condizioni economiche e tecniche. Una semplice ed immediata dimostrazione di ciò si ritrova nel fatto che al 2012 non esiste ancora un chiaro riferimento tecnico condiviso a livello internazionale, né per la progettazione, né per l'installazione, né per il testing delle diverse applicazioni della geotermia superficiale, questo a fronte di una moltitudine di articoli scientifici pubblicati, impianti realizzati ed associazioni di categoria coinvolte nel primo decennio del ventunesimo secolo.

Il presente lavoro di ricerca si colloca all'interno di questo quadro. In particolare verranno mostrati i progressi della ricerca svolta all'interno del Dipartimento DICAM nei settori della progettazione e del testing dei sistemi geotermici, nonché verranno descritte alcune tipologie di geoscambiatori innovative studiate, analizzate e testate nel periodo di ricerca.

Ringraziamenti

La presente Tesi di Dottorato chiude un ciclo di lavoro sui sistemi a reservoir geotermico superficiale iniziato nell'ormai lontano 2006, ben prima dell'inizio del Dottorato di Ricerca. Molto è passato da allora, in termini di pubblicazioni, esperienza acquisita, progetti realizzati. L'esperienza dei 3 anni del Dottorato di Ricerca mi ha permesso di compiere un enorme balzo in avanti, grazie anche all'apporto dei contatti internazionali, europei ed extraeuropei, maturati nel corso della ricerca. E' stato quindi possibile, una volta appreso lo stato dell'arte della tecnologia, fornire contributi originali, comprovati scientificamente, che verranno enunciati e descritti nel presente lavoro di Tesi.

Vorrei ringraziare pertanto tutte le persone e i gruppi di lavoro che hanno permesso il raggiungimento di questo importante obiettivo, accompagnando la ricerca. Innanzitutto, un grazie sentito al Prof. Ing. Roberto Bruno, tutor della ricerca e ineguagliabile guida nelle tematiche inerenti l'apporto della geostatistica alla caratterizzazione dei reservoir. Ringrazio quindi l'amica e collega Sara Focaccia, per il continuo, costante e proficuo confronto, di persona e anche a distanza, tutto il personale del dipartimento DICAM, dottorandi, tecnici, ricercatori e professori, per il supporto e l'amicizia dimostrati, l'azienda Geo-Net per l'esperienza e le capacità che ha saputo trasmettermi nel campo dell'installazione delle Sonde Geotermiche Verticali e degli studi geologici di fattibilità, ed il comitato Annex 21 IEA TRT, per l'enorme mole di esperienza e di lavoro sul Test di Risposta Termica. Desidero infine ringraziare tutte quelle persone, provenienti dall'ambito accademico ed industriale, nazionale ed internazionale, incontrate nel corso della ricerca che in misura maggiore o minore hanno contribuito al raggiungimento del risultato finale oggetto di questa Tesi. Grazie a tutti voi.

Legenda

SIMBOLI

T	temperatura	[°C]
c	capacità termica volumetrica	[J/(m ³ ·K)]
t	tempo	[s], [h], [d], [m], [y]
x	lunghezza asse x	[m]
y	lunghezza asse y	[m]
p	flusso di calore	[W/m]
P	potenza termica	[W]
A	ampiezza oscillazione termica	[°C]
S	superficie	[m ²]
D	profondità	[m]
α	diffusività	[m ² /s]
G	gradiente geotermico	[K/m]
R	resistenza termica	[K/(W/m)]
γ	costante di Eulero	
λ	conduttività termica	[W/(m·K)]
C	calore specifico	[J/(kg·K)]
ρ	densità	[kg/m ³]
M	portata in massa	[kg/s]
v	velocità	[m/s]
μ	viscosità dinamica	[Pa·s]
Q	energia	[J]
L	lunghezza	[m]

d	diametro [m]
I	distanza [m]
H	carico idraulico [m]
h	coefficiente di scambio termico [W/(m ² ·K)]
g	accelerazione di gravità [m/s ²]
f	fattore di attrito
η	rendimento
φ	porosità
K	costo (€)
tr	tasso di redditività

PARAMETRI

n	numero di dati
w	parametro moltiplicatore
ω	parametro
ψ	peso
v	peso
a	intercetta
b	pendenza
c	termine di correzione della potenza
τ	spazio del logaritmo del tempo
m	media
Y	fluttuazione
γ	variogramma
σ ²	varianza

σ	deviazione standard
D	deriva
Σ	sommatoria
e	errore di stima
X	valore vero
x	valore stimato
L	dominio di variabilità
P	coefficiente correttivo per serpentine orizzontali
O	coefficiente correttivo per serpentine orizzontali

PEDICI

g	terreno (ground)
m	media
f	fluido
s	solido
b	foro (borehole)
T_{\min}	corrispondente alla temperatura minima
geo	geotermico
i	indice
j	indice
α	indice
β	indice
in	ingresso
out	uscita
w	acqua

0 punto temporale di partenza dell'analisi ILS

start punto temporale di inizio dell'analisi di convergenza

end punto temporale di fine dell'analisi di convergenza

ε errore

inf inferiore

sup superiore

max massimo

min minimo

c corrispondente alla capacità termica volumetrica del terreno

R corrispondente alla resistenza termica del foro

o ottimale

Lmax massimo all'interno del dominio di variabilità

Lmin minimo all'interno del dominio di variabilità

int interno

ext esterno

pp tubazione (piping)

gr materiale di riempimento (grouting)

p penalizzazione

stored stoccaggio

heat riscaldamento

cool raffrescamento

year annuale

month mensile

day giornaliero

el elettrico

res energia rinnovabile

usable utilizzabile

rsu materiale della discarica

str manto stradale

n neve

fu fusione

ev evaporazione

rc radiazione e convezione

SIMBOLI ASSOCIATI

δ errore

Δ variazione

*

$()^G$ valore di tentativo

∂ derivata

ACRONIMI

UTES Sistemi di Stoccaggio di Calore nel Sottosuolo (Underground Thermal Energy Storage)

BTES Sistemi di Stoccaggio di Calore nei Fori Geotermici (Borehole Thermal Energy Storage)

SGV Sonda Geotermica Verticale

TRT Test di Risposta Termica

ILS Sorgente Lineare Infinita (Infinite Line Source)

FLS Sorgente Lineare Finita (Finite Line Source)

CLD Sorgente Lineare Cilindrica (Cylindrical Line Source)

VR Variabile Regionalizzata

FA Funzione Aleatoria

FASt Funzione Aleatoria Stazionaria

MT metodo tradizionale

MD metodo della deriva

MTD metodo tradizionale con declustering

MDD metodo della deriva con declustering

TRCM Modello Termico Resistivo Capacitivo (Thermal Resistance and Capacity Model)

EER efficienza istantanea della pompa di calore in raffreddamento (Energy Efficiency Ratio)

COP efficienza istantanea della pompa di calore in riscaldamento (Coefficient of Performance)

SPF efficienza media stagionale della pompa di calore (Seasonal Performance Factor)

CTA costo totale attualizzato

VAN valore attuale netto

TIR tasso interno di rendimento

NUMERI ADIMENSIONALI

Re Reynolds $Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$

Pr Prandtl $Pr = \frac{C \cdot \mu}{\lambda}$

Gr Grashof $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2}$

Nu_1 Nusselt convezione forzata $Nu_1 = Re \cdot Pr$

Nu_2 Nusselt convezione naturale $Nu_2 = a \cdot (Gr \cdot Pr)^b$

Fo Fourier $Fo = \frac{\alpha \cdot t}{L^2}$

Pe Peclet $Pe = \frac{v \cdot L}{\alpha}$

Schema della tesi

La presente Tesi riassume il lavoro di Dottorato svolto nel periodo 2009-2011, presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali (DICAM, ex-DICMA), Università di Bologna. Durante tale periodo, è stata effettuata un'esperienza continuativa di progettazione e di cantiere, propedeutica alla ricerca, presso l'azienda Geo-Net s.r.l. di Imola. Di seguito si riportano le tempistiche della ricerca e del lavoro effettuati.

		Anno 2009											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	sett	ott	nov	dic
Università													
Azienda													
		Anno 2010											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	sett	ott	nov	dic
Università													
Azienda													
		Anno 2011											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	sett	ott	nov	dic
Università													
Azienda													

Figura 0. Tempistiche e distribuzione dell'attività di ricerca.

La ricerca è stata inoltre supportata dal gruppo di lavoro “ANNEX 21 TRT” del Comitato *Energy Conservation through Energy Storage* (ECES) dell'*International Energy Agency* (IEA)

La presente Tesi riassume i seguenti ambiti di ricerca affrontati: implementazione della realizzazione, dell'analisi dati e della misura dell'errore dei Test di Risposta Termica, proposta di metodologia corretta per la progettazione dei sistemi geotermici con riferimento alle ricadute economiche, ambientali e assicurative, analisi e studio di tipologie innovative di geoscambiatori alternativi alle sonde geotermiche verticali.

Le analisi nei 3 anni di ricerca sono state condotte principalmente su: Test di Risposta Termica commerciali, Test di Risposta Termica a fini di ricerca, simulazioni e progetti di sistemi geotermici, monitoraggio di applicazioni geotermiche realizzate. Per motivi di riservatezza, nel presente documento verranno presentati solo grafici e risultati di set di dati provenienti da applicazioni costruite a tavolino o realizzate puramente a fini di ricerca.

Nel particolare, tutte le analisi condotte su dati sperimentali di Test di Risposta Termica mostrate nella Tesi fanno riferimento ad un Test condotto nella città tedesca di Ravensburg ad opera dei tecnici dello Zae Bayern per conto dell'Agenzia Internazionale dell'Energia.

Per quanto riguarda inoltre gli schemi di impianto per la progettazione dei sistemi geotermici, essi fanno riferimento ad un caso fittizio, assolutamente credibile in quanto confrontabile con sistemi geotermici recentemente realmente progettati, installati e monitorati per la climatizzazione di edifici pubblici e privati.

Si ringrazia il Dott. Markus Proell dello Zae Bayern per la disponibilità nell'utilizzo e pubblicazione dei dati del Test di Risposta Termica di Ravensburg.

Nel corso della trattazione, si farà riferimento a tre tipologie di documenti: pubblicazioni di ricerca effettuate da terzi, pubblicazioni ed interventi realizzati durante i 3 anni di dottorato e Tesi di Laurea di cui si ha curato la revisione e si è stati correlatori.

La Tesi di Dottorato riporta come allegati le sinossi delle pubblicazioni e dei contributi presentati, nonché delle Tesi di Laurea seguite.

Indice

1. INTRODUZIONE.....	17
2. IL TEST DI RISPOSTA TERMICA (TRT): TEORIA, PRATICA E MODELLI.....	19
2.1 IL TRT OGGI.....	19
2.1.1 L'importanza del TRT	19
2.1.2 I parametri di interesse	20
2.1.3 L'analisi dati.....	32
2.1.4 Il problema del controllo della potenza termica	38
2.1.5 L'influenza del moto dell'acqua di falda sui risultati del test	42
2.1.6 Le tecniche innovative e gli sviluppi futuri.....	62
2.2 UN APPROCCIO PROBABILISTICO PER L'ANALISI DEL TRT	63
2.2.1 L'apporto della geostatistica	63
2.2.2 L'utilizzo della covarianza incrociata sui parametri.....	67
2.2.3 Il metodo "Best Time Interval"	71
2.2.4 Il metodo "Drift and Conditional Estimation"	78
2.3 LA RICERCA DEL TERMINE CORRETTIVO SULLA POTENZA.....	93
3. I SISTEMI GEOTERMICI SUPERFICIALI: LA MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA INTEGRATO	98
3.1 IL MODELLO DEL SISTEMA INTEGRATO	98
3.1.1 La necessità di un approccio integrato nella progettazione dei sistemi geotermici: la standardizzazione internazionale, l'assicurazione per il cliente e l'accesso agli incentivi per le fonti rinnovabili.....	98
3.1.2 Le componenti di un sistema geotermico e la loro modellizzazione.....	99
3.1.3 La sonda geotermica verticale e l'importanza della resistenza termica del foro.....	105
3.1.4 Lo stoccaggio di energia termica in relazione alla geometria del campo sonde e la penalizzazione sulle temperature derivante	110
3.1.5 La quantificazione dell'influenza termica dovuta al moto dell'acqua di falda	111
3.1.6 La componentistica idraulica e il bilanciamento dei collegamenti.....	113
3.1.7 Un esempio di progettazione	115
3.2 L'UTILIZZO DELL'ANALISI DI SENSITIVITA' E DELL'ANALISI DI RISCHIO PER LA VALUTAZIONE ECONOMICA DELL'INVESTIMENTO	124
3.2.1 La difficoltà nella stima dei parametri geologici ed idrogeologici e la loro influenza sulle decisioni del progettista e dell'utente finale	124
3.2.2 L'analisi di sensitività	125
3.2.3 L'analisi di rischio	128
3.2.4 La valutazione economica dell'investimento	130
4. LE CONSIDERAZIONI AMBIENTALI.....	138
4.1 I SISTEMI GEOTERMICI NEL QUADRO DEL RAGGIUNGIMENTO DEGLI OBIETTIVI DI KYOTO	138
5. LE SOLUZIONI INNOVATIVE DI GEOSCAMBIO	142
5.1 I PALI ENERGETICI.....	142
5.2 LO SFRUTTAMENTO TERMICO DELLE DISCARICHE	143
5.3 I SISTEMI DI DE-ICING E SNOW MELTING	146
6. LE CONCLUSIONI FINALI	148
BIBLIOGRAFIA	149
Articoli e pubblicazioni scientifiche	149
Normativa	160
Articoli pubblicati e atti di convegni.....	162

I.	L'importanza della misurazione in situ delle proprietà termiche dei terreni nella progettazione di un campo di sonde geotermiche: casi studio di Test di Resa Termica in differenti contesti geologici	163
II.	Geothermal Potential of Emilia Romagna and Marche. Developments and future prospects for non – electrical, low – temperature applications	164
III.	Edificio bioecologico con monitoraggio in tempo reale	165
IV.	Progettazione e dimensionamento di campi sonde geotermiche: risultati e considerazioni in merito ad alcuni test di risposta termica eseguiti e nuovi modelli di interpretazione.....	166
V.	Sistemi geotermici per il condizionamento.....	167
VI.	L'analisi di fattibilità tecnico economica degli impianti geotermici	168
VII.	Test di Risposta Termica per la geotermia superficiale: un approccio geostatistico.....	169
VIII.	Lo sfruttamento termico del sottosuolo	170
X.	Il test di risposta termica del terreno come strumento di progettazione esecutiva	172
XI.	Comparative life cycle assessment of renewable energy systems for heating and cooling 173	
XII.	Una nuova opportunità per le discariche: lo stoccaggio di energia termica.....	174
XIII.	Thermal Response Test for shallow geothermal applications: a geostatistical approach. Part I and II	175
XIV.	Annex 21 Thermal Response Test Final Report	176
XV.	ETP-RHC Geothermal Panel Vision 2020-2030 e Strategic Research Agenda.....	177
	Tesi seguite come correlatore	178
a)	Caratterizzazione della conduttività termica di una roccia a scala di laboratorio.....	179
b)	Sistemi di climatizzazione mediante pompe di calore geotermiche e pali energetici	180
c)	Confronto di Life Cycle Assessments applicati a sistemi ad energia rinnovabile: sonde geotermiche e pannelli solari termici	181
d)	Aspetti geologici ed idrogeologici in relazione alle sonde geotermiche verticali	182
e)	Analisi di prove TRT (Thermal Response Test) in diversi contesti geologici	183

1. INTRODUZIONE

L'energia geotermica è l'energia stoccata sotto forma di calore sotto la superficie terrestre (Direttiva 2009/28/CE) e può essere estratta in modi differenti a seconda delle proprietà termiche dei terreni, variabili con la profondità. Nel presente lavoro ci si riferisce esclusivamente alla geotermia superficiale, per lo sfruttamento del calore del terreno nei primi 100-200 metri. Installando appropriati geoscambiatori, il sottosuolo è usato come stoccaggio termico di energia, da cui è possibile estrarre calore in inverno ed immetterlo in estate. (Lund, 2005). Infatti i sistemi Underground Thermal Energy Storage (UTES) non solo permettono di risparmiare energia e denaro, ma inoltre sfruttano una fonte rinnovabile e non hanno emissioni inquinanti in atmosfera: sono i sistemi ideali per contribuire alle politiche europee ed internazionali quali gli obiettivi del protocollo di Kyoto per la riduzione delle emissioni.

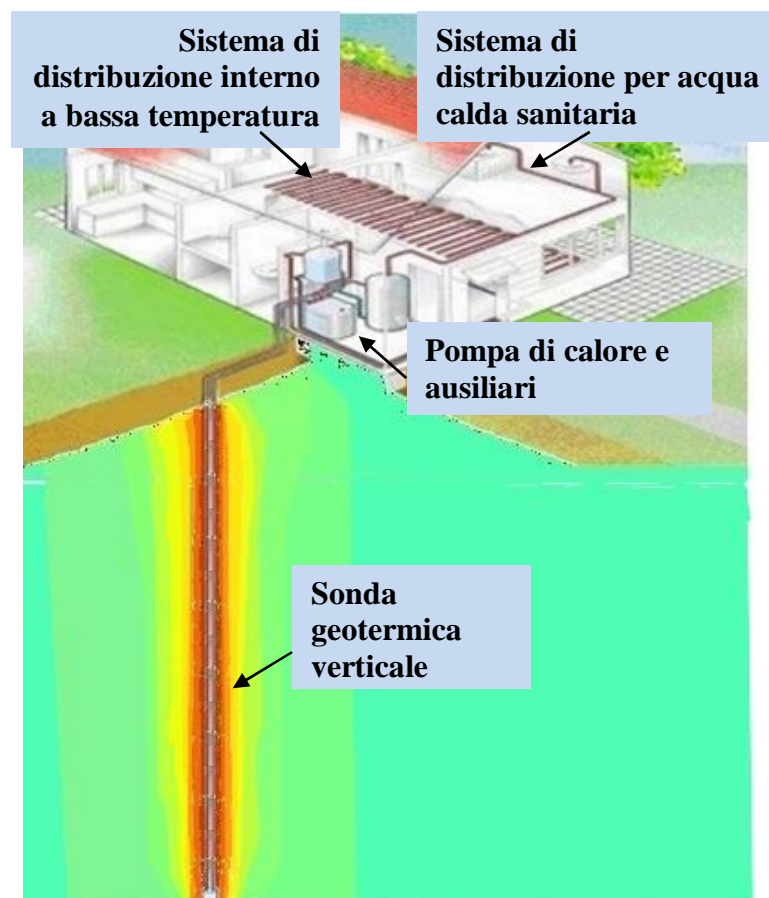


Figura 1 Schema di funzionamento di un sistema geotermico per la climatizzazione

Tra le differenti tipologie di UTES, la tipologia a circuito chiuso viene chiamata Borehole Thermal Energy Storage (BTES), che utilizza degli scambiatori di calore in cui non si ha il prelievo diretto di acqua di falda. Esistono scambiatori di calore a circuito chiuso di differente tipo e dimensione, ma la tipologia più comune è rappresentata dalle Sonde Geotermiche Verticali (SGV) (Sanner, 2003): viene realizzato un foro, dentro il quale è inserito un tubo, chiamato collettore; il collettore ha una U-bend alla base del foro, così che la circolazione è chiusa. Tra la parete esterna del collettore e la parete interna del foro viene iniettato un materiale di riempimento, generalmente una miscela cementizia, per ragioni termiche e meccaniche. Un fluido scorre all'interno del collettore e trasferisce calore per convezione al tubo stesso; le SGV scambiano energia termica per conduzione con il terreno circostante attraverso i materiali del foro. La presenza di un acquifero potrebbe fornire un termine convettivo, dovuto al movimento dell'acqua generato da diversi fenomeni, tra cui la differenza di temperatura nel suolo. La variabilità spaziale delle proprietà geologiche e la variabilità spazio temporale delle condizioni idrogeologiche sono specifiche per ogni caso e sono entrambe definite da funzioni geostatistiche come variogramma e deriva. Esse condizionano la reale quota di calore trasferibile per mezzo delle SGV e, conseguentemente, l'ammontare di energia estratta o iniettata nel terreno. Il problema di per se è complicato, a causa delle anisotropie del sottosuolo, dei gradienti di temperatura, dei processi di trasporto di calore, pertanto non è un'operazione semplice identificare le proprietà termiche del sottosuolo da considerare per la progettazione. Allo stato attuale della tecnologia, il test in situ più comunemente utilizzato per la valutazione delle proprietà termiche delle SGV e dei materiali naturali è il Test di Risposta Termica (TRT) (Gehlin, 1998).

2. *IL TEST DI RISPOSTA TERMICA (TRT): TEORIA, PRATICA E MODELLI*

2.1 IL TRT OGGI

2.1.1 L'importanza del TRT

Il Test di Risposta Termica (TRT) è, oggi, il test in situ per la caratterizzazione delle proprietà termiche del terreno con il più alto grado di accuratezza (figura 2). Il TRT consiste nella simulazione delle operazioni di iniezione/estrazione di calore a potenza costante all'interno di una Sonda Geotermica Verticale per un tempo limitato (Gehlin, 2002).

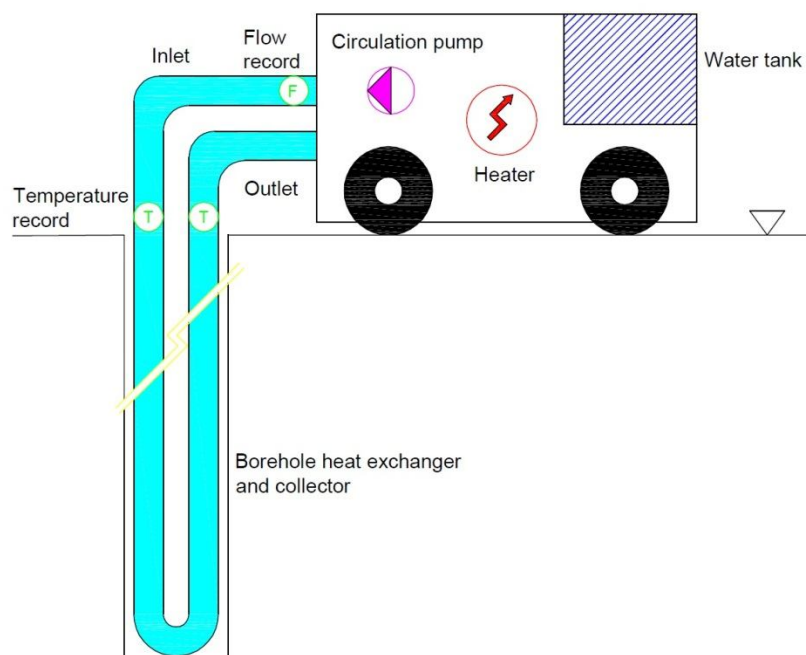


Figura 2 Schema usuale di strumentazione di Test di Risposta Termica

Analizzando la variazione di temperatura del fluido termovettore, è possibile stimare le proprietà termiche equivalenti dell'anello quasi cilindrico di suolo interessato dallo scambiatore di calore. L'anello cilindrico è composto da diversi materiali; alcuni di questi sono artificiali e hanno

proprietà termiche costanti, mentre altri, i materiali naturali, hanno proprietà termiche variabili. La realizzazione di una geometria del foro perfettamente cilindrica dipende dalla procedura di perforazione, pertanto l'impossibilità di ottenere un foro verticale perfetto aggiunge un'ulteriore fonte di variabilità. Il TRT non risolve completamente il problema della caratterizzazione delle proprietà termiche di un reservoir geotermico superficiale, semplicemente perché caratterizza solamente l'intorno dello scambiatore di calore e solamente per la durata del Test. Infatti, la variabilità a 2 e 3 dimensioni delle proprietà termiche attraverso l'intero reservoir non può essere studiata con un solo Test realizzato, il che d'altro canto è la pratica normale. Tale variabilità può divenire un fattore importante se deve essere realizzato un campo con più di una SGV. Inoltre, la variabilità temporale del livello dell'acqua di falda potrebbe cambiare le proprietà termiche equivalenti di ogni geoscambiatore (Clauser, 1995). Ciononostante, il TRT è il più adeguato, popolare ed efficiente sistema per identificare i parametri che devono essere considerati quando si progetta un sistema BTES. Diversi modelli analitici e numerici esistono per la caratterizzazione del reservoir geotermico superficiale.

2.1.2 I parametri di interesse

Le proprietà termiche di interesse per un reservoir geotermico superficiale sono la conduttività termica del terreno λ_g , la capacità termica volumetrica del terreno c_g e la temperatura del terreno indisturbato T_g (Ekolf, 1996). Questi tre parametri sono strettamente connessi dall'equazione della conduzione termica di Fourier (Carslaw, 1947), che in una dimensione è espressa dall'equazione:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Tutti questi parametri, necessari per la corretta progettazione dei BTES, sono Variabili Regionalizzate (VR) nello spazio e nel tempo e possono essere modellizzati come Funzioni Aleatorie. (FA)

- La *conduttività termica del terreno* λ_g [W/(m·K)] è la proprietà del materiale naturale di trasmettere calore per conduzione. Nei materiali anisotropi tipicamente varia con l'orientazione ed è rappresentata da un tensore del second'ordine. (Zhang, 2007) Inoltre, in materiali non uniformi, come lo sono i materiali naturali, la conduttività varia con la collocazione spaziale. Questo è un fatto molto importante che deve essere tenuto in conto quando si caratterizza un reservoir geotermico superficiale per almeno due ragioni:

1. il volume interessato dal flusso termico varia durante il funzionamento del reservoir;
2. la natura tensoriale della variabile la rende una variabile non sommabile, quindi non è possibile calcolare un valore medio tramite la media aritmetica.

Occorre ricordare che discretizzando il dominio del sottosuolo in elementi regolari (supporto), piccoli abbastanza da essere considerati omogenei, accoppiando due volumi elementari con diverse conduttività termiche λ_1 e λ_2 , la conduttività media è inclusa tra la media aritmetica e la media armonica:

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

Il nome comune utilizzato per identificare un valore medio di conduttività in un dominio a grande scala è *conduttività termica "effettiva" del suolo*. Per approfondire l'analisi occorre introdurre la terminologia *conduttività termica "equivalente" del suolo*, che è, in accordo con l'analoga definizione fornita da Matheron, la conduttività fittizia di un mezzo omogeneo che trasmette il medesimo flusso di calore \vec{p} [W/m] della conduttività reale (Matheron, 1967). Infatti due interpretazioni operazionali esistono della conduttività equivalente, e cioè la conduttività effettiva e la conduttività del blocco (De Lucia, 2008).

- La *capacità termica volumetrica del suolo* c_g [J/(m³·K)] è la quantità di calore necessaria a produrre una variazione di unità di temperatura nel suolo. 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 di un mezzo è data dal prodotto tra la densità e il calore specifico, secondo la formula

$$c = C \cdot \rho \quad (3)$$

Sia la densità ρ [kg/m³] che il calore specifico C [J/(kg·K)] di una sostanza variano al variare della temperatura della stessa, pertanto anche la capacità termica volumetrica di un mezzo è proporzionale alla temperatura a cui il mezzo si trova, cioè $c(T)$.

- *La temperatura del terreno indisturbato* 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 terreno allo stato indisturbato è influenzata da:

1. temperatura esterna;
2. irraggiamento solare;
3. gradiente geotermico;
4. moti convettivi;
5. proprietà termiche degli strati.

E' una variabile spazio temporale, anche se le variazioni naturali stagionali sono significative solo nello strato superficiale termicamente instabile. 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.

Lo strato termicamente instabile è compreso tra la superficie del suolo e il bordo superiore dello strato termicamente stabile. La temperatura al suo interno varia in funzione della profondità e del periodo dell'anno considerato.

La temperatura del terreno indisturbato ad una certa profondità viene in genere approssimata con l'equazione analitica di diffusione del calore in un piano semi infinito dovuto ad una sollecitazione sinusoidale di temperatura (Ingersoll, 1948):

$$T_g(D,t) = T_m - A \cdot \exp\left[-D \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi}{365 \cdot \alpha_g}\right)}\right] \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{365} \cdot \left(t - t_{T_{min}} - \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{365}{\pi \cdot \alpha_g}\right)}\right)\right] \quad (4)$$

Dove $T_g(D,t)$ è la temperatura del terreno alla profondità D dopo t giorni dal primo giorno di gennaio [°C]; T_m è la temperatura media dell'ambiente secondo i dati statistici annuali [°C]; A è l'ampiezza di oscillazione annuale della temperatura [°C] $t_{T_{min}}$ è il numero del giorno corrispondente alla temperatura minima del terreno, trovato sulla base di informazioni statistiche (a partire dal primo di gennaio), D è la profondità [m], t è il tempo, espresso in numero di giorni (1 gennaio = 1) [d], α_g è la diffusività termica giornaliera equivalente del terreno [m²/d].

La diffusività termica equivalente del terreno è legata ai parametri noti dalla seguente relazione:

$$\alpha_g = \frac{\lambda_g}{c_g} \quad (5)$$

Di seguito si riporta un esempio di grafico di temperature per una profondità totale pari a 100 m di profondità (profondità tipica per le sonde geotermiche), costruito a partire da valori di ipotesi, che rappresenta, al variare di tempo t e profondità D , l'andamento sinusoidale delle temperature del sottosuolo per i diversi periodi dell'anno:

Strato
termica
mente
instabile

Strato
termica
mente
stabile

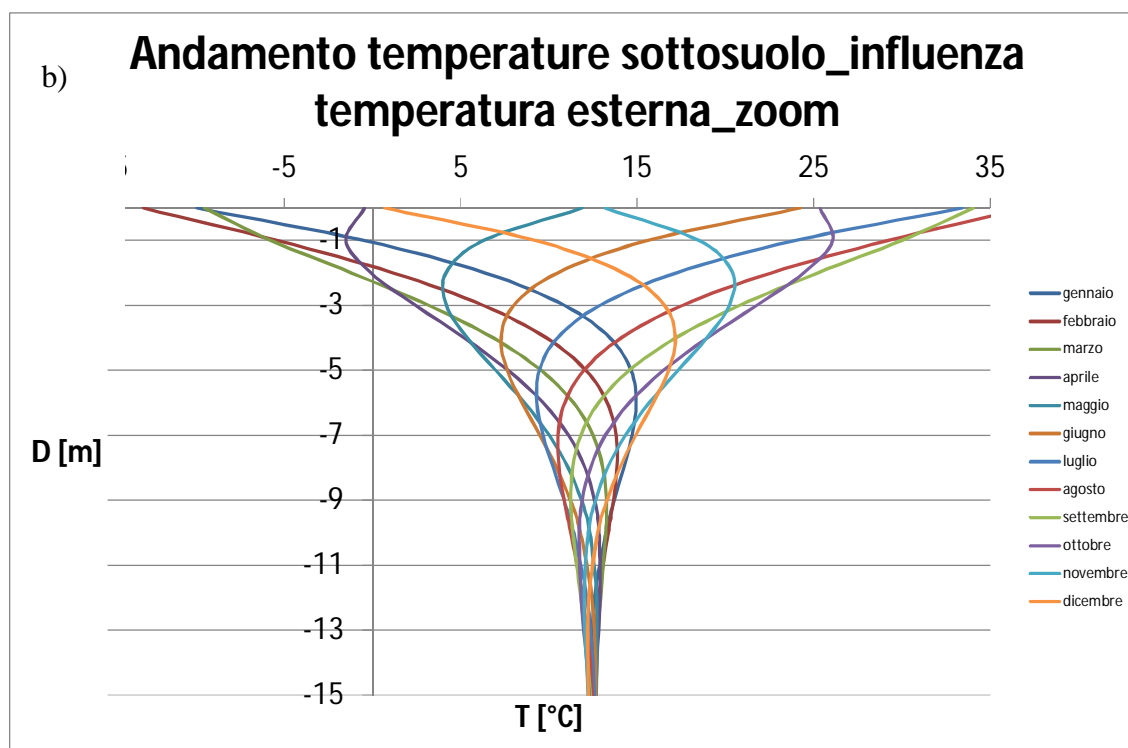
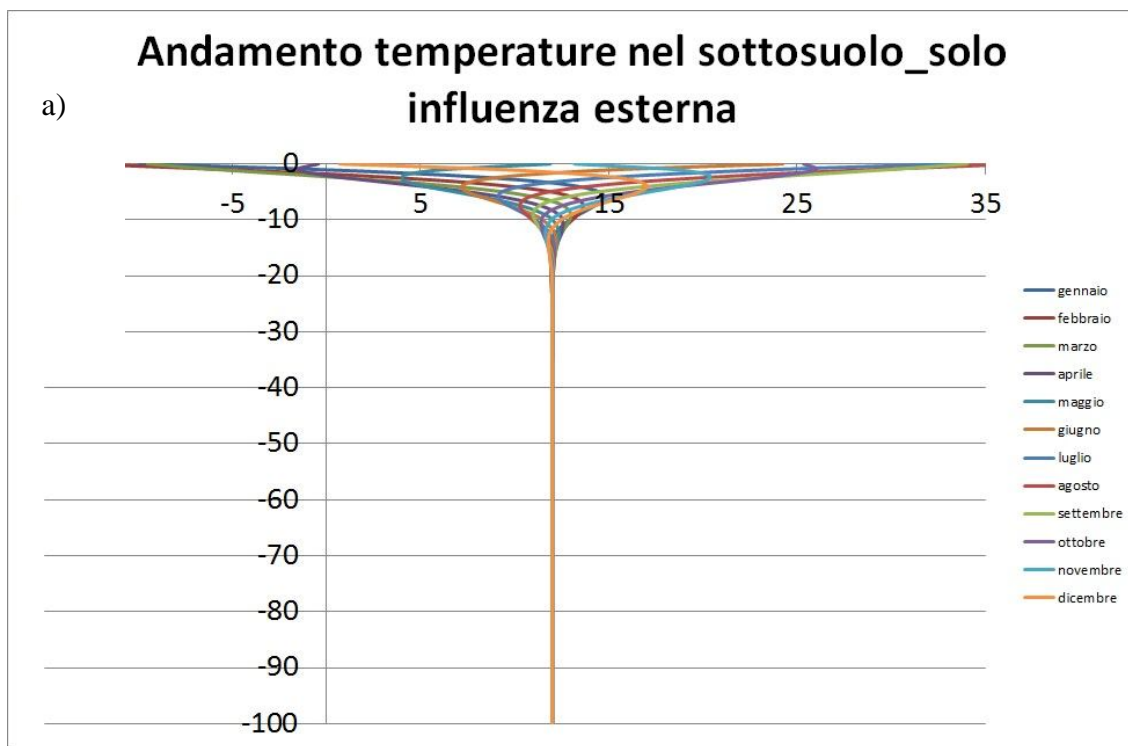


Figura 3 Andamento delle temperature nel sottosuolo (a) e zoom dello stato termicamente instabile (b)

Nel sottosuolo, altri fenomeni incidono sulla variazione termica oltre all'influenza dell'ambiente esterno e dell'irraggiamento solare, e cioè:

- Il gradiente geotermico G [K / m];

- La componente convettiva dovuta al flusso di acqua di falda;
- Le proprietà termiche dei diversi strati.

Considerando l'apporto di un gradiente geotermico normale, pari a 3°C/100 m, l'equazione generale è così modificata:

$$T_g(D,t) = T_m - A \cdot \exp\left[-D \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi}{365 \cdot \alpha_g}\right)}\right] \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{365} \cdot \left(t - t_{T_{\min}} - \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{365}{\pi \cdot \alpha_g}\right)}\right)\right] + T_{geo}(D) \quad (6)$$

Dove $T_{geo}(D)$ è pari al prodotto del gradiente geotermico per la profondità di indagine e ha quindi la dimensione di una temperatura [°C]

Un possibile profilo che tenga conto di queste variazioni potrebbe essere del tipo illustrato in figura 4.

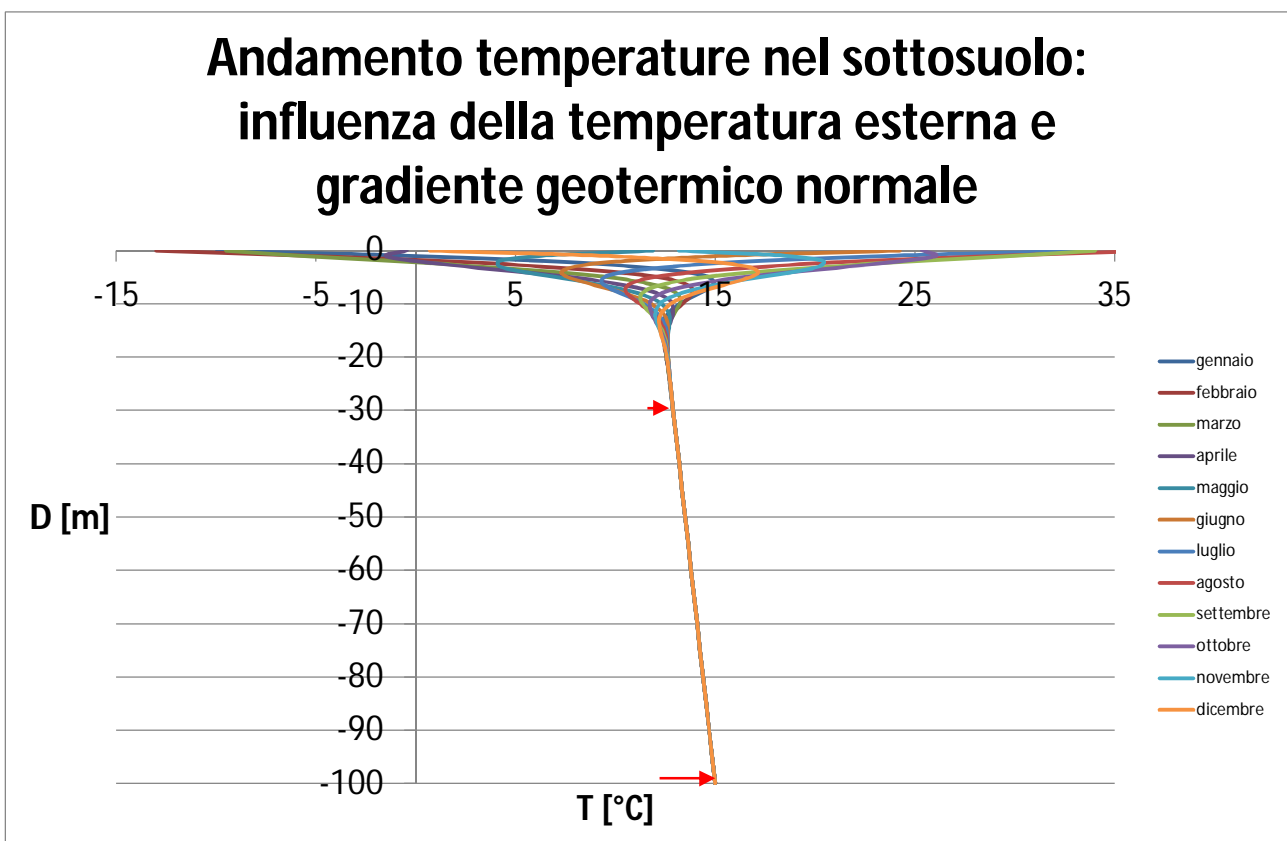


Figura 4 Andamento delle temperature soggette al gradiente geotermico costante. Si nota lo scostamento crescente delle temperature dalla verticale sulla media, dovuto all'influenza del gradiente geotermico.

Anche questo secondo grafico è un'approssimazione abbastanza grossolana della realtà, in quanto, soprattutto negli strati superficiali, la successione di strati differenti di terreno a diversa conduttività termica e con differente grado di saturazione in acqua, porta ad avere una successione di temperature nel sottosuolo non lineare (Acuna, 2009).

Per una migliore rappresentazione della realtà, si utilizza l'equazione generale del gradiente geotermico e cioè:

$$G = \frac{p_{geo}}{\lambda_g} \quad (7)$$

Dove p_{geo} è il flusso geotermico [W/m] e λ_g è la conduttività termica del materiale attraversato [W/(m·K)] Il flusso geotermico p_{geo} diretto verso la superficie è costante lungo la direzione, ma può variare in senso radiale a seconda delle anomalie locali dovute per esempio a moti convettivi o a fenomeni vulcanici / magmatici. La conduttività termica non è costante lungo la verticale, ma varia al variare degli strati.

Una volta individuato il valore di p_{geo} significativo per un determinato luogo, la formula che approssima correttamente il reale andamento della temperatura del terreno nei cento metri interessati è quindi la seguente:

$$T_g(D, t) = T_m - A \cdot \exp\left[-D \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi}{365 \cdot \alpha_g}\right)}\right] \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{365} \cdot \left(t - t_{T_{min}} - \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{365}{\pi \cdot \alpha_g}\right)}\right)\right] + T_{geo}(D, \lambda_g) \quad (8)$$

Dove in questo caso $T_{geo}(D, \lambda_g)$ si calcola a partire dalla conduttività termica dello strato di terreno e dalla sua profondità.

Il grafico che ne deriva è il seguente:

Andamento temperature nel sottosuolo: influenza della temperatura esterna e gradiente geotermico variabile

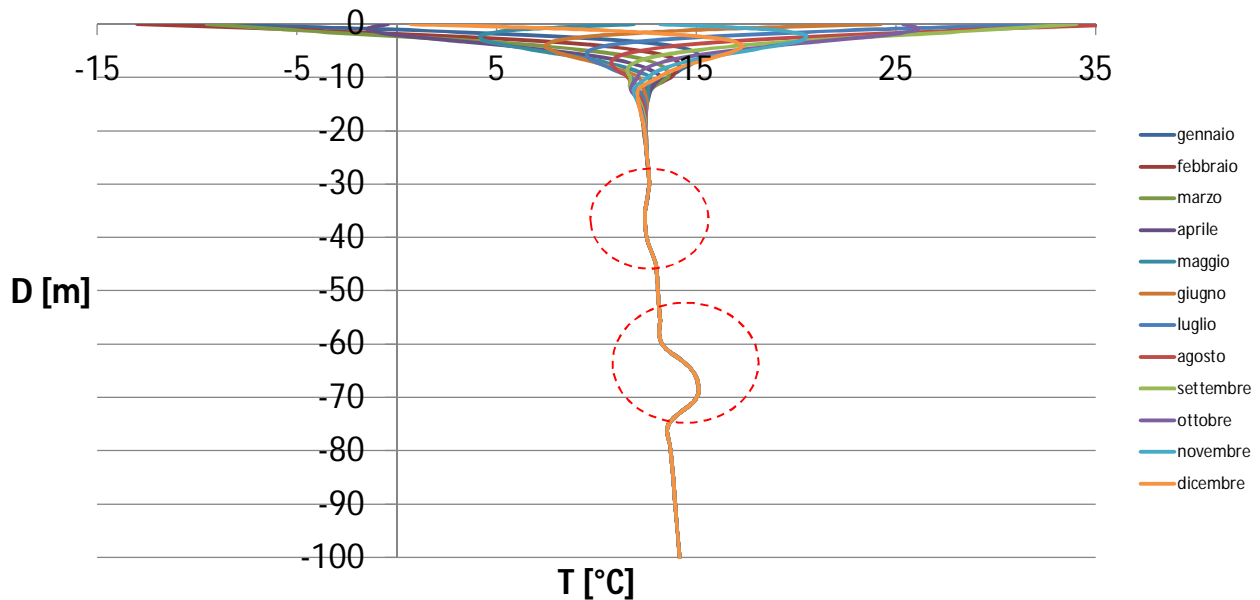


Figura 5 Andamento della temperatura in profondità. Sono cerchiati in rosso gli strati a differente conduttività termica, e in cui l'andamento di temperatura si discosta dalla direzione principale.

Le variazioni della temperatura dovute alla conduttività termica e alle caratteristiche idrogeologiche si manifestano, con minore intensità, anche nella zona termicamente instabile. Per questo motivo anche nella progettazione dei sistemi geotermici superficiali (serpentine orizzontali, pali energetici) occorre tenere in conto dell'influenza della variabilità delle caratteristiche del sottosuolo. Si riporta di seguito lo zoom di una zona termicamente instabile con gradiente geotermico variabile

Andamento temperature nel sottosuolo: influenza della temperatura esterna e gradiente geotermico variabile_zoom

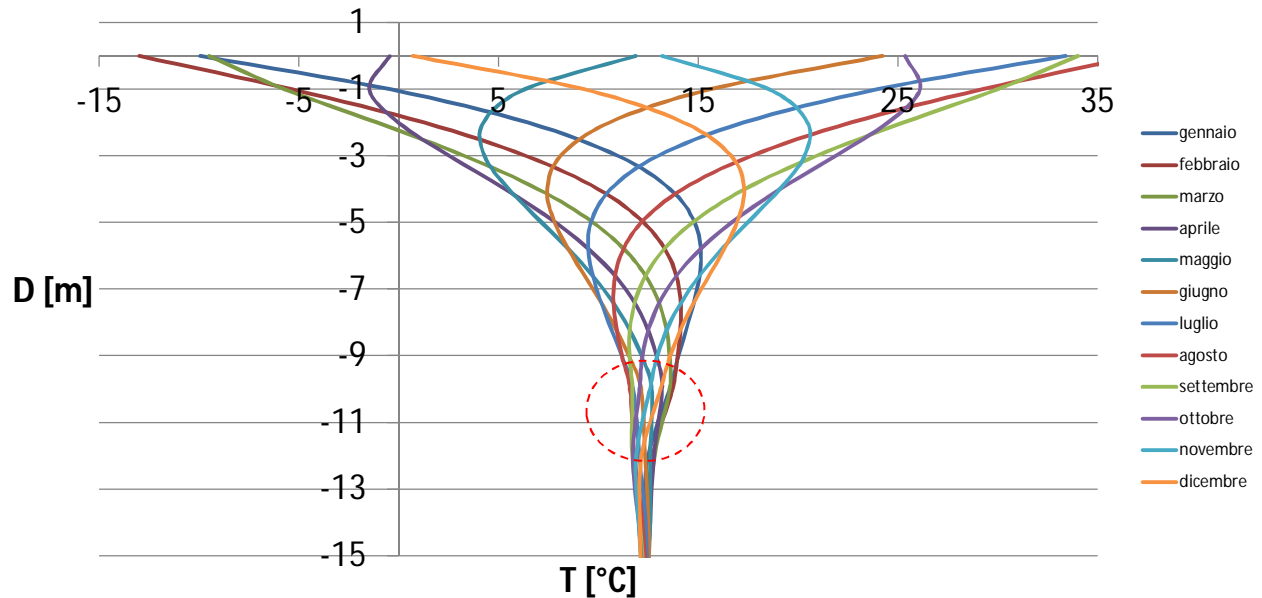


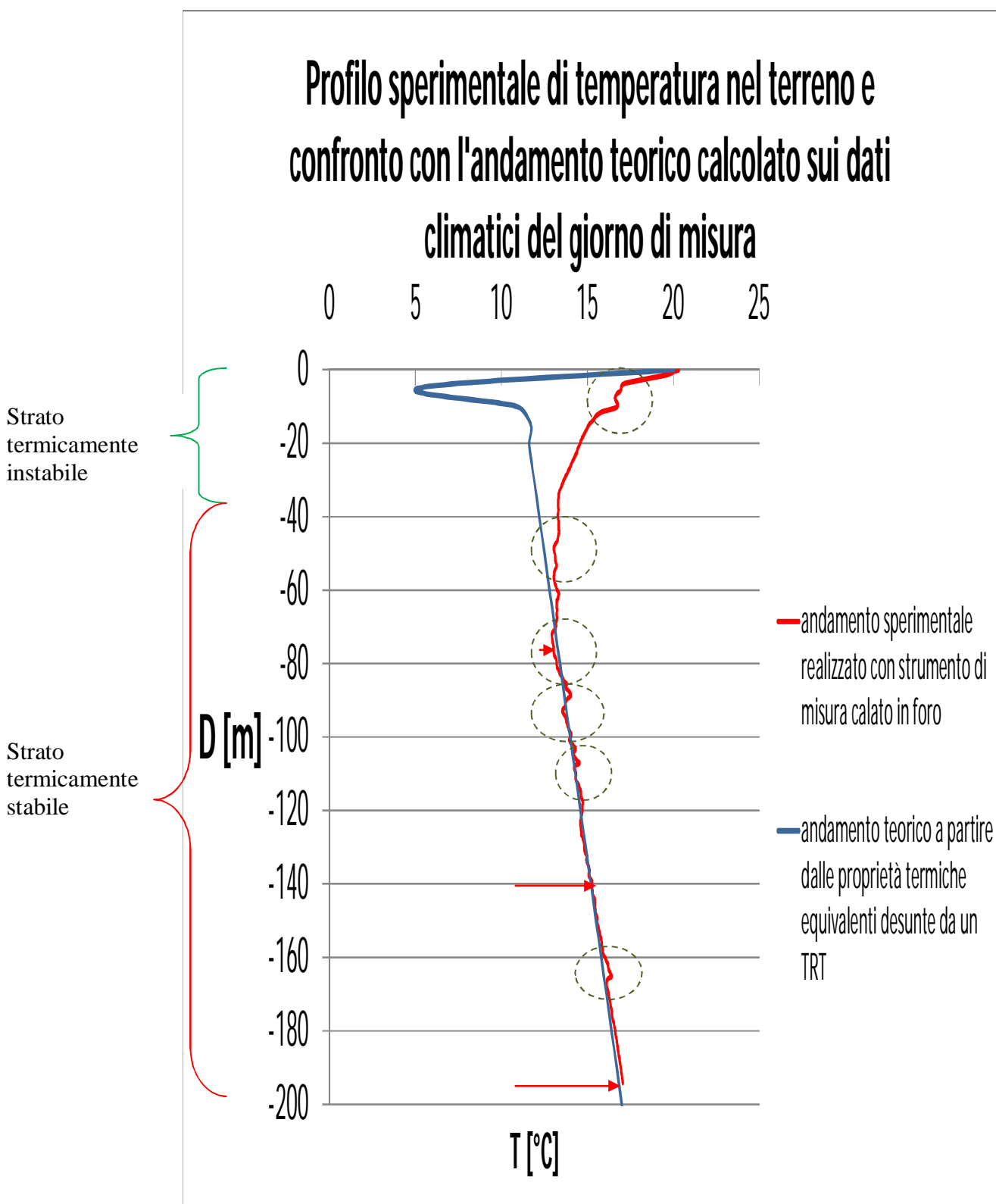
Figura 6 Zoom della zona termicamente instabile. In rosso è cerchiata una zona a differente conduttività

Le misure sperimentali realizzate convergono sui dati numerici ottenuti tramite la trattazione teorica descritta del caso sintetico sopra riportato.

Nella pratica sperimentale la temperatura del terreno indisturbato è misurata facendo calare un sensore (wireless o via cavo) nella sonda geotermica verticale, riempita d'acqua per garantire il contatto termico con il terreno circostante; le letture di temperatura sono in genere prese a profondità e intervalli di tempo regolari. La profondità è tenuta costante per un tempo sufficiente da permettere la lettura di temperatura, una volta che il sensore ha raggiunto l'equilibrio con il terreno circostante.

Al sensore di misura è in genere richiesta un'accuratezza minima di $\pm 0.20^\circ\text{C}$. Al momento l'accuratezza massima dei sensori presenti sul mercato per questo tipo di applicazioni è $\pm 0.15^\circ\text{C}$

Un grafico tipo di risultati sperimentali è il seguente¹:



¹ Tutte le misure sperimentali riportate nel capitolo del Test di Risposta Termica fanno riferimento al set di dati di un TRT realizzato a Ravensburg dal centro di ricerca Zae Bayern, per conto dall'Agencia Internazionale dell'Energia, messo a disposizione per il presente lavoro di ricerca.

Figura 7 Misure sperimentali del profilo di temperatura lungo la verticale del foro e confronto con l'andamento teorico calcolato ai partire dai dati climatici della zona di interesse nel giorno della misura e dalle proprietà termiche equivalenti risultanti da un TRT, come descritto nei prossimi paragrafi. I cerchi evidenziano le zone a diversa conduttività termica.

Come si vede, i risultati sperimentali rispecchiano l'andamento generale della trattazione teorica: suddivisione del campo in zone termicamente stabile e instabile, apporto del gradiente geotermico nella zona termicamente stabile sull'andamento della temperatura, influenza delle variazioni locali di conduttività termica in entrambe le zone sul valore locale della temperatura.

Trascurando il tempo t , ed integrando i valori di temperatura del terreno indisturbato misurati lungo la lunghezza verticale della SGV, si ottiene l'unico valore medio T_g , che verrà successivamente utilizzato nell'analisi del Test di Risposta Termica. L'equazione discretizzata per il calcolo di T_g è la seguente (Acuna, 2008):

$$\bar{T}_g = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_i \cdot T_{g,i}^*}{\sum_{i=1}^n \psi_i} \quad (9)$$

Dove $T_{g,i}^*$ è la temperatura rilevata [°C], mediata su ogni intervallo di lunghezza scelto di misura, e ψ_i è il peso di ogni misura, cioè la lunghezza dell'intervallo [m]. Di seguito la temperatura media del terreno verrà indicata per brevità e in assenza di ambiguità T_g .

Per il caso dell'esempio, il risultato delle misurazioni di T_g è pari a 14,7°C.

Il calcolo si basa su una media pesata di valori sperimentali. Per tale motivo, ad ogni misura presa corrisponde un errore dovuto all'accuratezza dello strumento. Il valore finale di T_g è dunque affetto da un errore sulla media, risultato della propagazione degli errori di ogni misura, nell'ipotesi che gli n errori siano casuali e indipendenti, secondo l'equazione:

$$\delta T_g = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta T_{g,i})^2}}{n} \quad (10)$$

Per il caso dell'esempio di figura 7, le misure sono state prese ogni mezzo metro, per tutta la lunghezza della sonda pari a 194,5 m. L'accuratezza dello strumento di misura è pari a $\pm 0,15^\circ\text{C}$, pertanto l'errore finale sulla misura di T_g risulta essere $0,00761^\circ\text{C}$, praticamente trascurabile.

I valori rilevati nello strato termicamente instabile a livello superficiale fanno sì che il valore medio calcolato di T_g vari a seconda delle condizioni climatiche esterne del periodo dell'anno in cui si è realizzato il TRT. Trattandosi di una media pesata del valore di temperatura sugli strati di terreno, quanto più il peso dello strato termicamente stabile è preponderante sul peso dello strato termicamente instabile, tanto più il valore di T_g si stabilizza intorno ad un unico valor medio durante l'anno.

Facendo riferimento al caso sintetico dell'andamento delle temperature per 100 m di profondità di figura 5, si ottiene il seguente andamento della T_g media durante l'anno:

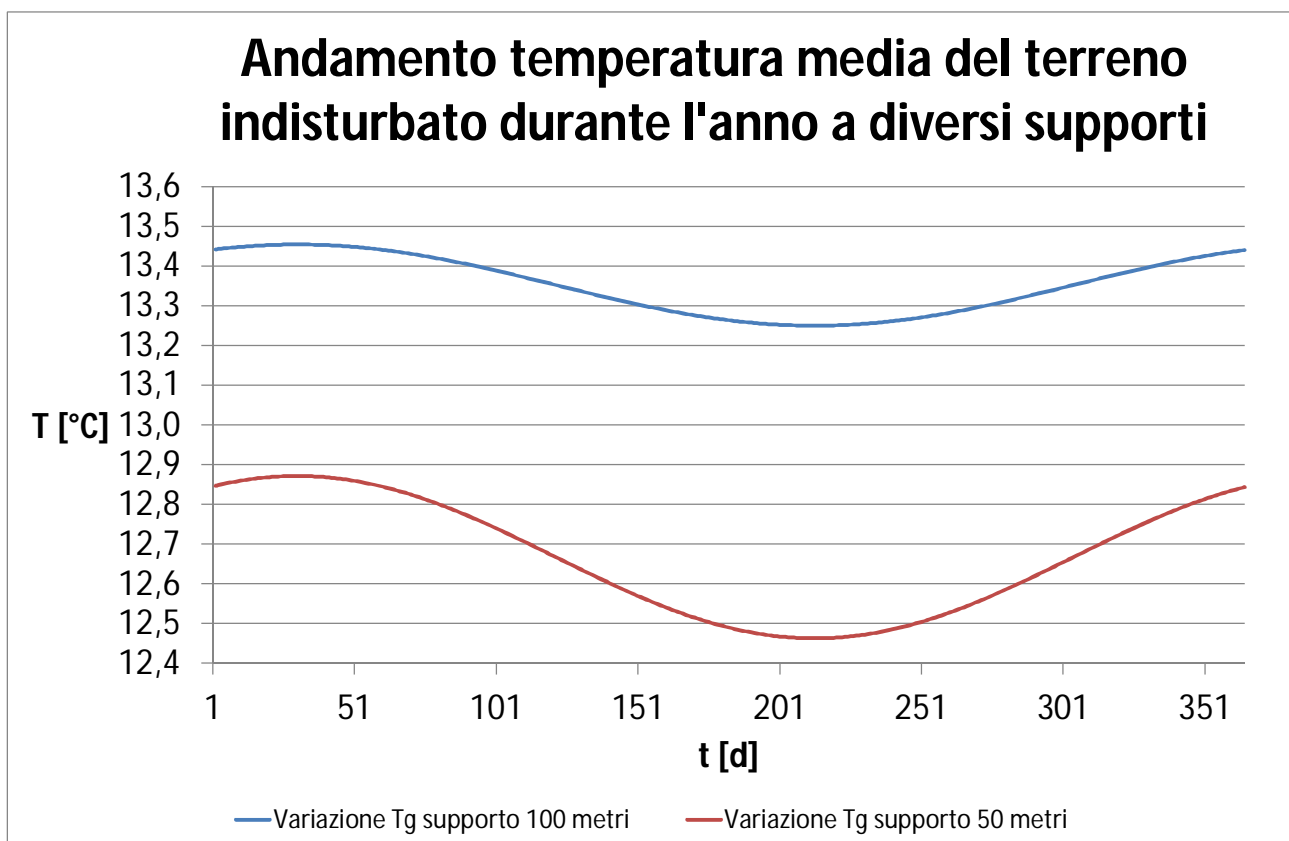


Figura 8 Andamento del valore medio di T_g su diversi supporti, ottenuto dalla media pesata di dati numerici

Nel caso dell'esempio sintetico, in cui per 100 m di profondità si ha uno stato termicamente instabile di circa 15 m, si ottiene un'oscillazione sinusoidale della T_g media con ampiezza pari a 0,10 °C. (che corrisponde al 0,75% del valore medio, un valore molto piccolo, pressoché trascurabile). Per quanto riguarda invece una SGV di profondità inferiore (supporto 50 m), l'influenza della variabilità della temperatura nello strato termicamente instabile è superiore, pertanto in questo caso l'andamento sinusoidale di T_g medio ha un'ampiezza pari a 0,2°C, che corrisponde al 1,60% del valore medio.

Ogni variazione di T_g influenza inoltre il risultato della resistenza termica del foro R_b ricavato sperimentalmente per mezzo dell'analisi dati di un Test di Risposta Termica (per maggiori dettagli si rimanda al paragrafo 2.1.3).

Ai fini della progettazione di un sistema geotermico, quindi, occorre conoscere l'ampiezza delle oscillazioni della temperatura esterna per interpolare i dati ottenuti dai TRT effettuati, in quanto 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.

2.1.3 L'analisi dati

Il 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 di 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.

Attualmente il TRT permette di calcolare una λ_g equivalente dei materiali inclusi nel volume coinvolto dal geoscambiatore durante il test. La resistenza termica del foro R_b è la resistenza equivalente del volume tra la superficie interna della sonda, in contatto con il fluido termovettore, e la superficie esterna del foro, in contatto con il terreno (figura 9). E' un parametro che dipende dai materiali della miscela cementizia e dei tubi, dalla geometria del foro e dalle proprietà e dal tipo di

moto del fluido circolante; può essere stimato per ogni sonda tramite un calcolo di conduzione / convezione in genere considerando omogenei i materiali della miscela e del collettore e regolare la sezione del foro .

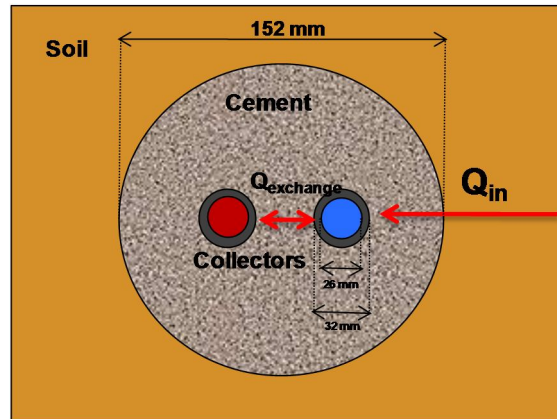


Figura 9 Pianta dall'alto di una sonda geotermica verticale

Per ottenere λ_g e R_b il sistema è approssimato tramite un modello termico che permette di stimare indirettamente questi parametri dai risultati del TRT, in particolare con riferimento alle proprietà del fluido di circolazione: temperatura di ingresso, temperatura di uscita, portata. Esistono diversi modelli disponibili; il più utilizzato e popolare è la Sorgente Lineare Infinita (Infinite Line Source - ILS), ma esistono anche il modello della Sorgente Lineare Finita (Finite Line Source – FLS) e il modello della Sorgente Lineare Cilindrica (Cylindrical Line Source – CLS). (Gehlin, 2002). Il metodo che viene proposto è il metodo ILS, che è basato sulle seguenti approssimazioni iniziali:

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.

Il problema è stato risolto per condizioni di stato stazionario dall'equazione semplificata di Hellstrom, Eskilson e Mogensen (Eskilson, 1987):

$$T_g - T_b(t) = p \cdot R_g = \frac{p}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g} \left(\ln \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot t}{r_b^2} - \gamma \right) \quad (11)$$

Dove T_g [°C] è la temperatura del terreno indisturbato, già calcolata nel paragrafo 2.1.2 e $T_b(t)$ [°C] è la temperatura media sulle pareti del foro; t [s] è la durata del test; p [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]; R_g [K·m/W] è la resistenza termica equivalente del terreno che circonda il foro; λ_g [W/(m·K)] è la conduttività termica equivalente del terreno; r_b [m] è il raggio del foro; α_g [m²/s] è la diffusività termica equivalente del terreno; è uguale al rapporto tra λ_g e la capacità termica volumetrica media del terreno c_g [J/(m³·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. Ciononostante la semplificazione comune di considerarli costanti, spesso giustificata dall'ordine di grandezza delle variazioni effettive, permette di soddisfare la relazione teorica per il problema (Witte, 2009).

L'accuratezza del modello ILS dipende non solo dalle approssimazioni considerate, ma soprattutto dall'esistenza di condizioni di stato stazionario postulate. Diverse indagini sperimentali hanno confermato l'ipotesi teorica per cui l'accuratezza dipende dalle caratteristiche del foro (raggio e diffusività termica dei materiali) e che l'equazione ILS semplificata è accettabile per tempi superiori a $t \geq 5 \cdot \frac{r_b^2}{\alpha_b^2}$ dove i parametri sono tutti riferiti al foro (Eklof, 1996).

Normalmente R_b è considerata costante e vale la seguente relazione:

$$T_f(t) - T_b(t) = R_b \cdot p \quad (12)$$

Dove la temperatura del fluido termovettore $T_f(t)$ [°C] è generalmente considerata pari alla media tra la temperatura del fluido in ingresso $T_{f,in}(t)$ [°C] e la temperatura del fluido in uscita $T_{f,out}(t)$ [°C], misurate a bocca foro. Alcune ricerche recenti hanno valutato metodi alternativi alla media

aritmetica per il calcolo della T_f , che considerano la dipendenza dalla profondità della quota di flusso di calore scambiato tra il terreno e il fluido.

Le due resistenze R_g e R_b sono disposte in serie (figura 10), così che, in condizioni di stato stazionario, per un costante ammontare di potenza iniettata P , la variazione di temperatura totale sia la somma di due ΔT (figura 11): la differenza di temperatura tra il fluido termovettore e la superficie esterna del foro e la differenza di temperatura tra la superficie esterna del foro e il terreno indisturbato. Pertanto, la differenza di temperatura $\Delta T(t)$ può essere espressa da:

$$\Delta T(t) = p \cdot (R_b + R_g) = p \cdot \left(R_b + \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g} \left(\ln \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot t}{r_b^2} - \gamma \right) \right) \quad (13)$$

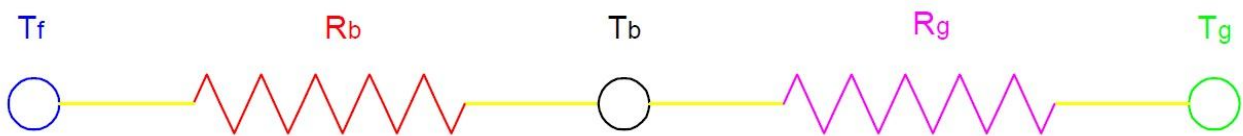


Figura 10 Modello termico resistivo dello scambio termico interno tra fluido e terreno

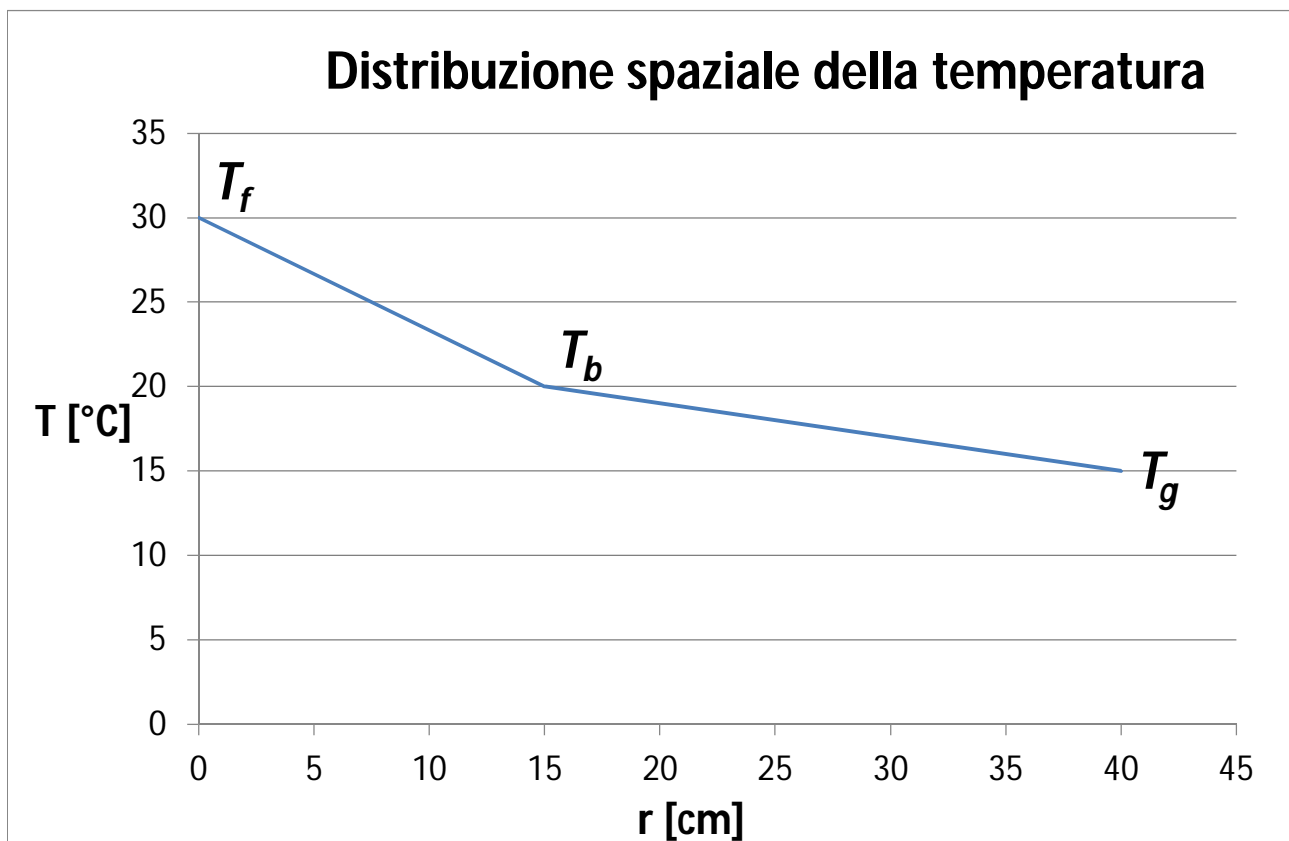


Figura 11 Evoluzione della temperatura lungo la distanza radiale del foro

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, $R_g(t)$, così che semplicemente T_g 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 P e la lunghezza attiva della sonda D , è possibile esprimere $T_f(t)$ nella seguente forma:

$$T_f(t) = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g \cdot D} \cdot \ln t + \left[\frac{P}{D} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha_g}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right) + T_g \right] \quad (14)$$

Questa equazione si risolve in una retta nella dimensione del logaritmo del tempo

$$T_f(t) = b \cdot \ln t + a \quad (15)$$

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

$$a = T_g + \frac{P}{D} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot \alpha_g}{r_b^2} - \gamma \right) + R_b \right) \quad (16)$$

$$b = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g \cdot D} \quad (17)$$

Da questo momento in poi chiameremo $\ln(t)$ come τ .

La pendenza b e l'intercetta a vengono stimate operando una classica regressione lineare (figura 12) sul vettore delle n temperature sperimentali del fluido, T_{fi} , registrate ai tempi t_i , ma solo dopo che il TRT ha raggiunto condizioni di stato quasi stazionario.

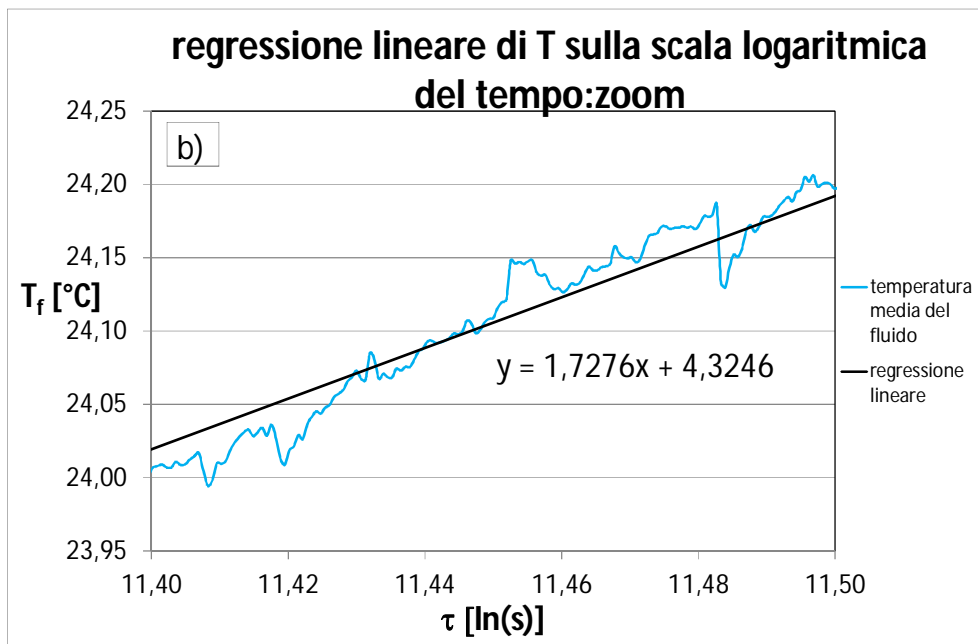
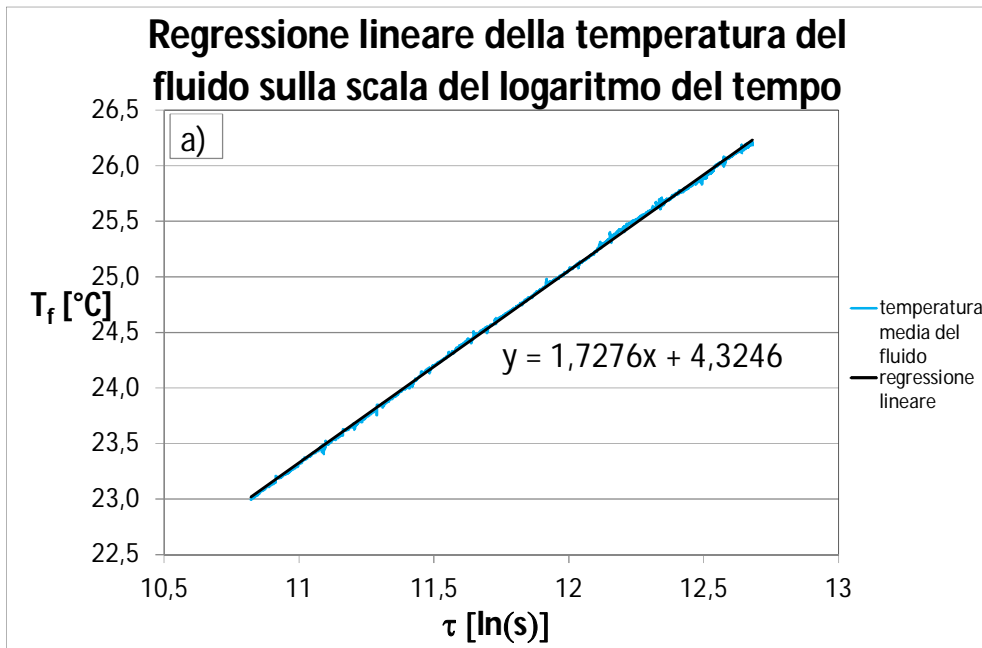


Figura 12 Regressione lineare della temperatura sulla scala logaritmica del tempo: intero (a) e zoom (b)

Conoscendo il valore della pendenza di regressione b , è possibile derivare un valore stimato di λ_g , indipendente dal tempo (Gehlin, 2002):

$$\lambda_g^* = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot b^*} \quad (18)$$

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

$$R_b^* = \frac{P}{D} \cdot (a^* - T_g^*) - \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g^*} \left(\ln \frac{4 \cdot \frac{\lambda_g^*}{(c_g)^G}}{r_b^2} - \gamma \right) \right) \quad (19)$$

La procedura usuale è basata puramente sul modello conduttivo con note condizioni al contorno; P 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 , α_b e t_f 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 (approssimazione originariamente adottata dal modello).

Esistono modelli numerici che in principio possono dare una risposta a molte delle osservazioni sopra riportate, ma non a tutte. Inoltre, è desiderabile un approccio differente, capace di tenere in conto i diversi fattori secondari che si discostano dalla teoria e dalle assunzioni del test.

2.1.4 Il problema del controllo della potenza termica

Una delle assunzioni basiche per il successo di un Test di Risposta Termica e per la corretta applicazione della teoria ILS è basata sul mantenimento della potenza termica iniettata / estratta costante, per tutta la durata del test. In questo modo, assumendo portata costante e potenza costante, avviene il graduale incremento / decremento della temperatura del fluido, solamente dovuto ai fenomeni di trasporto termico che occorrono all'interno del foro (Witte, 2002).

La potenza termica è una funzione dei parametri fisici del fluido

$$P = \frac{M_f}{\rho_f} \cdot c_f (T_{f,in} - T_{f,out}) \quad (20)$$

Dove P [W] è la potenza termica iniettata o estratta, M_f [kg/s] è la portata in massa del fluido, ρ_f [kg/m³] la densità del fluido, c_f [J/(m³·K)] la capacità termica volumetrica del fluido e $T_{f,in}$ e $T_{f,out}$ [°C] le temperature rispettivamente di ingresso e uscita del fluido dal foro.

Per ottenere il valore di potenza da un Test di Risposta Termica, occorre misurare, ad intervalli regolari, i valori di portata del fluido (in massa o in volume) e le temperature di ingresso ed uscita del fluido, facendo attenzione che ogni misura presa sia relativa all'istante di iniezione di flusso termico considerato.

La portata del fluido è misurata con un flussimetro, del quale esistono differenti tipi, con differenti caratteristiche. In generale la portata volumetrica è misurata con un flussimetro di tipo elettromagnetico, in quanto è uno strumento robusto e facilmente integrabile; altri metodi includono flussimetri a pressione differenziale, a vortice, sonici o meccanici. E' anche possibile direttamente misurare la portata in massa (per esempio utilizzando un flussimetro tipo Coriolis). Gli errori dei flussimetri sono usualmente indicati come una percentuale del flusso misurato, a volte con un valore minimo addizionale sotto una certa soglia. Ci può essere una dipendenza addizionale dell'errore dalla temperatura, ma in genere è molto piccola e viene ignorata. L'accuratezza tipica del flussimetro elettromagnetico è di +/- 0,33% sul valore di portata in volume, mentre per quanto riguarda i flussimetri in massa tipo Coriolis l'accuratezza è dell'ordine di +/- 0,15%.

Le temperature del fluido sono misurate generalmente tramite la stessa tipologia di sensori utilizzati per la misura della temperatura del terreno indisturbato, termoresistenze o termocoppie. Pertanto anche l'accuratezza è la medesima, pari a +/- 0,2°C.

Occorre però anche considerare la propagazione di tali errori. Per quanto riguarda la differenza tra temperatura di ingresso ed uscita, la sua precisione dipende dalla precisione delle misure di temperatura. Se gli errori commessi nella rilevazione delle due temperature sono casuali ed indipendenti, la deviazione standard dell'errore sulla misura della differenza di temperatura può essere dedotta dalla deviazione standard degli errori di misura delle due temperature, come segue:

$$\delta\Delta T_f = \sqrt{(\delta T_{f,in})^2 + (\delta T_{f,out})^2} \quad (21)$$

Per quanto riguarda la temperatura media tra ingresso ed uscita, la relazione che lega la deviazione standard dell'errore di misura della temperatura media con le deviazioni standard delle temperature misurate è la seguente:

$$\delta T_f = \frac{\sqrt{(\delta T_{f,in})^2 + (\delta T_{f,out})^2}}{2} \quad (22)$$

Come si evince, la precisione sulla differenza di temperatura, che influisce attivamente sul valore di potenza, è la metà rispetto alla precisione sulla media delle temperature.

A ciò occorre aggiungere che densità e calore specifico di un fluido non sono valore costanti, ma sono influenzati dalle condizioni della temperatura e della pressione.

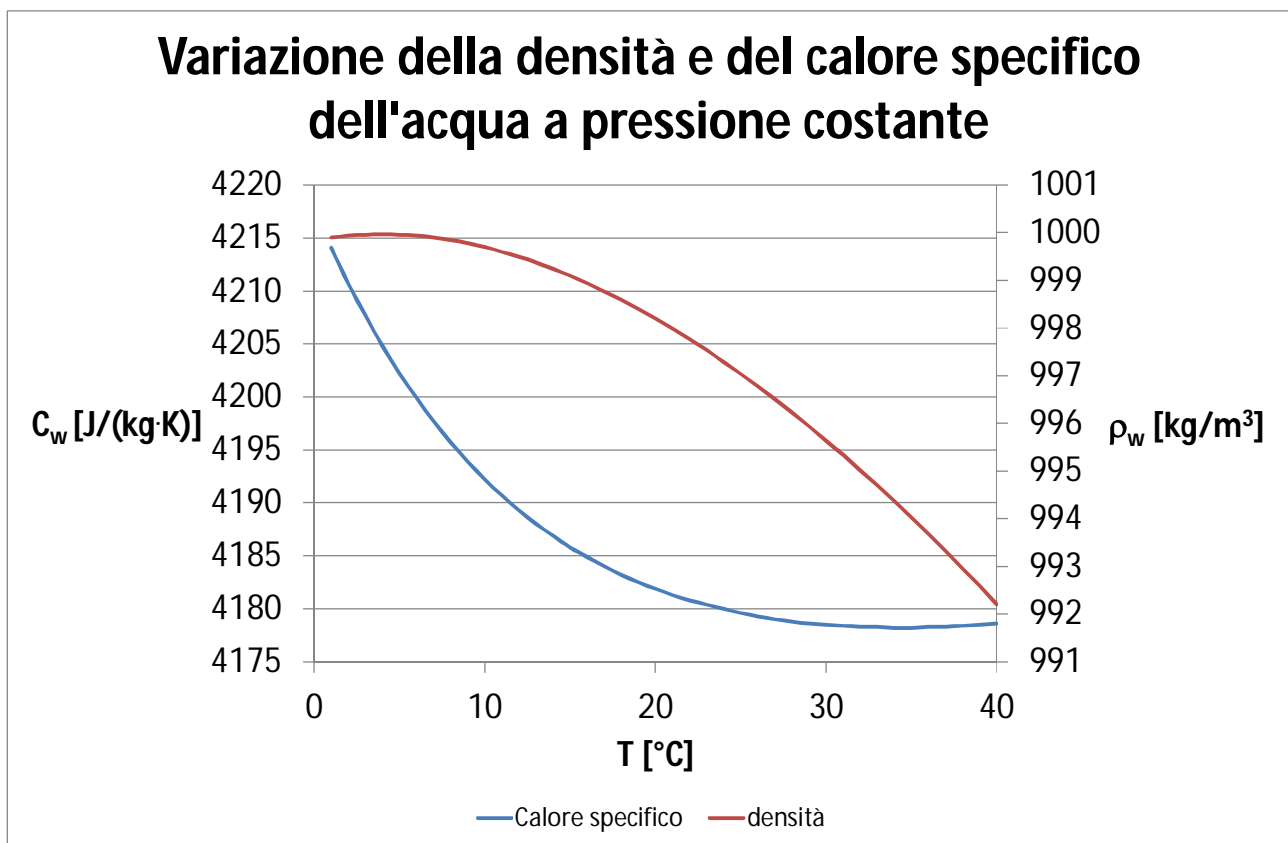


Figura 13 Dipendenza dalla temperatura del calore specifico e della densità per il fluido acqua

Considerando poi che la capacità termica volumetrica del fluido è funzione del calore specifico e della densità, secondo l'equazione 3, la variazione della capacità termica volumetrica del fluido segue quindi anch'essa la variazione della temperatura.

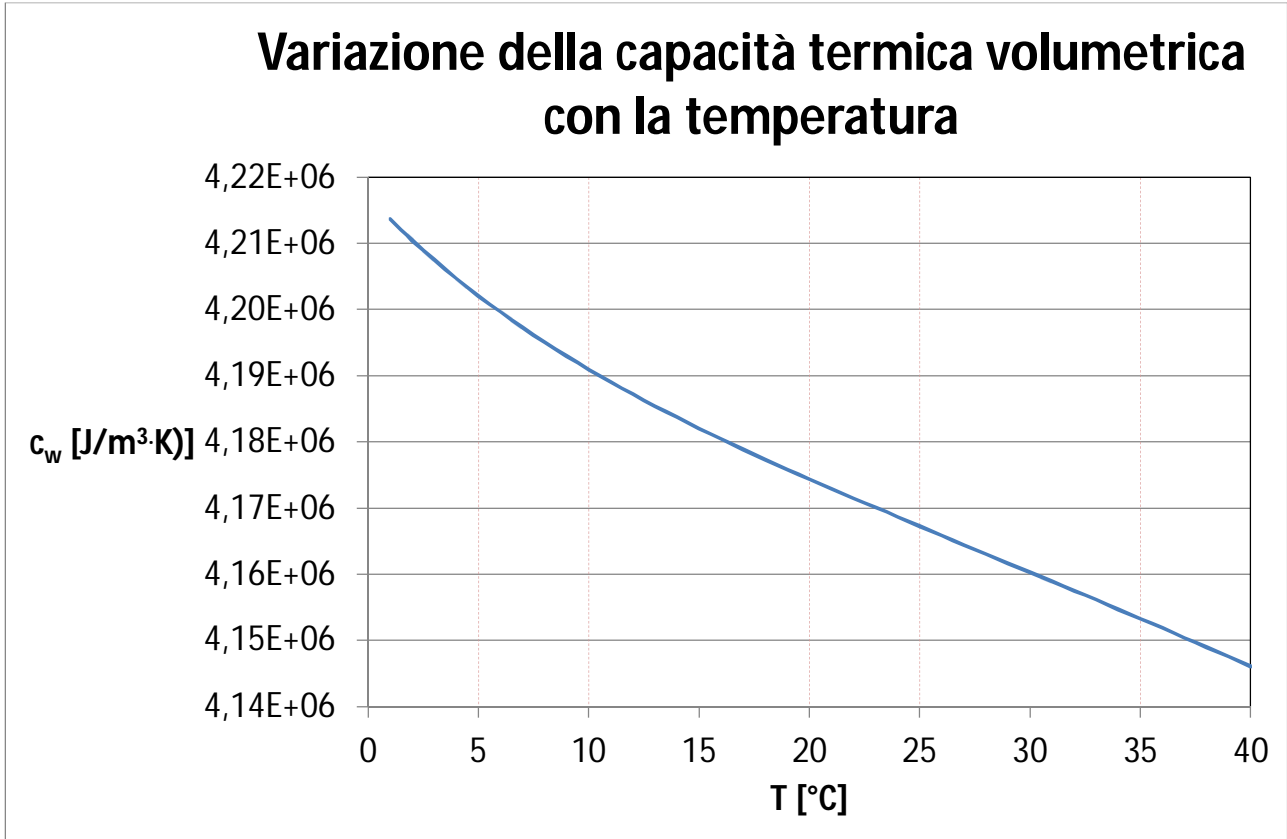


Figura 14 Dipendenza dalla temperatura della capacità termica volumetrica per il fluido acqua

Durante l'esecuzione di un TRT perfetto, la pressione del fluido rimane costante, mentre la temperatura necessariamente varia, in seguito all'iniezione di potenza. Pertanto, le proprietà del fluido variano e conseguentemente la potenza termica fluttua intorno al valore medio nel tempo.

L'applicazione tradizionale della teoria utilizza un unico valore di potenza per l'analisi del test, una volta calcolata la temperatura media del fluido durante tutto il periodo di test e i risultanti valori di densità e capacità termica volumetrica.

$$P(T_{f,m}) = \frac{M_f}{\rho_f(T_{f,m})} \cdot c_f(T_{f,m}) \cdot (T_{f,in} - T_{f,out}) \quad (23)$$

$$T_{f,m} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{f,in,i} + T_{f,out,i}}{2} \right)}{n} \quad (23)$$

Questo valore calcolato deve avvicinarsi al valore medio della potenza registrata durante l'esecuzione del test tramite i dati sperimentali. La divergenza tra il valore di calcolo e il valore medio sperimentale comporta necessariamente una fonte di errore.

Un'altra causa di errore deriva dalle fluttuazioni attorno al valore medio della potenza durante il test, che dipendono dal grado di accuratezza dei sensori della macchina utilizzata e dal grado di isolamento termico dei collegamenti tra la sonda e la macchina; nel percorso del fluido all'interno dei collegamenti, infatti, il fluido riceve o un apporto gratuito di calore dall'irraggiamento solare o una cessione di calore all'ambiente, che, se rilevanti, potrebbero falsare i dati sperimentali raccolti.

2.1.5 L'influenza del moto dell'acqua di falda sui risultati del test

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

diversi metodi per verificare la presenza della componente convettiva in un Test di Risposta Termica, di forza tale da inficiare il risultato della ILS.

Esistono diversi possibili moti di fluido all'interno di un terreno e di un foro in cui viene realizzato un Test di Risposta Termica su una sonda verticale. Questi sono:

- moto naturale laterale, all'interno del mezzo poroso o fratturato, causato da una differenza di potenziale (Gehlin, 2002);
- moto per convezione naturale indotta, a piccola o a grande scala, causato da una differenza di temperatura (Gustaffson, 2011)
- infiltrazione di acqua piovana o di altra provenienza dentro o nei dintorni del foro;
- effetto termosifone (Gehlin, 2003);
- perforazioni o pompaggio nelle vicinanze del foro (Austin, 1995).

Gli effetti sul TRT, rispetto alla situazione statica, sono:

- effetto sulla fase transitoria: il tempo di transizione risulta accorciato o allungato, rispetto alla situazione statica;
- effetto sull'intercetta a : il valore di capacità termica equivalente del terreno risultante dall'analisi non corrisponde al valore effettivo del terreno;
- effetto sull'intercetta a : il valore di resistenza termica del foro risultante dall'analisi risulta inferiore al valore effettivo del manufatto in condizioni statiche;
- effetto sulla pendenza b : il valore di conduttività termica equivalente del terreno risultante dall'analisi non corrisponde al valore effettivo del terreno;
- effetto sulla pendenza b : il valore di conduttività termica risultante dall'analisi potrebbe continuare a crescere all'aumentare del tempo del test, fino ad avere una tendenza all'infinito per moti di acqua di falda rilevanti.

Di seguito si riportano le configurazioni/combinazioni di sonda, materiale di riempimento e terreno in cui è possibile il verificarsi dell'influenza termica della componente convettiva dovuta alla

presenza di acqua sul comportamento della sonda verticale, e come si manifesta nella misurazione dei dati del TRT.

Per ognuna di essi vengono analizzate le variazioni al trasporto di calore generate dal movimento dell'acqua, sempre con riferimento alla condizione base di assenza o trascurabilità di fenomeni convettivi, sia per quanto riguarda i parametri termici (conduttività termica del terreno, capacità termica del terreno, resistenza termica del foro e temperatura del terreno indisturbato), sia per l'evoluzione delle misure registrate (profilo termico di temperatura, pendenza della retta di regressione su scala logaritmica sui dati di temperatura del TRT, intercetta della retta con l'asse delle temperature).

L'intensità di tali variazioni dipende dall'effettivo grado di manifestazione della componente convettiva / advettiva. 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;
- dalla differenza di temperatura tra il fluido termovettore e l'acqua di falda.

Per tutti i casi, viene seguita la presente legenda del terreno:

LEGENDA



MEZZO
IMPERMEABILE



MEZZO POROSO
PERMEABILE



MEZZO FRATTURATO
PERMEABILE

Figura 15 Legenda per i casi di influenza dell'acqua di falda sul comportamento del TRT.

Caso 1: Influenza dell'acqua di falda laterale, attraverso i pori (legge di Darcy)

Il movimento dell'acqua di falda nei pori può avvenire per tutta la lunghezza della sonda o solo in intervalli di terreno poroso.

Il trasferimento di calore è maggiorato, il che porta ad avere:

- conduttività termica apparente superiore a quella effettiva del terreno;
- temperatura del terreno indisturbato inferiore a quella prevedibile sulla base del gradiente geotermico normale;
- capacità termica del terreno e resistenza termica del foro conformi ai valori effettivi.

Il comportamento registrato dalle misure termometriche in foro e dal Test di Risposta Termica è differente a seconda che si tratti di un solo strato poroso e permeabile o di tutta la lunghezza del foro.

Per quanto riguarda il caso di mezzo poroso attraversato da acqua di falda in movimento lungo tutta la verticale del foro, si hanno le seguenti variazioni nelle misure effettuate per mezzo del sensore di temperatura calato in foro e del TRT:

- profilo di temperatura sistematicamente inferiore alla condizione base andamento lungo tutta la verticale del foro;
- pendenza della retta inferiore alla condizione base;
- nessuna variazione dell'intercetta.

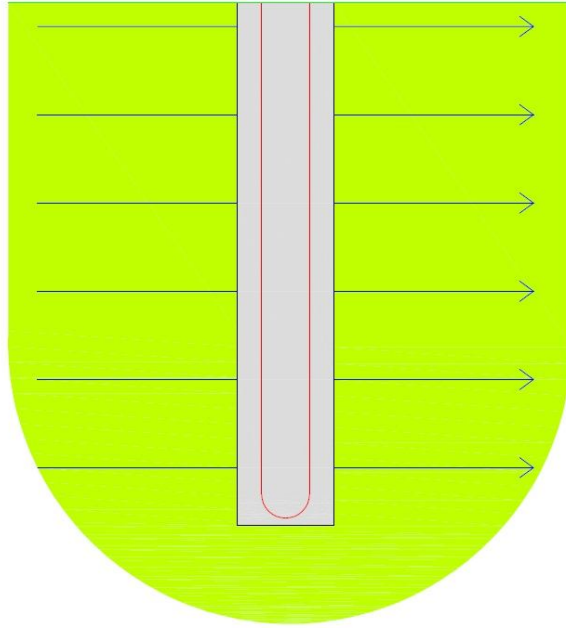


Figura 16 Caso 1a: schema del movimento dell'acqua di falda nel mezzo poroso e interazione con la sonda geotermica verticale

Per quanto riguarda invece il movimento dell'acqua di falda in un unico strato poroso, il suo manifestarsi durante le misurazioni in situ è il seguente:

- profilo di temperatura localmente inferiore alla condizione base, per poi riprendere l'andamento regolare dovuto al gradiente geotermico negli strati inferiori;
- pendenza della retta inferiore alla condizione base;
- nessuna variazione dell'intercetta.

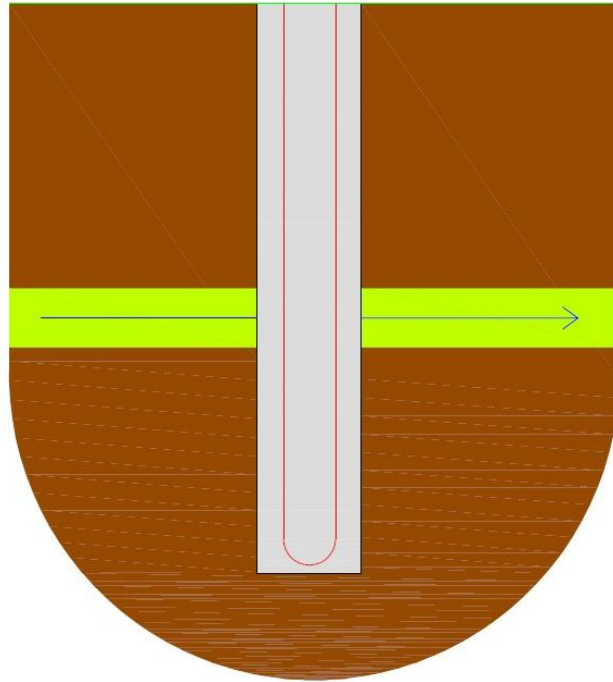


Figura 17 Caso 1b: schema del movimento dell'acqua di falda nell'unico strato poroso e interazione con la sonda geotermica verticale

Caso 2: Flusso laterale nel mezzo fratturato. Possibilità che qualche frattura tocchi il foro.

In caso di mezzi fratturati, il comportamento è comparabile con il comportamento nello strato poroso. L'intensità della componente convettiva/advettiva può manifestarsi maggiorata rispetto al caso precedente, in seguito a velocità dell'acqua maggiori

L'effetto sui parametri termici è il seguente:

- conduttività termica apparente superiore a quella effettiva del terreno;
- temperatura del terreno indisturbato inferiore a quella prevedibile sulla base del gradiente geotermico normale;
- capacità termica del terreno e resistenza termica del foro conformi ai valori effettivi.

Il manifestarsi di questi fenomeni nelle misurazioni in situ è il seguente:

- profilo di temperatura localmente inferiore alla condizione base, per poi riprendere l'andamento regolare dovuto al gradiente geotermico negli strati inferiori;
- pendenza della retta inferiore alla condizione base;

- nessuna variazione dell'intercetta.

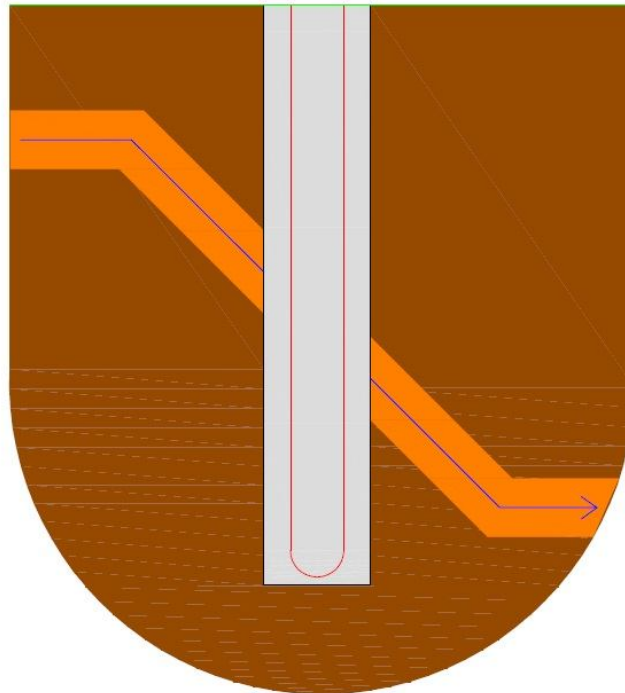


Figure 18 Caso 2: schema del movimento dell'acqua di falda nell'unico strato fratturato permeabile e interazione con la sonda geotermica verticale

Caso 3: Convezione indotta, nei mezzi porosi.

Una differenza di temperatura elevata tra fluido termovettore e l'acqua di falda può generare nel mezzo poroso una variazione di densità, con il conseguente innescarsi di fenomeni di convezione naturale. Il movimento dell'acqua di falda è in genere anulare.

Questo effetto può manifestarsi in due modi:

In caso di sonda verticale perfettamente cementata, la convezione naturale indotta si manifesta negli strati di terreno poroso che circonda la sonda geotermica. L'effetto è in genere molto modesto, e viene detto di *piccola scala*.

L'effetto sui parametri termici è il seguente:

- Nessuna variazione rilevante della conduttività termica del terreno;
- Capacità termica del terreno apparente inferiore rispetto al valore effettivo;

Per quanto riguarda le misurazioni del TRT, accadono i seguenti fenomeni:

- nessuna variazione della pendenza;
- intercetta inferiore alla condizione base;
- nessuna rilevanza per il profilo misurato di temperatura del terreno indisturbato, in quanto il movimento avviene successivamente all'iniezione di calore.

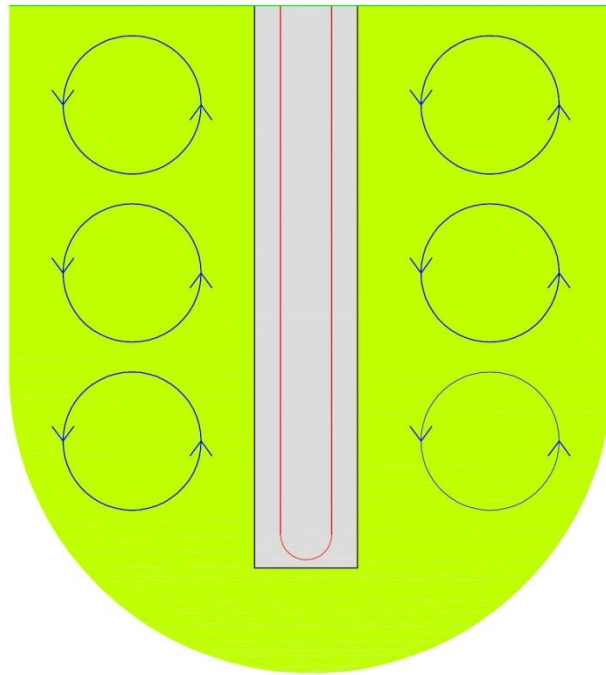


Figura 19 Caso 3a: schema del movimento dell'acqua di falda nel mezzo permeabile in seguito a convezione naturale generata dalla differenza di temperatura tra fluido termovettore e acqua di falda

In caso di sonda verticale non perfettamente cementata, oppure riempita con materiali permeabili, o in caso di sonde verticali immerse in acqua di falda (usuale tecnica di installazione dei Paesi del Nord Europa), la convezione naturale indotta si manifesta all'interno del foro. Rispetto alla precedente situazione, l'effetto è molto più marcato, e viene detto di *grande scala*.

L'effetto sui parametri termici è il seguente:

- nessuna variazione rilevante della conduttività termica del terreno;
- resistenza termica del foro inferiore al valore teorico di progetto;
- capacità termica apparente del terreno inferiore al valore effettivo, negli strati permeabili intorno alla sonda.

Per quanto riguarda le misurazioni del TRT, accadono i seguenti fenomeni:

- nessuna variazione della pendenza;
- intercetta inferiore alla condizione base;
- nessuna rilevanza per il profilo misurato di temperatura del terreno indisturbato, in quanto il movimento avviene successivamente all'iniezione di calore.

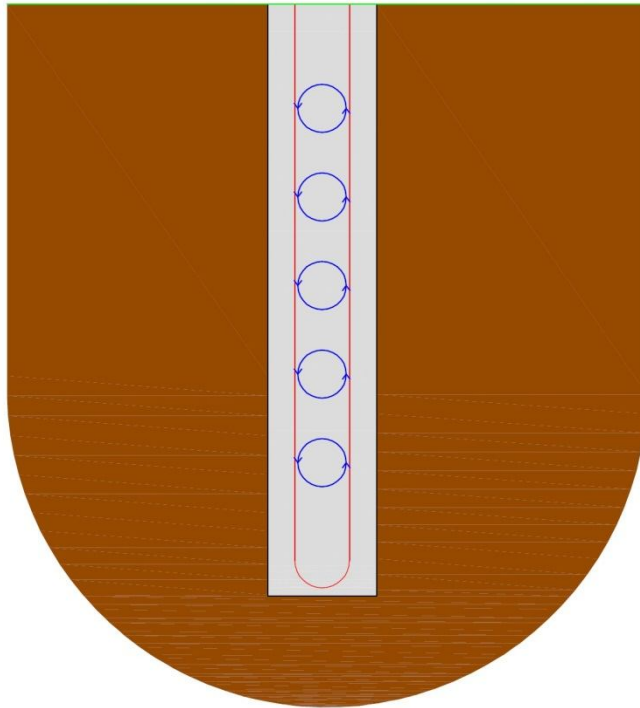


Figura 20 Caso 3b: schema del movimento dell'acqua di falda all'interno del foro, in seguito a convezione naturale generata dalla differenza di temperatura tra fluido termovettore e acqua presente nel foro

Caso 4: Movimento verticale nel foro

Questo movimento avviene o in fori aperti con sonde inserite in acqua di falda o in fori cementati male. In particolare possono avvenire due fenomeni:

- infiltrazione di acqua piovana dall'alto della sonda;
- effetto termosifone tra due strati permeabili a differente quota comunicanti solo attraverso il foro.

In entrambi i casi l'effetto sui parametri è il seguente:

- conduttività termica del terreno apparente superiore al valore effettivo;
- resistenza termica del foro inferiore al valore teorico di progetto;
- capacità termica del terreno apparente inferiore al valore effettivo;
- temperatura del terreno indisturbato modificata localmente alla scala della sonda verticale.

Per quanto riguarda le misurazioni in situ, si registrano i seguenti fenomeni:

- pendenza della retta inferiore al valore della condizione base;
- intercetta della retta inferiore al valore della condizione base;
- profilo di temperatura modificato rispetto alla condizione base; il sensore calato nella sonda non rileva la temperatura media del terreno indisturbato nel punto, ma rileva la temperatura modificata dell'acqua di infiltrazione, non risultando pertanto attendibile come campione del profilo di temperatura del terreno indisturbato del campo geotermico.

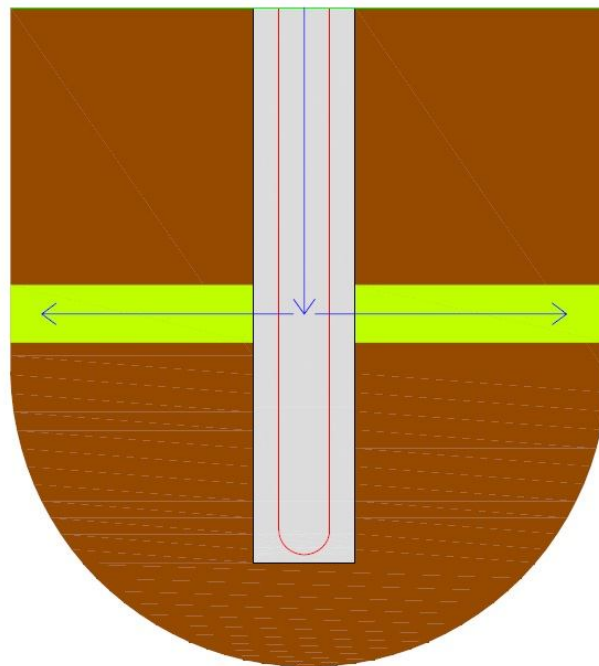


Figura 21 Caso 4a: schema del movimento dell'infiltrazione dell'acqua piovana nel foro e del successivo ingresso nello strato permeabile

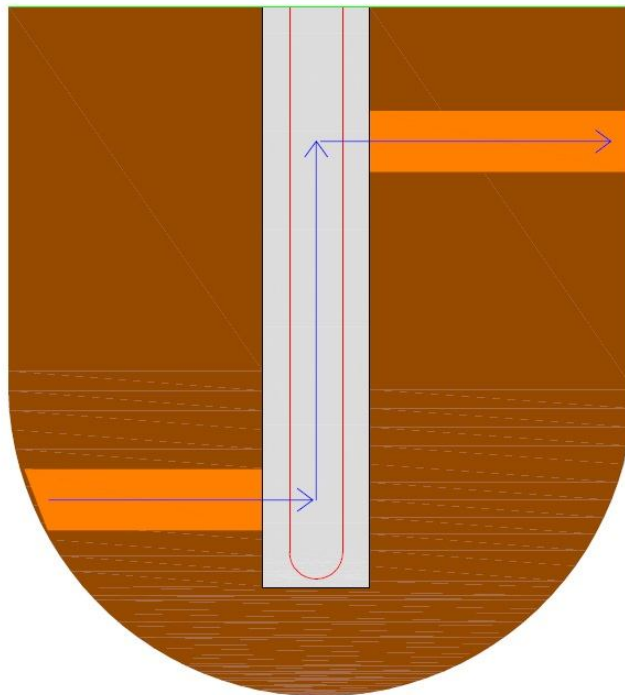


Figura 22 Caso 4b: schema dell'effetto termosifone: infiltrazione di acqua di falda nel foro dagli strati inferiori permeabili e successiva risalita, per variazione di densità dovuta alla variazione di temperatura (effetto termosifone) fino all'ingresso in un secondo strato permeabile, non naturalmente collegato al primo.

Caso 5: pompaggio o perforazione nelle vicinanze del TRT

Queste procedure, effettuate nelle vicinanze della sonda dove si esegue il Test di Risposta Termica, possono provocare un abbassamento (pompaggio dalla falda ed estrazione di acqua) o innalzamento (perforazione ad acqua) della falda locale. Inoltre inducono un movimento di quest'acqua. Soprattutto nel caso della perforazione, infine, vi è un effetto termico che incrementa la temperatura dell'acqua di falda stessa. Il comportamento del TRT durante la prova è influenzato da questi effetti, a livello discontinuo. Per tale motivo, in casi in cui avvengano questi fenomeni, il risultato della prova è da scartare. Occorre prevedere una distanza di sicurezza del TRT da operazioni di questo tipo.

I parametri termici sono completamente stravolti rispetto ai valori effettivi. Per quanto riguarda le misure del TRT, l'andamento della curva dei dati di temperatura nel tempo non è costante, in quanto è influenzata dalle variazioni temporali delle operazioni di pompaggio / perforazione. Per

tale motivo, è possibile individuare dai dati di misura un TRT affetto da questo tipo di problema e quindi ripetere il Test successivamente in condizioni statiche.

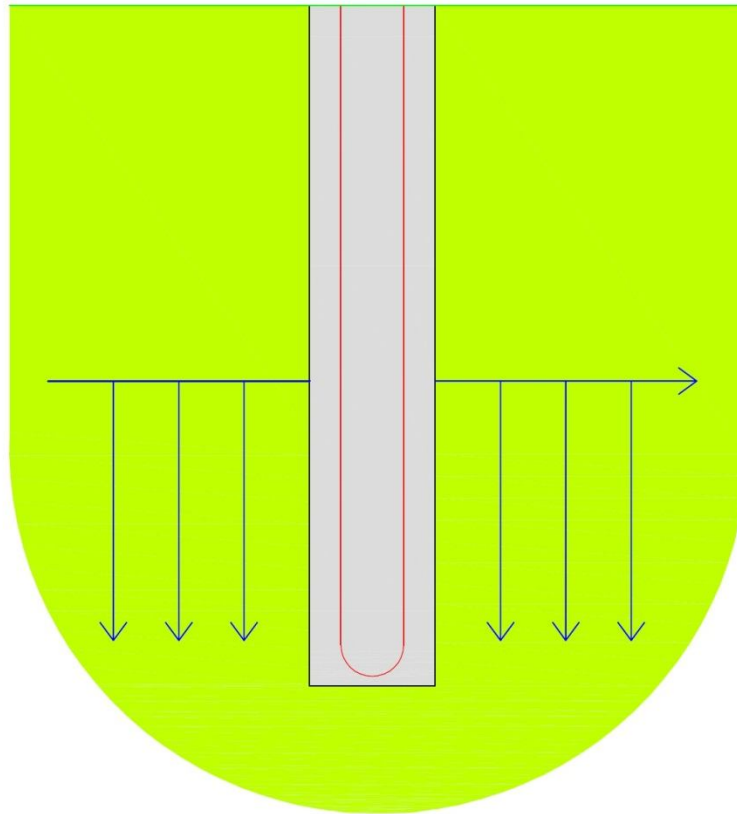


Figura 23 Caso 5a: schema dell'effetto delle operazioni di pompaggio sul movimento della falda nell'intorno della sonda verticale; il pompaggio richiama acqua nel pozzo dai terreni nelle prossimità, generando un moto della falda (Nello schema, il pozzo di estrazione e la pompa sono posizionati sulla destra della sonda). Il livello della falda si abbassa in seguito all'estrazione di acqua

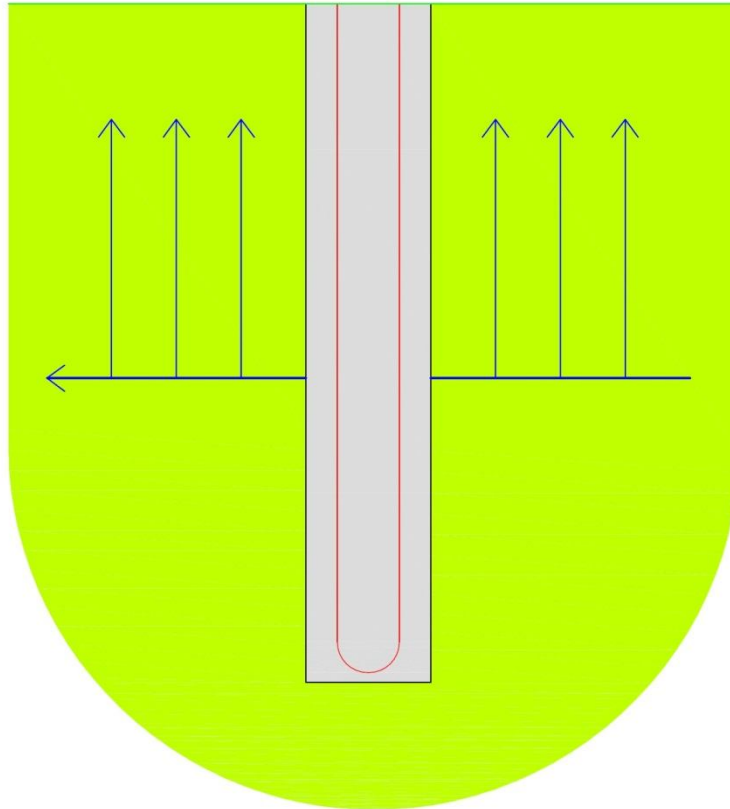


Figura 24 Caso 5b: schema dell'effetto delle operazioni di perforazione sul movimento della falda nell'intorno della sonda verticale; la perforazione immette acqua (o anche aria o fanghi bentonitici) all'interno del foro nei terreni nelle prossimità della sonda, generando un moto della falda (Nello schema, il foro in fase di perforazione è posizionato sulla destra della sonda). L'acqua iniettata si scalda a seguito del calore rilasciato dalla macchina perforatrice. Infine, il livello della falda si innalza in seguito all'iniezione di acqua

Tutti gli effetti presentati sono potenzialmente sommabili, anzi difficilmente si incontrerà in qualunque TRT un solo effetto convettivo. Pertanto può risultare complicato tramite un TRT distinguere i diversi effetti e comprendere la componente convettiva preponderante. In ogni caso alcune tecniche esistono per valutare la presenza o meno della componente convettiva e sono di seguito presentate.

Poiché l'analisi ILS prevede uno scambio termico conduttivo nello stato stazionario, per ogni TRT si può testare la veridicità del modello sul caso reale, verificando la convergenza dei

risultati ottenuti a diversi intervalli di tempo, all'interno dello stato stazionario.

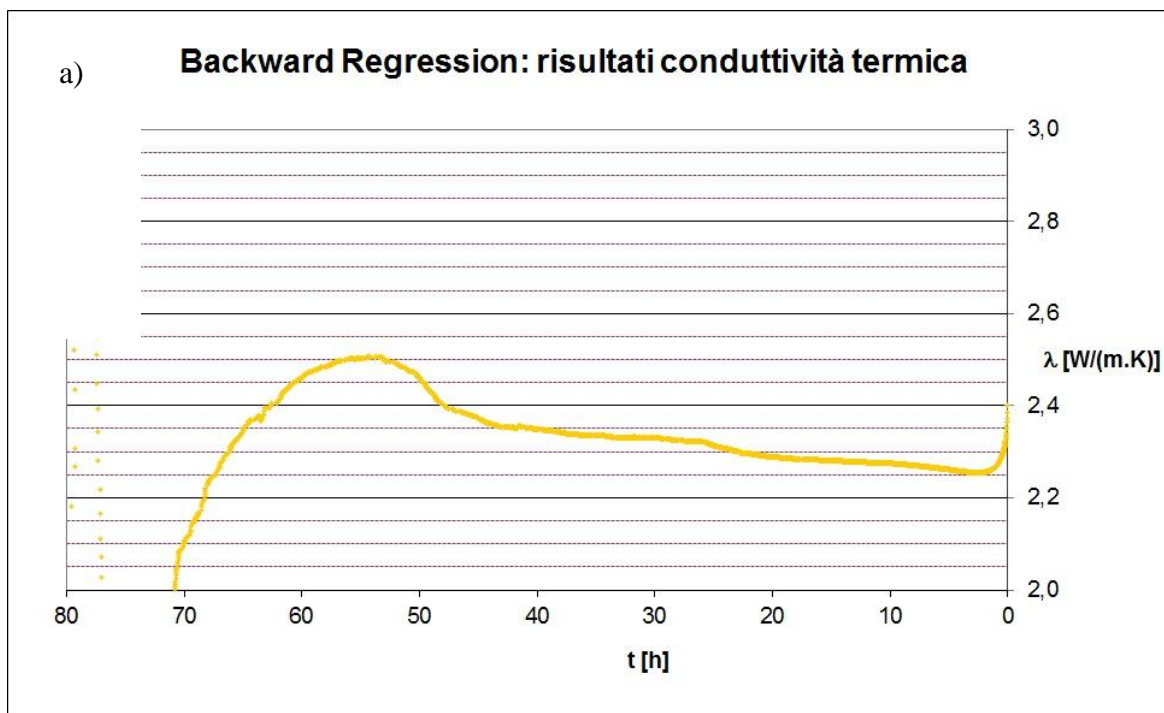
La convergenza del risultato di un TRT (in primo luogo del valore di λ_g) può essere provata tramite una graduale valutazione dei dati del test. Se i dati sperimentali seguono il modello previsto di trasferimento del calore nel sottosuolo, il risultato raggiunge un valore costante dopo un certo periodo di tempo. In questo caso, si può assumere che il trasferimento di calore nel suolo segua il modello di valutazione previsto e che il tempo di valutazione sia abbastanza grande per fornire la precisione statistica necessaria. Questa tecnica si può applicare facilmente alla soluzione analitica data dalla Sorgente Lineare Infinita, ma può essere implementata anche nelle valutazioni numeriche (Bandos, 2011)

Assumendo un'analisi di tipo ILS, la valutazione della convergenza è realizzata effettuando la regressione lineare della temperatura media del fluido sulla scala semilogaritmica, che fornisce i valori di pendenza e intercetta della retta, e conseguentemente λ_g e R_b . Muovendo il punto iniziale della regressione, il punto finale o entrambi nel tempo, nello stato stazionario secondo la teoria ILS non dovrebbe verificarsi nessuna variazione del risultato. Nella pratica sperimentale variazioni del risultato, funzione dei punti di inizio e di fine nel tempo, accadono sempre. L'ampiezza di tali variazioni mostra in quali casi la componente convettiva possa essere trascurata, e quindi possa essere ritenuto corretto il modello ILS, e in quali invece la componente convettiva non possa essere trascurata. In quest'ultimo caso, il risultato trovato di λ_g per mezzo dell'applicazione del modello ILS risulta di per sé inutilizzabile ai fini della progettazione, ma il TRT fornisce comunque dati interessanti relativi alla capacità di scambio termico del sottosuolo. Tali dati non risultano esaustivi, ma dovranno poi essere integrati da un'analisi idrogeologica del mezzo per definire la velocità del moto di acqua di falda e conseguentemente il suo impatto su un progetto di sistema geotermico. Di seguito si illustrano le tre possibili tecniche per ottenere le curve di convergenza.

Tecnica 1: Regressione in indietro (backward regression)

In questa tecnica, si assume il punto finale delle registrazioni di temperatura utili come il punto di fine della valutazione t_{end} ai fini della regressione, che si tiene fisso. Il punto iniziale della valutazione t_{start} è imposto al tempo t uguale a zero. t_{start} è quindi aumentato con un passo costante. All'aumentare di t_{start} corrisponde via via un intervallo di tempo minore su cui fare la regressione. Il risultato ottenibile è funzione del tempo di inizio.

Di seguito si riportano i grafici della regressione in indietro riferiti al set di dati sperimentale dell'esempio.



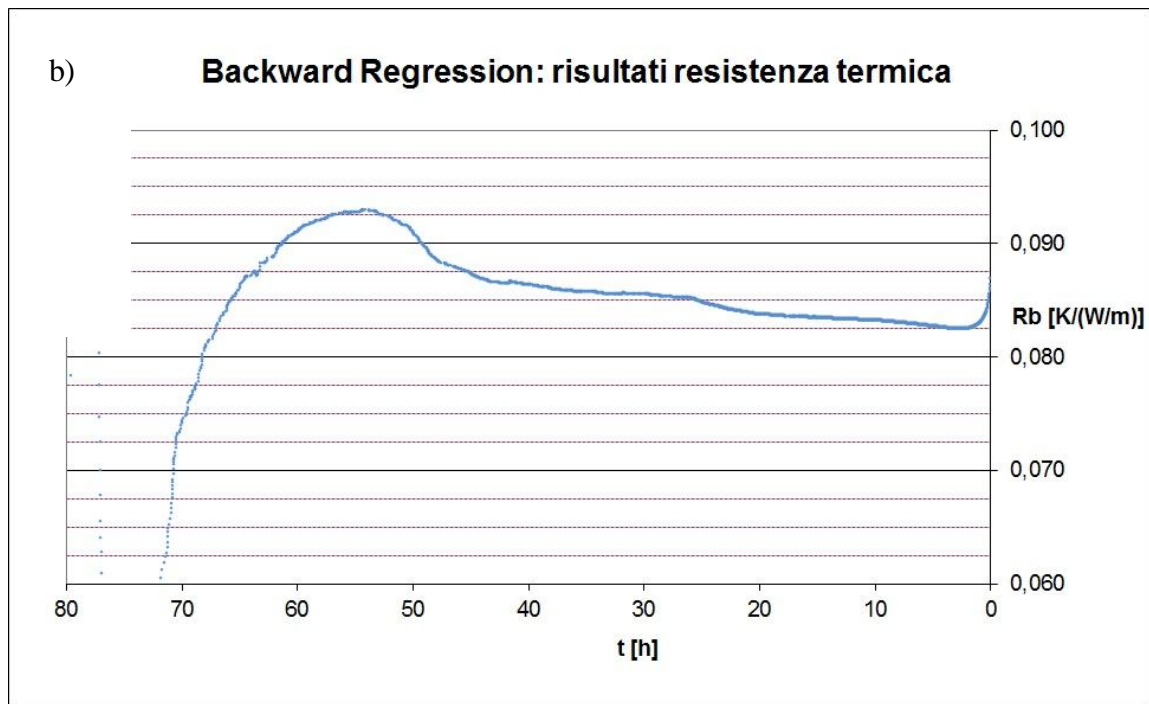


Figura 25 Evoluzione del risultato della regressione all'indietro per il calcolo della conduttività termica del terreno (a) e della resistenza termica del foro (b), in funzione del tempo iniziale dell'intervallo.

Tecnica 2: regressione in avanti (forward regression)

Il punto temporale iniziale per la valutazione t_{start} è questa volta fissato al criterio di tempo minimo per la soluzione approssimata in stato stazionario t_0 (per i modelli numerici questo punto di inizio può essere impostato a zero). Si trova quindi un punto temporale finale t_{end} , corrispondente agli ultimi dati di temperatura $T_{f,in}$ e $T_{f,out}$ registrati, che si fa variare. La prima regressione deve essere fatta tra il punto iniziale e il punto finale così definiti. In maniera opposta alla regressione in indietro, ora è il punto finale ad essere diminuito passo dopo passo, con il risultato di ottenere una funzione di risultati che dipendono dal tempo finale.

La scelta di un t_{start} troppo piccolo, (inferiore al criterio del tempo minimo, t_0), e quindi rientrante nello stato transitorio del TRT, fornisce come risultato il non raggiungimento della convergenza.

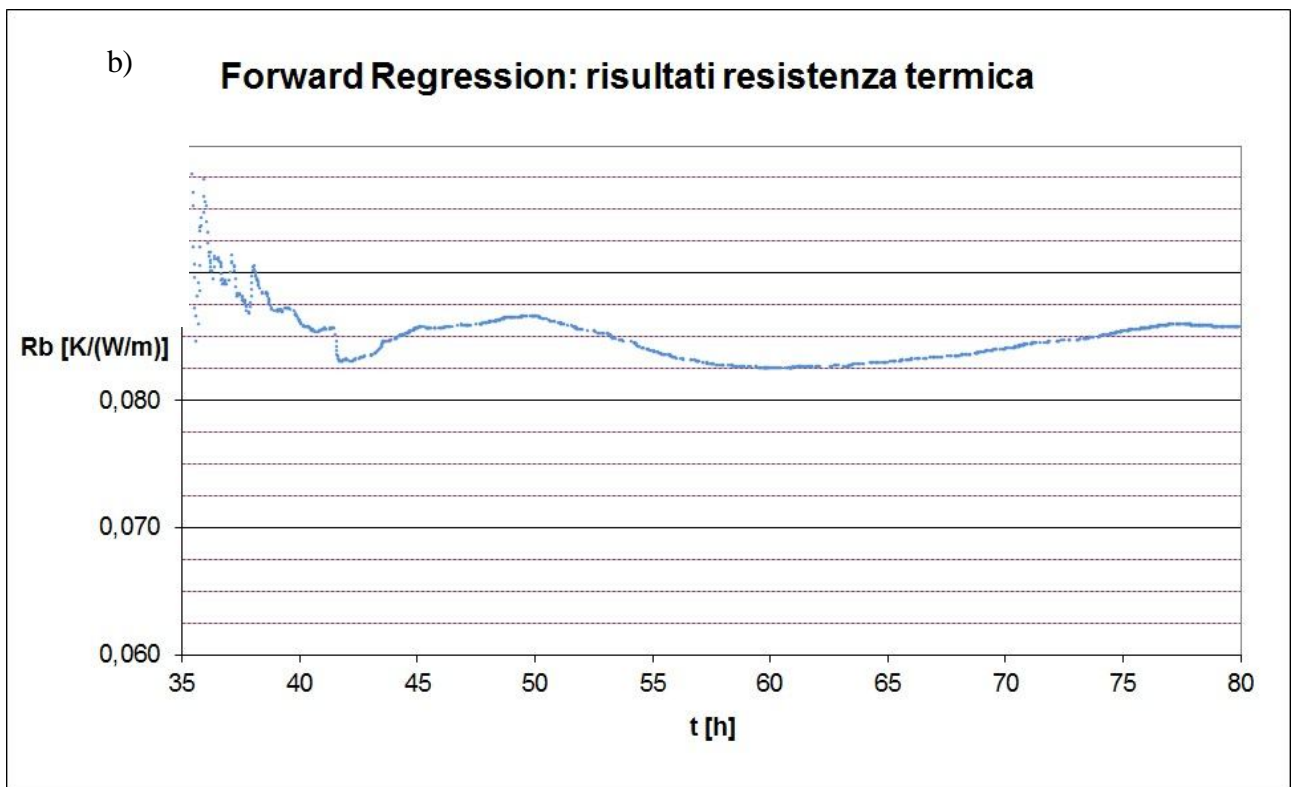
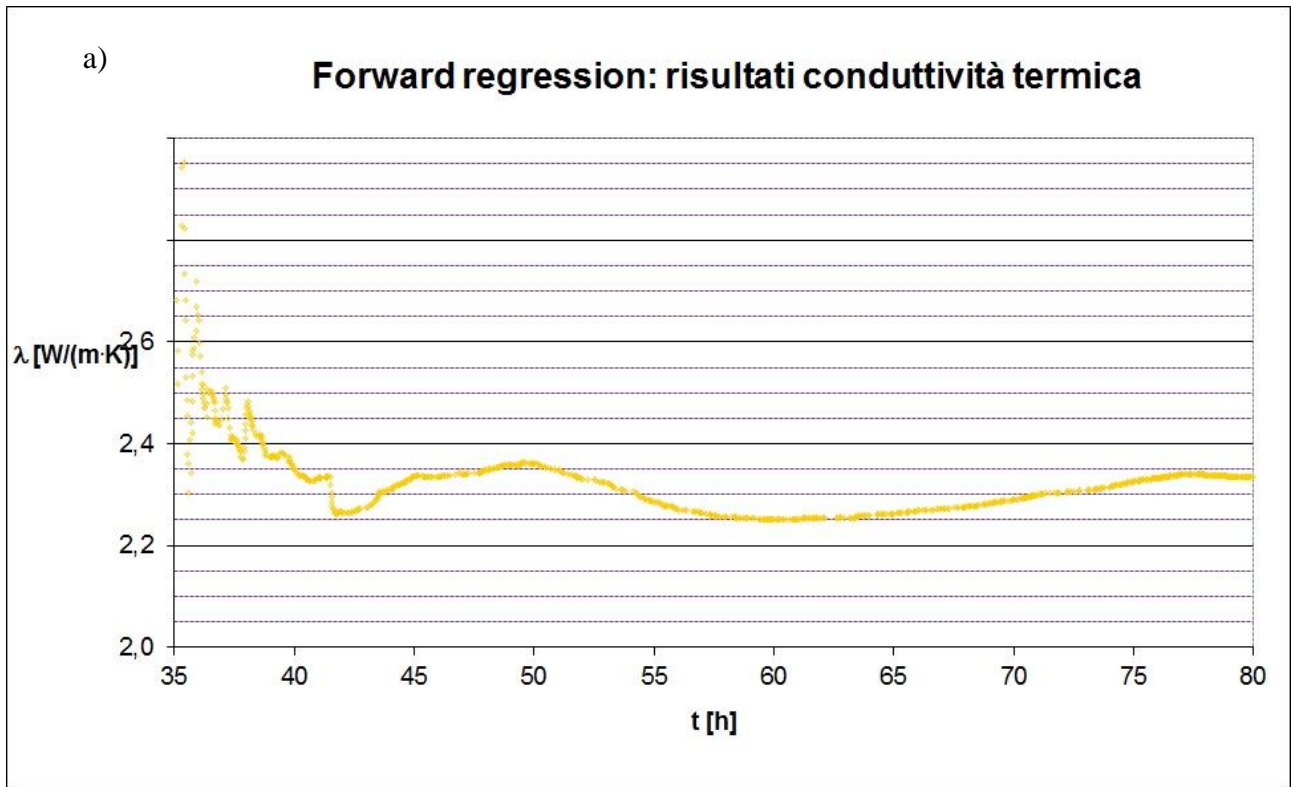


Figura 26 Evoluzione del risultato della regressione in avanti per il calcolo della conduttività termica del terreno (a) e della resistenza termica del foro (b), in funzione del tempo finale dell'intervallo.

Se il periodo di valutazione è scelto correttamente e l'assunzione della soluzione applicata è valida, la regressione in avanti, funzione di t_{start} , così come la regressione all'indietro, funzione di t_{end} , portano a una convergenza dei risultati della pendenza e dell'intercetta nel tempo, e così i valori termici equivalenti ricercati.

Tecnica 3. Metodo delle finestre mobili (moving windows)

Un metodo addizionale per la verifica del modello conduttivo è il metodo delle finestre mobili. La valutazione dei dati di misura è ristretta a una finestra temporale, il cui punto di inizio t_{start} e di fine t_{end} sono mossi simultaneamente lungo il periodo di misurazione, a partire dal criterio del tempo minimo t_0 , fino agli ultimi valori utili di temperatura registrati. Ogni risultato viene referenziato al tempo iniziale della finestra di valutazione. Il numero di dati all'interno di ogni finestra è in genere scelto pari a circa 1/5 del tempo totale del TRT. Ciò non permette di ottenere una convergenza (infatti si verificano delle fluttuazioni), ma consente di identificare anomalie locali nel tempo che non sono evidenti né dall'andamento della misura della temperatura media del fluido, né dalle curve di convergenza dei precedenti due metodi illustrati. La comparazione tra la curva di convergenza del metodo delle finestre mobili e le curve di convergenza dei metodi della regressione in avanti e in indietro può fornire suggerimenti aggiuntivi sullo scambio di calore tra fluido e terreno in diversi periodi.

Il comportamento di una curva di convergenza dalle finestre mobili che ci si aspetta per avere uno scambio termico puramente conduttivo è un andamento sinusoidale con media costante e ampiezza costante. Dalla configurazione ideale possono esserci diverse varianti (ampiezza costante e media crescente / decrescente; media costante e ampiezza crescente / decrescente; media e ampiezza variabili), ognuna delle quali che evidenzia in misura maggiore o minore un apporto termico aggiuntivo alla pura conduzione termica. Bisogna fare presente che alcuni apporti termici differenti dalla conduzione sono intrinseci della tecnica del TRT, quali lo scambio termico per convezione

dovuto al moto del fluido all'interno della sonda o la variabilità giornaliera nello stato termicamente instabile, per cui in nessun caso si otterrà mai una curva di convergenza perfetta.

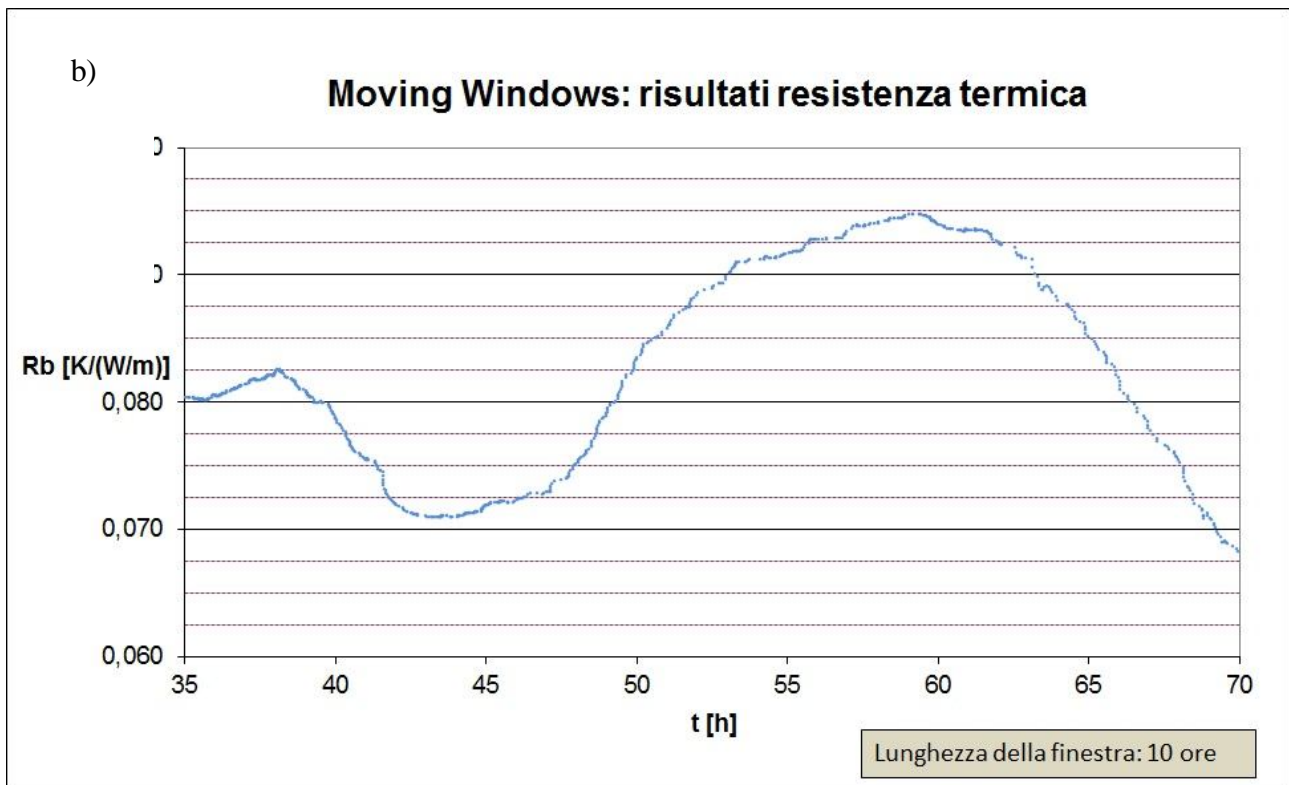
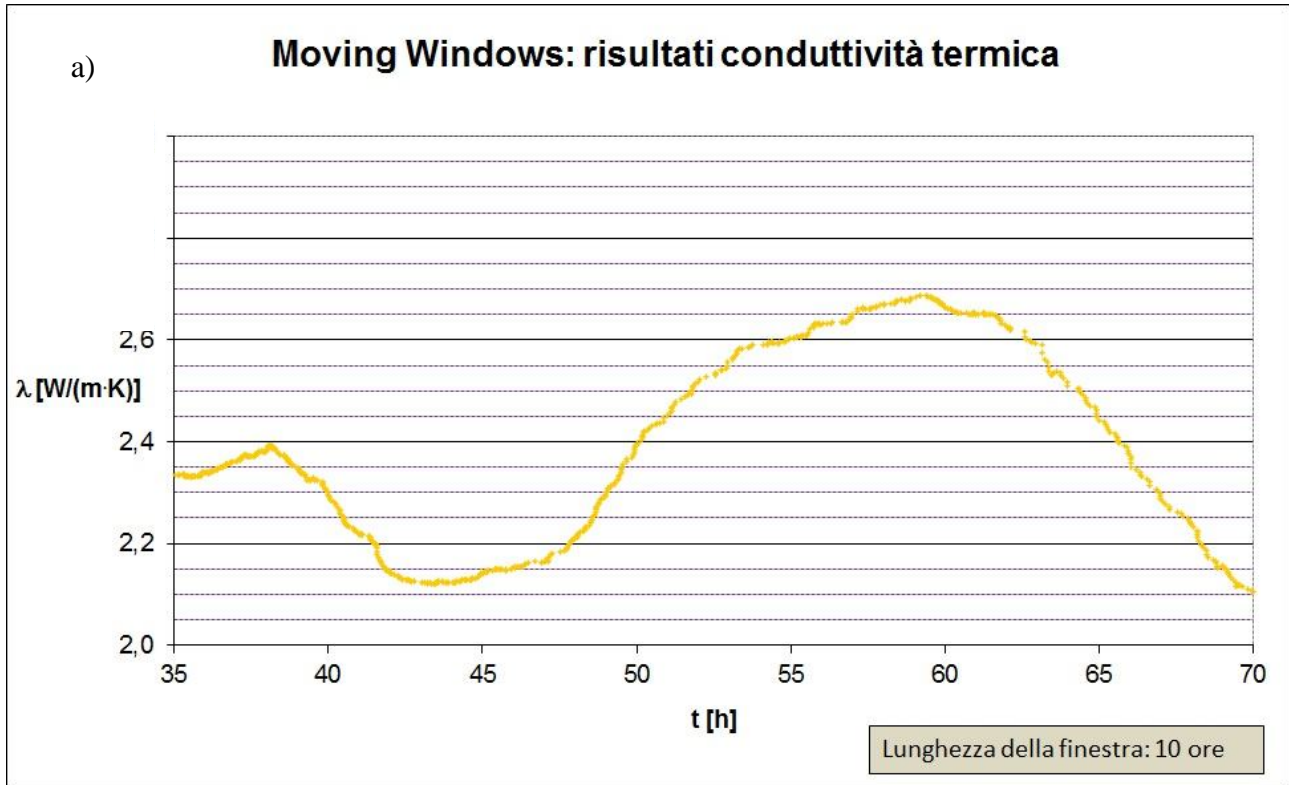


Figura 27: Comportamento sinusoidale dell'evoluzione del risultato della regressione effettuata con finestra mobile (lunghezza della finestra: 10 ore) con ampiezza crescente e valore medio costante: conduttività (a) e resistenza (b)

In entrambe le curve di convergenza in avanti e in indietro, per piccoli periodi di valutazione, le curve fluttuano, in seguito alla bassa densità statistica di dati sperimentali. Successivamente le curve dovrebbero raggiungere un valore costante all'interno di un range definito e per una durata definita.

Se la convergenza non viene raggiunta per tutta la durata del test, ciò può essere dovuto o ad un tempo di misurazione insufficiente a garantire un valore affidabile o al fatto che i dati sperimentali non si comportano coerentemente con il modello di valutazione applicato. Se la valutazione della convergenza viene realizzata durante il funzionamento del TRT, un'estensione della durata del test può fugare ogni dubbio su quale delle due cause sia responsabile della non convergenza.

Un incremento monotono del risultato di conduttività termica, ottenuto con la tecnica della regressione in avanti, in genere indica la presenza di acqua di falda. Se l'influenza dell'acqua di falda è elevata, e quindi si ha l'aumento costante del risultato nel tempo, il metodo di valutazione di pura conduzione termica della Sorgente Lineare Infinita non è valido.

Esistono infine ancora altre procedure addizionali, più o meno complesse, per verificare e quantificare la presenza di flusso di acqua di falda in concomitanza di un TRT su una sonda geotermica verticale. Esse sono:

- studio delle condizioni idrogeologiche dell'area in esame, per indagare la possibilità di sussistenza idrogeologica del fenomeno (Signorelli, 2004);
- analisi del periodo di rilascio termico delle temperature a TRT concluso, per verificare il tempo di ritorno alle condizioni iniziali (Beier, 2011);
- analisi di impulsi multipli effettuati dal TRT, con combinazione di iniezione ed estrazione di calore in sonda, per verificare la presenza di anomalie in una o più modalità (Witte, 2006)

- analisi addizionale dei profili di temperatura in foro durante e dopo il test, per verificare la presenza di anomalie che potrebbero essere accentuate dall'iniezione di calore (Acuna, 2008);
- esecuzione di misurazioni vicine per mappare le condizioni termiche nel tempo e nello spazio dell'intero campo sonde (Signorelli, 2004);
- esecuzione di una modellizzazione inversa con i dati raccolti utilizzando modelli di scambio termico e di massa (Al-Khoury, 2010)

2.1.6 Le tecniche innovative e gli sviluppi futuri

I TRT più avanzati possono disporre di alcune tecniche innovative, che sono essenzialmente di due tipi: le fibre ottiche e il cavo riscaldante.

Fibre ottiche

L'utilizzo delle fibre ottiche permette di ottenere informazioni aggiuntive sui profili di temperatura lungo la verticale del foro, rispetto all'utilizzo delle termocoppie o termoresistenze calate in sonda (Fujii, 2009).

Un sensore di fibre ottiche per la registrazione della temperatura a diversi livelli di profondità viene inserito nella sonda verticale, ed è connesso con una centralina esterna. Il sensore, contrariamente alle termocoppie tradizionali, viene lasciato in posto in sonda durante l'esecuzione del TRT. In tal modo, è possibile ottenere un profilo di temperatura non solo prima e dopo un TRT, ma anche durante. I sensori posizionati misurano l'incremento o decremento di temperatura del fluido termovettore in movimento all'interno della sonda. Una coppia di sensori a fibre ottiche può essere utilizzata per misurare nel dettaglio sia la fase di discesa che la fase di risalita. In questo modo, si riescono a reperire informazioni aggiuntive sui processi di scambio termico che avvengono lungo la verticale della sonda geotermica, con un maggior grado di dettaglio della valutazione del moto dell'acqua di falda

Cavo riscaldante (hot wire)

In questo caso, viene modificata la procedura standard del TRT. Non si inietta infatti calore per mezzo del fluido termovettore, ma viene direttamente fornito un impulso di potenza ad una certa profondità per mezzo del cavo riscaldante (Katsura, 2006). I sensori di registrazione della temperatura (normalmente termoresistenze) vengono collegati all'estremità superiore del cavo e connessi ad un datalogger. Inviando l'impulso termico direttamente dall'interno del foro, senza la fase di circolazione del fluido, è possibile calcolare direttamente la conduttività termica del terreno alle diverse quote. Per contro, non può essere trovata con questa tecnica la resistenza termica del foro.

2.2 UN APPROCCIO PROBABILISTICO PER L'ANALISI DEL TRT

2.2.1 L'apporto della geostatistica

Una tipica registrazione di un TRT è un grafico che riporta una serie di temperature sperimentali del fluido termovettore. In figura 28 viene mostrato un test molto regolare, che tuttavia mostra alcune piccole fluttuazioni della temperatura media del fluido.

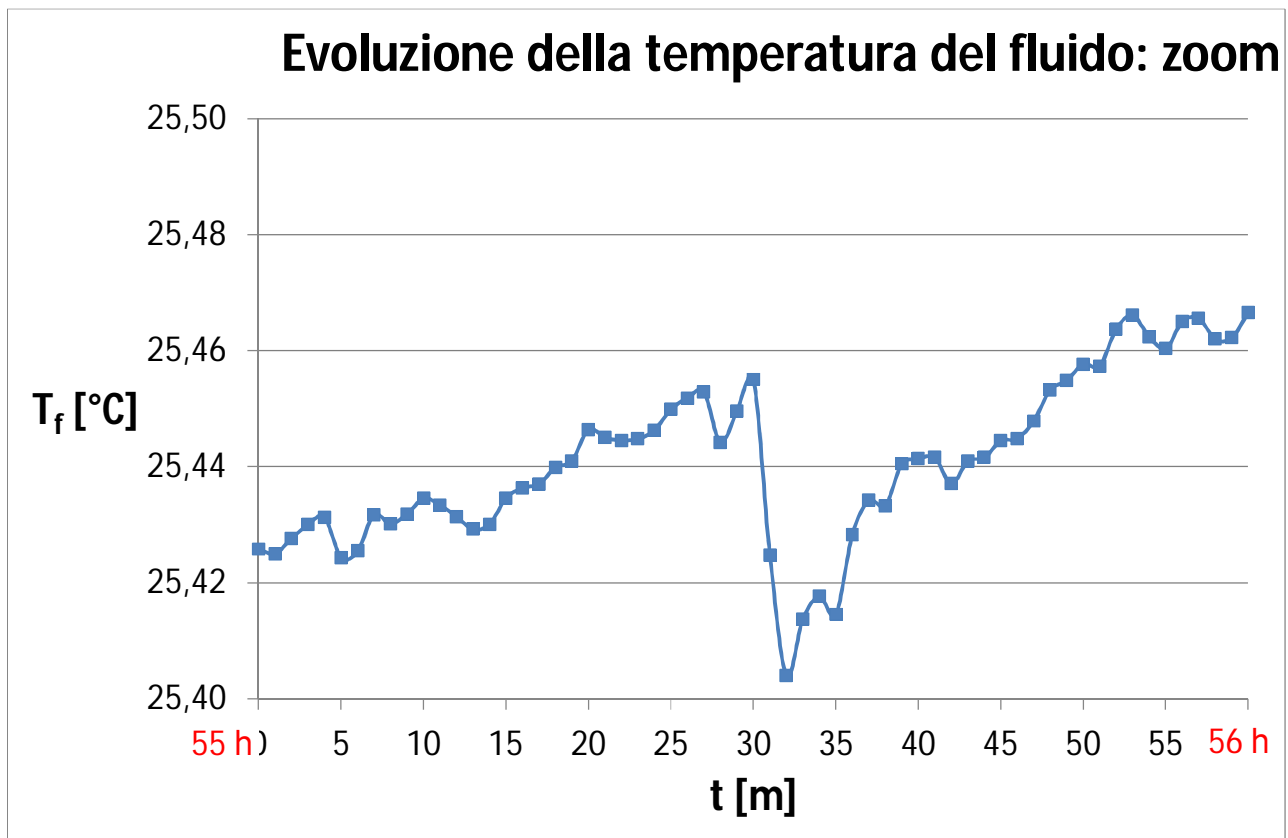


Figura 28 Andamento dei dati sperimentali di temperatura ricavati da un TRT in un arco di tempo limitato

Osservando l'equazione 15, la prima considerazione immediata è che si sta affrontando un classico problema di stima dei parametri, perché il valore vero dei parametri di servizio, b e a , può solo essere stimato, b^* e a^* (Van der Heijden, 2004). Un errore di stima compare e può essere trattato solo come una funzione aleatoria.

Inoltre, le temperature registrate dal TRT sperimentale sono realmente influenzate da diversi fattori come riportato nei paragrafi precedenti. In effetti, le temperature 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, comprovati da basi teoriche.

Riguardo alle fluttuazioni, occorre considerare che ripetendo una registrazione di TRT, il profilo di T_f 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 media del fluido T_f come una funzione aleatoria (FA) non stazionaria nel tempo con un trend definito (Chiles, 1999). Si considera quindi un classico modello a residuo; la temperatura è modellizzata come la somma di una funzione media (il valore atteso), $m(t)$, deterministica, e una funzione aleatoria stazionaria (FASt), $Y(t)$, chiamata fluttuazione o residuo con media zero (figura 29, equazione 24). La funzione media della temperatura del fluido, che rappresenta il comportamento medio della funzione aleatoria, è definita in accordo alla teoria:

$$T(t) = m(t) + Y(t) \quad (24)$$

$$E[T(t)] = m(t) = a + b \cdot \ln(t) \quad t \geq t_0 \quad (25)$$

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.

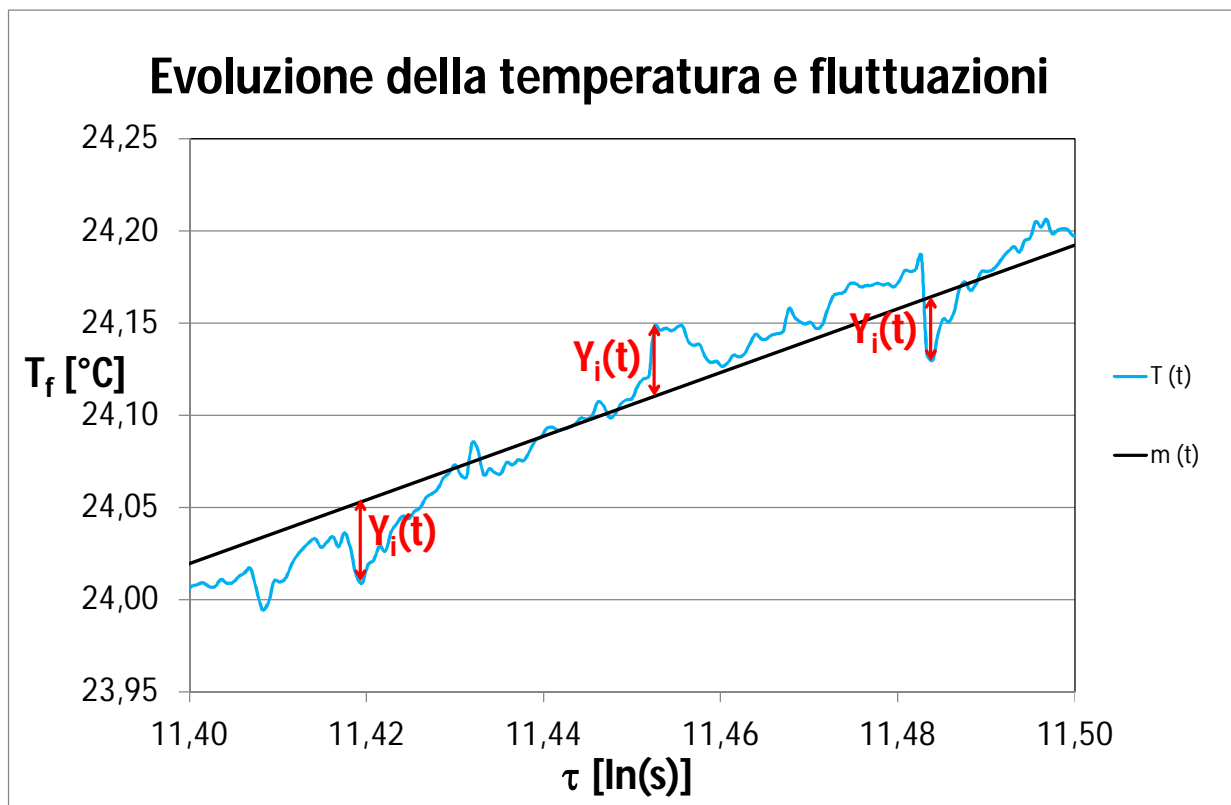


Figura 29 Evoluzione della temperatura e fluttuazioni

Il variogramma delle fluttuazioni è:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}\{T(t+h) - T(t)\} = \frac{1}{2} E[(Y(t+h) - Y(t))^2] \quad (26)$$

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.

In Figura 30 sono presentati il variogramma sperimentale ed il modello. L'ipotesi di stazionarietà è accettabile ed il modello è rappresentato con tre strutture annidate, una pepitica, una sferica con range 41 ore 40 minuti e una gaussiana con range 7 ore. Si è registrata una buona correlazione per intervalli di tempo oltre le 10 ore.

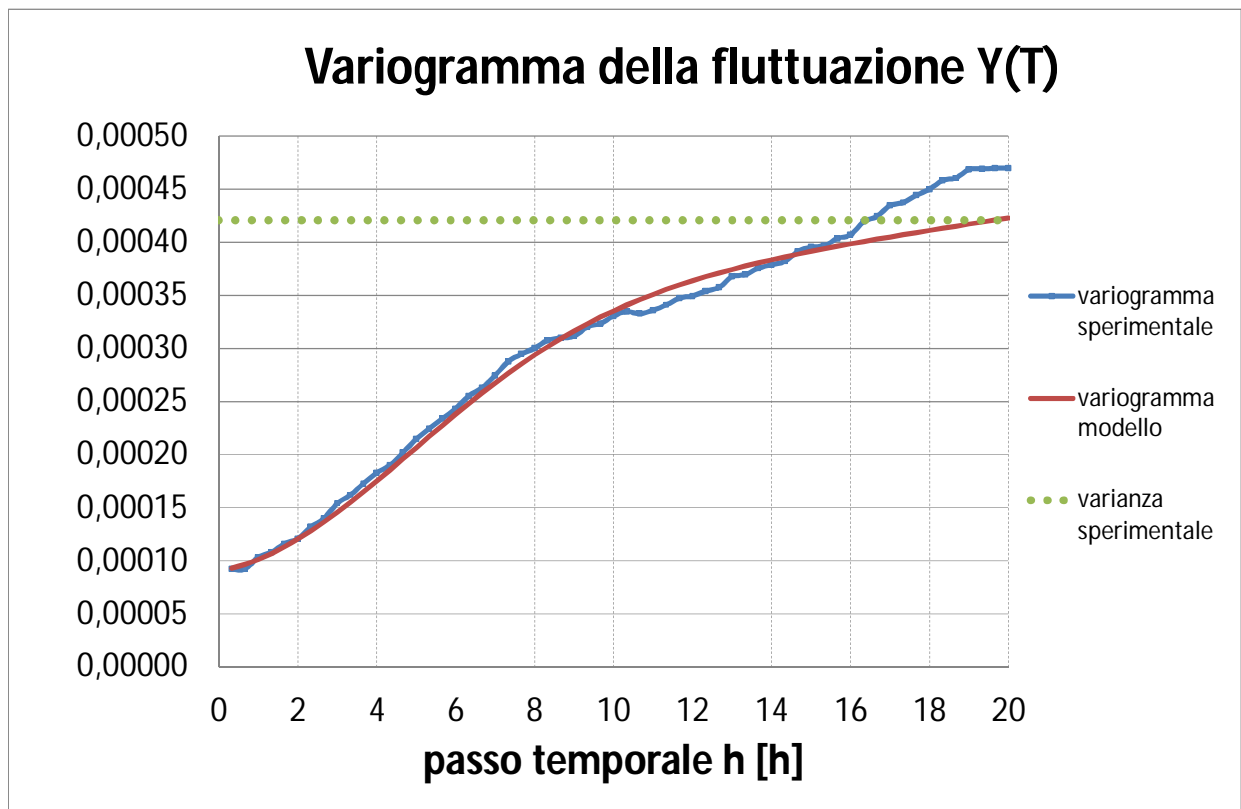


Figura 30: variogramma delle fluttuazioni della temperatura intorno alla media: sperimentale e modello

2.2.2 L'utilizzo della covarianza incrociata sui parametri

Le fluttuazioni sulla potenza termica influiscono sull'andamento della temperatura del fluido, e pertanto influenzano il risultato finale del Test.

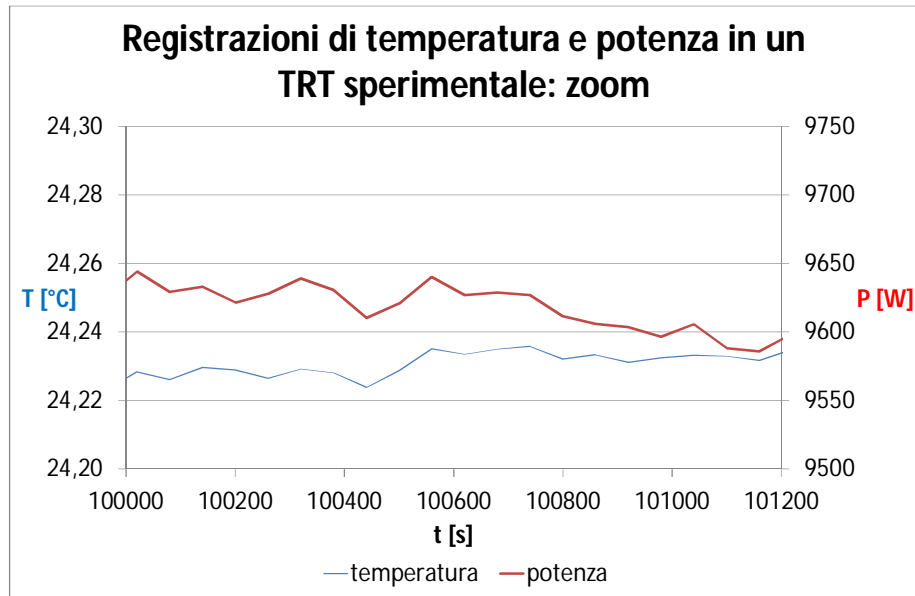


Figura 31 Zoom delle fluttuazioni della potenza termica e della temperatura intorno al valore vero.

L'approccio probabilistico intende incorporare queste fonti di errore nel modello di calcolo per migliorare la stima.

Di seguito si riportano le nuvole di correlazione dei valori di potenza e temperatura di ingresso e di uscita, nonché le nuvole di correlazione delle fluttuazioni.

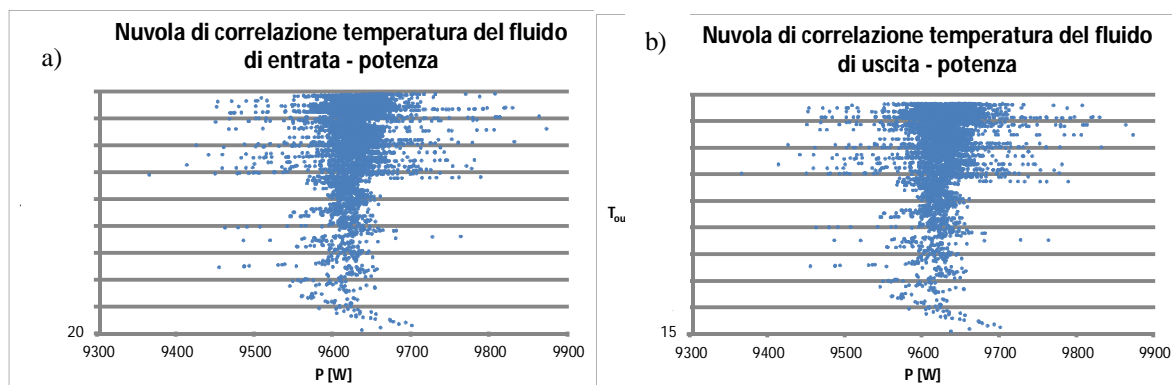


Figura 32 Nuvola di correlazione dei valori di temperatura e potenza: ingresso (a) e uscita (b) del fluido

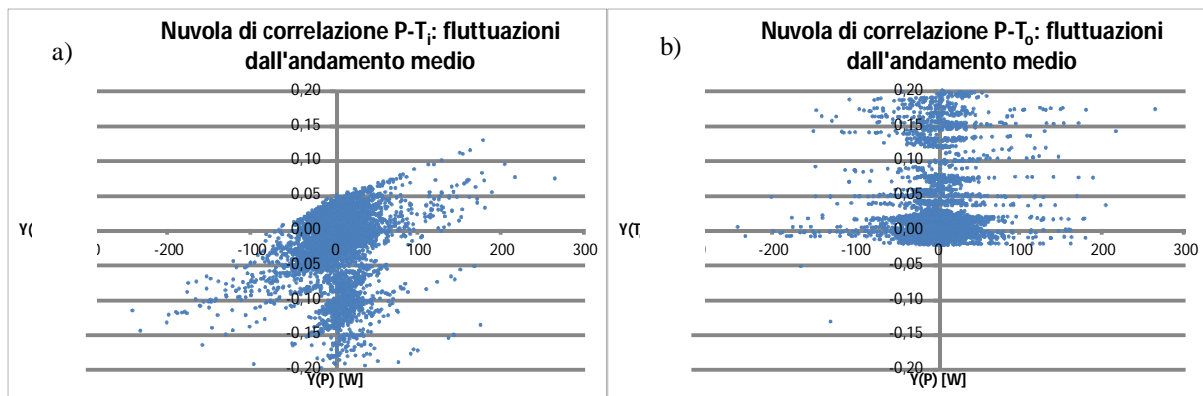


Figura 33 Nuvola di correlazione delle fluttuazioni intorno ai valori medi di temperatura e potenza: ingresso (a) e uscita (b) del fluido

Utilizzando il metodo della covarianza incrociata è possibile definire quantitativamente il grado di correlazione tra la potenza e la temperatura del fluido di ingresso ed uscita ed eventualmente il tempo di ritardo se presente. Si è scelto di dividere l'analisi in due categorie: la correlazione dei valori interi e la correlazione delle fluttuazioni attorno alla media.

Di seguito sono presentati i grafici con i risultati.

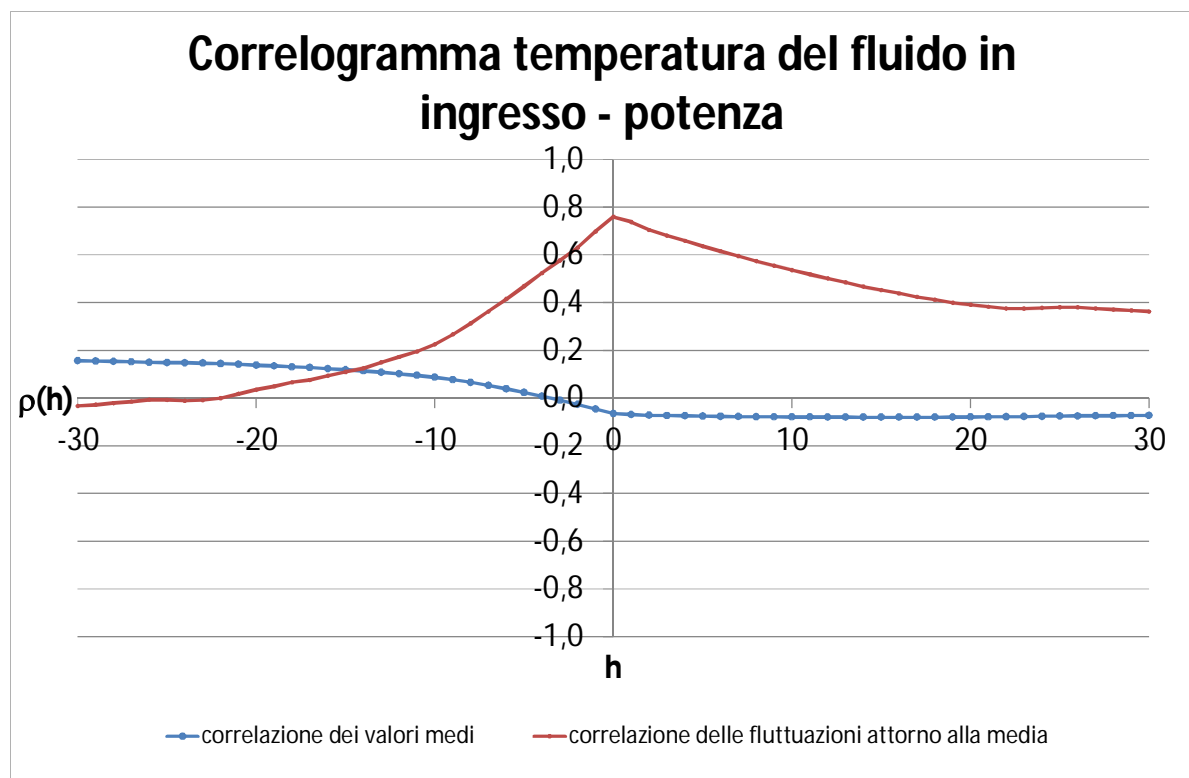


Figura 34: covarianza incrociata tra la potenza termica e la temperatura in ingresso

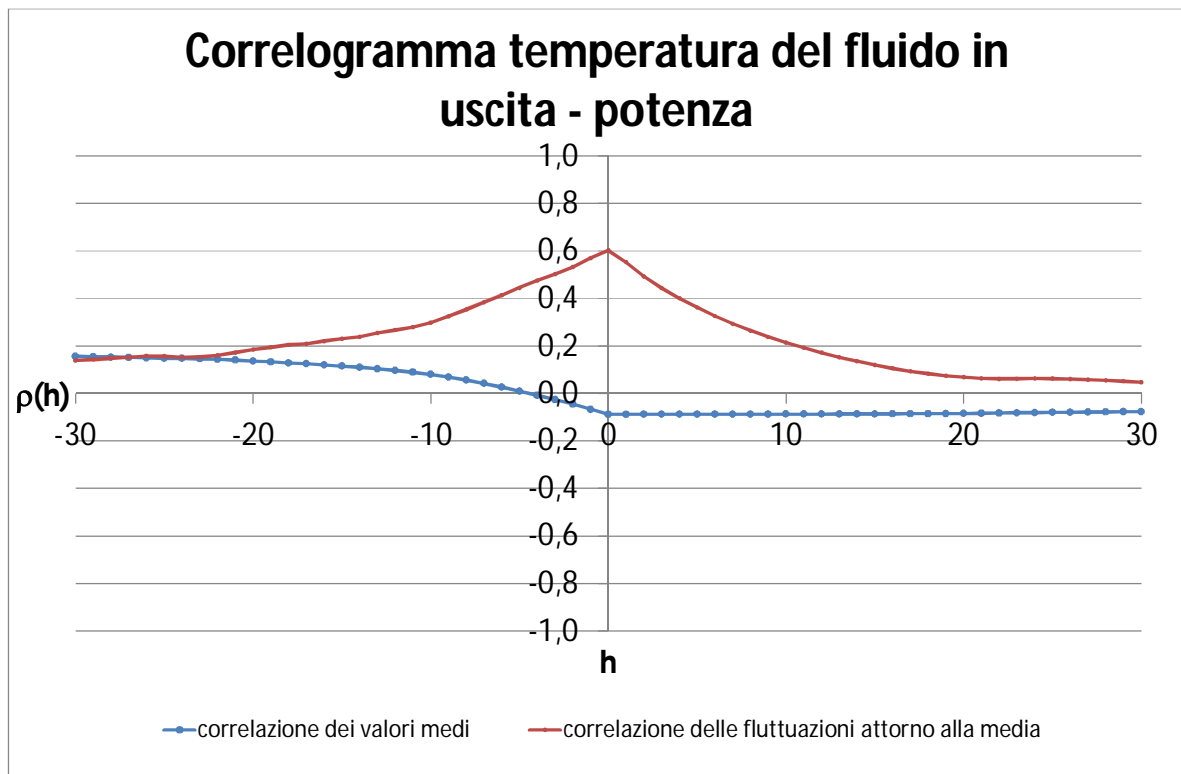


Figura 35: covarianza incrociata tra la potenza termica e la temperatura di uscita.

I grafici mostrano che esiste, come previsto, correlazione tra i valori di potenza e temperatura sia per i valori medi che per le fluttuazioni e la quantificano ad ogni tempo di indagine, in un range [-30;30], il che significa un ritardo massimo di 30 registrazioni.

La correlazione delle fluttuazioni è perfettamente centrata in 0, per poi discendere all'aumentare del passo.

Anche per quanto riguarda i valori medi la correlazione è centrata in 0, ma di valore negativo e di intensità inferiore.

Un test in cui entrambe le correlazioni (potenza – temperatura in ingresso e potenza – temperatura in uscita) sono centrate in zero mostra come i tempi di rilevazione della temperatura siano corretti, in quanto ogni istante di misurazione del fluido coincide con l'istante di misurazione della potenza iniettata, che ha generato quella temperatura.

Un errore nell'impostazione dei tempi di campionamento può essere rilevato attraverso l'utilizzo dei correlogrammi, in quanto la correlazione massima deve sempre risultare centrata sullo 0.

A titolo di esempio, un'impostazione di campionamento della temperatura in uscita che non tiene conto del ritardo dovuto alla lunghezza del circuito in cui scorre il fluido, porta ad avere una correlazione tra temperatura e potenza non centrata sullo 0, ma shiftata di una quantità che coincide con il tempo di ritardo, cioè con il tempo che il fluido impiega a percorrere la lunghezza del circuito della sonda.

Il grafico seguente mostra il variogramma delle fluttuazioni della potenza nel tempo, con un possibile modello.

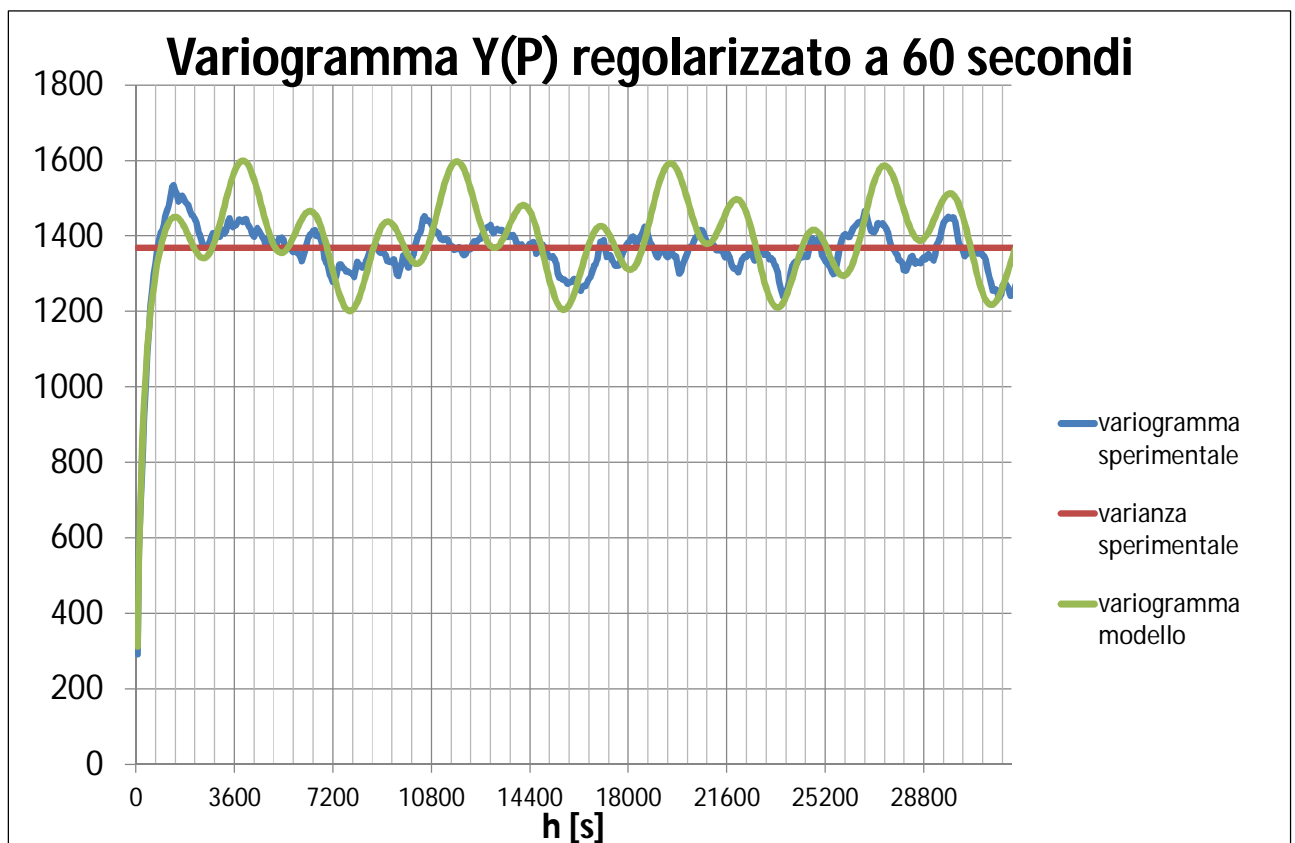


Figura 36 Variogramma sperimentale e modello delle fluttuazioni della potenza sul tempo.

Il variogramma mostra come l'andamento del grado di autocorrelazione dei dati presenti delle periodicità, che si mantengono all'aumentare del passo, e quindi alla distanza tra i dati. Per tale

motivo è lecito pensare che le fluttuazioni della potenza siano legate tra loro e quindi non completamente casuali.

2.2.3 Il metodo “Best Time Interval”

Il criterio del tempo minimo t_0 fa sì che la teoria del metodo ILS sia soddisfacentemente approssimata da quel punto in poi. Nell’approccio classico, il t_0 reale per l’analisi della regressione è calcolato come un multiplo w del rapporto tra il raggio del foro r_b e la diffusività della miscela

cementizia α_b , secondo la relazione: $t_0 \geq w \cdot \frac{r_b^2}{\alpha_b}$. Un modello teorico e ipotesi specifiche, basate

sulle serie di Taylor, enunciano che il coefficiente di proporzionalità deve essere maggiore di 5, per ottenere un’approssimazione soddisfacente. Per migliorare l’accuratezza dei risultati della teoria ILS, valori più grandi sono necessari, per esempio $w \geq 20$ porta l’accuratezza al 2,5 % (Eklof, 1996).

In conclusione, la correttezza della scelta non è totalmente verificata, e nemmeno è valutata l’accuratezza dei valori dei parametri.

Inoltre, l’ipotesi che ogni foro delle medesime proprietà del raggio e della miscela cementizia identifichi il medesimo tempo iniziale rende l’analisi indipendente dal sito.

Una sensibilità dei parametri termici alla scelta del coefficiente w , quindi a t_0 , mostra la difficoltà della scelta. In figura 37 sono mostrate le variazioni percentuali di λ_g e c_g quando si varia w nell’intervallo [5-20], definite dalla teoria ILS classica.

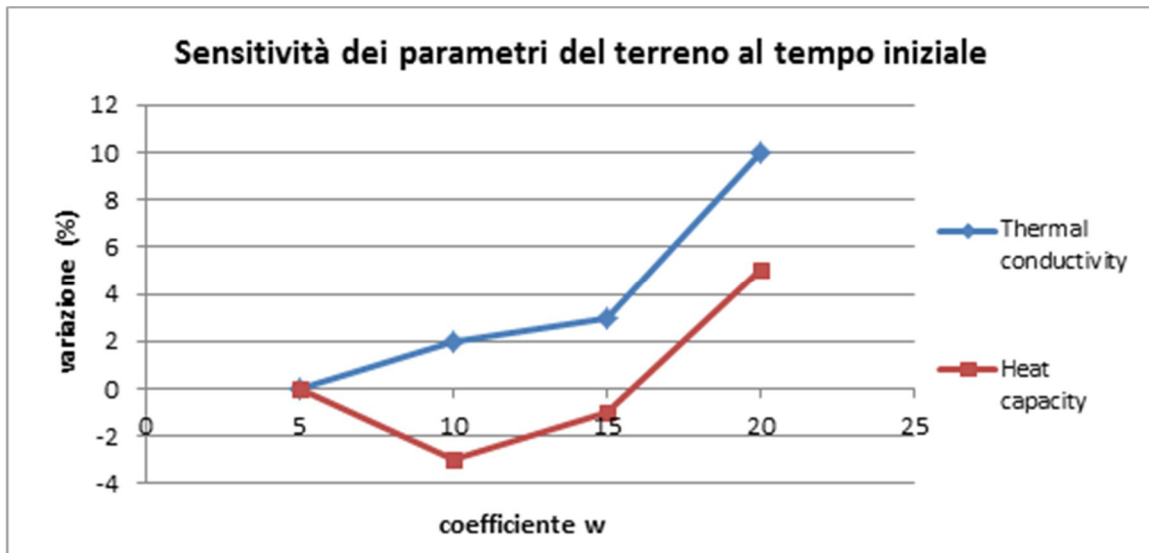


Figura 37: analisi di sensitività dei risultati dei parametri termici al variare del tempo iniziale

Per l'identificazione del tempo t_0 ottimale ai fini dell'analisi, si riprendono le tecniche di convergenza descritte nel paragrafo 2.1.5. L'idea alla base consiste nel fatto che quando la pendenza b fluttua più di un valore predefinito, allora il tempo iniziale è identificato perché la teoria non è più valida.

Con riferimento invece a t_f , il tempo finale dei valori registrati considerati nel TRT, non c'è un problema di applicabilità della teoria, ma di stabilità dei parametri e di costi del Test. Anche in questo caso, si applica una logica simile. L'idea alla base consiste nel fatto che quando il valore della pendenza non mostra un cambiamento significativo ad un incremento del tempo di Test, si può assumere che il calore trasferito nel sottosuolo segui la valutazione del modello previsto e che il tempo di valutazione sia largo abbastanza per garantire la precisione statistica desiderata. Il criterio è ancora basato sulle tecniche di convergenza mostrate nel paragrafo 2.1.5.

Per quanto riguarda la ricerca di t_0 , la tecnica che verrà descritta poggia sul ragionamento che è abbastanza difficile dimostrare quando la teoria ILS inizia ad essere valida, ma che si può verificare in ogni momento se c'è coerenza tra le assunzioni teoriche e i risultati reali. Il punto di vista metodologico è che spesso un modello può non essere provato, ma può essere falsificato (Matheron, 1978).

Operativamente, l'idea consiste nel controllare che la precisione teorica di λ_g^* ottenuta con la regressione lineare sia coerente con il valore vero di λ_g .

Vengono considerate finestre mobili con intervalli di tempo costante, sulle quali la pendenza e l'intercetta sono stimate tramite la regressione lineare. Nelle seguenti descrizioni, viene considerato solo il parametro b , essendo più conveniente in quanto dipende solo dalla conduttività termica λ_g e la sua stima ha una qualità migliore di a .

La regressione è uno stimatore lineare i cui pesi dipendono solo dal logaritmo del tempo. Per esempio, nel caso della regressione della pendenza su n coppie T - τ , la pendenza e i suoi pesi possono essere espressi da:

$$b^* = \sum_{\alpha=1}^n v_{\alpha}^b T_{\alpha}$$

$$v_{\alpha}^b = \frac{\tau_{\alpha} - \bar{\tau}}{n \cdot \sigma_{\tau}^2} \quad (27)$$

Dove T_{α} sono i dati di temperature registrati ai tempi t_{α} , mentre v_{α} sono i loro pesi; $\bar{\tau}$ e σ_{τ}^2 sono la media e la varianza dei logaritmi dei tempi di campionamento, τ_{α}

Essendo uno stimatore lineare, la varianza di stima σ_e^2 è espressa da:

$$\sigma_e^2(b^* \rightarrow b) = - \sum_{\beta=1}^n \sum_{\alpha=1}^n v_{\beta}^b v_{\alpha}^b \gamma(t_{\alpha} - t_{\beta}) \quad (28)$$

Assumendo l'errore di stima come una variabile gaussiana di media zero, l'intervallo dato dal valore di stima +/- la deviazione standard dell'errore $b^* +/- \sigma$, ha approssimativamente un 68% di probabilità di contenere il valore vero. t_0 identifica il tempo in cui la teoria ILS può essere considerata applicabile, in modo che dopo t_0 la logica di considerare intervalli di variabilità per il valore vero possa essere applicata. Se la pendenza vera b non cade dentro l'accettabile intervallo di variabilità in un generico punto t , si può asserire, semplificando, che c'è circa un 70% di probabilità che l'ipotesi ILS non possa essere applicata a quel tempo t .

Una volta ottenuto l'intervallo di variabilità dell'errore di stima per ogni punto t , occorre trovare il valore vero della pendenza. Il calcolo tradizionale di b , in un intervallo di tempo non affetto dall'imprecisione di t_0 , ha una confidenza molto alta, il che ci permette di ritenerlo come il valore vero. Il valore t_0 viene quindi identificato all'intersezione della linea del valore della pendenza con la banda possibile teorica di variabilità (Figura 38). Nel caso studio mostrato, la lunghezza delle finestre di 10 ore è stata scelta per tenere in conto del range reale del variogramma delle fluttuazioni sulla temperatura.

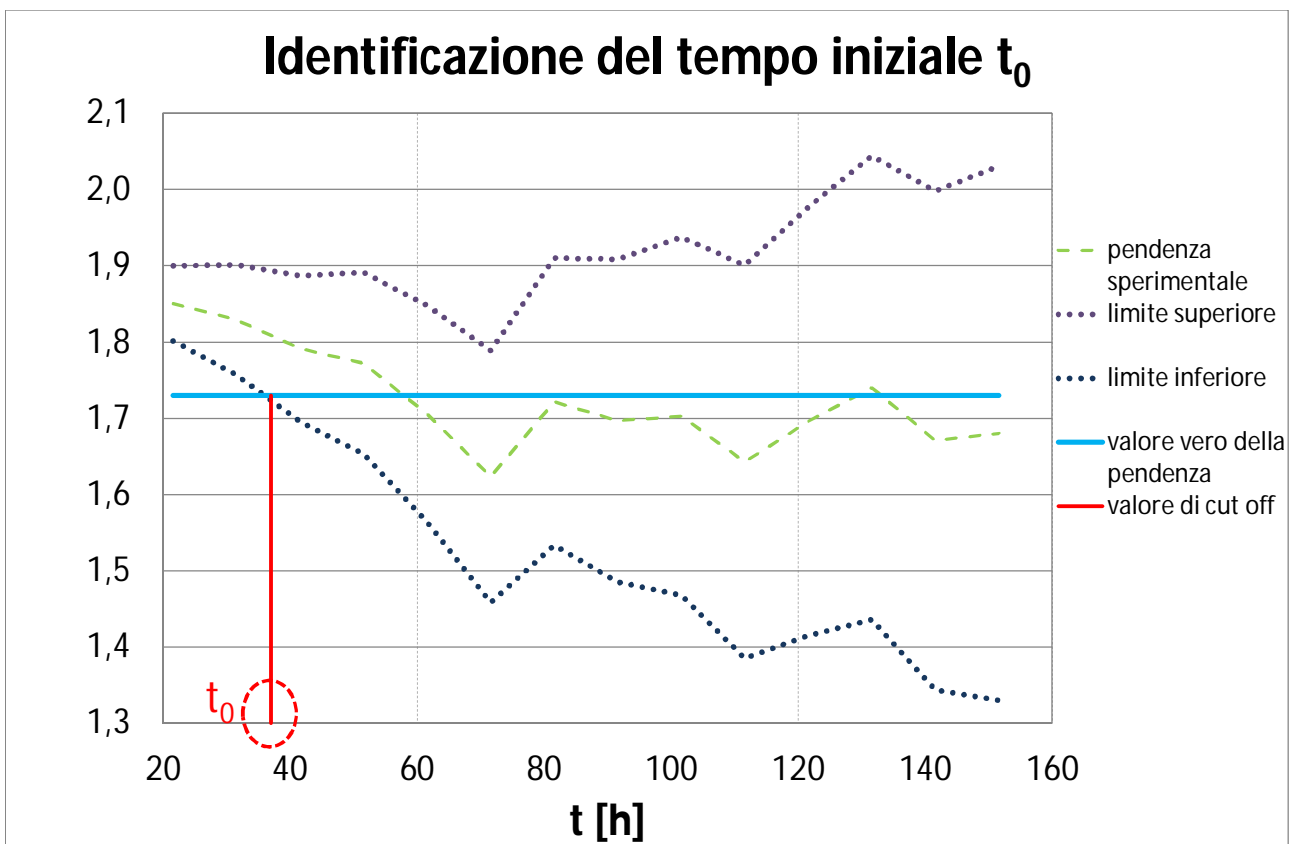


Figura 38 Identificazione del tempo iniziale t_0 tramite il metodo geostatistico

In conclusione, il tempo identificato rappresenta il limite oltre il quale la teoria ILS è probabilisticamente eleggibile, dato un certo intervallo di confidenza.

Nell'approccio c'è una possibile circolarità della procedura perché un tempo iniziale di tentativo $(t_0)^G$ è richiesto indirettamente. In effetti la procedura è alimentata dal valore vero della pendenza b , che è approssimato dal valore ottenuto tramite il metodo tradizionale. E' stata quindi indagata la

sensibilità della procedura tradizionale alla scelta del t_0 (Figura 39). Il problema dimostra di essere assolutamente irrilevante perché la variazione significativa dei parametri termici non condiziona né il modello di variogramma, né l'identificazione probabilistica come mostrato nel seguente grafico di sensibilità.

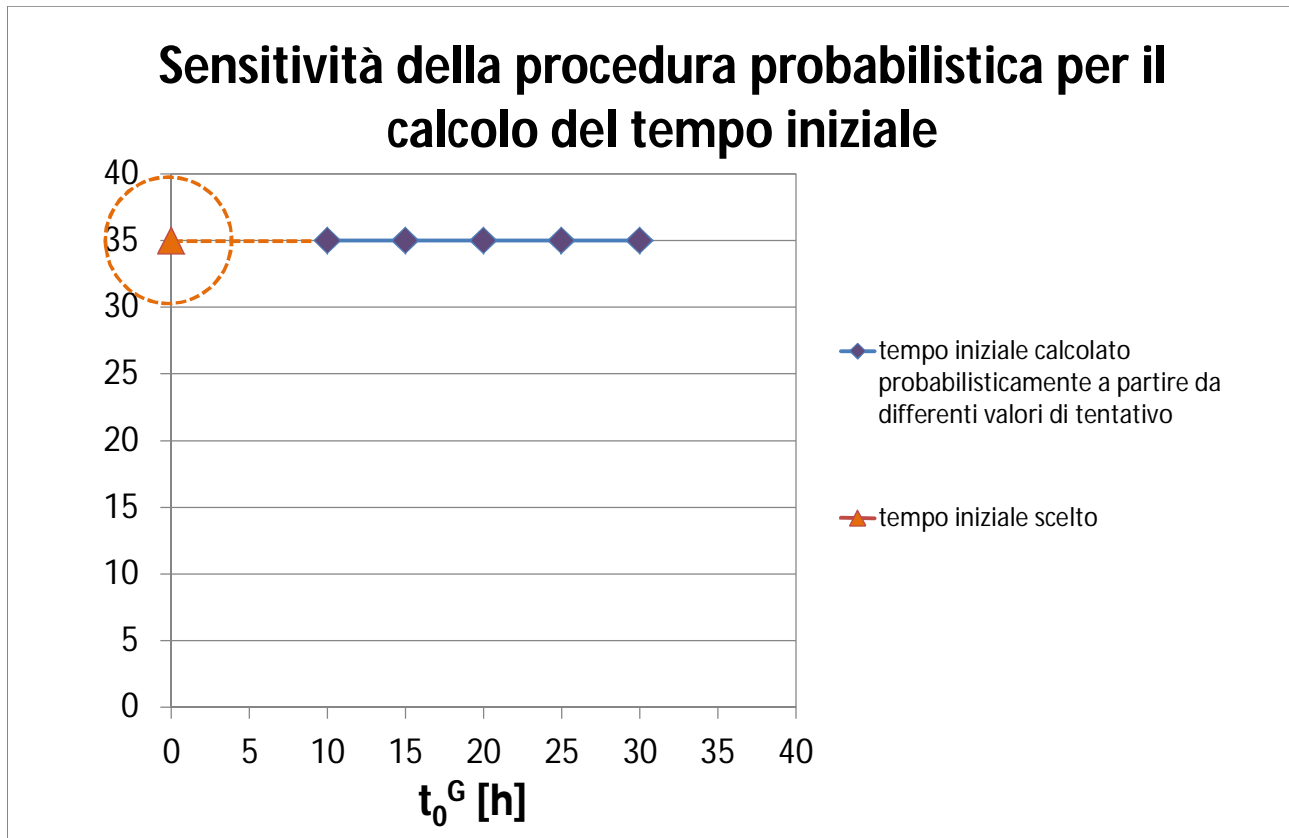


Figura 39 Sensibilità della procedura per trovare il t_0 ottimale al variare dei t_0 di tentativo

L'elevata stabilità di t_0 rende la procedura proposta assolutamente conveniente.

Sono da sottolineare inoltre altre peculiarità dell'approccio proposto:

1. è una procedura "non parametrica", perché si affida solo a dati sperimentali, mentre il metodo tradizionale necessita di valori di r_b e α_b ;
2. mette in evidenza che il risultato è "dipendente dal sito", cioè che può tenere in conto ogni peculiarità che rende ogni foro diverso dall'altro, anche con gli stessi r_b and α_b .

Nessun significato teorico è attribuito al tempo finale del Test, t_f . Il problema è operativo, cioè interessa la decisione su quando fermare il Test e per quale motivo.

Un punto importante è la stabilità delle condizioni necessarie per l'applicazione della teoria ILS. Abbastanza spesso al termine del Test (nella pratica comune trascorsi 3 giorni dall'accensione) ci sono variazioni in P e T_f , che incidono sulla valutazione di λ_g . In pratica, le variazioni di t_f incidono sui risultati del calcolo di λ_g^* . Potenzialmente, questa variabilità potrebbe mettere in discussione la validità della teoria ILS alla fine del Test, in particolar modo perché la potenza può non rispettare la condizione di costanza nel tempo.

La procedura proposta conta ancora sull'utilizzo della varianza di stima σ_e^2 , ma questa volta non ci sono ipotesi teoriche da essere verificate o applicate. E' stata quindi creata una metodologia per giustificare oggettivamente la decisione su quando arrestare il TRT, ad esempio quando la precisione della stima delle proprietà termiche è sufficiente. Il problema a questo punto si sposta sul calcolo della qualità della stima, in pratica sulla σ_e^2 .

La proposta consiste nel considerare intervalli di tempo di lunghezza crescente (secondo la tecnica della regressione in avanti), per cui t_{start} è fissato nel tempo t_0 e t_{end} cresce sistematicamente (Figura 40).

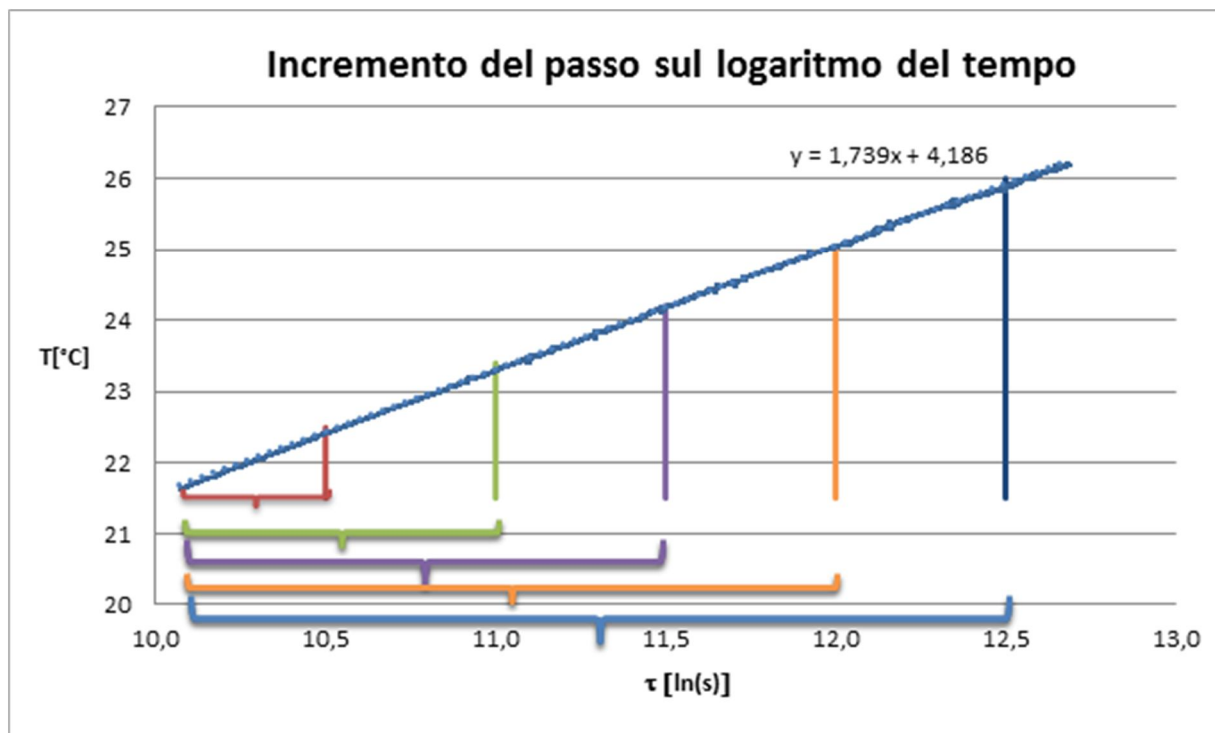


Figura 40 Incremento del passo sul logaritmo del tempo, in una tecnica di regressione in avanti

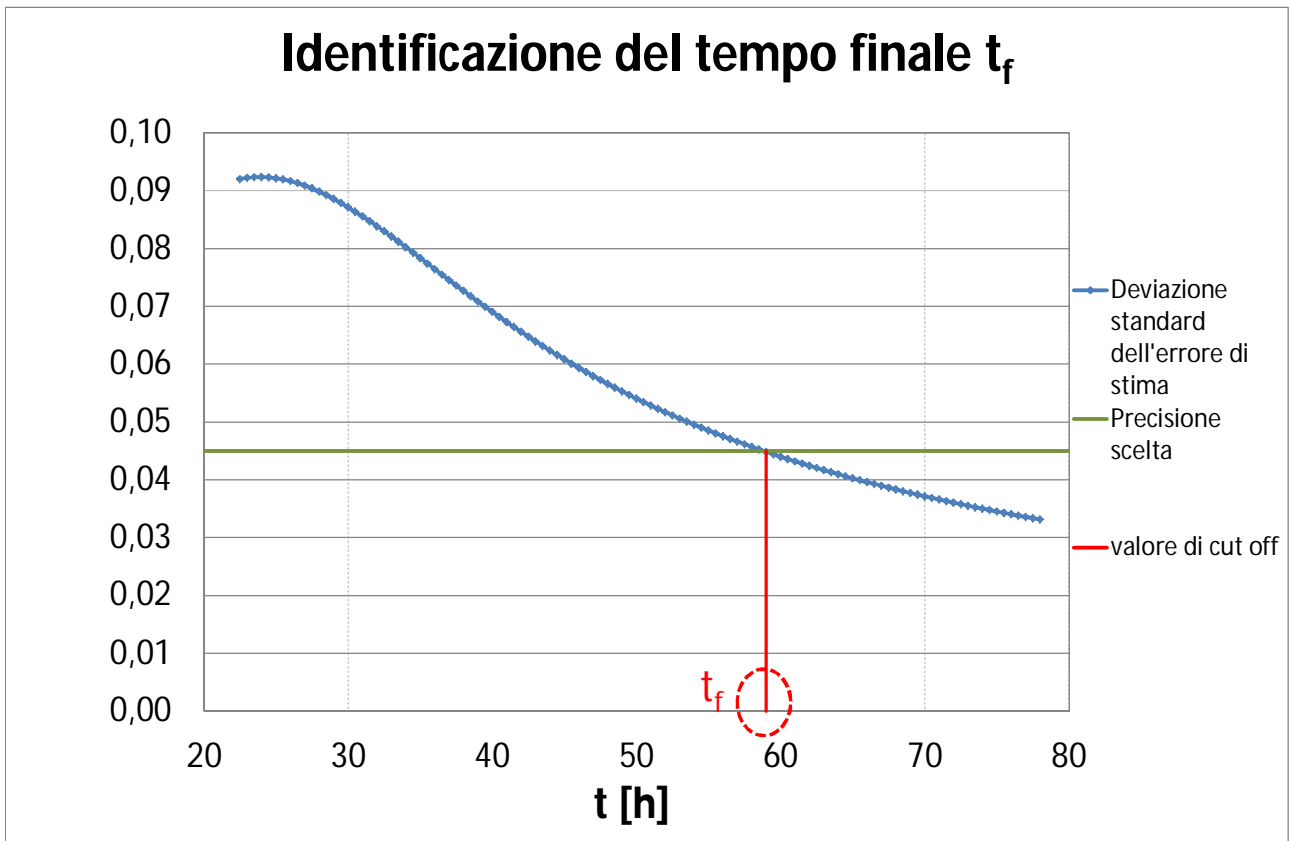


Figura 41 Identificazione del tempo finale t_f

Per ogni intervallo viene calcolata la pendenza, sempre tramite regressione lineare. Aumentando la lunghezza delle finestre, aumenta la confidenza di b^* . t_f è scelta quando la qualità della stima, misurata tramite σ_e^2 , raggiunge un livello considerato sufficiente / soddisfacente (Figura 41).

La procedura è semplice anche se dispendiosa in termini di tempo, in seguito all'alto numero di dati da prendere in considerazione. La metodologia ha due ripercussioni potenzialmente interessanti::

1. il tempo finale è oggettivamente scelto su un criterio quantitativo significativo: una volta deciso il livello di precisione da raggiungere, viene identificato t_f ;
2. tramite la procedura proposta, può essere possibile sapere quando fermare il Test con un anticipo accettabile (per esempio dopo il secondo giorno). t_f non deve essere scelto durante le misure, calcolando continuamente la regressione della pendenza e controllando per ogni risultato un criterio di stabilità. Infatti la curva della deviazione standard (la curva blu di figura 41) può essere disegnata conoscendo semplicemente il modello del variogramma, perché σ_e^2 è

indipendente dai valori misurati. Il variogramma può essere modellizzato dopo circa 45-50 ore di funzionamento del TRT; questo significa che una volta decisa la precisione richiesta, cioè fissata la linea rossa di figura 14, è possibile identificare il t_f a cui fermare il test.

Il principale svantaggio operativo del metodo è dovuto all'alto numero di punti necessari a calcolare σ_e^2 in accordo con l'equazione 28. Per esempio due giorni di misure prese ogni 60 secondi, significa avere a che fare con 2880 dati. Dal punto di vista teorico, è importante verificare la validità del modello di variogramma alla scala di intervalli di tempo molto grandi.

2.2.4 Il metodo "Drift and Conditional Estimation"

La conduttività termica del terreno è dedotta dal metodo ILS, cioè calcolando la pendenza b del comportamento lineare della temperatura nello spazio del logaritmo del tempo. λ_g è determinata tramite b , una volta fissate la potenza iniettata P e la lunghezza attiva della sonda verticale D .

Il metodo della deriva proposto non cambia la logica generale dell'approccio, ma il modo di stimare b , e conseguentemente a .

Considerato il modello a residuo (equazione 25), con il trend espresso dalla relazione teorica, il modello previsionale degli incrementi della temperatura, chiamato deriva, è

$$D(t, \Delta t) = ET [(t + \Delta t) - T(t)] = m(t + \Delta t) - m(t) = b (\ln(t + \Delta t) - \ln(t)) \quad (29)$$

La deriva nello spazio degli incrementi τ ($\Delta\tau$) è una linea passante per l'origine con pendenza b :

$$D(t, \Delta t) = b (\ln(t + \Delta t) - \ln(t)) = b \Delta\tau = D(\Delta\tau) \quad (30)$$

Le coppie che soddisfano un passo costante $\Delta\tau$ devono avere una distanza temporale che varia nel tempo.

$$\Delta t = e^{\Delta\tau + \ln t} - t = t(e^{\Delta\tau + \ln t}) \quad (31)$$

Sperimentalmente la media probabilistica è sostituita dalla media statistica degli incrementi n con lo stesso incremento $\Delta\tau$. In pratica vengono considerati un numero discreto di valori di deriva, corrispondenti agli incrementi n .

$$D(\Delta\tau_j) = E[T(\ln(t + \Delta t_j)) - T(\ln t)] = E[T(\ln t + \Delta\tau_j) - T(\ln t)] \cong D^*(\Delta\tau_j) = \frac{\sum_{\alpha=1}^{n(\Delta\tau_j)} [T(\ln t_\alpha + \Delta\tau_j) - T(\ln t_\alpha)]}{n(\Delta\tau_j)} \quad (32)$$

Data la rappresentazione della deriva sperimentale $D^*(\Delta\tau_j)$, la regressione ai minimi quadrati può essere applicata per stimare il parametro b (Figura 42).

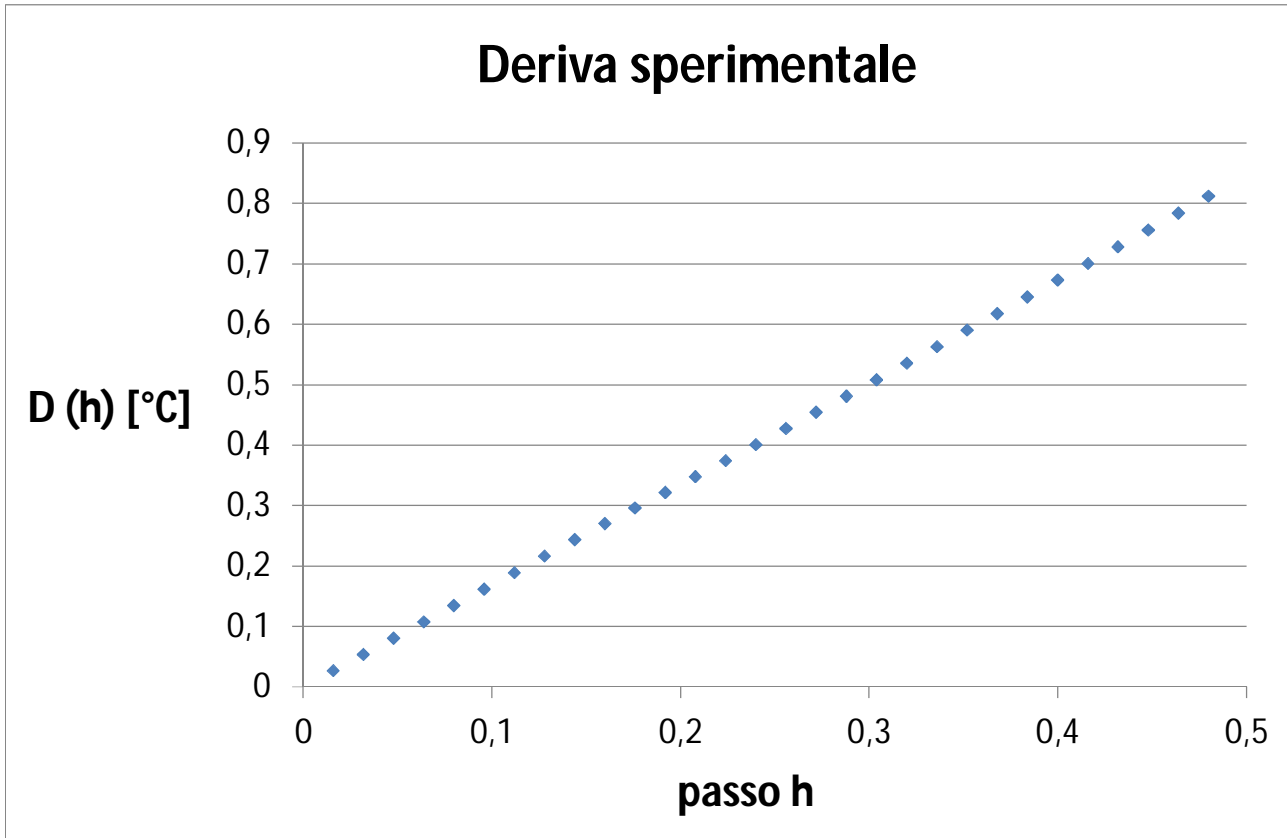


Figura 42 Deriva sperimentale

Dapprincipio il “metodo della deriva” ha una coppia di vantaggi rispetto al metodo classico:

1. la stima filtra l’intercetta a , e questo fatto permette una stima più precisa della pendenza b ;
2. la separazione delle stime della pendenza da quelle dell’intercetta permette un controllo migliore di ogni regressione.

Il metodo della deriva divide in due fasi la stima dei parametri della temperatura media nello spazio τ del logaritmo del tempo:

- 1) la stima della pendenza b dalla regressione sulla deriva sperimentale:

$$b^D = \sum_{j=1}^{nj} \psi_j^b D^*(\Delta \tau_j). \quad (33)$$

2) la stima dell'intercetta a , condizionata dalla precedente stima, tramite la regressione sulla temperatura media del fluido sperimentale:

$$a^D = \sum_{j=1}^{nj} \psi_j^a T_f(t_\alpha) + \psi_0^a. \quad (34)$$

Nell'analisi dati del TRT queste due regressioni non possono essere applicate direttamente sui dati sperimentali, a causa della crescente densità di dati nello spazio del logaritmo del tempo τ .

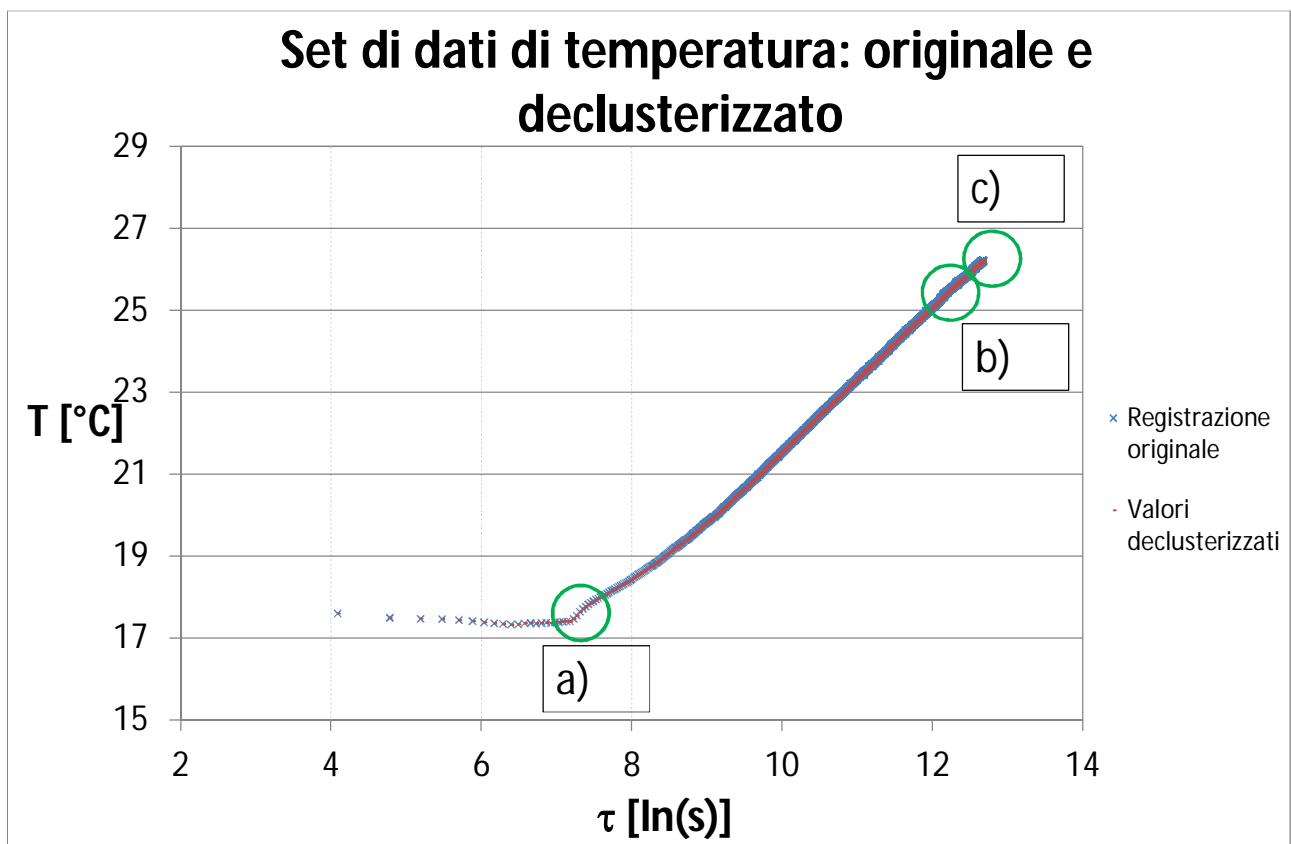
Una regressione per non avere bias necessita di campioni isoprobabili, cioè di un'informazione uniformemente distribuita (Pyriz, 2004). Nel caso del TRT, le temperature sono registrate a intervalli costanti di tempo $t_{i+1} = t_i + \Delta t_i$, in cui l'incremento sperimentale del tempo è costante, basato sull'intervallo di registrazione, per esempio 60 secondi. Ciò significa che nello spazio del logaritmo τ c'è una densità di dati differente, inferiore all'inizio e maggiore alla fine.

La variabilità della densità è rilevante e influenza negativamente ogni regressione lineare, fatta su ogni funzione dello spazio τ , sia essa la temperatura o la deriva della temperatura.

Il problema non è sul metodo della regressione per sé stesso, cioè sulla scelta dei pesi ψ_j^b , ma sulla qualità dei dati disponibili, cioè sui valori della deriva sperimentale, $D^*(\Delta \tau)$. Infatti, gli incrementi di temperatura a passi più grandi sono calcolati utilizzando gli stessi dati come limite inferiore del passo $T_{inf}(t_0)$, e molti dati come limite superiore del passo, $T_{sup}(t_i)$, essendo questi $T_{sup}(t_i)$ concentrati tutti nella parte finale della scala τ . Non è una questione di numero di dati, ma della loro distribuzione sistematicamente disomogenea. Per ridurre il rischio di bias, la stima della deriva necessita di dati regolarmente distribuiti (Olea, 2007).

Nell'analisi seguente, è fissata una densità dei dati nello spazio τ . Il valore della densità è stato stabilito sulla base del numero minimo di dati ricadenti nell'intervallo più vicino ad una predefinita lunghezza del logaritmo del tempo, iniziando dal tempo iniziale individuato t_0 (per esempio con il metodo "Best Time Interval"). Nel caso dell'esempio, è stato scelto un intervallo di lunghezza fissa

di $0,5 \ln(s)$, corrispondente a 400 dati è stato scelto, che equivale a una densità nello spazio τ di 800 dati/ $\ln(s)$. E' stata quindi applicata una tecnica di declustering, che consiste in una scelta casuale di 400 valori in ogni intervallo τ . In figura 43 è riportato il grafico sperimentale dell'evoluzione dei dati di temperatura, con e senza declustering. Come si vede, non appare nessuna differenza per valori di logaritmo del tempo bassi, mentre nel centro della scala del logaritmo del tempo e soprattutto nell'ultimo settore della scala del logaritmo del tempo, la reale selezione di dati è evidente.



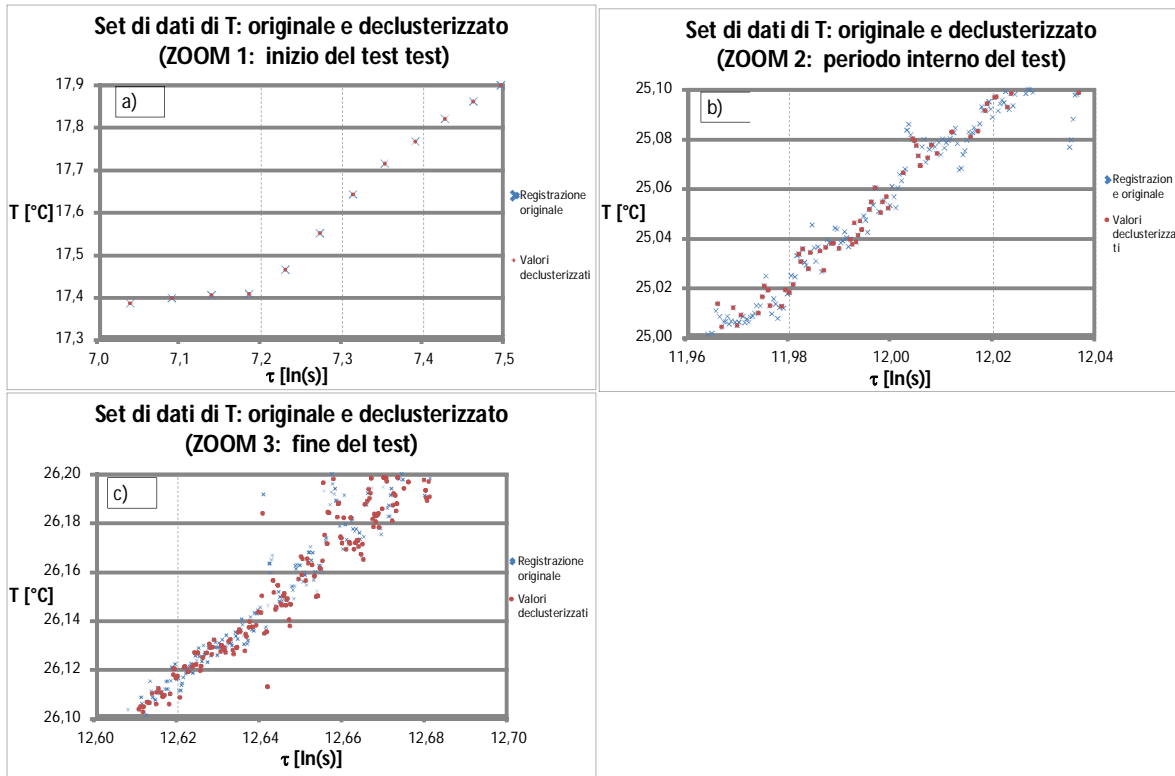


Figura 43 Tecnica di declustering dei valori sperimentali: totale e zoom (a),(b),(c)

La deriva sperimentale è stata quindi calcolata a partire dai dati declusterizzati, sempre partendo dal tempo iniziale individuato t_0 , e la pendenza b è stata stimata tramite una regressione lineare (equazione 33, figura 44-a). In questo caso, la deriva è una linea passando per l'origine, quindi i pesi della regressione sono semplicemente proporzionali alla variabile indipendente, cioè il passo del logaritmo del tempo:

$$\psi_j^b = \frac{\Delta \tau_j}{\sum_{j=1}^{n_j} \Delta \tau_j^2} \quad (35)$$

L'intercetta a della linea che rappresenta la temperatura media del fluido nello spazio del logaritmo del tempo τ è ottenuta da una nuova regressione mono-parametrica sulle temperature del fluido T_f nello spazio del logaritmo del tempo τ , e condizionata dalla stima della pendenza già ottenuta tramite la regressione sulla deriva sperimentale (equazione 34, figura 44-b).

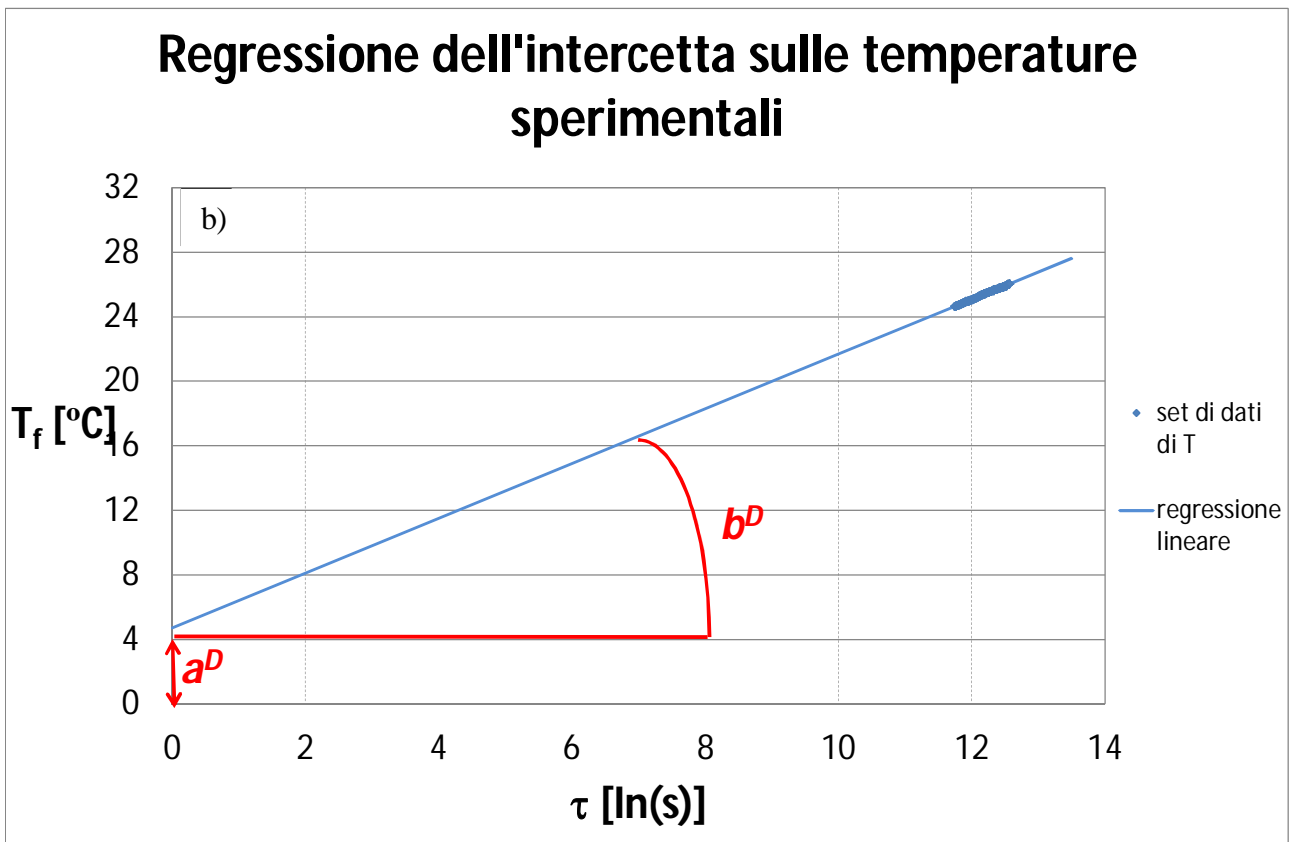
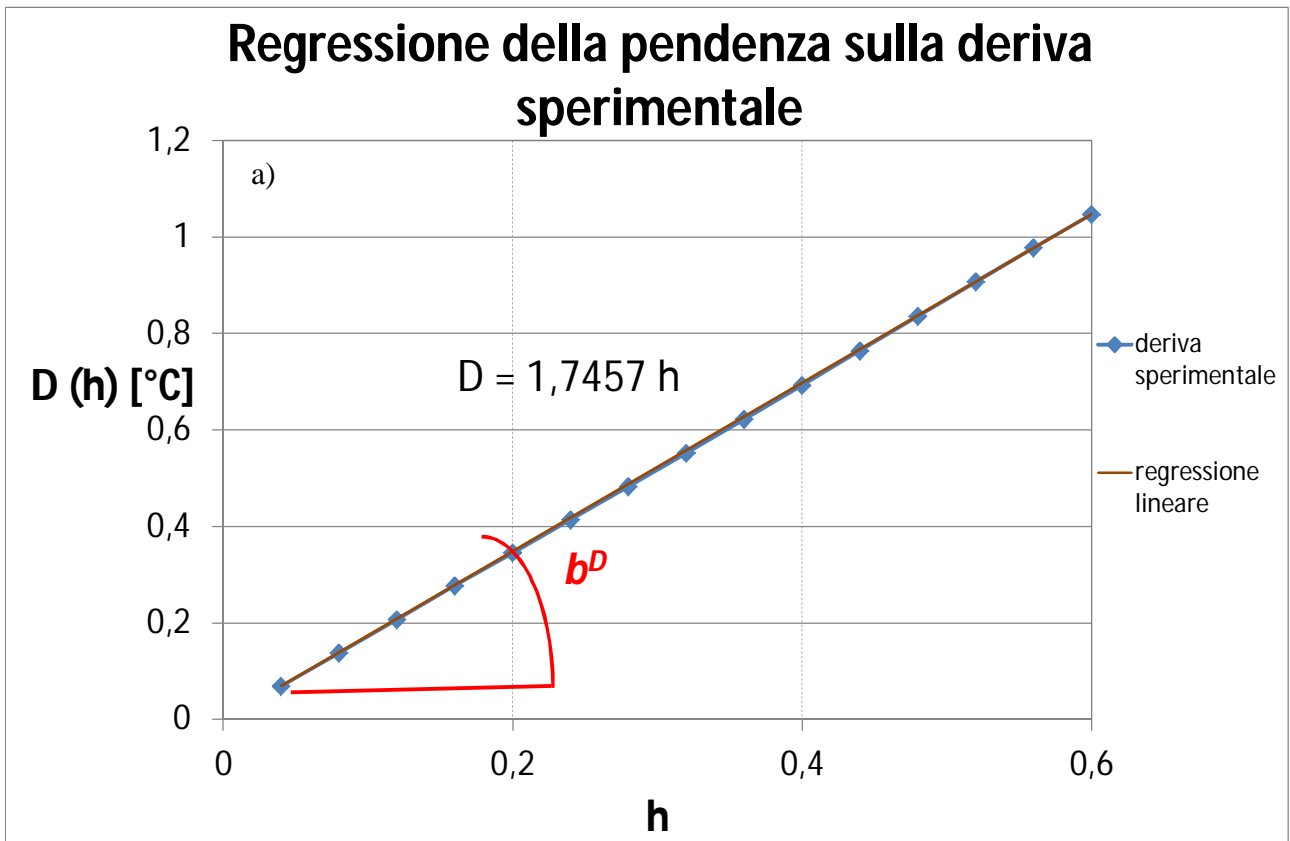


Figura 44 Identificazione dei valori di pendenza (a) ed intercetta (b) tramite la regressione sulla deriva

I pesi della regressione lineare condizionale sono:

$$\begin{cases} \psi_j^a = \frac{1}{n} \\ \psi_0^a = -b^D \cdot \overline{\ln t} \end{cases} \quad (36)$$

Nel caso studio analizzato, a partire dagli stessi tempi iniziali e finali del test (t_0 : 35 h, t_f : 80 h), i risultati sperimentali della pendenza e dell'intercetta sono riassunti come segue:

	<i>Metodo Tradizionale [MT]</i>	<i>Metodo Tradizionale con Declustering [MTD]</i>	<i>Metodo della Deriva [MD]</i>	<i>Metodo della Deriva con Declustering [MDD]</i>	<i>Differenza (%) tra MDD e MT</i>
<i>Pendenza b^* [$^{\circ}\text{C}/\ln(s)$]</i>	1.695	1.696	1.681	1.678	1%
<i>Intercetta a^* [$^{\circ}\text{C}$]</i>	4.724	4.712	4.899	4.934	5%

Tabella 1 Confronto dei valori di pendenza b ed intercetta a ottenuti con diversi metodi

a^* e b^* ottenuti senza declustering [MT e MD] devono essere scartati perché sono influenzati dalle differenze di densità di dati nella scala del logaritmo del tempo e pertanto non sono rappresentativi dell'evoluzione del trend

Criteri oggettivi sono necessari per comparare il metodo tradizionale [MTD] e il metodo della deriva [MDD] per calcolare i parametri a e b della ILS. Questi criteri sono:

- i) la qualità dei risultati;
- ii) la complessità della procedura.

La qualità dei risultati può essere valutata solo nel contesto dell'approccio probabilistico, cioè controllando la qualità della stima: in pratica, vengono comparate le varianze di stima (Matheron, 1978).

Riferendosi alla pendenza b , le varianze di stima dei due metodi sono:

$$\sigma_e^2(b^T \rightarrow b) = -\sum_{\beta=1}^n \sum_{\alpha=1}^n \left(\frac{\ln t_\beta - \overline{\ln t}}{n \cdot \sigma_{\ln t}^2} \right) \left(\frac{\ln t_\alpha - \overline{\ln t}}{n \cdot \sigma_{\ln t}^2} \right) \cdot \gamma(\Delta t_{\alpha\beta}) \quad (37)$$

$$\sigma_e^2(b^D \rightarrow b) = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^{nj} \Delta \tau_j^2 \right)^2} \sum_{j=1}^{nj} \sum_{k=1}^{nj} \frac{\Delta \tau_j \cdot \Delta \tau_k}{nc(\Delta \tau_j) \cdot nc(\Delta \tau_k)} \sum_{\beta=1}^{nc(\Delta \tau_j)} \sum_{\alpha=1}^{nc(\Delta \tau_k)} \left(-\gamma(\Delta t_{\beta j, \alpha k}) + \gamma(\Delta t_{\beta j, \alpha}) + \gamma(\Delta t_{\beta, \alpha k}) - \gamma(\Delta t_{\beta, \alpha}) \right) \quad (38)$$

Entrambe le relazioni sono espresse rispetto al variogramma delle fluttuazioni modellizzato nello spazio del tempo. I passi nel caso tradizionale sono la distanza temporale tra le coppie di punti del vettore dei dati originali $T(t_\alpha)$, $T(t_\alpha + \Delta t_{\alpha\beta})$. Nel caso della deriva, i passi devono essere calcolati da una trasformazione inversa del logaritmo del tempo dei punti che contribuiscono a ogni deriva sperimentale. $D^*(\Delta \tau_j): \tau_\alpha$; $D^*(\Delta \tau_j): \tau_\alpha + \Delta \tau_{\alpha\beta}$.

$$\begin{aligned} \Delta t_{\beta, \alpha} &= t_\beta - t_\alpha = e^{\tau_\beta} - e^{\tau_\alpha} \\ \Delta t_{\beta j, \alpha k} &= t_{\beta j} - t_{\alpha k} = e^{\tau_\beta + \Delta \tau_j} - e^{\tau_\alpha + \Delta \tau_k} \end{aligned} \quad (39)$$

Viene quindi creato un variogramma modello per definire la struttura spaziale delle variabili. Una volta conosciuto il variogramma modello entrambe le varianze di stima possono essere calcolate.

La metodologia della deriva produce teoricamente una migliore qualità della stima della pendenza, come mostrato in figura 4, in cui è rappresentata la sensitività delle varianze di stima al numero di dati usati nella stima. Entrambe le funzioni, comunque, convergono molto rapidamente così che, nei TRT usuali, dove ci sono migliaia di dati disponibili, entrambi i metodi convergono molto velocemente a un risultato comune della stessa qualità.

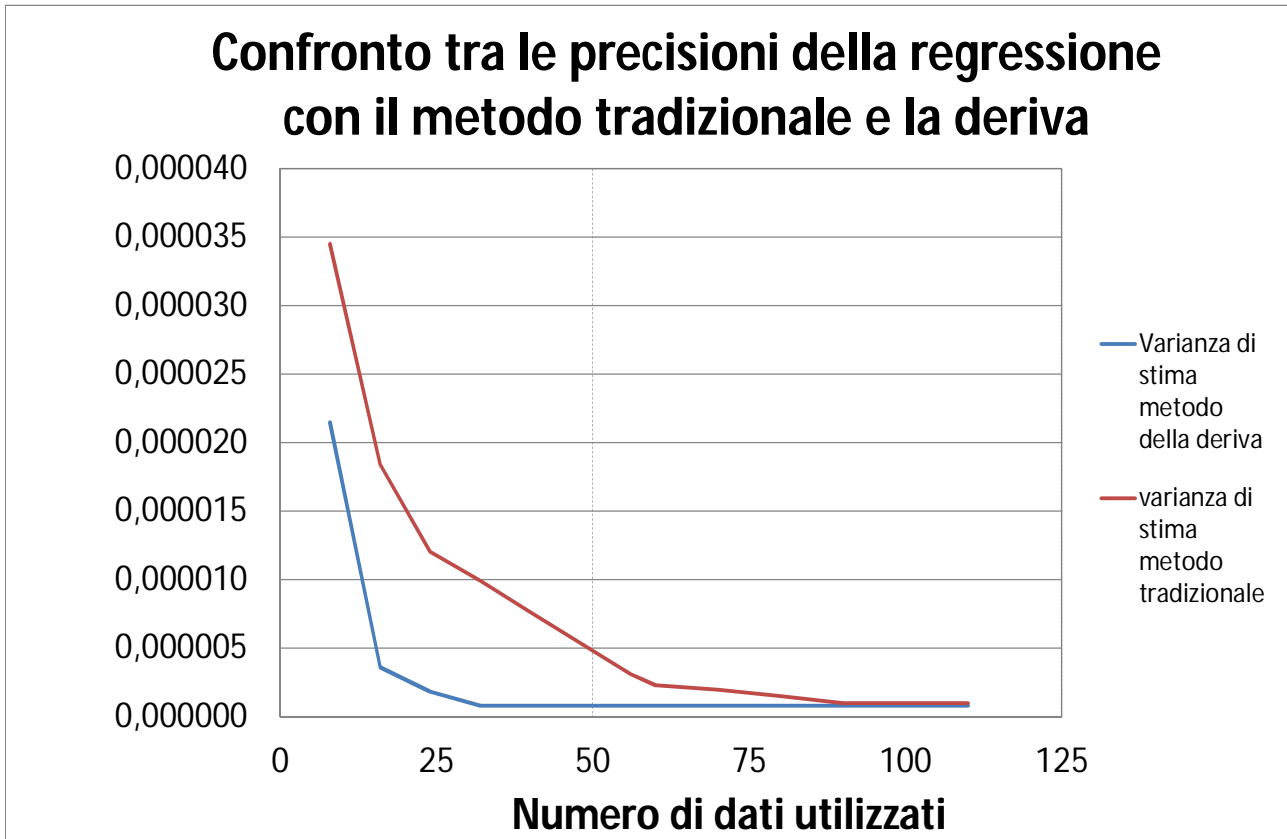


Figura 45 Analisi di sensitività sulle varianze di stima del metodo della deriva e del metodo tradizionale

Con riferimento all'intercetta a , le varianze di stima dei due metodi sono:

$$\sigma_e^2(a^T \rightarrow a) = C(0) - \frac{1}{n^2} \sum_{\beta=1}^n \sum_{\alpha=1}^n \left(1 - \frac{(\ln t_\beta - \overline{\ln t}) \cdot \overline{\ln t}}{\sigma_{\ln t}^2} \right) \left(1 - \frac{(\ln t_\alpha - \overline{\ln t}) \cdot \overline{\ln t}}{\sigma_{\ln t}^2} \right) \cdot \gamma(h_{\alpha\beta})$$

$$\sigma_e^2(a^D \rightarrow a) = \sigma_e^2(b^D \rightarrow b) \cdot (\overline{\ln t_\alpha})^2 - \bar{\gamma}(A, A) \quad (40)$$

Dove $\bar{\gamma}(A, A)$ rappresenta il variogramma medio delle fluttuazioni del dominio A dei tempi sperimentali.

Il confronto tra le procedure di stima dei parametri a e b della relazione temperature – tempi può essere divisa in due, il confronto tra il calcolo delle stime e delle varianze di stima.

Per quanto riguarda la complessità della stima, in entrambi i casi la procedura è la stessa: una regressione lineare. La regressione sul metodo della deriva richiede un passaggio preliminare, il calcolo della deriva e due regressioni distinte. Dal punto di vista del numero di operazioni la

procedura di stima con il metodo della deriva è più complessa, ma il totale delle operazioni può essere comunque incluso in un unico foglio di calcolo o programma.

Per quanto riguarda la complessità del calcolo delle varianze di stima, l'elaborazione aggiuntiva è necessaria perché è richiesta la modellizzazione del variogramma delle fluttuazioni. D'altra parte, potrebbe non essere necessario ripetere il calcolo delle varianze di stima per ogni TRT, perché il loro valore assoluto è generalmente molto piccolo comparato con l'incertezza di altri parametri che intervengono nell'identificazione dei parametri termici del terreno.

Una volta calcolato λ_g è quindi possibile calcolare R_b . La procedura classica richiede prima la scelta di una c_g di tentativo per ottenere, attraverso l'equazione 16, la resistenza termica del foro.

Questo calcolo è realizzato in una maniera deterministica e imponendo un valore di tentativo di c_g che è scelto come una media pesata sugli strati per i terreni coinvolti.

In realtà la capacità termica volumetrica di ogni tipo di terreno c_g può variare all'interno di un range di possibilità (definito per esempio dalle norme tedesche VDI 4640 Parte 1); si può supporre che la distribuzione di probabilità a priori sia simmetrica (per esempio una distribuzione gaussiana), con la media, m_{Cg} , coincidente con il punto medio dell'intervallo e con il valore medio dei valori tabellati. Si può anche considerare che il semi intervallo corrisponda a $2\sigma_{Cg}$.

La resistenza termica del foro, R_b , è calcolata analiticamente sui parametri del foro (proprietà termiche del materiale di riempimento, della sonda e del fluido circolante, spaziatura tra le tubazioni) ma dipende fortemente dalla qualità dell'installazione (operazioni di perforazione, miscelazione, mantenimento della verticalità e della spaziatura della sonda). In seguito alla realizzazione teorica di un foro perfetto, l' R_b reale coincide con il valore di calcolo, e per tale motivo vi si può attribuire il valore medio della distribuzione di probabilità m_{Rb} , all'interno di un range di variabilità definito dagli estremi R_{bmax} e R_{bmin} , definiti realisticamente sulla base del possibile scostamento percentuale dal valore medio in seguito ad una non perfetta realizzazione del foro.

L'attribuzione di una distribuzione di probabilità alla resistenza termica del foro richiede alcune ipotesi. Si ritiene legittimo pensare ad una distribuzione uniforme con media, m_{R_b} , uguale al valore centrale, e varianza uguale a:

$$\sigma_{R_b}^2 = \frac{(R_{b_{\max}} - R_{b_{\min}})^2}{12} \quad (41)$$

Realisticamente le due variabili sono indipendenti, considerando che la capacità termica volumetrica del terreno c_g è una grandezza naturalmente variabile e la resistenza termica del foro R_b è una variabile artificiale, che risulta da un'azione umana. La distribuzione di probabilità congiunta è quindi il prodotto delle rispettive distribuzioni monovariate:

$$f(c_g, R_b) = f_C(c_g) f_R(R_b) \quad (42)$$

Un criterio ottimale, cioè la scelta della coppia di valori ottimi $(c_{g,o}, R_{b,o})$, si può riferire a una classica struttura di stima, cioè la scelta di uno stimatore corretto che minimizzi la varianza di stima. Non è quindi un problema bivariato, ma un problema monovariato, perché la relazione lineare teorica permette di eliminare una delle variabili:

$$\omega_1 \ln(c_g) + \omega_2 R_b + \omega_3 = 0 \quad (43)$$

L'ottimalità di un parametro implica l'ottimalità dell'altro. Pertanto è sufficiente considerare una variabile che vari lungo una linea condizionale, in quanto è equivalente a considerare una coppia di parametri condizionati dalla relazione.

Data una variabile aleatoria con una distribuzione nota, della quale si vuole stimare il valore vero della realizzazione senza campioni, il valore ottimale coincide con il valore medio, perché garantisce la correttezza di stima e la minimizzazione della varianza. L'errore di stima e è dato dalla differenza tra il valore vero X e il valore stimato x :

$$e = x - X \quad (44)$$

Il valore vero incognito è una funzione aleatoria; inoltre anche l'errore è una variabile aleatoria. Se lo stimatore deve essere corretto e ottimale, il valore atteso dell'errore deve essere nullo e la varianza di stima deve essere minima:

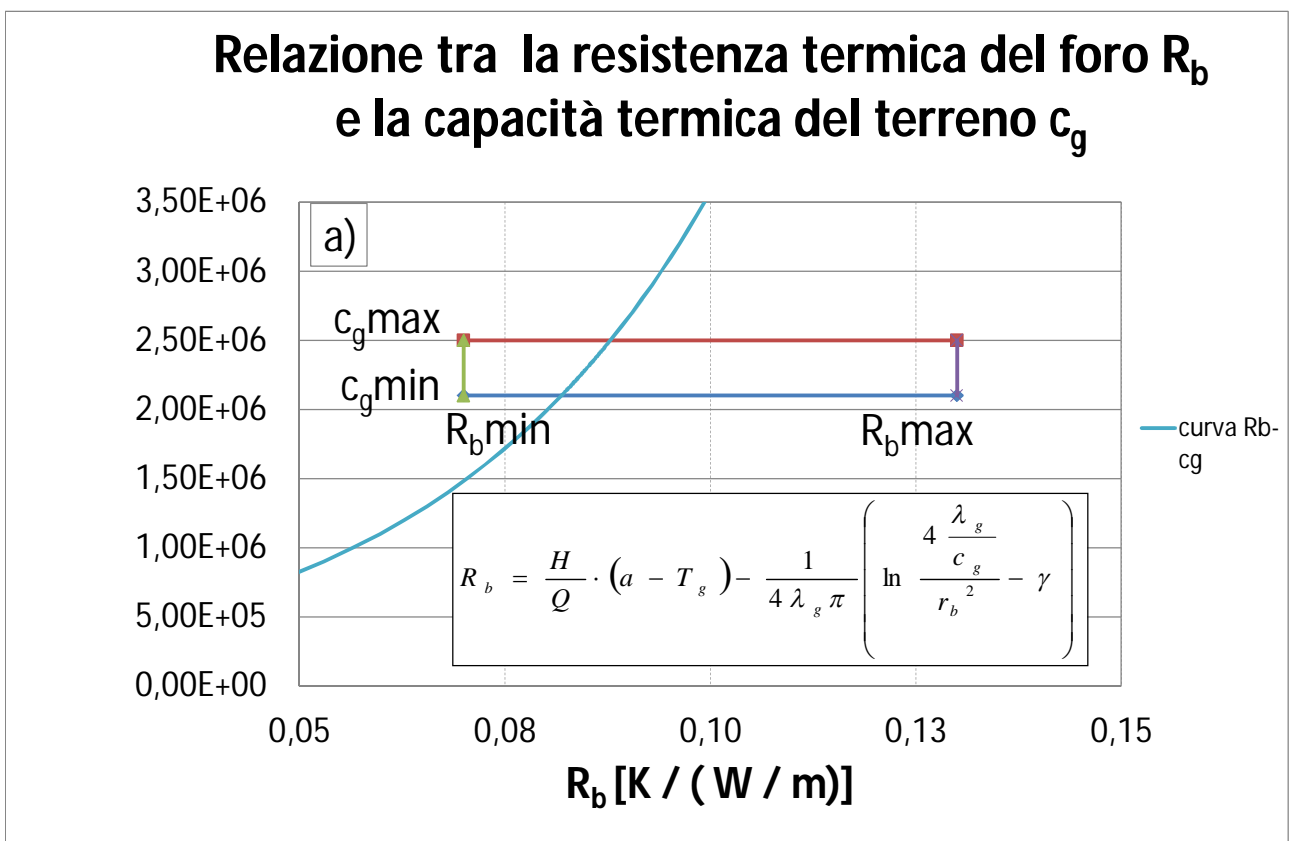
$$E[e] = E[x - X] = 0 \Rightarrow x_0 = E[X] = m_x \quad (45)$$

$$E[e^2] = \min \Rightarrow \frac{\partial E[(x - X)^2]}{\partial x_0} = 0 \Rightarrow E[-2(x - X)] = 0 \Rightarrow x = E[X]$$

Il problema è risolto se si conosce la distribuzione di probabilità della variabile, che descriva la relazione tra i due parametri di interesse.

La relazione condizionale riduce di una dimensione il dominio della variabilità della legge bivariata ed identifica un sottodominio di esistenza di una coppia di possibili valori per i parametri basati sulle misure del TRT. Nuovi estremi, c_{gLmax} , c_{gLmin} , R_{bLmax} , R_{bLmin} , sono ovviamente inclusi all'interno del range esistente di origine. (figura 46)

$$(c_{gLmax}, c_{gLmin}) \subseteq (c_{gmax}, c_{gmin}) \quad (R_{bLmin}, R_{bLmax}) \subseteq (R_{bmax}, R_{bmin}) \quad (46)$$



Relazione tra R_b e c_g : zoom dell'area di validità

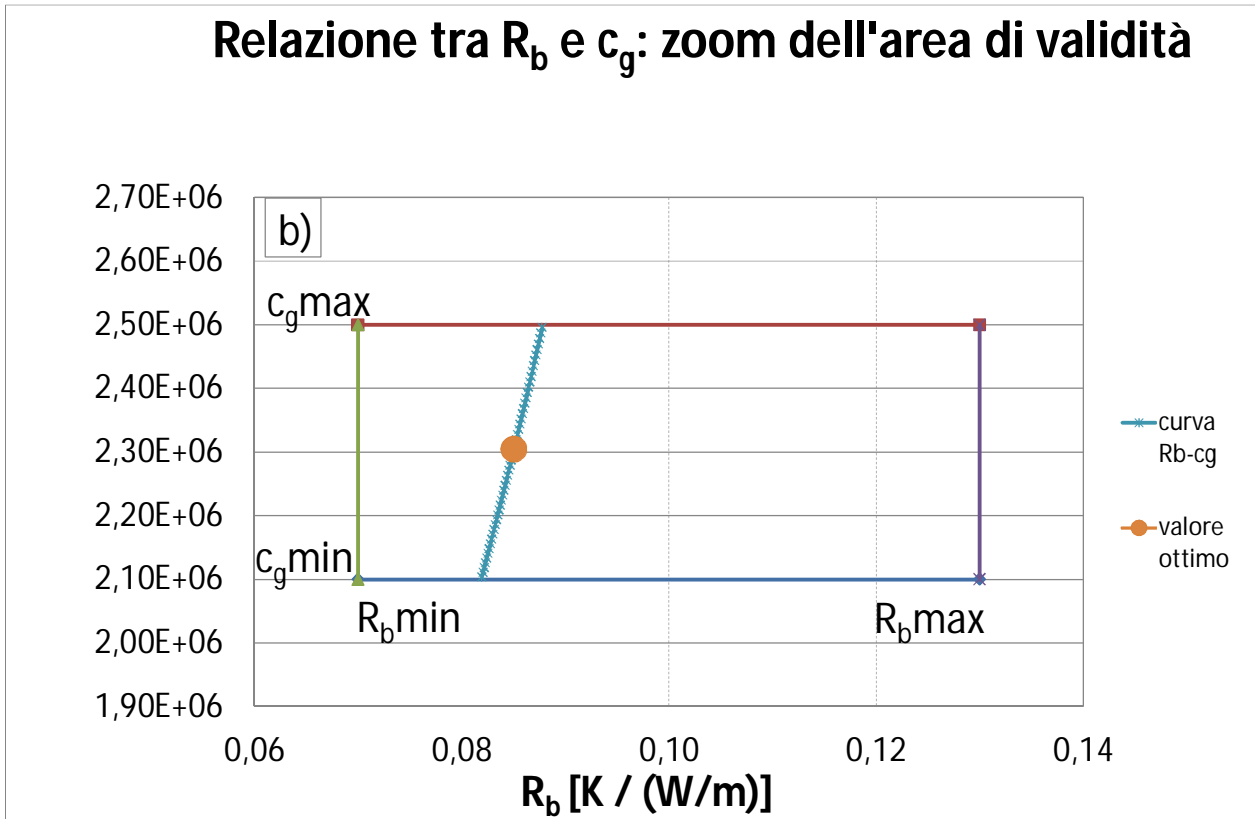


Figura 46 Relazione tra R_b e c_g e dominio di variabilità. Totale (a) e zoom all'interno del dominio (b)

Il sottodominio, che deriva dalla relazione condizionale, identifica una distribuzione di probabilità condizionale.

L viene chiamato il sottodominio definito dalla relazione condizionale. Di seguito si enuncia l'equazione della distribuzione condizionale:

$$f(c_g, R_b | c_g, R_b \in L) = \frac{f(c_g, R_b)}{F(c_g, R_b \in L)} = \frac{f_C(c_g) f_R(R_b)}{[F_C(c_{gL \max}) - F_C(c_{gL \min})][F_R(R_{bL \max}) - F_R(R_{bL \min})]} \quad (47)$$

Dove la legge bivariata rispetta gli assiomi di probabilità, cioè:

$$F(c_{g \max}, R_{b \max}) \cong 1 \quad F(c_{gL \min}, R_{bL \min}) \cong 0 \quad (48)$$

Il valore ottimo risulta quindi:

$$c_{go} = E[c | c, R \in L] = \int_{c_{L \min}}^{c_{L \max}} c f(c, R | c, R \in L) dc \quad (49)$$

Sostituendo R_b :

$$R_b = \frac{-\omega_1 \ln(c_g) - \omega_3}{\omega_2} \quad (50)$$

$$c_{go} = \int_{c_{gL\min}}^{c_{gL\max}} c f(c_g, R_b | c_g, R_b \in L) dc = \frac{\int_{c_{gL\min}}^{c_{gL\max}} c f_C(c_g) f_R\left(\frac{-\omega_1 \ln(c_g) - \omega_3}{\omega_2}\right) dc}{[F_C(c_{gL\max}) - F_C(c_{gL\min})][F_R(R_{bL\max}) - F_R(R_{bL\min})]} \quad (51)$$

Alternativamente si può risolvere tutto in R_b , per arrivare allo stesso risultato:

$$c_g = \exp\left(\frac{-\omega_2 R_b - \omega_3}{\omega_1}\right) \quad (52)$$

$$R_{bo} = \int_{R_{L\min}}^{R_{L\max}} R_b f(c_g, R_b | c_g, R_b \in L) dR = \frac{\int_{R_{L\min}}^{R_{L\max}} R_b f_C\left[\exp\left(\frac{-\omega_2 R_b - \omega_3}{\omega_1}\right)\right] f_R(R_b) dR}{[F_C(c_{gL\max}) - F_C(c_{gL\min})][F_R(R_{bL\max}) - F_R(R_{bL\min})]} \quad (53)$$

Riguardo il caso studio a partire da dati sperimentali illustrato, di seguito viene presentata una tabella che riassume tutte le ipotesi e i risultati ottenuti dal calcolo geostatistico descritto.

Condizioni iniziali e parametri noti	• Lunghezza del foro H	→	193.5 m
	• Raggio del foro r_b	→	0.1 m
	• Potenza media iniettata Q	→	9625 W
	• Temperatura del terreno T_g	→	14.7 °C
	• Durata totale del test t	→	89 h
Range temporale di applicabilità	• Tempo iniziale t_0	→	35 h
	• Tempo finale t_f	→	80 h
Risultati derivanti dall'approccio geostatistico	• Conduttività termica del terreno λ_g	→	2.332 W/(m·K)
	• Capacità termica volumetrica del terreno c_g	→	$2.304 \cdot 10^6$ J/(m ³ ·K)
	• Resistenza termica del foro R_b	→	0.085 K/(W/m)

Tabella 2 Risultati sperimentali del caso di studio

Noti i valori del profilo verticale di temperatura misurato in foro, i valori medi delle proprietà termiche equivalenti del terreno, i dati climatici ed il flusso geotermico medio per la zona in esame, si può ricostruire l'intero profilo di conduttività termica $\lambda_{g,i}$ dei terreni lungo la verticale della sonda, tramite l'equazione:

$$\lambda_{g,i} = \frac{T_{geo,i}}{q_{geo}} \cdot D_i \quad (54)$$

Dove T_{geo} [°C] si estrapola attraverso l'equazione 8, una volta conosciuti tutti i dati.

Essendo noti quindi i dati climatici della zona del Test di Risposta Termica del caso in oggetto ed i valori equivalenti del terreno ricavati dal Test, è possibile risalire al profilo di conduttività termica responsabile del profilo di temperatura rilevato in sonda, come segue:

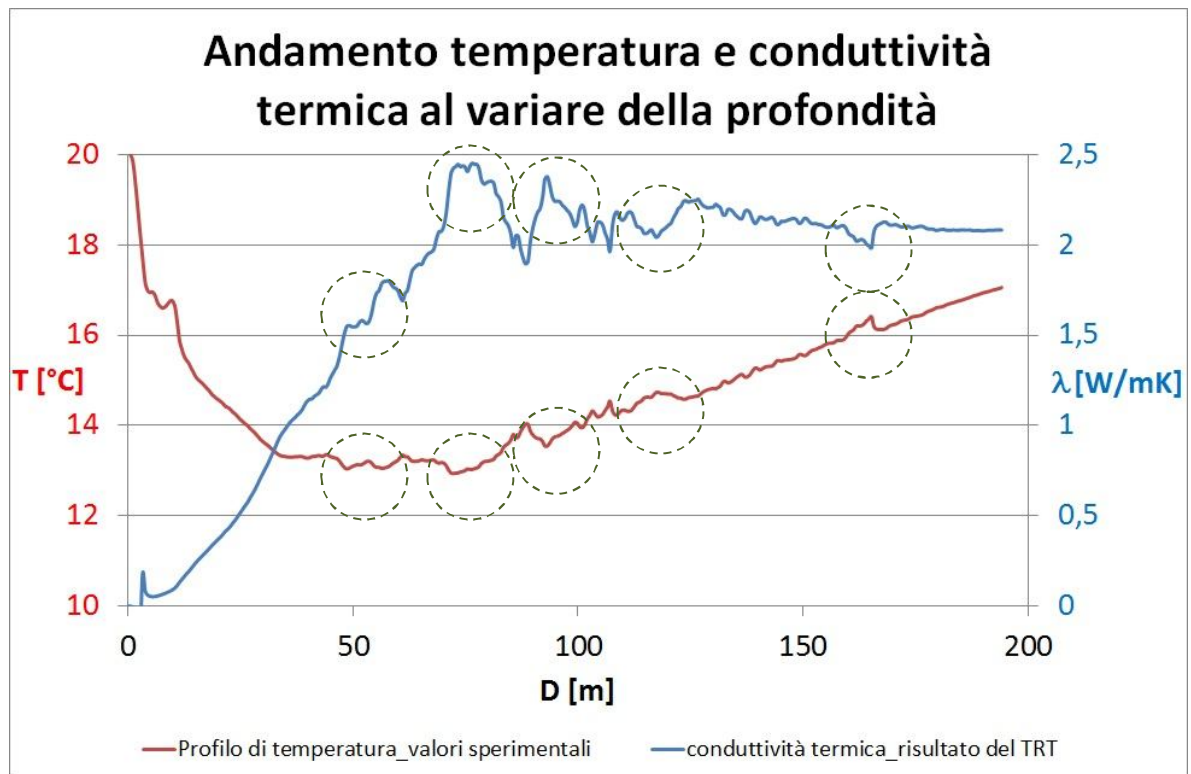


Figura 47 Andamento del risultato del profilo di conduttività termica, raffrontato al profilo di temperatura misurato in situ

Nella figura i cerchi rappresentano i punti in cui si evidenzia come il dato di temperatura sperimentale sia strettamente correlato alla variazione locale delle proprietà termiche del terreno ed in particolare della conduttività termica.

2.3 LA RICERCA DEL TERMINE CORRETTIVO SULLA POTENZA

L'analisi svolta, sia essa di tipo deterministico o probabilistico, parte da un'assunzione fondamentale: che il valore di potenza iniettata / estratta dal foro sia costante. Come si è evinto dal paragrafo 2.2.2, anche per TRT con un controllo ottimale delle possibili cause di errore ed un grado di accuratezza elevato degli strumenti di misura, sono sempre presenti delle fluttuazioni della potenza dal valore medio impostato, e tali fluttuazioni nono sono del tutto casuali ma seguono un andamento costante.

Innanzitutto occorre ricordare che la potenza è funzione del calore specifico di un fluido e della sua densità, che a loro volta sono funzione della temperatura del fluido stesso. (equazione 19). Poiché l'iniezione di potenza termica provoca una variazione della temperatura del fluido, trattandosi di un circuito chiuso, il non completo trasferimento di calore al terreno genera un incremento costante della temperatura di ritorno, provocando una variazione della potenza stessa. Si sono quindi trovate le variazioni di potenza teoriche possibili al variare della temperatura di ritorno del fluido termovettore, secondo l'equazione:

$$P_i(T_{f,out}) = \frac{M_f}{\rho_{f,i}(T_{f,out})} \cdot c_{f,i}(T_{f,out}) \cdot (T_{f,in,i} - T_{f,out,i}) \quad (55)$$

Dove la densità del fluido ρ_f [kg/m³] e la capacità termica volumetrica del fluido c_f [J/(m³·K)] sono funzione della temperatura del fluido di ritorno, e conseguentemente lo è la potenza termica.

Per quantificare quale sia l'effettivo contributo delle fluttuazioni della potenza sulla temperatura media del fluido di un Test di Risposta Termica, si è effettuata un'analisi inversa a partire dal modello di Sorgente Lineare Infinita.

Una volta noti i valori di temperatura del terreno indisturbato, conduttività termica del terreno, resistenza termica del foro e capacità termica volumetrica del terreno (per esempio del caso in esame), si sono utilizzate le seguenti equazioni per trovare i valori della pendenza e dell'intercetta in ogni punto, b_i e a_i , al variare della potenza iniettata P_i :

$$b_i = \frac{P_i(T_{f,out})}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g \cdot D} \quad (56)$$

$$a_i = T_g + \frac{P_i(T_{f,out})}{D} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g} \left(\ln \frac{4 \cdot \alpha_g}{r_b^2} - \gamma \right) + R_b \right) \quad (57)$$

Si è quindi ricostruita la curva delle temperature a partire dai valori di a e b , punto per punto.

$$T_i = a_i + b_i \cdot \ln(t) \quad (58)$$

Di seguito il grafico mostra il confronto tra l'andamento delle curve di temperatura media ricostruite a partire dai risultati del caso di studio, a potenza costante e a potenza variabile e la curva di temperatura sperimentale.

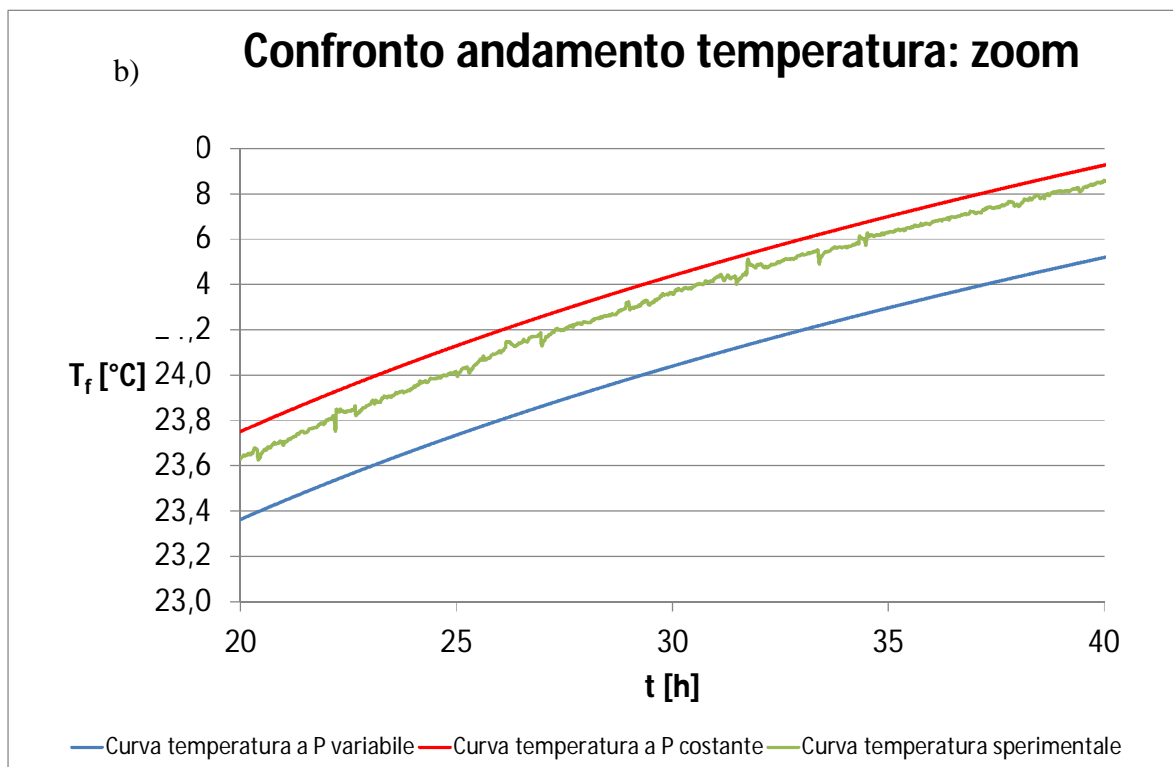
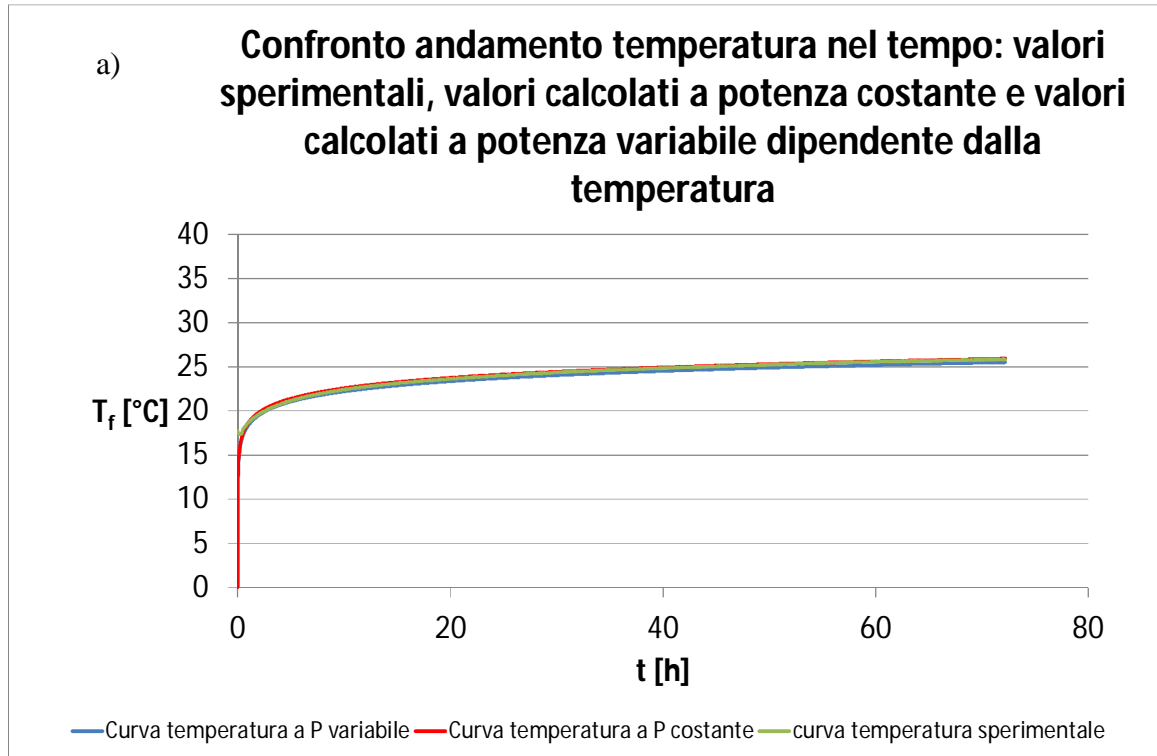


Figura 49 Confronto andamento curve di temperatura a potenza costante, variabile e sperimentale: totale (a) e zoom(b).

Lo scostamento della temperatura tra la curva a potenza costante e la curva sperimentale è molto piccolo, dell'ordine di 0,1°C. Per quanto riguarda la curva a potenza variabile, essa si colloca sullo stesso lato della curva sperimentale rispetto alla curva a potenza costante, ma lo scostamento è superiore, pari a 0,4°C. Entrambi gli scostamenti si mantengono costanti nella fase stazionaria. La tendenza della temperatura sperimentale appare dunque essere quella di allontanamento sistematico dal trend medio. Oltre alle proprietà termiche del fluido che influenzano il valore della potenza, però sembrano sussistere altri fattori che limitano lo scostamento della curva di temperatura. Tali fattori si ritiene debbano essere ricercati nell'influenza della temperatura esterna, che modifica la temperatura del fluido di ritorno nel tratto compreso tra il punto di misura e registrazione (a bocca foro) e il punto di successiva iniezione di potenza (sull'apparato del test). In ogni caso, lo scostamento dal trend medio esiste, e si mantiene costante nello stato stazionario; per tale motivo si ritiene dovrebbe essere considerato nell'applicazione del metodo della Sorgente Lineare Infinita o negli altri metodi di calcolo.

Di seguito si presenta una proposta per tenere in conto dell'influenza del comportamento (deriva sistematica e fluttuazioni) della potenza sull'effettiva misurazione delle temperatura del fluido.

$$T(t) = m'(t) + Y'(t)$$

$$m'(t) = a + b \ln(t) + cP_i(t)$$

$$Y'(t) = Y(t) + W(\Delta t)$$

(59)

Dove P_i [W] è la potenza termica, variabile nel tempo; c [K/W] è il termine di correzione della temperatura media, basata sulla correlazione tra la temperatura di ritorno del fluido e la potenza; dipende dalle variazioni di potenza dovute alle proprietà fisiche del fluido circolante; Δt [s] è il passo di tempo che intercorre tra la misura della temperatura e l'iniezione di nuova potenza termica; $W(\Delta t)$ è la Funzione Aleatoria Stazionaria che rappresenta l'interazione tra le fluttuazioni della potenza e della temperatura. (come descritto nel paragrafo 2.2.2). Se la calibrazione è corretta e la covarianza incrociata massima tra potenza e temperatura si ritrova in corrispondenza dello zero,

$W(\Delta t)$ deriva solo dalle condizioni al contorno, in quanto la temperatura esterna influenza il funzionamento del TRT.

Al momento attuale tale approccio è solo una proposta, in quanto non è stato ancora comprovato da indagini sperimentali oltre a quelle precedentemente descritte né è stato ancora individuato un metodo giudicato robusto e corretto di risoluzione del problema.

3. I SISTEMI GEOTERMICI SUPERFICIALI: LA MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA INTEGRATO

3.1 IL MODELLO DEL SISTEMA INTEGRATO

3.1.1 La necessità di un approccio integrato nella progettazione dei sistemi geotermici: la standardizzazione internazionale, l'assicurazione per il cliente e l'accesso agli incentivi per le fonti rinnovabili.

I motivi della scelta dell'installazione di un sistema geotermico (per esempio con sonde verticali) con pompa di calore elettrica rispetto ad un sistema a combustibili fossili sono essenzialmente i seguenti:

- questione energetica: il consumo di un sistema geotermico risiede essenzialmente nell'energia elettrica spesa per il funzionamento del compressore e delle pompe di circolazione. Prelevando oltre il 70% dell'energia dal terreno, il consumo effettivo di energia è molto basso;
- questione economica: ad un consumo energetico basso, corrispondono basse spese di esercizio, a fronte però di un elevato investimento iniziale, che in ogni caso si ripaga tra gli 8 e i 12 anni, a seconda dei prezzi delle materie prime;
- questione ambientale: così come i consumi, anche le emissioni di sostanze climalteranti sono piuttosto ridotti. Inoltre l'emissione non avviene in loco, ma rimandata alle centrali di conversione dell'energia elettrica;
- questione di sicurezza: non essendo presenti processi di combustione, il sistema non è sottoposto a particolari rischi di incendio;
- questione socio-politica: l'energia necessaria è per larghissima parte situata sul territorio stesso dell'edificio in esame, rimandando alla produzione esterna solo la quota di energia

elettrica. Anche per quanto riguarda la tecnologia necessaria, essa è generalmente diffusa e semplice da reperire sul territorio. Per tale motivo, si riduce la dipendenza da materiali, tecnologie e combustibili provenienti dall'esterno.

A fronte dei citati indiscussi vantaggi, il rischio di insuccesso nell'adozione di un sistema geotermico è superiore a qualsiasi altro impianto di climatizzazione ad oggi conosciuto. Ciò è dovuto alla difficoltà nell'integrazione delle diversi componenti: la componente energetica dell'edificio, legata alla variabilità climatica e alle esigenze specifiche, la componente termotecnica dell'impianto, legata al funzionamento e al controllo dei sistemi, la componente più strettamente geologica ed idrogeologica del terreno, legata alla valutazione della risorsa geotermica disponibile. Trattandosi di sistemi complessi, infatti, la progettazione dei sistemi geotermici necessita di un approccio integrato che faccia dialogare tutte le sue parti in modo univoco e che identifichi, seppur con le approssimazioni del caso, la variazione dell'efficienza nel tempo, fornendo quindi le adeguate garanzie in termini sia assicurativi che finanziari.

3.1.2 Le componenti di un sistema geotermico e la loro modellizzazione

In un sistema geotermico per la climatizzazione interagiscono diverse componenti: l'ambiente esterno, l'edificio e la sua destinazione d'uso, i terminali di distribuzione del calore, la pompa di calore, il sistema di geoscambiatori, il terreno. (Sanner, 2003). L'interazione è dinamica ed ha un carattere circolare. Inoltre i rapporti di causa - effetto non si hanno semplicemente tra la componente precedente e quella posteriore, ma esistono anche dei rapporti di carattere trasversale. Per esempio, l'ambiente esterno ha un'influenza sì sull'edificio e quindi sul suo fabbisogno termico, ma anche sul terreno nello strato termicamente instabile e conseguentemente sull'energia effettivamente estraibile dallo stesso. Il presente lavoro di ricerca ha tentato di individuare una procedura integrata, univoca e condivisa per la simulazione di un sistema geotermico nel suo complesso, che porta ad una valutazione dei carichi termici a breve (mensile), medio (annuale) e lungo termine (decennale). La procedura prevede poi un'ottimizzazione interna, che porta a

definire, impostati i parametri di progetto iniziali, la soluzione ottimale in termini di costi di investimento iniziale ed energia elettrica consumata dal compressore della pompa di calore e dalle pompe di circolazione. Tale procedura infine è integrata da una necessaria analisi di sensitività e di rischio sui parametri incogniti, per definire dei range di probabilità in cui tali carichi si collocano per ognuna delle modalità di utilizzo del sistema. Infine, sono state integrate a tali analisi una valutazione economica ed una valutazione ambientale. Tutte le procedure realizzate e tutti i calcoli svolti sono connessi tra loro per mezzo di un unico foglio di calcolo, che permette quindi una organizzazione integrata del sistema.

Per maggiore semplicità di comprensione, e per non appesantire eccessivamente la trattazione, si riporta di seguito un diagramma di flusso che riassume la procedura adottata ed i passaggi per ogni passo di progettazione e simulazione.

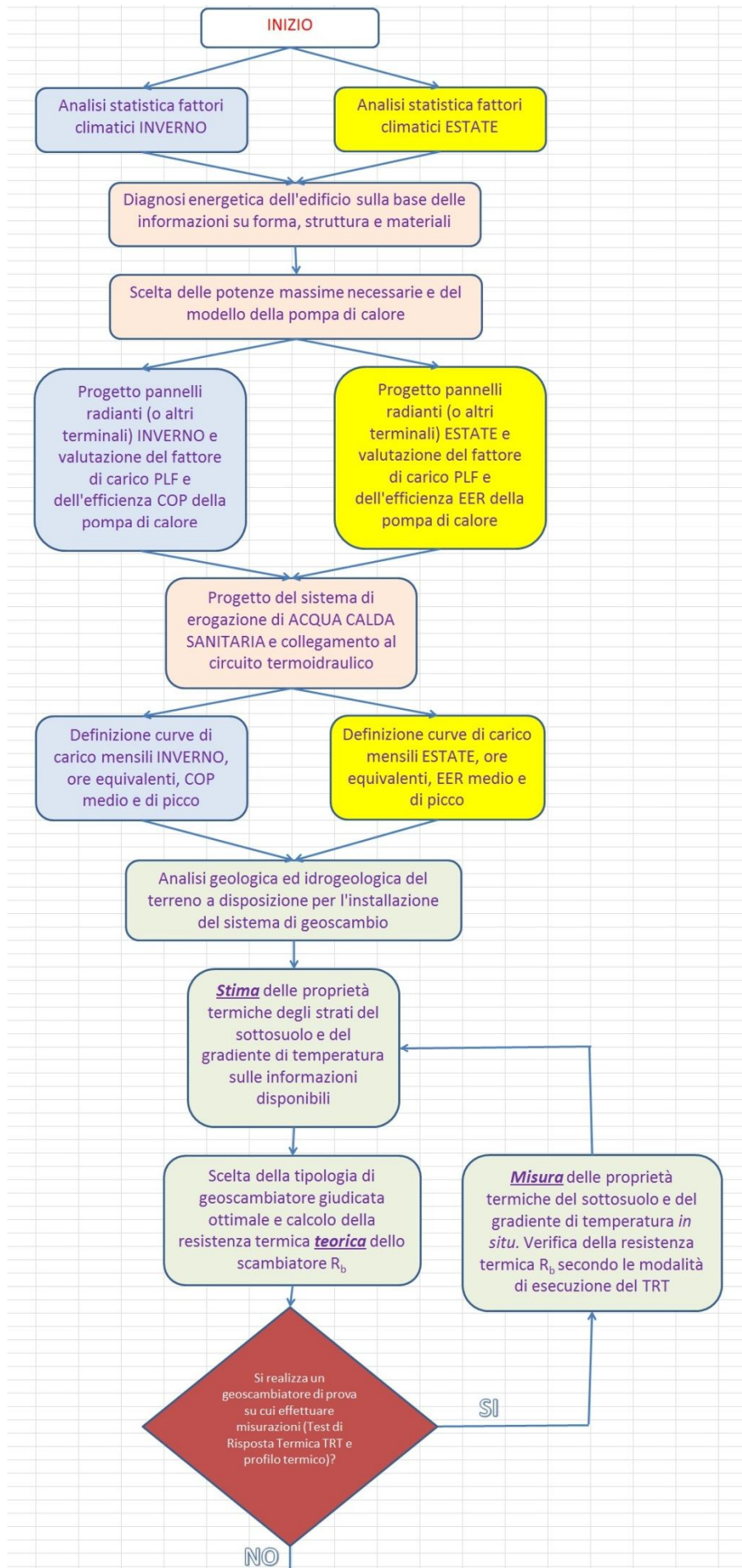
Inoltre, nel corso del capitolo, non si tratterà per esteso tutta la trattazione teorica del funzionamento della pompa di calore e dello scambio che avviene tra terreno ed edificio tramite la pompa di calore, data per nota ed assodata. Ci si soffermerà invece su alcuni parametri, giudicati generalmente marginali ai fini della progettazione, ma che invece possono risultare decisivi, e la cui ottimizzazione all'interno del sistema di progettazione integrata deve essere garantita. Su questi parametri, verranno realizzate quindi le analisi di sensitività e di rischio successive.

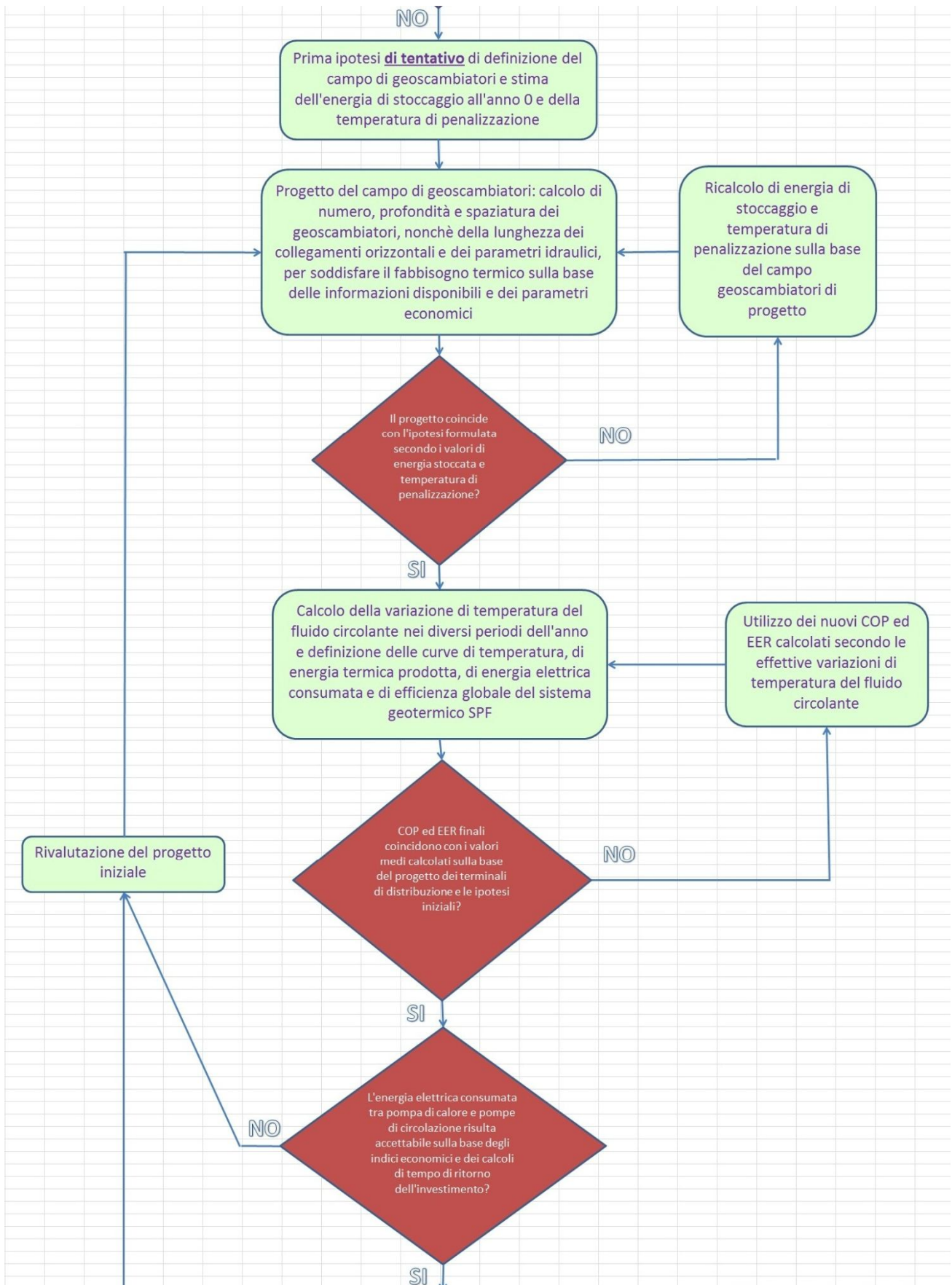
Per completezza, si aggiunge che la base su cui si è impostato il procedimento è il metodo analitico di progettazione noto come *ASHRAE*, di cui di seguito si riportano le equazioni fondanti per il calcolo della lunghezza totale delle sonde verticali in riscaldamento L_{heat} e raffrescamento L_{cool} (Kavanaugh, 1997):

$$L_{heat} = \frac{P_{year} \cdot R_{g,year} + P_{g,heat} \cdot [R_b + (PLF_{heat} \cdot R_{g,month}) + (R_{g,day} \cdot F)]}{T_g - \left(\frac{T_{f,in} + T_{f,out}}{2} \right)_{heat} - T_p} \quad (60)$$

$$L_{cool} = \frac{P_{year} \cdot R_{g,year} + P_{g,cool} \cdot [R_b + (PLF_{cool} \cdot R_{g,month}) + (R_{g,day} \cdot F)]}{T_g - \left(\frac{T_{f,in} + T_{f,out}}{2} \right)_{cool} - T_p} \quad (61)$$

Dove P_{year} [W] è il flusso termico medio scambiato con il terreno nell'arco di un anno; $P_{g,heat}$ [W] è la potenza di progetto lato terreno per il riscaldamento; $P_{g,cool}$ [W] è la potenza di progetto lato terreno per il raffrescamento; PLF_{heat} è il fattore di carico nel mese di progetto per il riscaldamento; PLF_{cool} è il fattore di carico parziale nel mese di progetto per il raffrescamento; F è il fattore di cortocircuito termico tra le tubazioni di mandata e di ritorno alle sonde verticali; R_b [K·m/W] è la resistenza termica del foro; $R_{g,year}$ [K·m /W] è la resistenza termica del terreno, riferita all'impulso annuale; $R_{g,month}$ [K·m/W] è la resistenza termica del terreno, riferita all'impulso mensile; $R_{g,day}$ [K·m/W] è la resistenza termica del terreno, riferita all'impulso giornaliero; T_g [°C] è la temperatura del terreno indisturbato; $T_{f,in}$ [°C] è la temperatura di mandata del fluido alle sonde; $T_{f,out}$ [°C] è la temperatura di ritorno del fluido dalle sonde; T_p [°C] è la temperatura di penalizzazione, che indica l'ammontare della variazione della temperatura del terreno.





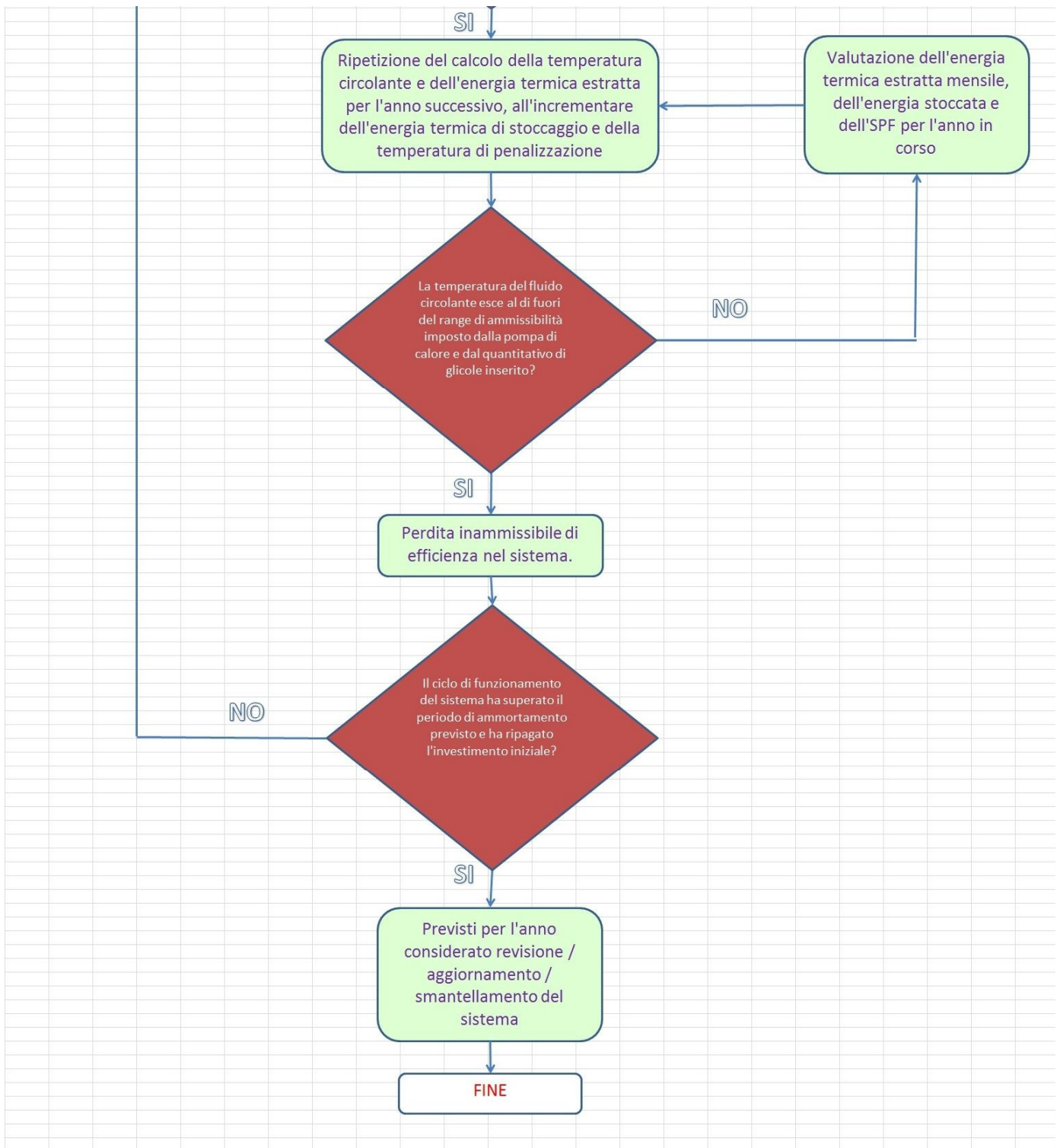


Figura 50 Diagramma di flusso della procedura di progettazione integrata

3.1.3 La sonda geotermica verticale e l'importanza della resistenza termica del foro

La corretta realizzazione della sonda verticale è importante per comprovare la garanzia:

- dell'assenza di crepe o rotture che generano perdite di carico che compromettono il funzionamento del sistema;
- del rispetto delle normative vigenti in merito alla protezione delle falde acquifere attraversate;
- del rispetto dei parametri di progetto.

Quest'ultimo punto, troppo spesso sottovalutato, è particolarmente importante in quanto un'errata installazione potrebbe vanificare tutto il lavoro di progettazione svolto.

Il parametro resistenza termica del foro R_b , infatti, incide in maniera decisiva sull'effettivo scambio termico tra il fluido ed il terreno.

La sonda geotermica verticale, sia essa singola, doppia o coassiale, è normalmente approssimata da un modello puramente resistivo chiamato Circuito Delta, che ha la seguente configurazione (Bauer, 2010):

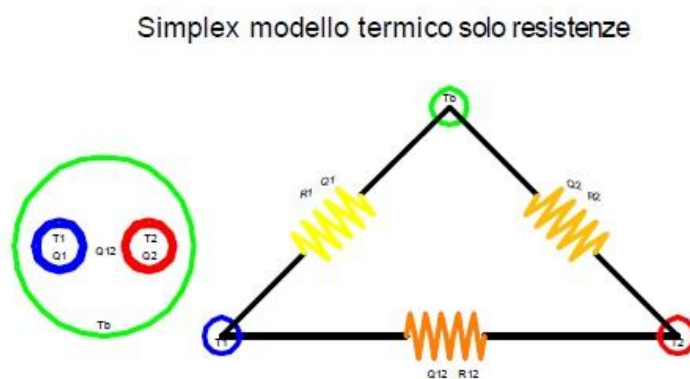


Figura 51 Modello Resistivo per la sonda verticale a singolo U (la dicitura Circuito Delta prende il suo nome da questa configurazione)

Duplex modello termico solo resistenze

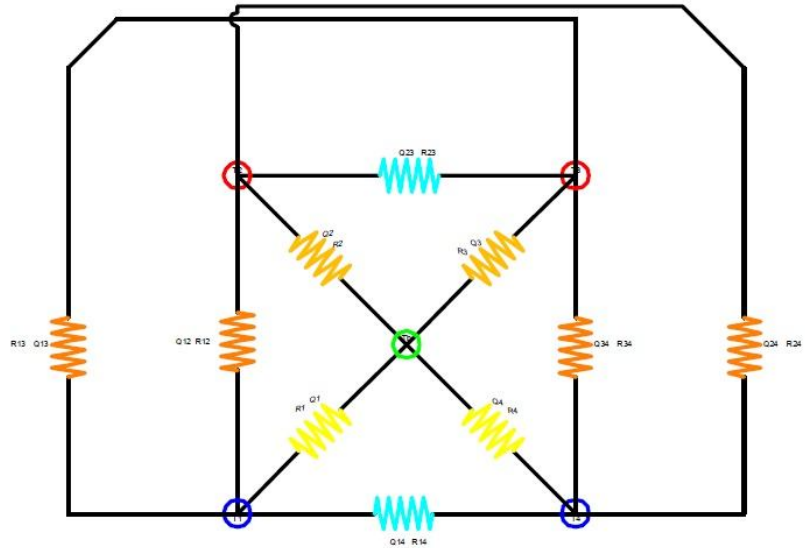


Figura 52 Modello Resistivo per la sonda verticale a doppio U

Coaxial modello termico solo resistenze

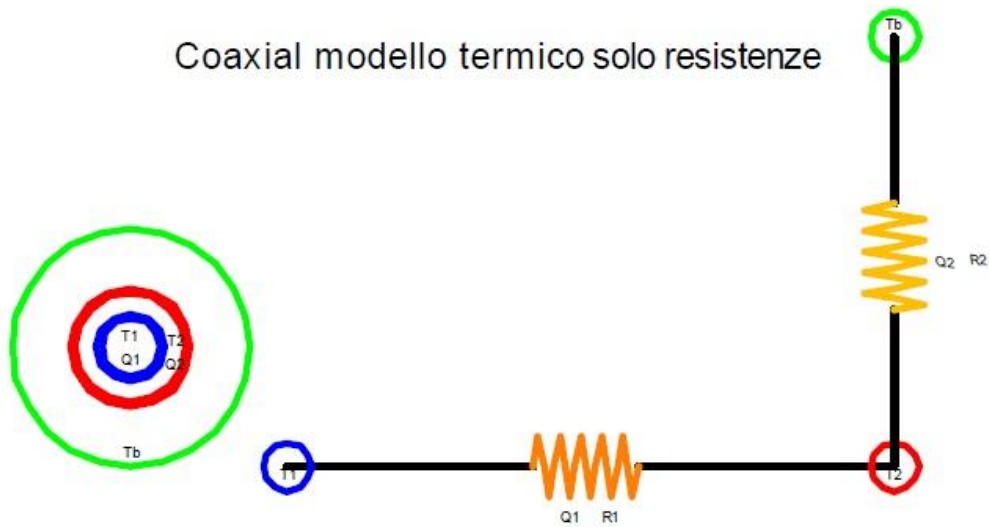


Figura 53 Modello Resistivo per la sonda verticale concentrica

Il Circuito Delta può a sua volta essere approssimato da un gruppo di resistenze in serie che compongono R_b (la resistenza termica della tubazione R_{pp} , la resistenza termica del materiale di riempimento R_{gr} e la resistenza termica del rivestimento, se presente) ed utilizzando dei valori tabellari per i parametri di interazione tra i diversi componenti, quali il corto circuito termico tra le sonde di mandata e ritorno (Hellstrom, 1991).

Per contro, aggiungendo al modello resistivo del Circuito Delta la capacità termica delle componenti del foro, si ottiene il cosiddetto “Modello Termico Resistivo - Capacitivo” (TRCM). (Bauer, 2010).

Come miglioramento del Circuito Delta, i TRCM tengono in conto della capacità termica del materiale di riempimento approssimandolo con una capacità per ogni tubazione. La parete del foro anche in questo caso è rappresentata da un singolo nodo, il che rende possibile la connessione dei TRCM ad una descrizione monodimensionale del terreno circostante. Per mezzo dell'utilizzo dei TRCM, si possono quantificare con un maggiore grado di dettaglio diversi fenomeni, quali la durata del periodo transitorio o il quantitativo di energia scambiata tra le sonde per corto circuito.

Di seguito si riporta a titolo di esempio il modello TRCM connesso con il terreno per una sonda verticale concentrica.

$T1$ = temperatura ingresso
 $T2$ = temperatura uscita
 Tg = temperatura grout
 Tb = temperatura borehole
 $Ts1$ = temperatura soil zona 1
 $Ts2$ = temperatura soil zona 2
 Tsn = temperatura soil zona n
 Q = potenza termica scambiata
 $R12$ = resistenza termica interna
 $R2g$ = resistenza termica esterna
 Rgb = resistenza termica grout
 $Rbs1$ = resistenza termica soil 1
 $Rsls2$ = resistenza termica soil 2
 $Rsn-lsn$ = resistenza termica soil n
 Cg = capacità termica grout
 $Cs1$ = capacità termica soil 1
 $Cs2$ = capacità termica soil 2
 Csn = capacità termica soil n

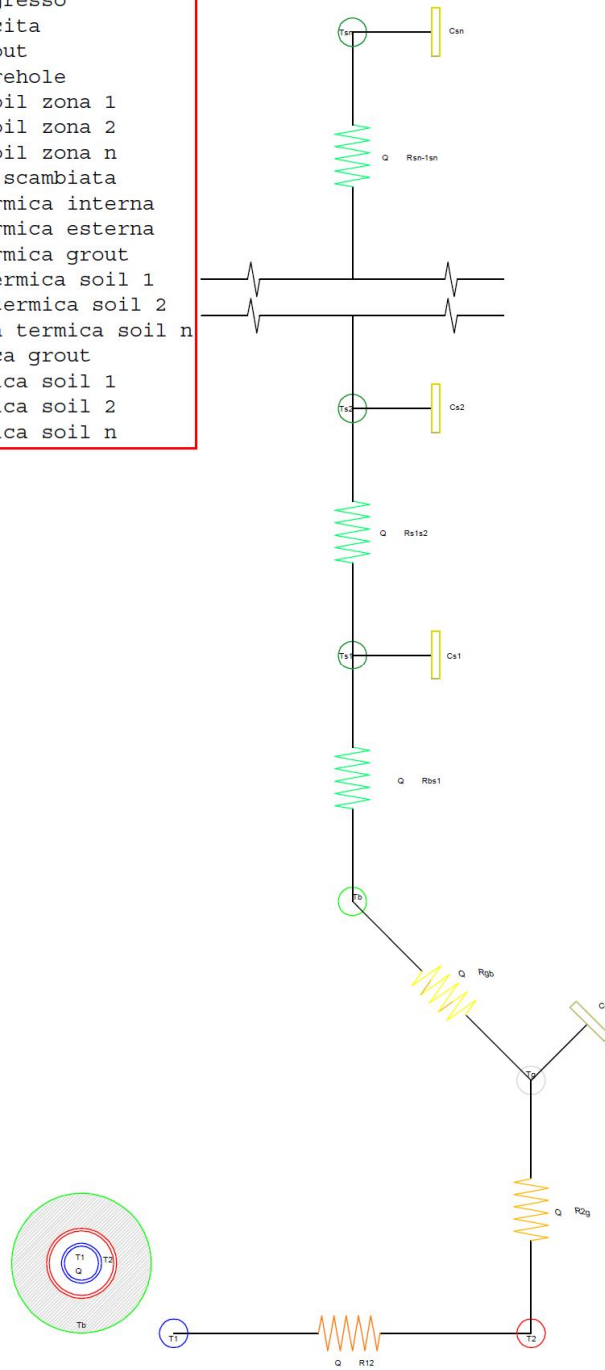


Figura 54 Modello TRCM per sonda coassiale connesso al terreno circostante

Utilizzando uno o l'altro modello, si può calcolare la resistenza termica del foro, con maggiore o minore grado di dettaglio a seconda delle approssimazioni fatte.

Oltre ai parametri termici e geometrici delle sonde verticali (diametro, numero, spaziatura e proprietà termiche delle tubazioni, proprietà termiche del materiale di riempimento, diametro del foro e degli eventuali rivestimenti), in fase di progettazione non bisogna dimenticare che sulla resistenza termica del foro influisce in maniera determinante anche la componente convettiva. Questa si può manifestare in due modi:

- **convezione forzata all'interno della sonda:** il fluido termovettore in moto genera un fenomeno di convezione forzata, il cui coefficiente di scambio termico dipende dalle proprietà del fluido, dal diametro del collettore e dalla portata imposta. Il coefficiente di scambio termico h [W/m²·K] è legato al numero adimensionale di Nusselt, e quindi ai parametri termofisici del fluido, secondo le seguenti relazioni:

$$h_{conv} = \frac{\lambda_f}{d_{int}} \cdot Nu$$

$$Nu = Re \cdot Pr = \frac{\rho_f \cdot v_f \cdot d_{int}}{\mu_f} \cdot \frac{C_f \cdot \mu_f}{\lambda_f} \quad (61)$$

Dove λ_f [W/(m·K)] è la conduttività termica del fluido, v_f [m/s] è la velocità, μ_f [Pa·s] la viscosità dinamica, C_f [J/(kg·K)] il calore specifico e d_{int} [m] il diametro interno del tubo;

- **convezione naturale nel liquido contenuto nel materiale di riempimento;** tale fenomeno si manifesta nelle sonde immerse direttamente in acqua di falda (*grande scala*), oppure in minore misura nelle sonde non perfettamente cementate (*piccola scala*) (come descritto nel paragrafo 2.1.5) La convezione naturale è indotta dalla differenza di temperatura tra il fluido termovettore e il fluido di riempimento, le cui proprietà devono essere note per conoscere il relativo coefficiente di scambio termico (Gustaffson, 2011). Il coefficiente di scambio termico è legato sempre al numero adimensionale di Nusselt, stavolta secondo le seguenti relazioni:

$$h_{conv\ nat} = \frac{\lambda_f}{L} \cdot Nu$$

$$Nu = 0.51 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25} = 0.51 \left(\frac{g \cdot \beta_f \cdot \Delta T \cdot L^3}{\left(\frac{\mu_f}{\rho_f} \right)^2} \cdot \frac{C_f \cdot \mu_f}{\lambda_f} \right)^{0.25} \quad (62)$$

Dove stavolta i pedici si riferiscono al fluido nell'interno del foro. $\beta_f [^{\circ}C^{-1}]$ è il coefficiente di dilatazione; ΔT è la differenza di temperatura tra i due fluidi e L è la lunghezza caratteristica, diversa per ogni geometria. L'equazione del numero di Nusselt per convezione naturale presentata si riferisce alla forma generica. Diverse ricerche sono in atto per definire i coefficienti ottimali al fine della descrizione migliore possibile del fenomeno fisico che accade internamente al foro in cui sono installate le sonde verticali.

3.1.4 Lo stoccaggio di energia termica in relazione alla geometria del campo sonde e la penalizzazione sulle temperature derivante

Un altro parametro che non si dovrebbe sottovalutare ai fini della progettazione di un sistema geotermico è la cosiddetta temperatura di penalizzazione T_p , cioè la temperatura derivante da uno squilibrio termico nel terreno in seguito ad estrazione / iniezione di calore (Kavaunagh, 1997); essa consente di considerare l'interferenza reciproca dei campi termici indotti dagli scambiatori di calore attivi nel terreno e quindi di apportare le opportune modifiche analitiche al salto termico medio tra terreno e fluido termovettore. Essa è funzione della quantità di energia termica stoccata, ed è definita per ogni sonda verticale, in accordo con la seguente equazione.

$$T_{p,i} = \frac{Q_{stored}}{\rho_g \cdot C_g \cdot I^2 \cdot L} \quad (63)$$

Dove Q_{stored} [J] è il calore accumulato nel terreno dal sistema geotermico; in genere lo si riferisce ad un periodo di lungo termine pari a 10 anni, o comunque a un periodo previsto di funzionamento del sistema geotermico [J]; ρ_g [kg/m³] è la densità equivalente del terreno; C_g [J/(kg·K)] è il calore specifico equivalente del terreno, I [m] è l'interasse tra i vari geoscambiatori, L [m] è la lunghezza totale.

Una volta nota la dimensione generale del campo, e quindi il numero delle sonde n , si ottiene la T_p globale per il periodo di riferimento scelto.

$$T_p = \left[\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=i+1}^n T_{P_{i-j}} \right) \right] \cdot 0,15 \cdot \frac{2}{n} \quad (64)$$

Dove $T_{P_{i-j}}$ [°C] è la temperatura di penalizzazione valutata facendo uso dell'interasse I_i tra lo scambiatore i e lo scambiatore j .

3.1.5 La quantificazione dell'influenza termica dovuta al moto dell'acqua di falda

L'influenza termica del moto dell'acqua di falda sul quantitativo di energia estraibile dalle sonde geotermiche verticali può essere quantificata, purché si applichi l'approssimazione che tale moto si mantenga costante nel tempo, in termini di velocità e superficie laterale di foro coinvolto (Carslaw, 1947). Ciò può non essere vero, in quanto molti fattori possono intervenire nel tempo per modificare tale moto. Inoltre nella stragrande maggioranza dei casi, le sonde verticali non incontrano solo un tipo di acquifero, con le proprie caratteristiche, ma spesso attraversano differenti acquiferi, freatici e artesiani, con comportamenti totalmente differenti. Basti pensare alle modifiche nel tempo dell'acquifero superficiale, soggetto a precipitazioni più o meno intense, oppure al moto

indotto e all'abbassamento del livello statico di acquiferi profondi, in seguito a operazioni di pompaggio.

In ogni caso, considerando l'approssimazione del mantenimento delle condizioni nel tempo, è possibile quantificare l'influenza del moto dell'acqua di falda sul campo termico di ogni sonda verticale. Il concetto base consiste nel fatto che ogni parametro fisico di un terreno saturo è composto dal parametro della quantità fluidica e dal parametro della quantità solida, legati tra loro attraverso la porosità dei grani. L'impatto termico è dunque retto dalla seguente equazione:

$$\left[\phi \cdot \rho_f \cdot C_f + (1 - \phi) \cdot \rho_s \cdot C_s \right] \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + \phi \cdot \rho_f \cdot C_f \cdot v \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = \left[\phi \cdot \lambda_f + (1 - \phi) \cdot \lambda_s \right] \cdot \left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} \right) \quad (65)$$

Dove ϕ è la porosità dei grani del terreno interessato dal moto dell'acqua di falda; ρ_f [kg/m³], C_f [J/(kg·K)] e λ_f [W/(m·K)] sono la densità, la capacità termica volumetrica e la conduttività termica della componente liquida mentre i corrispettivi ρ_s , C_s e λ_s lo sono della parte solida; v [m/s] è la velocità della falda; ΔT [°C] è la variazione di temperatura indotta.

L'equazione si risolve sempre tramite la teoria della Sorgente Lineare Infinita, con l'utilizzo della funzione di Bessel e dei numeri adimensionali di Peclet e Fourier, e dell'angolo dello scambio termico indotto rispetto alla direzione del moto dell'acqua di falda. I risultati, che necessitano di elaborazione di tipo numerico, forniscono la variazione di temperatura in ogni punto nell'intorno della sonda geotermica, ed il tempo necessario perché questa variazione avvenga. Ovviamente, nella direzione e nel verso del moto dell'acqua di falda avverranno le variazioni più significative, dovute al trasporto di calore, per poi decrescere in maniera radiale.

3.1.6 La componentistica idraulica e il bilanciamento dei collegamenti

In una progettazione del sistema geotermico, notevole importanza rivestono la quantificazione delle perdite di carico del circuito, l'ottimizzazione dei collegamenti tra le sonde e la pompa di calore e la conseguente scelta della pompa di circolazione (Spitler, 2000).

Nell'ottica di una progettazione perfettamente integrata tra tutte le sue parti, infatti, occorre prevedere il bilanciamento tra le perdite di carico da un lato e le portate del fluido termovettore che massimizzino il quantitativo di energia estraibile dal terreno dall'altro. La seguente tabella mostra i parametri utili per l'ottimizzazione del sistema:

	Target							
	Quota di trasferimento di energia dal terreno		Resistenza termica		Capacità di trasferimento di energia		Consumo pompe di circolazione	
Sonde verticali	Massima possibile	Lunghezza elevata dell'insieme del campo sonde verticali. Mantenimento di una distanza adeguata tra le sonde	Minima possibile	Velocità elevata del fluido circolante in sonda	Massima possibile	Tempo sufficiente per permettere il passaggio di calore dal terreno al fluido o viceversa	Minimo possibile	Mantenimento di basse perdite di carico nelle sonde
Collegamenti orizzontali	Minima possibile	Lunghezza ridotta dei collegamenti orizzontali	Massima possibile	Velocità bassa del fluido circolante nei collegamenti	Minima possibile	Tempo minimo possibile di passaggio del fluido nei collegamenti	Minimo possibile	Mantenimento di basse perdite di carico nei collegamenti

Tabella 3 Obiettivi del bilanciamento idraulico ed energetico del campo sonde e dei collegamenti

L'energia estraibile dal terreno tramite le sonde verticali deve essere la massima possibile; limitatamente all'ottimizzazione del circuito idraulico, l'attenzione si focalizza sulla velocità che deve essere impressa al fluido, la più elevata possibile per mantenere bassa la resistenza termica delle sonde (alti numeri di Reynolds, elevato scambio convettivo), senza pertanto compromettere lo scambio termico conduttivo, garantendo il tempo necessario al fluido per il trasferimento di calore nello stato stazionario, e senza generare delle perdite di carico eccessive, e quindi elevati consumi di energia elettrica delle pompe di circolazione. L'energia dissipata nei collegamenti orizzontali, a causa dell'influenza climatica esterna, al contrario deve essere la minima possibile; per mantenere la temperatura del fluido in uscita dalle sonde costante fino alla pompa di calore, occorre intervenire sui collegamenti orizzontali, che, adagiati a 1 – 2 metri di profondità dal piano campagna, risentono dell'influenza dell'ambiente esterno, trovandosi nella zona termicamente instabile. Per ottenere questo risultato si può agire direttamente sui collegamenti, coibentandoli, e indirettamente sul circuito idraulico, modulando le velocità, agendo sui diametri, in maniera inversa rispetto alle sonde verticali; a livello idraulico il tutto si traduce in una perdita di carico, che deve essere controllata per limitare il consumo delle pompe di circolazione. Si può agire anche sulla lunghezza, cercando di mantenere i collegamenti più corti possibili; anche in questo caso serve un'ottimizzazione con il campo sonde, in quanto ogni sonda, per garantire il mantenimento dell'energia estraibile dal terreno nel tempo, necessita di un volume di terreno intorno lasciato libero, differente per ogni tipo di terreno e per ogni richiesta termica.

L'equazione per il calcolo delle perdite di carico distribuite è:

$$H = f \cdot \frac{L}{d_{int}} \cdot \frac{v_f^2}{2 \cdot g} \quad (66)$$

Dove H [m] è la perdita di carico, L [m] è la lunghezza del tratto di tubazione; d_{int} [m] è il diametro interno della tubazione; f è il fattore di attrito; dipende dalla scabrezza del materiale e dal suo diametro interno; v_f [m/s] è la velocità del fluido nella tubazione, g [m/s²] è l'accelerazione di gravità.

Come si vede, nell'equazione rientrano tutti i parametri che incidono sull'energia termica estraibile / dissipabile da ogni tubazione: la lunghezza delle sonde e dei collegamenti, i diametri delle sonde e dei collegamenti, le velocità del fluido in ogni tratto.

Alle perdite di carico distribuite, vanno ad aggiungersi tutte le perdite di carico concentrate. Queste si verificano:

- nelle deviazioni;
- nei raccordi a Y tra un collegamento e una sonda verticale;
- nella U-bend;
- nei raccordi a T in caso di collegamenti in parallelo a “ritorno inverso” (Basta, 2008);
- nel collettore di raccolta, in caso di collegamenti in parallelo tradizionali;
- nei restringimenti / allargamenti di sezione;
- nelle valvole;
- nello scambiatore della pompa di calore lato terreno.

Una volta ottenuta la perdita di carico totale del circuito, si può risalire alla potenza elettrica P_{el} [W] necessaria della pompa di circolazione (e conseguentemente all'energia elettrica consumata in un certo periodo di tempo) utilizzando la relazione:

$$P_{el} = \frac{M_f \cdot H \cdot g}{\eta} \quad (67)$$

Dove M_f [kg/s] è la portata in massa del fluido alla pompa di circolazione; H [m] è la perdita di carico totale del circuito; g [m/s²] è l'accelerazione di gravità e η è il rendimento di conversione della pompa.

3.1.7 Un esempio di progettazione

Di seguito si riporta un esempio sintetico di progettazione. Seguendo la procedura, secondo il diagramma di flusso di figura 50, occorre stabilire l'effettivo fabbisogno termico dell'edificio, sulla base di un'indagine climatica di tipo statistico, della destinazione d'uso dell'edificio, della

trasmissione termica delle strutture verticali e degli infissi e di un'analisi della tipologia, numero e ubicazione dei terminali di erogazione (esistenti o da installare). Dalla frequenza delle temperature esterne, (figure 55 e 56) si arriva quindi ad ottenere l'effettivo fabbisogno termico dell'edificio, per i diversi intervalli di tempo considerati. (figura 57, intervallo di tempo mensile)

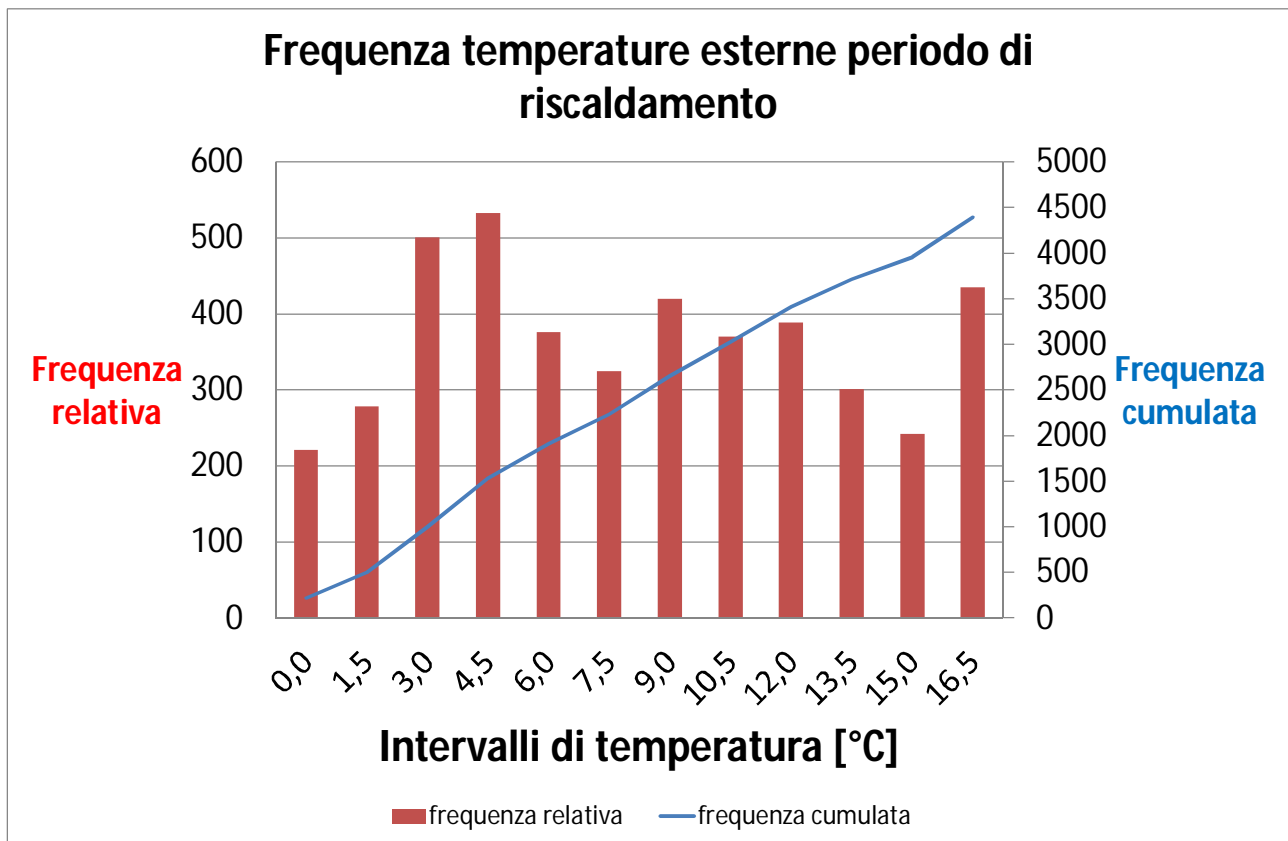


Figura 55 Frequenza delle temperature esterne periodo di riscaldamento: relativa e cumulata

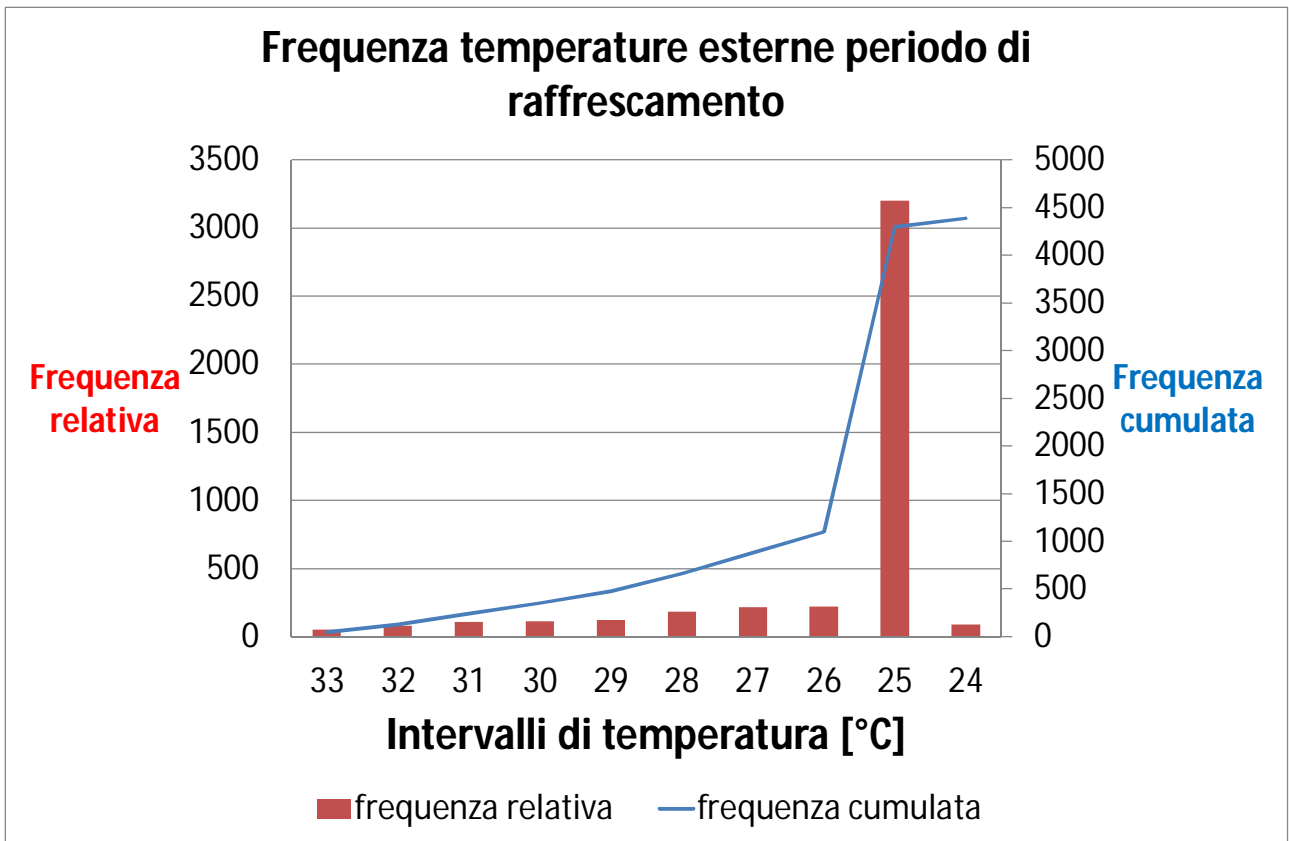


Figura 56 Frequenza delle temperature esterne periodo di raffrescamento: relativa e cumulata

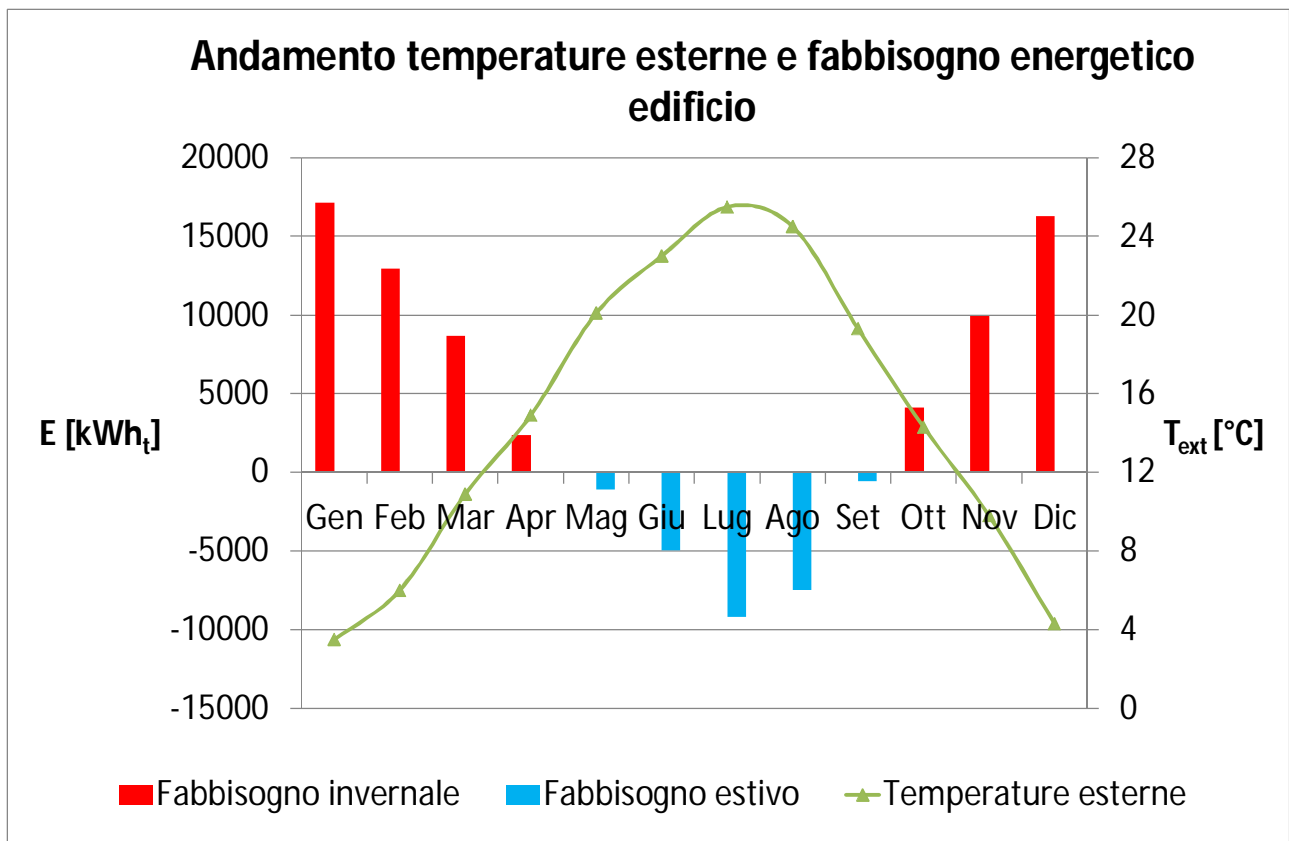


Figura 57 Andamento medio mensile delle temperature esterne e relativo fabbisogno energetico dell'edificio

Sulla base della scelta della pompa di calore, dello studio geologico ed idrogeologico del sottosuolo, e dell'analisi (anche iterativa) dei parametri di interesse descritti nei paragrafi precedenti, si arriva a quantificare il numero, la profondità e la disposizione delle sonde geotermiche verticali affinché vengano rispettate le efficienze di progetto della pompa di calore. Nel caso dell'esempio sintetico il fabbisogno invernale è superiore al fabbisogno estivo, pertanto il campo sonde è dimensionato per sopperire alle esigenze di riscaldamento. (figura 58)

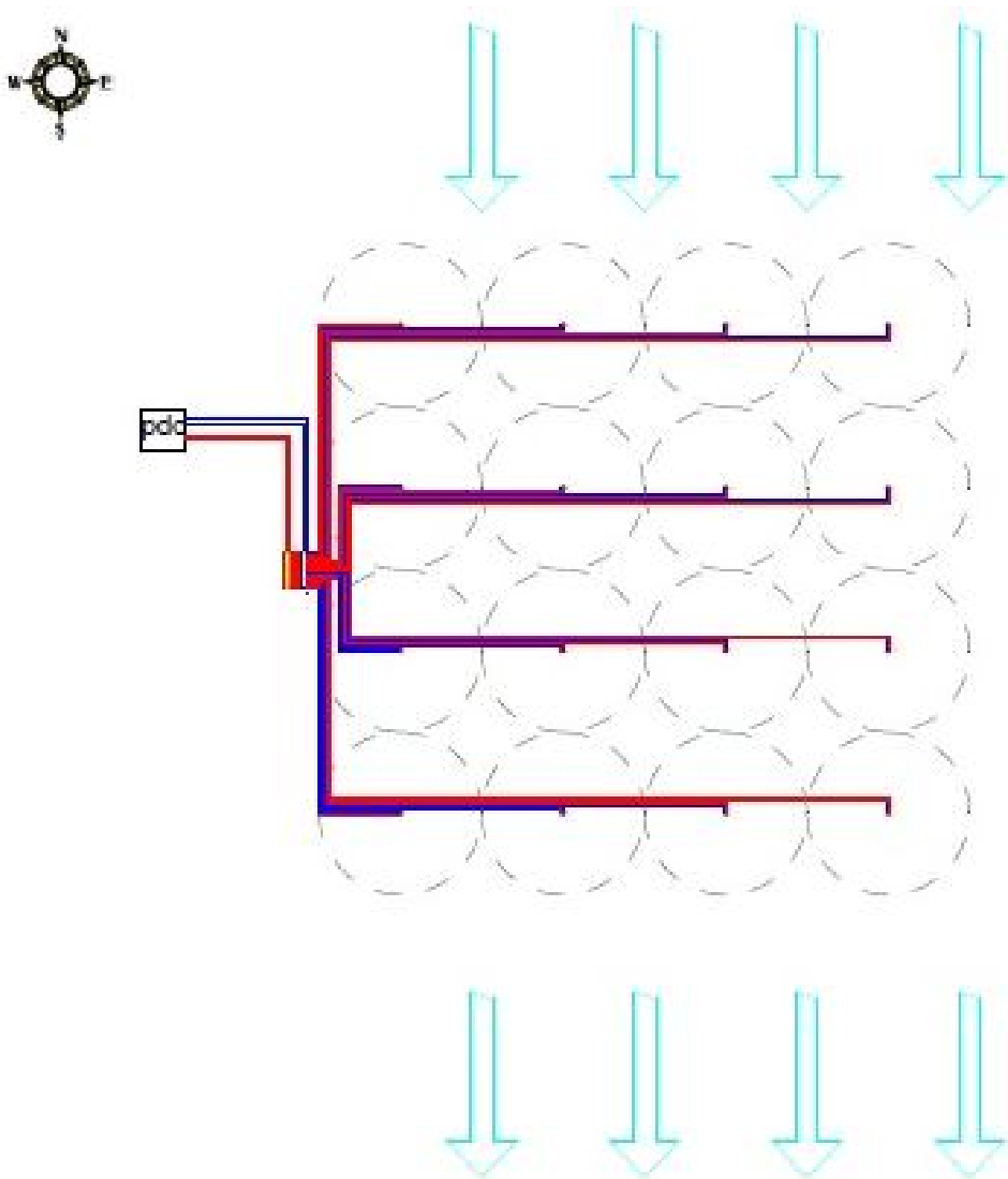


Figura 58 Pianta campo sonde geotermiche di esempio. Schema a 16 sonde in parallelo con collettore centrale e flusso di acqua di falda nella direzione N-S

Conseguentemente, si arriva a definire una prima valutazione delle temperature circolanti in sonda e dell'energia estratta / immessa nel sottosuolo, in accordo con le temperature medie ambientali, il fabbisogno energetico dell'edificio e l'effettivo fattore di carico parzializzato della pompa di calore

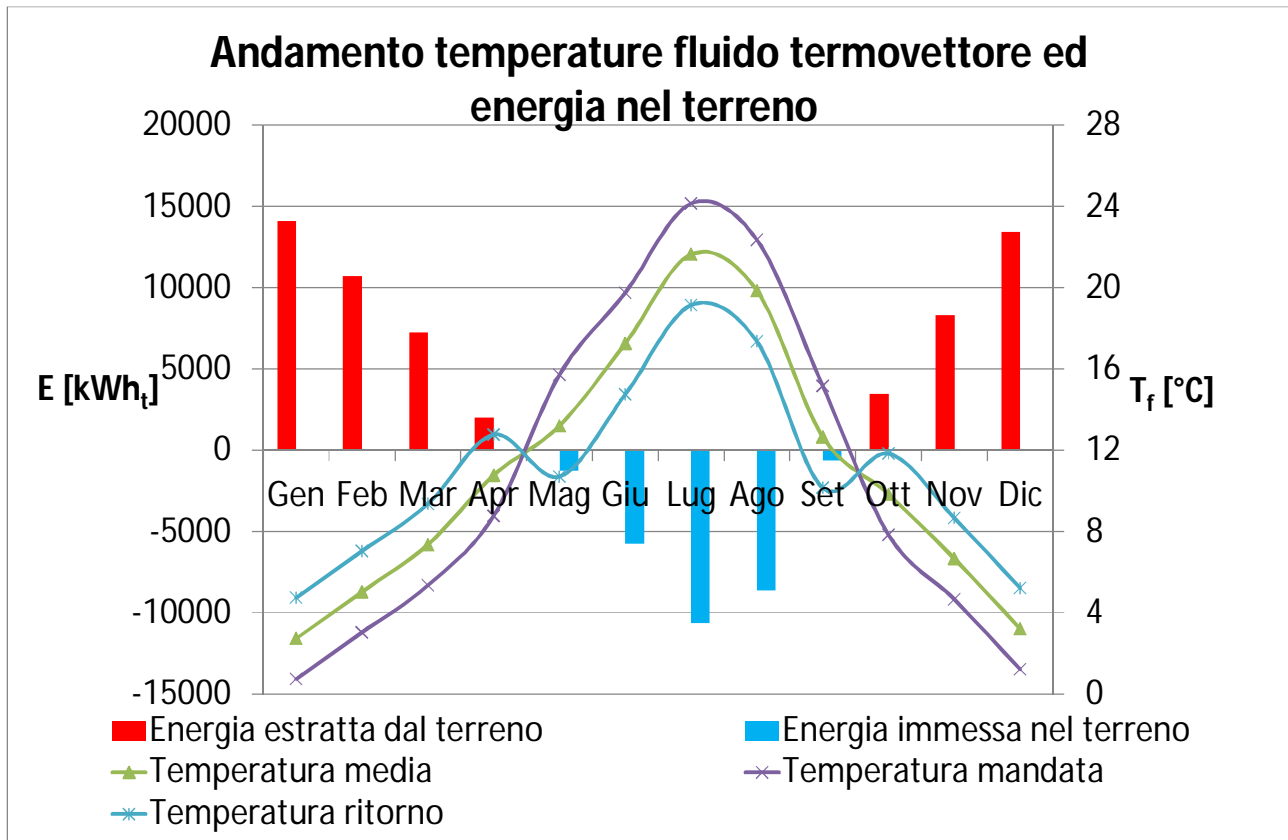


Figura 59 Andamento mensile temperatura del fluido termovettore circolante nel campo sonde ed energia termica estratta/immessa nel terreno

Nell'esempio riportato, si arriva a definire una temperatura minima superiore alla temperatura di congelamento dell'acqua (0°C), pertanto, in linea teorica, si può utilizzare come fluido termovettore l'acqua senza aggiunta di anticongelanti.

Infine, con il campo sonde progettato, si possono identificare le effettive efficienze istantanee (COP ed EER) e stagionali (SPF) del sistema e soprattutto i consumi elettrici che il funzionamento del sistema geotermico comporta, sia per quanto riguarda il consumo del compressore interno alla pompa di calore, che il consumo delle pompe di circolazione per la movimentazione del fluido nelle sonde.

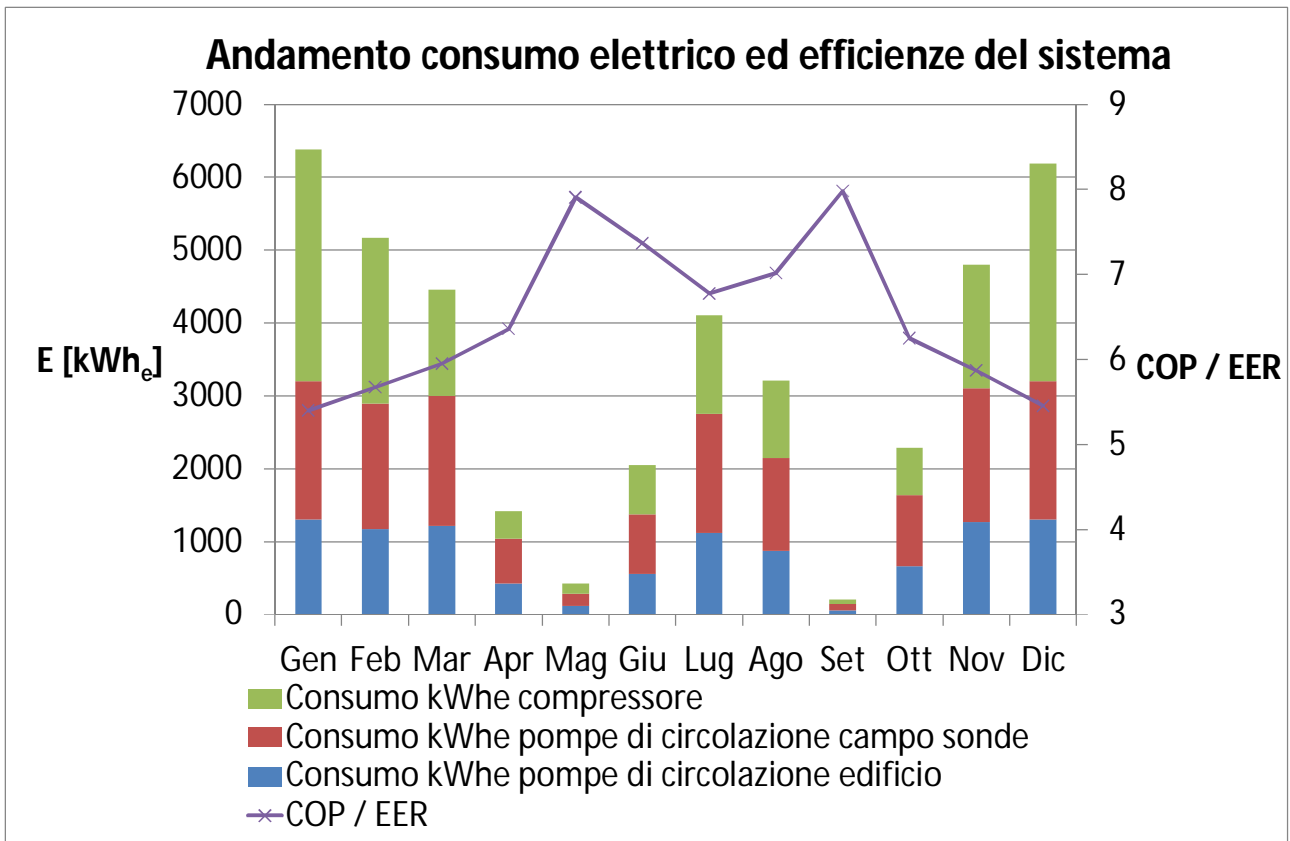


Figura 60 Andamento mensile efficienza del sistema geotermico e relativo consumo elettrico compressore e pompe di circolazione nel primo anno di funzionamento.

Una volta ottenuta una prima idea di consumi elettrici, si può passare alla fase di ottimizzazione dell'intero campo sonde, al fine di ottenere la migliore configurazione possibile perché si verifichi l'equazione 68, con il vincolo di non aumentare i costi di investimento per la realizzazione del sistema, rispetto alla configurazione iniziale di progetto:

$$\sum_{i=1}^n Q_{el,i} = MIN \tag{68}$$

Dove $Q_{el,i}$ [kWh] sono i differenti consumi elettrici delle diverse macchine, nelle differenti modalità di utilizzo del sistema (riscaldamento, raffrescamento, altri usi).

Un fattore aggiuntivo da considerare è l'influenza di un possibile squilibrio termico nel terreno nel tempo. Infatti, le elaborazioni fin qui fatte si riferiscono al primo periodo di funzionamento, nel quale il terreno si trova allo stato indisturbato.

L'andamento delle temperature, delle energie e delle efficienze del sistema del primo anno, può non susseguirsi costante per tutti gli anni di funzionamento del sistema a pompa di calore geotermica, sostanzialmente per due ragioni:

- variazione climatica e delle richieste energetiche dell'edificio: per quanto riguarda la condizione climatica e l'effettivo fabbisogno energetico, per ogni anno si possono solo fare delle stime, basate sulle statistiche dei dati climatici degli anni passati. Inoltre l'effettivo consumo energetico può cambiare anche per fattori che sono indipendenti dal clima esterno, quali: variazione del numero di occupanti dell'edificio, variazione della destinazione d'uso dell'edificio, integrazioni di richiesta termica durante la vita utile dell'impianto (acqua calda sanitaria, etc..). Non potendo conoscere tali variazioni per tutta la durata della vita utile dell'impianto, a meno di casi particolari, a fini progettuali si sceglie comunemente di ripetere le esigenze termiche per gli anni successivi sulla base delle esigenze stimate per i consumi del primo anno;
- squilibrio termico annuale generato da un non completo reintegro dell'energia termica estratta per mezzo dell'energia termica immessa (o viceversa). Tale condizione si verifica, con quote di energia più o meno rilevanti, praticamente sempre. La quota di energia termica o frigorifera stoccata nel terreno può venire calcolata, e quindi per ogni anno si possono ricalibrare le temperature, le efficienze ed i consumi sulla base delle nuove temperature del terreno soggetto a squilibrio termico.

Per il caso dell'esempio sintetico, la richiesta di energia termica invernale dell'edificio è superiore alla richiesta di energia frigorifera estiva, pertanto il bilancio di energia termica nel sottosuolo non è nullo, anzi si manifesta una temperatura di penalizzazione T_p , con una conseguente diminuzione della temperatura del terreno, al passare degli anni.

Questo fatto si ripercuote sia sull'efficienza annuale di riscaldamento, che viene via via ridotta, che sull'efficienza annuale di raffrescamento, che viene via via aumentata.

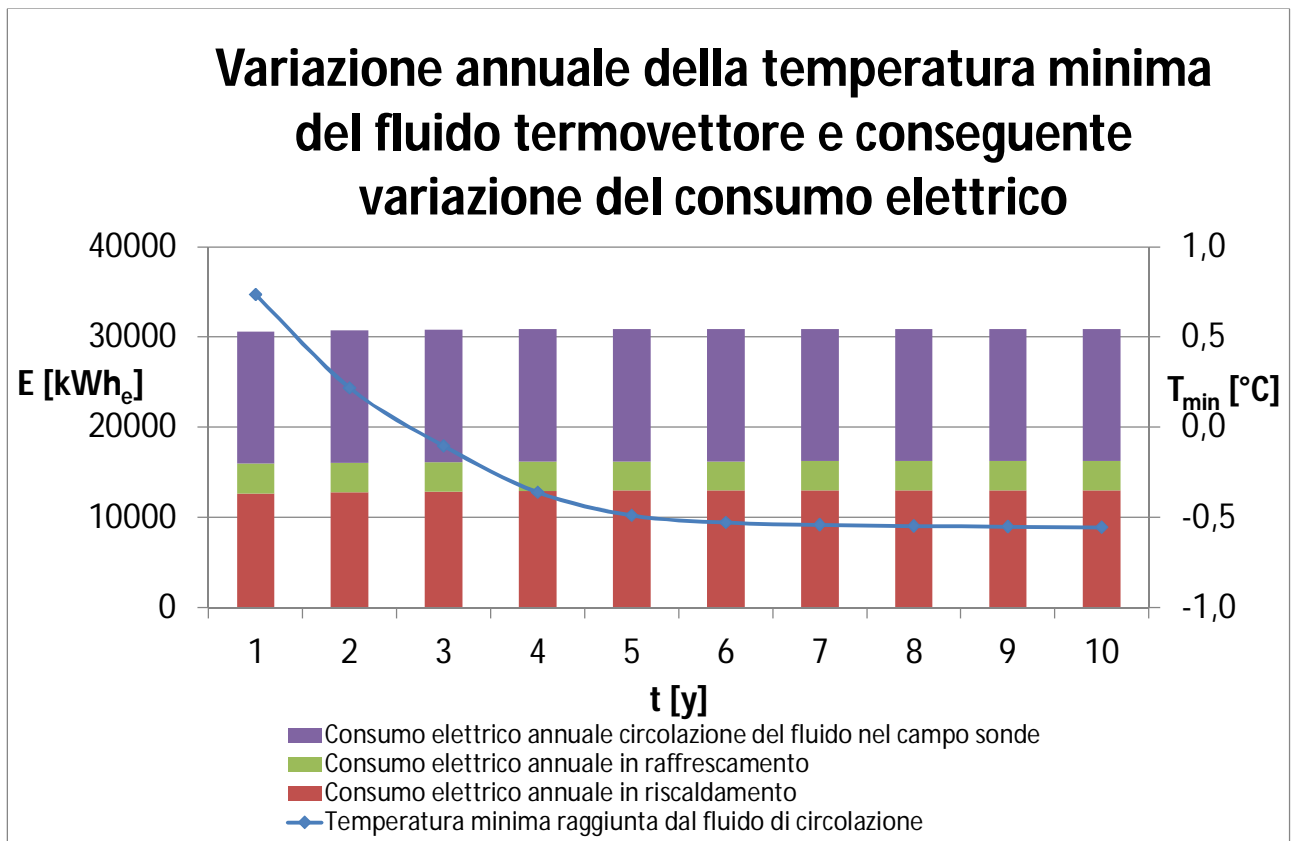


Figura 61 Andamento annuale temperatura minima del fluido termovettore e del consumo elettrico del compressore e delle pompe di circolazione

Come si vede dal grafico, l'apporto di suddetta variazione è molto ridotto, in quanto la temperatura minima del fluido varia di circa 1,5°C, con una variazione quasi impercettibile dei consumi.

La variazione nel tempo deve essere in ogni caso tenuta in conto. Nel caso sintetico, per esempio, la temperatura del fluido ha una variazione bassa nel tempo, ma ciò la porta a scendere sotto gli 0°C. Nel caso studiato si era scelto di utilizzare acqua come fluido termovettore, e, tramite il calcolo, si è stimato che nel primo anno di funzionamento non si scenda mai sotto gli 0°C.

Questo non è più vero a partire dal 3° anno di funzionamento. Si possono allora perseguire in fase di progetto 3 strade:

1. Leggero aumento della profondità delle 16 sonde, al fine di scongiurare l'abbassamento della temperatura anche sul lungo periodo.

2. Inserimento di una quota di glicole anticongelante per abbassare il punto di congelamento dell'acqua e ricalcolo dei consumi sulla base delle nuove proprietà del fluido termovettore. L'aggiunta del glicole causa infatti una perdita di efficienza.
3. Mantenimento del progetto iniziale. Inserimento di un sistema di monitoraggio, di controllo e di sicurezza sulla pompa di calore. Il sistema di monitoraggio consente di verificare nei diversi anni le effettive richieste termiche dell'edificio. Il sistema di controllo e di sicurezza interrompe momentaneamente l'estrazione di calore dal terreno qualora la temperatura del fluido termovettore scenda sotto lo zero. Questa terza soluzione è bene percorrerla anche in aggiunta alle soluzioni 1 o 2.

Qualsiasi strada si scelga di percorrere, una volta modificato, il progetto, occorre effettuare nuovamente il calcolo per l'ottimizzazione dei consumi come da equazione 68

3.2 L'UTILIZZO DELL'ANALISI DI SENSITIVITA' E DELL'ANALISI DI RISCHIO PER LA VALUTAZIONE ECONOMICA DELL'INVESTIMENTO

3.2.1 La difficoltà nella stima dei parametri geologici ed idrogeologici e la loro influenza sulle decisioni del progettista e dell'utente finale

Come si è visto nel precedente paragrafo, la progettazione dei sistemi geotermici deve tenere in conto diverse variabili, per potere ottenere un sistema ottimizzato nel tempo che estragga il maggior quantitativo possibile di energia dal terreno, mantenendo bassi i consumi elettrici del compressore e delle pompe di circolazione, compatibilmente con un costo di investimento iniziale contenuto.

Diverse variabili della progettazione, d'altro canto, sono valori che possono solo essere stimati, e sono le proprietà termiche del terreno. Queste sono:

- conduttività termica equivalente del terreno
- capacità termica equivalente del terreno

- temperatura media del terreno indisturbato
- porosità equivalente del terreno e altre proprietà idrologiche

L'accuratezza nella scelta di tali valori, fondamentali per la progettazione, può essere incrementata grazie alla realizzazione di prove in situ, quali il Test di Risposta Termica e la misura del profilo termico lungo la verticale della sonda.

Una critica che è lecito muovere a queste prove, d'altro canto, risiede nel fatto che esse sono di carattere puntuale, generalmente realizzate sulla prima sonda geotermica verticale di prova, e per cui l'adattamento dei risultati a tutto il campo sonde è necessariamente soggetto ad un errore.

Pertanto, data la natura variabile (spazialmente e temporalmente) delle caratteristiche fisiche dei diversi strati di terreno, i valori veri possono solo essere stimati, non essendo noti in tutti i punti.

A fini progettuali, l'importanza della variabilità di tali fenomeni può essere quantificata tramite le analisi di sensitività e le analisi di rischio

3.2.2 L'analisi di sensitività

L'analisi di sensitività consiste nella valutazione della sensitività appunto di un modello alle variazioni di alcuni parametri di base.

Nel caso del sistema geotermico, i parametri di base sono i parametri termici del terreno, che possono solo venire stimati, e la cui distribuzione di probabilità attorno a tale valore stimato si può ritenere di tipo normale.

Prendendo come target la temperatura minima del fluido, che identifica il congelamento o meno degli scambiatori e la rottura del sistema, l'analisi di sensitività sul caso sintetico ha riportato il seguente risultato:

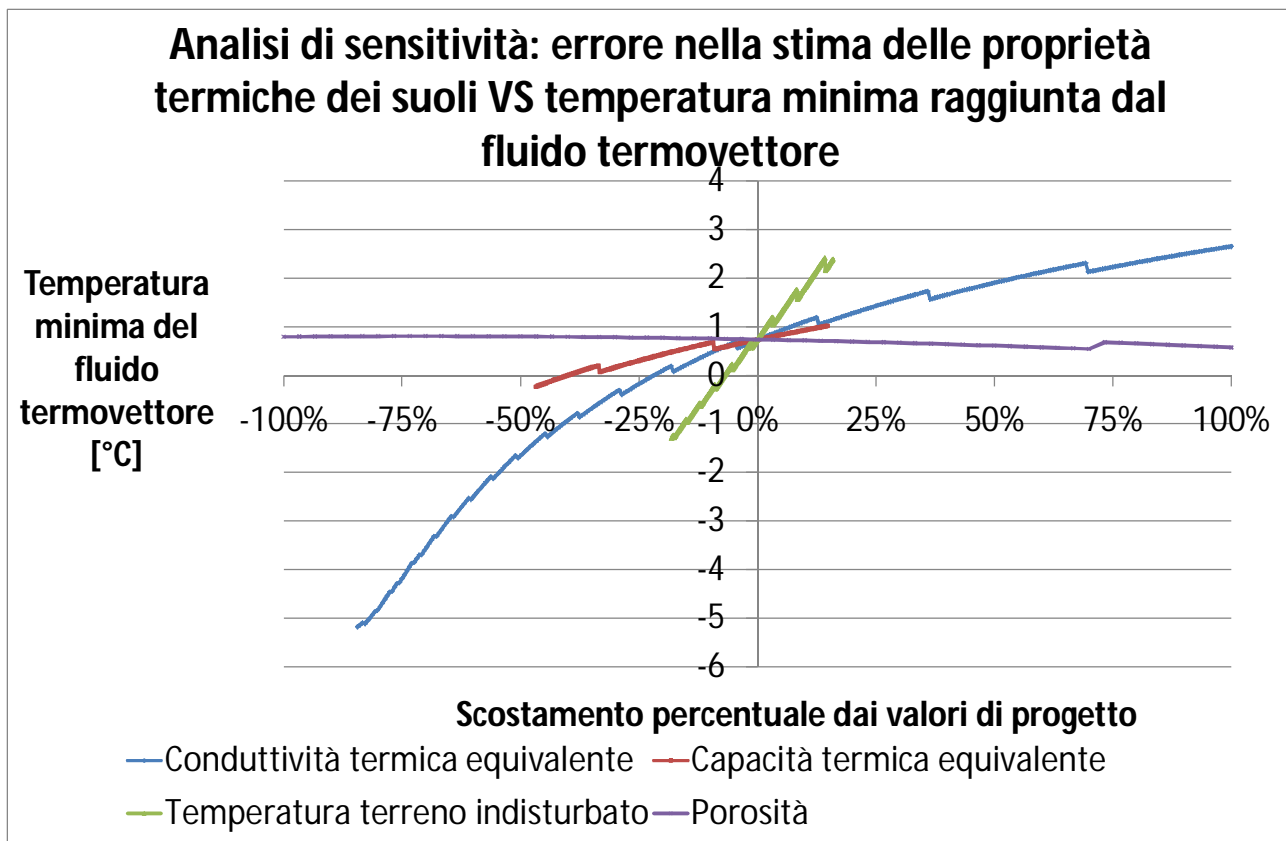


Figura 62 Analisi di sensitività: variazione della temperatura minima raggiunta dal fluido termovettore, sulla base dell'errore nella scelta delle proprietà termofisiche del terreno

In figura si vede come un errore del 10% sulla temperatura del terreno e del 25% della conducibilità termica possano portare a un abbassamento della temperatura del fluido termovettore sotto la temperatura di congelamento dell'acqua. Le altre variabili, porosità e capacità termica volumetrica, sono meno influenti sul risultato finale.

Per semplicità, nella presente analisi non è stato riportato il contributo della permeabilità e della velocità dell'acqua di falda, considerando il terreno come saturo, ma con falda sostanzialmente in quiete.

Un altro parametro di incertezza, e che deve essere tenuto in conto, è dato dalla resistenza termica del foro. Esso in teoria dovrebbe essere un valore di progetto, dovuto ad un manufatto antropico, quindi fisso.

Nella realtà, la resistenza termica del foro può variare (anche da foro a foro in uno stesso campo sonde), per i seguenti motivi:

- errore di posa: l'installazione delle sonde geotermiche è un'operazione complicata, la cui realizzazione dipende fortemente dalle caratteristiche idrogeologiche del terreno. Tali caratteristiche, naturali, possono variare anche all'interno dello stesso campo sonde geotermiche, pertanto anche ammettendo di eseguire un'installazione e una cementazione a regola d'arte, le resistenze termiche finali delle sonde possono differire tra loro a causa dell'interferenza della componente ambientale;
- effetti termici indotti. La resistenza termica è fortemente influenzata dalla componente convettiva, oltre che dai materiali e dalla geometria del foro e delle sonde. Mentre per quanto riguarda la convezione forzata all'interno delle sonde, essa è regolabile e controllabile, la convezione naturale indotta dalla differenza di temperatura nell'intorno della sonda verticale può variare da foro a foro. Ciò si manifesta con maggiore evidenza in fori cementati in maniera non corretta e soprattutto in fori liberi, con le sonde immerse direttamente in acqua di falda.

Per la verifica in situ che il valore reale della resistenza termica del foro sia conforme al valore di progetto, è possibile ricavare il parametro tramite un Test di Risposta Termica. Anche in questo caso, vale il discorso fatto in precedenza, e cioè che un valore trovato su una sonda può non essere valido per tutto il campo sonde.

Si è realizzata dunque un'analisi di sensitività anche a partire dalla resistenza termica del foro.

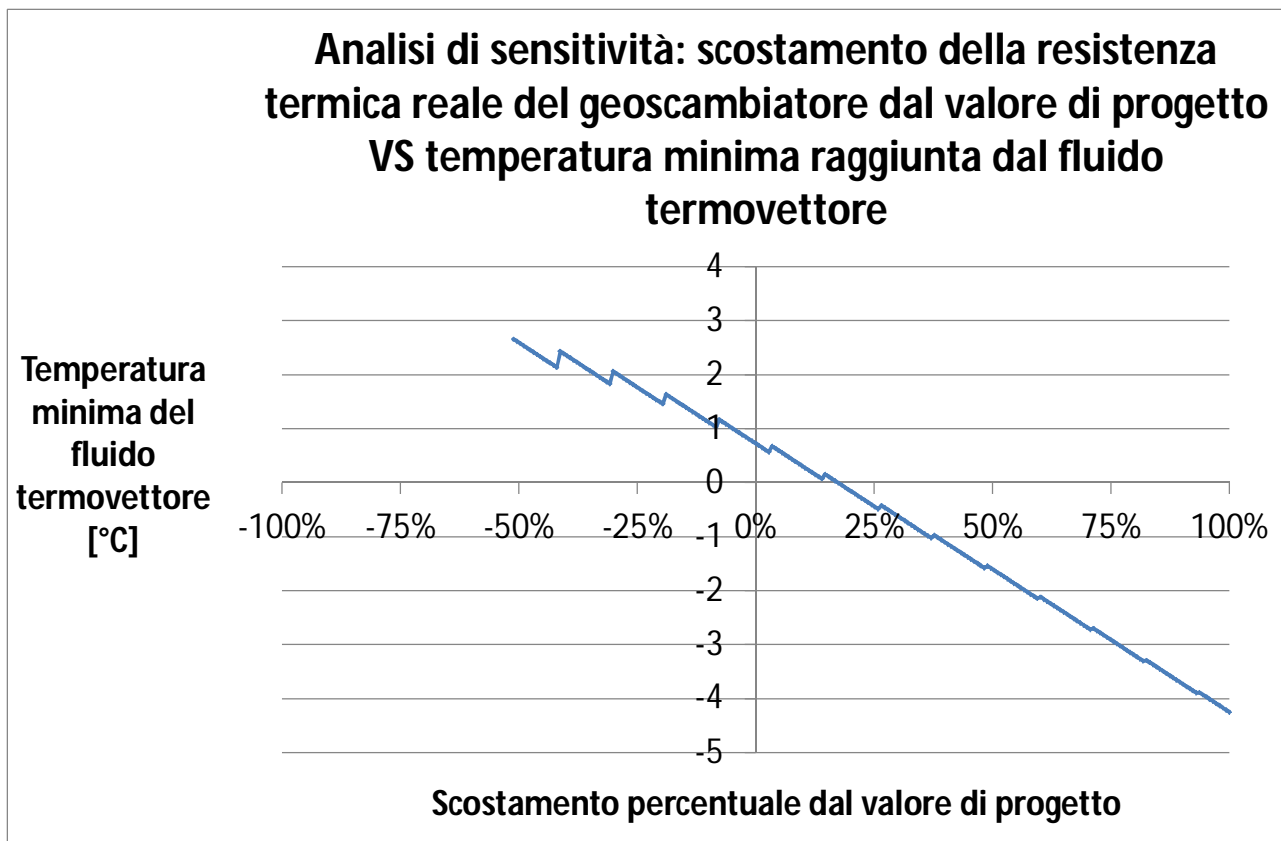


Figura 63 Analisi di sensitività: variazione della temperatura minima raggiunta dal fluido termovettore, sulla base della variazione della resistenza termica del foro reale dal valore di progetto

Nell'esempio considerato, si vede come una resistenza termica del foro superiore di un 25% al valore di progetto, porta ad un abbassamento della temperatura del fluido sino al valore di congelamento.

Queste variazioni influiscono anche la redditività dell'investimento. L'analisi di sensitività sui parametri verrà dunque ripresa nel paragrafo riguardante l'analisi economica.

3.2.3 L'analisi di rischio

L'analisi di rischio consiste nella quantificazione della probabilità che accada un determinato fenomeno, con un proprio potenziale di danno al progetto, sulla base dell'incertezza dei parametri di base. Tale analisi è sempre stata applicata sui parametri termici stimati del terreno, e il risultato è mostrato di seguito:

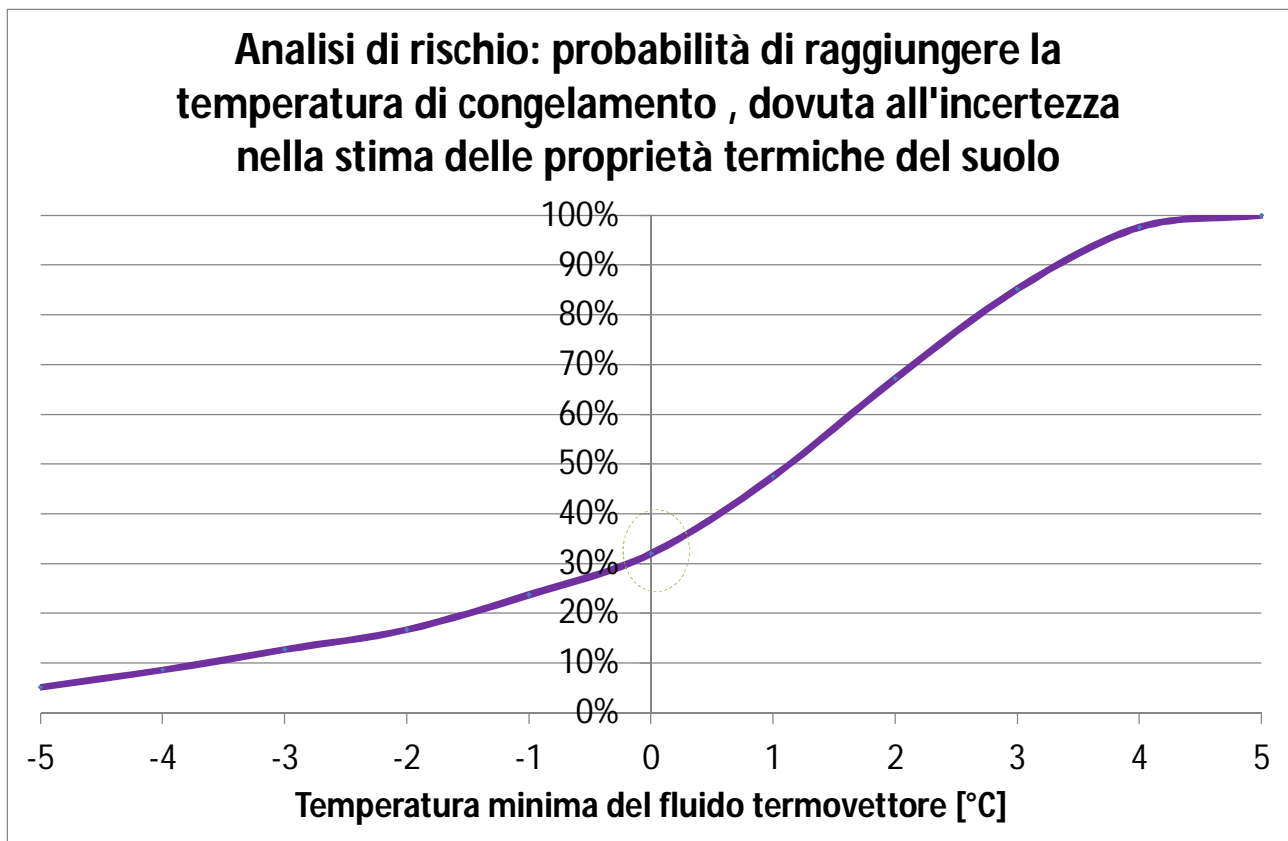


Figura 64 Analisi di rischio: probabilità del raggiungimento della temperatura di congelamento, sulla base dell'incertezza nella stima delle proprietà termiche del suolo

Per quanto riguarda l'analisi di rischio, sono state lanciate diverse simulazioni, a partire da funzioni di distribuzione normali di probabilità per i diversi parametri del sottosuolo. Per il caso in esame, il risultato mostra come il campo sonde così progettato sia soggetto ad un rischio di circa il 30% che l'errore nella stima delle proprietà termiche del sottosuolo porti il fluido termovettore circolante in sonda a congelare.

Conformemente a quanto detto per l'analisi di sensitività, l'analisi di rischio è applicabile anche al caso della resistenza termica. Di seguito il risultato dell'analisi sul caso di studio:

Analisi di rischio: probabilità di raggiungere la temperatura di congelamento, dovuta allo scostamento della resistenza termica reale da quella di progetto

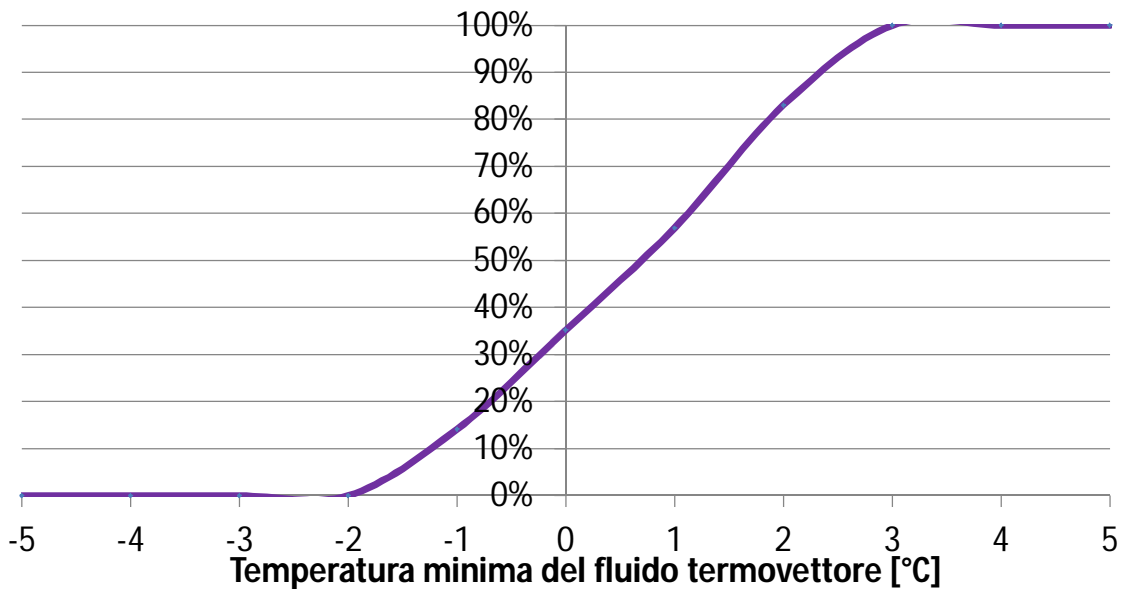


Figura 65 analisi di rischio: probabilità del raggiungimento della temperatura di congelamento, sulla base dello scostamento tra resistenza termica del foro teorica di progetto e resistenza termica reale.

Il risultato illustra come il campo sonde così progettato è soggetto ad un rischio di circa il 35% che lo scostamento della resistenza termica reale da quella di progetto comporti un abbassamento della temperatura del fluido fino al punto di congelamento.

Confrontando i due grafici del rischio, si vede come addirittura il rischio di congelamento causato da un errore sulla resistenza termica sia superiore al rischio causato da un errore sulle proprietà termiche del suolo.

3.2.4 La valutazione economica dell'investimento

La valutazione economica di un investimento geotermico si basa su due elementi (Tinti, 2008):

- l'investimento iniziale;
- i consumi elettrici annuali.

Anche la valutazione economica è però soggetta al medesimo rischio esposto nel paragrafo precedente dovuto all'incertezza dei parametri. Di seguito si esplicherà tale rischio, basandosi sull'investimento riferito al caso studio.

L'indice economico che si è scelto come riferimento è:

CTA: Costo Totale Attualizzato dell'investimento. Rappresenta il costo totale attualizzato all'anno zero, comprensivo di investimento iniziale e consumi elettrici annuali

$$CTA = K_0 + \sum_{j=1}^n \frac{K_j}{(1+tr)^j} \quad (69)$$

Altri indici economici che sono in genere utilizzati per la valutazione della redditività dell'investimento sono:

VAN: Valore Attuale Netto dell'investimento. Rappresenta il ritorno dell'investimento rispetto ad una soluzione alternativa.

$$VAN = -\Delta K_0 + \sum_{j=1}^n \frac{\Delta K_j}{(1+i)^j} \quad (70)$$

TIR: Tasso Interno di Rendimento. Rappresenta il tasso di redditività richiesto per cui il VAN è azzerato

$$VAN = 0 \quad \sum_{j=1}^n \frac{\Delta K_j}{(1+TIR)^j} = 0 \quad (71)$$

Per quanto riguarda il caso in esame, si prevede il seguente schematico investimento iniziale:

Voce di costo	Valore (€)
Campo sonde verticali	80.000
Collegamenti orizzontali	12.000
Pompa di calore	40.000
Ausiliari elettrici e valvolame idraulico	4.000
Contatore elettrico dedicato	300

TOTALE	141.300
--------	---------

Tabella 4 Investimento iniziale necessario per il sistema geotermico

Si sceglie di installare un contatore elettrico dedicato per potere usufruire della tariffa agevolata BTA per pompe di calore. I costi dell'energia elettrica sono ipotizzati i seguenti, comprensivi di oneri di dispacciamento e imposte:

Voce di costo	Costo (€/kWh)
Consumo elettrico compressore (tariffa BTA)	0,15
Consumo elettrico pompa di circolazione	0,18

Tabella 5 Costi dell'energia

Il tasso di sconto viene impostato al valore del 3%

I flussi di cassa dell'investimento sono i seguenti:

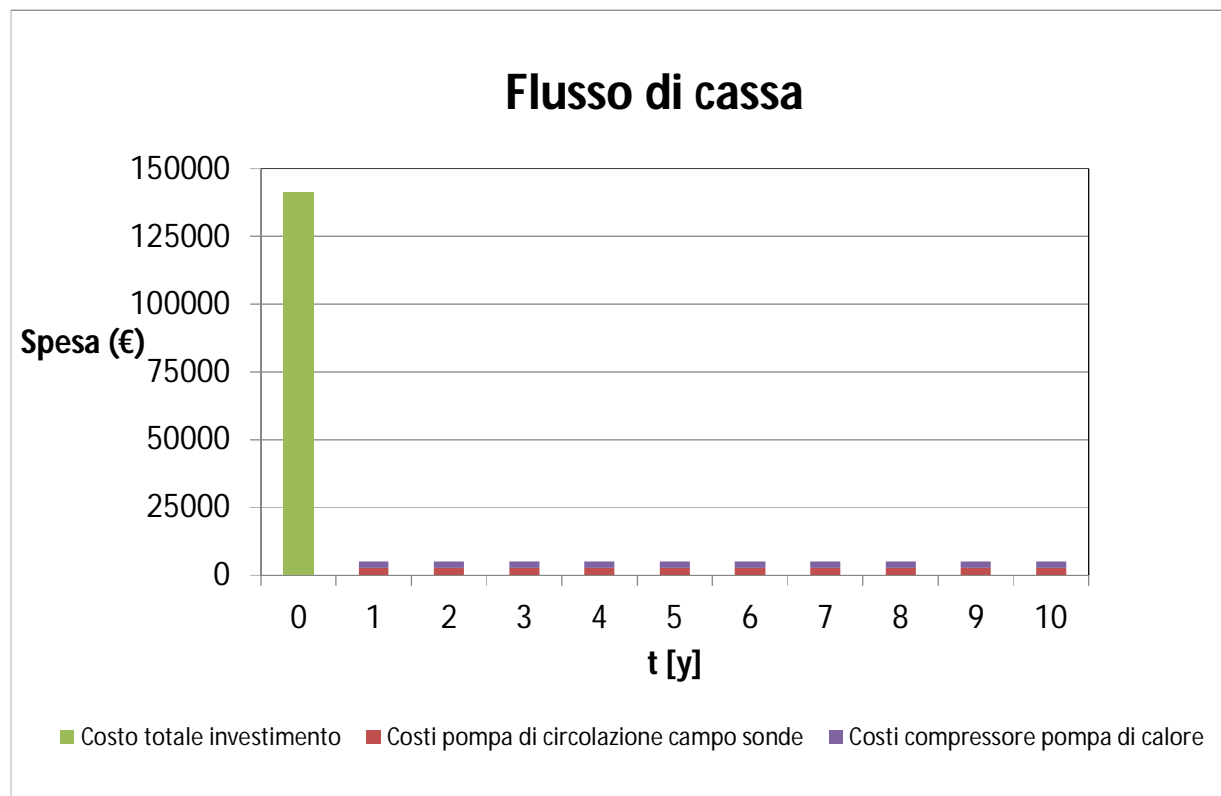


Figura 65 Flusso di cassa, suddiviso per anno, riferito al caso studio presentato

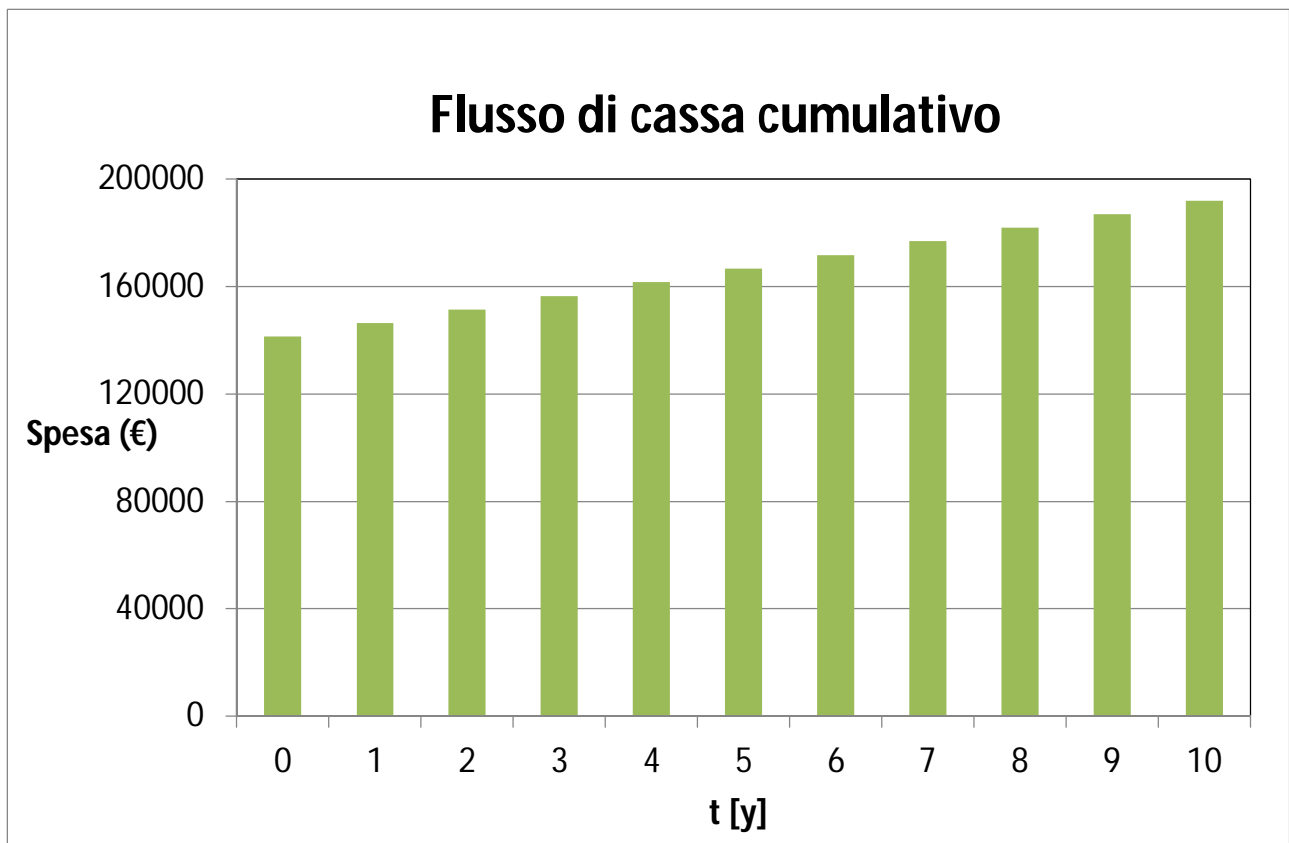


Figura 66 Flusso di cassa cumulativo riferito al caso studio presentato

Il costo totale attualizzato CTA risulta essere pari a circa 184.500 €

Si eseguono ora le analisi di sensitività e rischio sui parametri termici del terreno e sulla resistenza termica del foro, questa volta riferiti al CTA.

Di seguito i risultati:

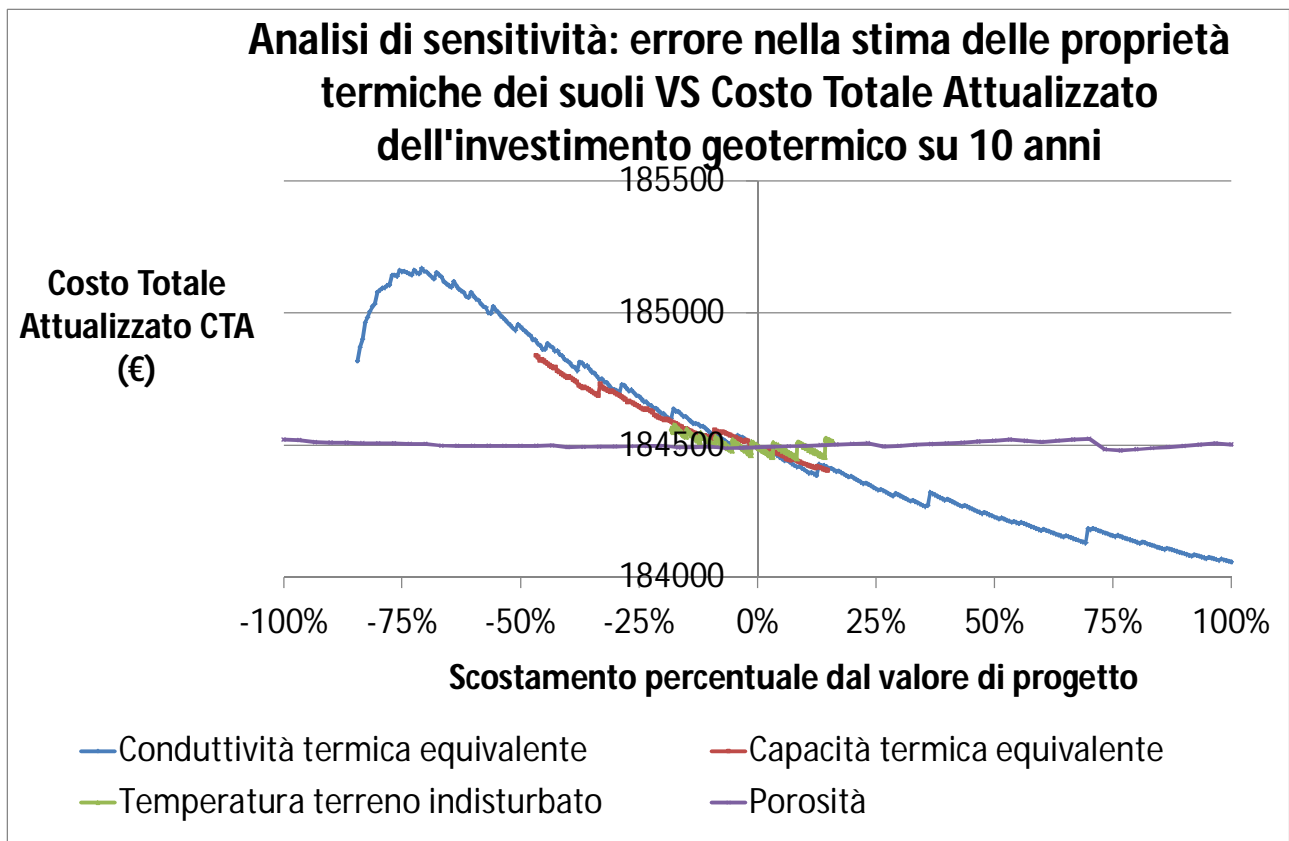


Figura 67 Analisi di sensitività: variazione del Costo Totale Attualizzato, sulla base della variazione della resistenza termica del foro reale dal valore di progetto

L'analisi di sensitività sul CTA, mostra come siano in questo caso i parametri termici conduttività termica e capacità termica volumetrica ad influire effettivamente sui consumi, e quindi sui costi, mentre la variazione di temperatura del terreno e porosità non danno luogo a variazioni significative.

Analisi di sensitività: scostamento della resistenza termica reale del geoscambiatore dal valore di progetto VS Costo Totale Attualizzato su un orizzonte di 10 anni

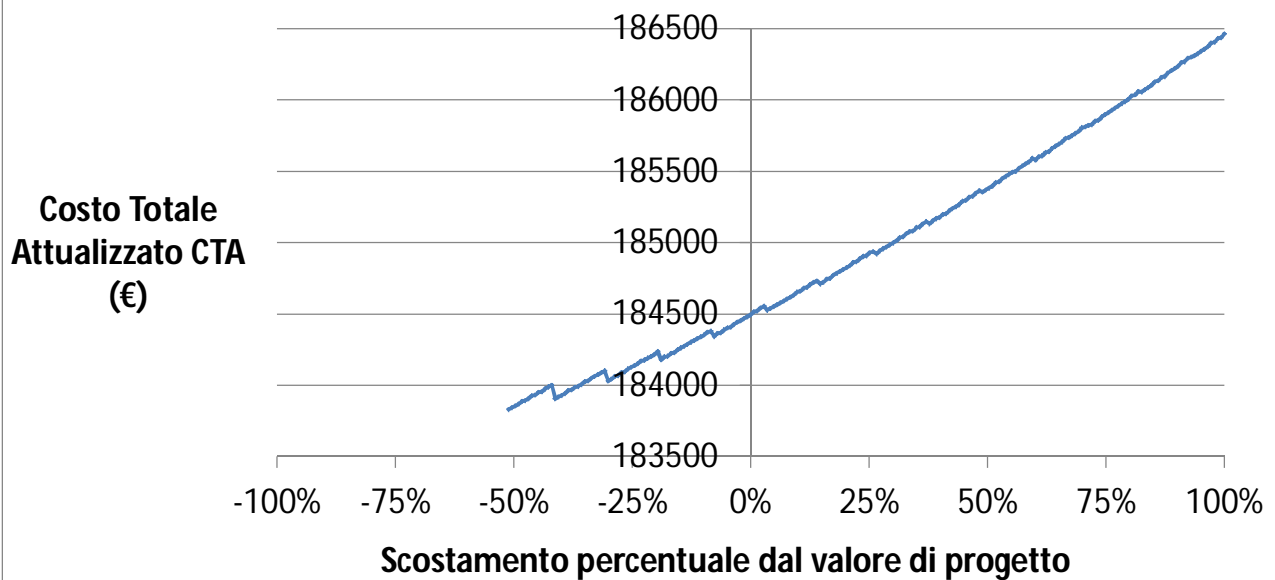


Figura 68 Analisi di sensitività: variazione del Costo Totale Attualizzato, sulla base della variazione della resistenza termica del foro reale dal valore di progetto.

Anche in questo caso, si vede come uno scostamento della resistenza termica reale dal valore di progetto può portare ad una considerevole variazione dei costi di esercizio. L'aumento dei costi di esercizio è proporzionale all'aumento della resistenza termica del foro.

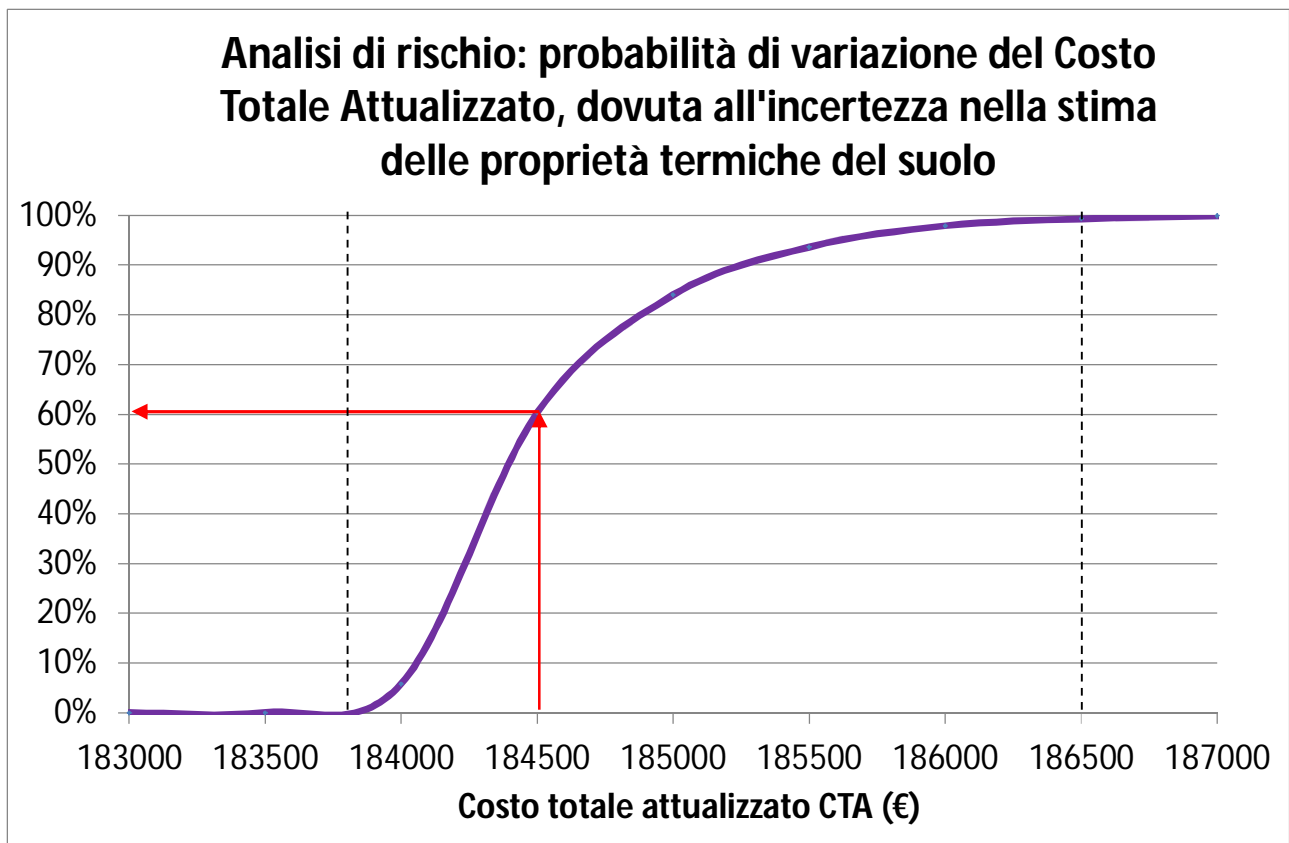


Figura 69 Analisi di rischio: probabilità dell'aumento dei costi di esercizio, sulla base dell'incertezza nella stima delle proprietà termiche del suolo

Per quanto riguarda la stima delle proprietà termiche del suolo, nel caso in esame, grazie alla combinazione dei loro diversi effetti, si ha un 60% di probabilità che i consumi reali siano inferiori o uguali ai consumi di progetto. Pertanto si ha quindi un 40% di probabilità che tali consumi siano invece superiori, con un range che varia tra 183.800 € e 186.500 €

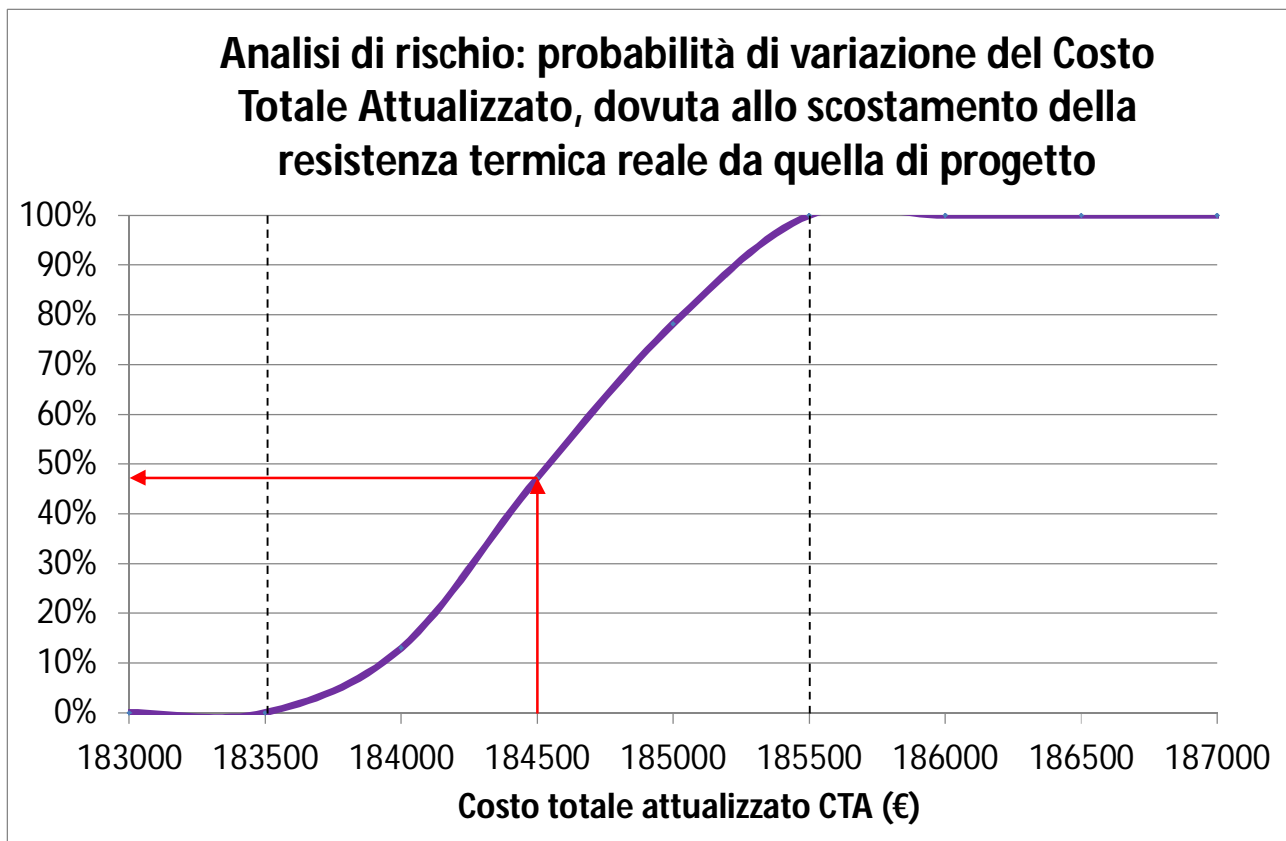


Figura 70 Analisi di rischio: probabilità dell'aumento dei costi di esercizio, sulla base dello scostamento tra resistenza termica del foro teorica di progetto e resistenza termica reale.

In questo caso, il risultato mostra come lo scostamento tra resistenza termica teorica e reale porti ad un 48% di probabilità di avere consumi uguali o inferiori al valore ipotizzato di progetto, e conseguentemente ad un 52% di probabilità che essi siano superiori al valore ipotizzato di progetto. Il range di CTA in questo caso varia tra 183.500 € e 185.500 €.

Confrontando le due analisi quindi:

- l'errore nella stima della resistenza termica del foro porta ad avere una maggiore probabilità di aumento di costi rispetto all'errore nella stima dei parametri termici del terreno;
- l'errore nella stima dei parametri termici del terreno può generare dei costi di esercizio più alti rispetto all'errore nella stima della resistenza termica del foro, seppur con probabilità di accadimento inferiore.

4. *LE CONSIDERAZIONI AMBIENTALI*

4.1 I SISTEMI GEOTERMICI NEL QUADRO DEL RAGGIUNGIMENTO DEGLI OBIETTIVI DI KYOTO

E' ben noto che i sistemi geotermici a bassa entalpia siano sistemi eco-compatibili in quanto hanno un bassissimo impatto ambientale. Di seguito di cerca di quantificare questo impatto.

Per quanto riguarda le emissioni climalteranti prodotte da tali sistemi, occorre distinguere tra due fasi:

- la fase di realizzazione del sistema;
- la fase di funzionamento del sistema.

Per quanto riguarda la fase di realizzazione, essa viene a sua volta distinta nella parte “impianti” (pompa di calore, fluidi refrigeranti, valvole, etc) e nella parte “terreno” (le sonde verticali, la perforazione del terreno, la cementazione, il trasporto e la movimentazione, etc..).

L'attenzione ambientale sull'impiantistica è sempre stata notevole, tanto che negli anni sono stati proibiti diversi tipi di fluidi refrigeranti.

Per ciò che concerne la parte terreno, invece, il problema è stato generalmente trascurato, non considerandone significativo l'impatto

Un'analisi recente ha tentato di quantificare l'impatto che le fasi di perforazione ed installazione sulle sonde verticali hanno sull'ambiente in termini di emissioni climalteranti, per mezzo di indicatori comuni e condivisi. L'indicatore utilizzato, conforme all'analisi nota come Life Cycle Assessment, definita dalla norma UNI EN ISO 14040, è rappresentato dalla quantità di anidride carbonica equivalente emessa

Il risultato dell'analisi per il caso dell'esempio considerato è stato il seguente:

Emissioni di anidride carbonica equivalente riferite all'installazione del sistema geotermico

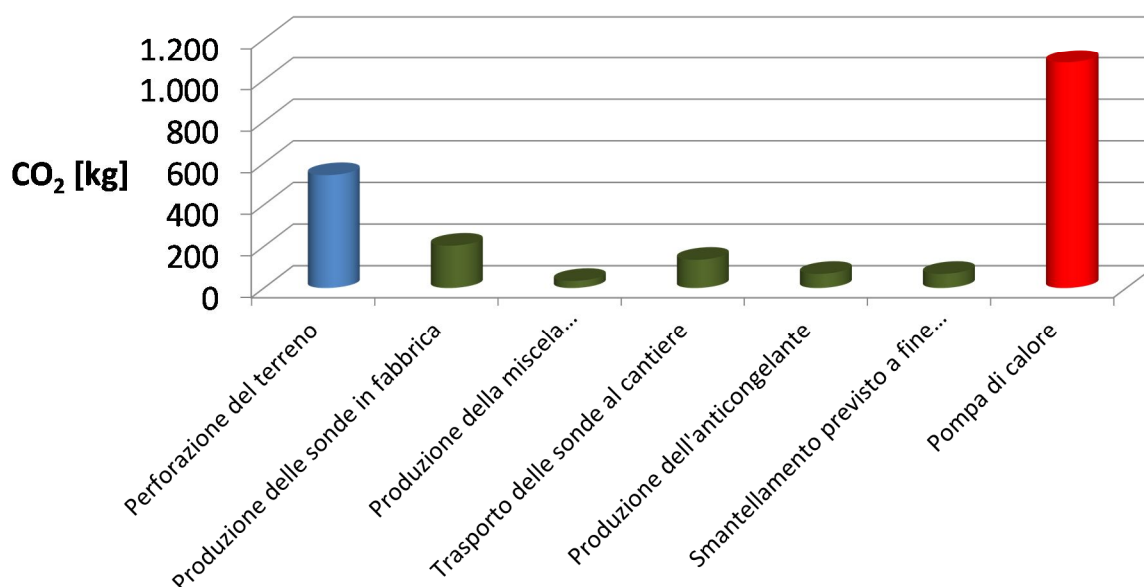


Figura 70 Quantitativo di emissioni di CO₂ equivalente delle operazioni di installazione del campo sonde, e della pompa di calore

Per quanto riguarda la fase di esercizio, non si hanno emissioni in loco, ma si ha consumo di energia elettrica (Tinti, 2007). Pertanto, l'indice si sposta sulla produzione di energia elettrica ad opera delle diverse centrali presenti sul territorio. Si considera un valore medio realistico di emissioni dovuto alla produzione termoelettrica italiana di 450g CO₂ / kWh_e. Di seguito il grafico delle emissioni riferito al caso studio in oggetto.

Emissioni di anidride carbonica equivalente riferite al funzionamento del sistema geotermico

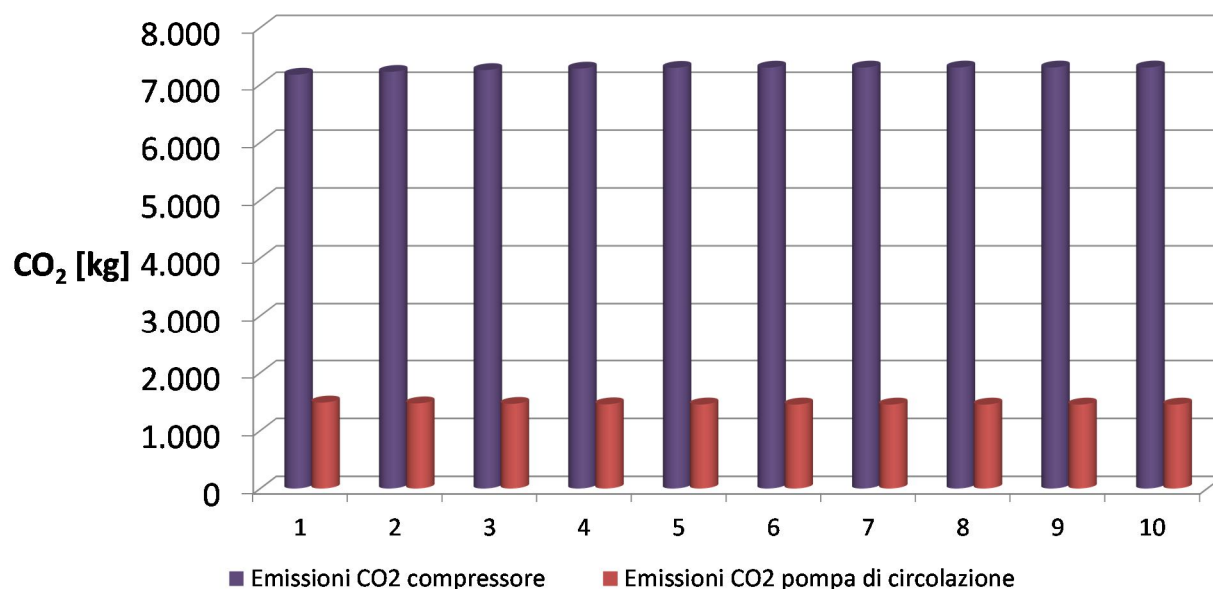


Figura 71 Emissioni annuali di anidride carbonica equivalente dovute al funzionamento del sistema geotermico

Le analisi di sensitività e di rischio effettuate sulla redditività dell'investimento, basate a partire dei parametri del terreno e della sonda, possono essere analogamente ripetute sul quantitativo di emissioni di CO₂ equivalente ipotizzato.

Prendendo il valore di consumi elettrici come calcolato da progetto, si ottiene il seguente risultato:

	Anidride Carbonica equivalente emessa totale su un funzionamento previsto di 10 anni [kg]	Percentuale sul totale (%)
Fase di installazione	2.135,59	2,39
Fase di funzionamento	87.227,73	97,61
TOTALE	74.790,42	100

Tabella 6 Quantificazione delle emissioni di CO₂ nel caso dell'esempio.

Il rapporto mostra come la quota relativa alle emissioni dovute al funzionamento del sistema sia assolutamente preponderante rispetto alla quota relativa alla fase di installazione.

Tuttavia, forse per la prima volta, si è cercato di quantificare la quota dovuta all'installazione del sistema. Ipotizzando un miglioramento continuo dell'efficienza del parco termoelettrico, sulla base del trend degli ultimi anni (l'efficienza di conversione è passata dal 36% del 2006 al 40% del 2010), il divario tra le percentuali dovrebbe via via ridursi, e la quota di emissioni dovuta alla fase di installazione aumentare sempre di più il suo peso sul bilancio globale.

In ogni caso, il totale delle emissioni dovute ad un sistema geotermico è nettamente inferiore ad un sistema di riscaldamento tradizionale a combustibili fossili, tanto che la Direttiva Europea 2009/28/EC, meglio nota come "Direttiva Rinnovabili" conferisce all'energia geotermica estratta tramite pompa di calore la qualifica di fonte di energia rinnovabile, ma limitatamente alla verifica della reale efficienza degli impianti, secondo l'equazione:

$$Q_{res} = Q_{usable} \cdot \left(1 - \frac{1}{SPF}\right) \quad (72)$$

Dove Q_{usable} [kWh] è l'energia termica prodotta dalla pompa di calore nella stagione considerata e SPF l'efficienza media stagionale dell'intero sistema geotermico.

L'efficienza SPF deve quindi rispettare:

$$SPF > 1,15 \cdot \frac{1}{\eta} \quad (73)$$

Dove η è il rendimento del parco elettrico calcolato su dati Eurostat.

A fini di accesso alle incentivazioni previste per le fonti rinnovabili, è importante quindi sapere quantificare l'energia termica rinnovabile gratuita per ogni installazione di sistema geotermico. Le analisi illustrate nel presente lavoro possono fornire un valido aiuto ai progettisti per la corretta stima dei rapporti tra energia termica prodotta ed energia elettrica consumata dai sistemi geotermici nei diversi anni di funzionamento dell'impianto.

5. *LE SOLUZIONI INNOVATIVE DI GEOSCAMBIO*

La soluzione tecnologica presentata non è la sola e unica che permette l'estrazione di calore dal sottosuolo mediante tecnologia a circuito chiuso. Nel lavoro di ricerca, sono state studiate tre possibili alternative, non ancora pienamente sviluppate, che hanno però ampi margini di miglioramento e di incremento nel mercato anche in Italia e in Europa:

- l'utilizzo di strutture portanti di edifici a fini energetici;
- lo sfruttamento di serbatoi di calore alternativi al terreno;
- l'utilizzo del calore a fini diversi dal condizionamento degli edifici.

5.1 I PALI ENERGETICI

Per palo energetico si intende una struttura di fondazione che viene utilizzata a fini termici. (Katsura, 2006).

I pali energetici sono una tecnologia abbastanza conosciuta ma effettivamente non molto diffusa. Sebbene molto promettente in termini di abbattimento di costi, infatti, non lo è altrettanto in termini di resa energetica, per cui l'adozione di questa tecnologia da sola difficilmente copre l'intero fabbisogno energetico dell'edificio. I motivi sono i seguenti:

- la limitata lunghezza del palo. I pali in genere sono profondi non più di 7 – 10 metri. Pertanto la temperatura del terreno raggiunta è di alcuni gradi inferiore rispetto alla temperatura che raggiungerebbe una sonda verticale nella medesima posizione;
- la presenza della zona termicamente instabile. I pali difficilmente riescono a raggiungere la zona termicamente stabile del terreno, per cui, anche se disposti in verticale, hanno delle quote di estrazione termica paragonabili più alle serpentine orizzontali che effettivamente alle sonde verticali. La presenza dell'edificio sovrastante attenua questo effetto. L'interazione termica ambiente / edificio / palo deve essere comunque studiata caso per caso;

- il riempimento dei pali ed il materiale di cementazione. Poiché la proprietà primaria dei pali è la sua capacità portante, la miscela cementizia deve assolvere in prima battuta questo compito. I cementi adatti per i pali energetici di norma hanno peggiori proprietà termiche delle miscele idonee per sonde verticali.

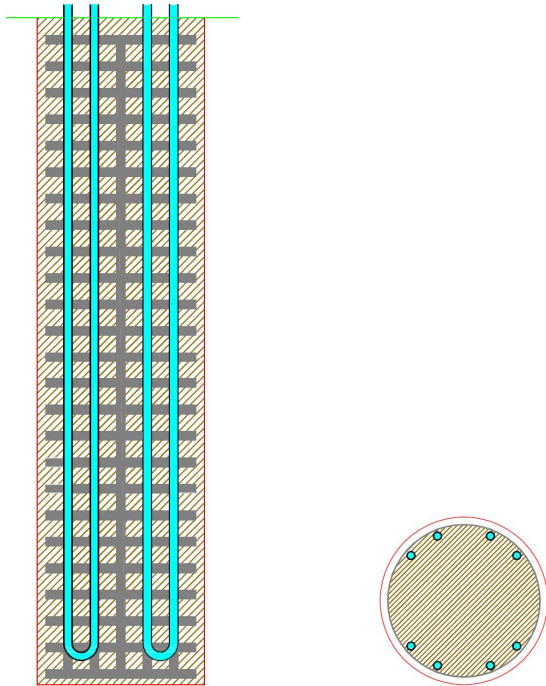


Figura 72 Pianta dall'alto e sezione di un palo energetico. Si notano la gabbia metallica e la disposizione delle tubazioni in polietilene di diametro 25 mm.

5.2 LO SFRUTTAMENTO TERMICO DELLE DISCARICHE

Oltre alla configurazione verticale, un'altra configurazione possibile delle sonde geotermiche è la posa orizzontale. (Fujii, 2010). Tale configurazione consiste essenzialmente nella posa a 1-2 m di profondità dal piano campagna di tubazioni (a serpentina / a spirale), che vengono poi ricoperte dal materiale precedentemente scavato. Questa soluzione ha un basso costo, rispetto alle sonde verticali, ma la resa è inferiore, in quanto si trovano nello strato termicamente instabile, e la temperatura del terreno è quindi influenzata dalla componente climatica esterna.

Una soluzione proposta per aumentare la quota di estrazione di energia consiste nello sfruttamento termico delle discariche. Infatti, all'interno dell'ammasso dei rifiuti si innescano fenomeni di decomposizione e fermentazione della sostanza organica in condizioni sia aerobiche che anaerobiche, con la produzione di biogas e calore.

Tramite alcuni TRT effettuati su serpentine orizzontali inserite in un ammasso di rifiuti, è stata verificata la possibilità di sfruttare il calore prodotto dalla decomposizione dei rifiuti durante i processi all'interno della discarica come produzione e stoccaggio di energia termica, allo stesso modo in cui viene estratta l'energia geotermica per la climatizzazione, e cioè tramite l'inserimento nell'ammasso di serpentine orizzontali geotermiche.

Trattando l'ammasso allo stesso modo dei materiali naturali, l'equazione per la determinazione della lunghezza necessaria delle serpentine è la medesima per definire la lunghezza delle serpentine orizzontali, e cioè (Kavaunagh, 1997):

$$L = \frac{P_{rsu} \cdot [R_b + R_{rsu} \cdot P \cdot O \cdot PLF]}{T_{rsu} - \left(\frac{T_{f,in} + T_{f,out}}{2} \right)} \quad (74)$$

Dove P_{rsu} [W] è la potenza termica scambiata con la discarica, R_b [(K·m)/W] la resistenza termica delle serpentine, P un coefficiente correttivo relativo al diametro delle tubazioni, O un coefficiente correttivo relativo alla distanza tra le tubazioni, PLF il fattore di carico di progetto per riscaldamento, T_{rsu} [°C] è la temperatura dell'ammasso della discarica, R_{rsu} è la resistenza termica dell'ammasso della discarica, $T_{f,in}$ [°C] è la temperatura del fluido in ingresso, $T_{f,out}$ [°C] è la temperatura del fluido in uscita.

Sono state realizzate alcune prove per valutare, a diverse condizioni di esercizio, il valore di T_{rsu} , che si rivela essere maggiormente favorevole rispetto al terreno per la produzione di energia termica per i seguenti motivi:

- data la notevole massa e volume degli ammassi di rifiuti, le serpentine sono protette in parte o del tutto dalla zona termicamente instabile e quindi dall'influenza della temperatura esterna;
- i fenomeni di degradazione aerobica e anaerobica portano le temperatura globale dell'ammasso di diversi gradi sopra il normale.

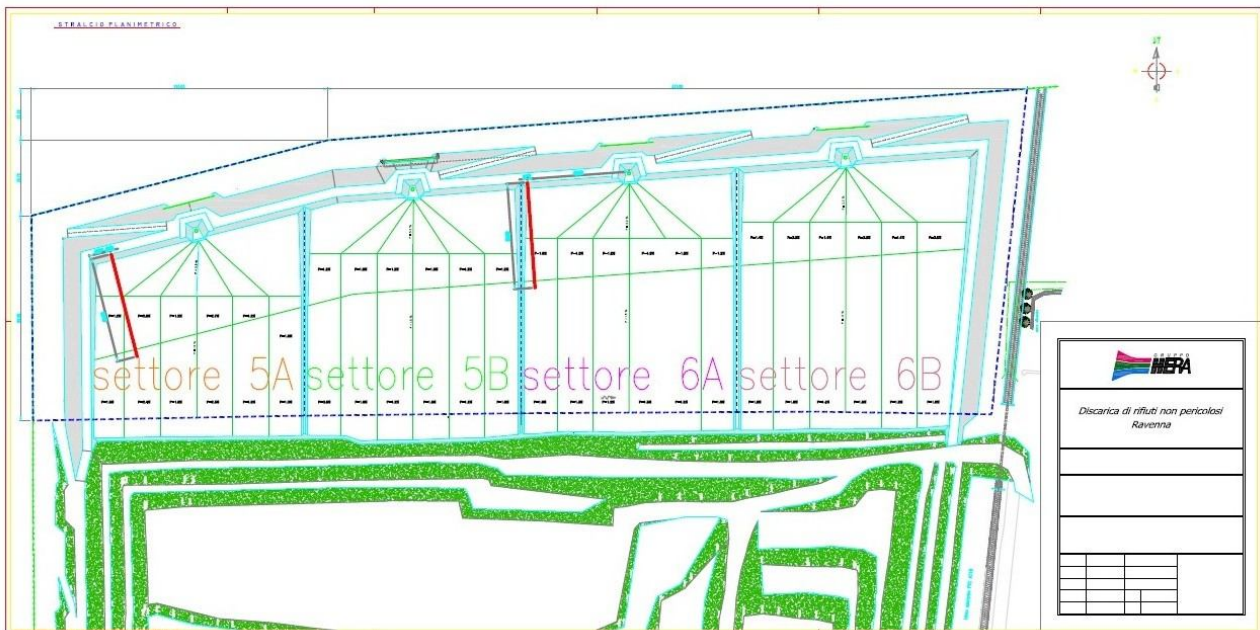


Figura 73: ubicazione delle sonde orizzontali all'interno della discarica di Hera dove sono state condotte le prove.

Sono ancora da verificare i valori delle proprietà termiche equivalenti dei diversi tipi di ammassi di rifiuti. Inoltre deve essere ancora verificato e studiato l'effettivo grado di utilizzabilità di questa energia prodotta. Tra le varie ipotesi, si può pensare di utilizzare questo calore per sopperire all'intero fabbisogno (acqua calda sanitaria, climatizzazione, riscaldamento) degli uffici e delle altre strutture interne, oppure per fornire calore di supporto e integrazione a processi industriali propri della discarica, o adiacenti ad essa oppure ancora per attività quali la piscicoltura e la sericoltura.

5.3 I SISTEMI DI DE-ICING E SNOW MELTING

Un utilizzo della geotermia superficiale non molto noto ma estremamente promettente è quello dello snow melting e del de-icing. La tecnica consiste nel collegare i geoscambiatori non alla pompa di calore e ai terminali di distribuzione del calore internamente all'edificio, ma ad apposite serpentine disposte sotto il manto stradale. L'intero sistema è mosso da un'unica pompa di circolazione. Questa tecnica permette di mantenere la temperatura dell'asfalto sempre sopra gli 0°C. I dati di progetto per un sistema di snow melting sono differenti da quelli per un sistema di condizionamento (Lund, 2000). L'equazione utilizzabile per quantificare il flusso termico di una certa porzione del manto stradale p_{str} [W/m²] è la seguente:

$$p_{str} = p_n + p_{fu} + S \cdot (p_{ve} + p_{rc}) \quad (75)$$

Dove p_n [W/m²] è il flusso di calore sensibile trasferito dalla neve, p_m [W/m²] il flusso di calore di fusione, S la quota di area libera dalla neve sul totale, p_{ev} [W/m²] il flusso di calore di evaporazione e p_{rc} [W/m²] il flusso di calore trasferito per radiazione e convezione.

Una volta calcolato il flusso di calore, si dimensiona la serpentina per ottenere una temperatura del fluido tale per cui sul manto stradale sia mantenuta una temperatura media desiderata che eviti la formazione di ghiaccio e la stratificazione della neve.

Con un corretto dimensionamento del sistema di geoscambio e con un'ideale progettazione del manto stradale, in zone climatiche con inverni non particolarmente rigidi, è possibile effettuare lo snow melting tramite una semplice circolazione di fluido, senza utilizzo della pompa di calore. In tal caso, i costi di funzionamento si abbattano in quanto l'unica spesa deriva dal prezzo dell'energia elettrica necessaria al funzionamento delle pompe di circolazione

PIANTA

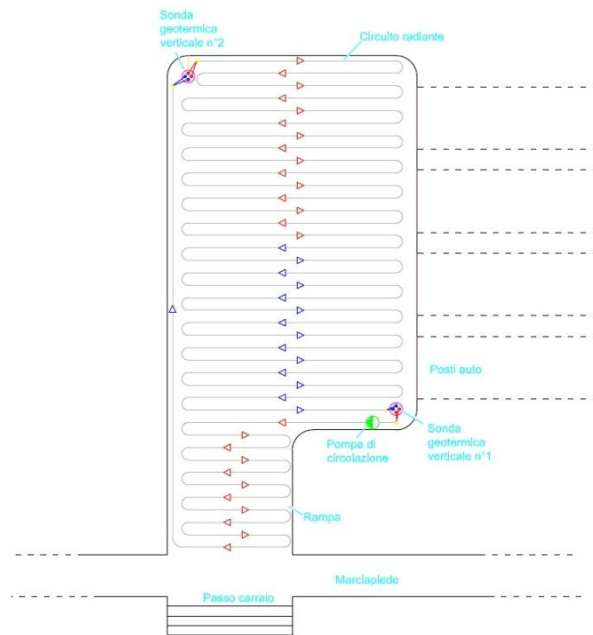


Figura 74 Progetto di Geothermal Snow Melting: pianta delle serpentine sotto il manto stradale della piazzola e ubicazione delle sonde geotermiche verticali

SEZIONE

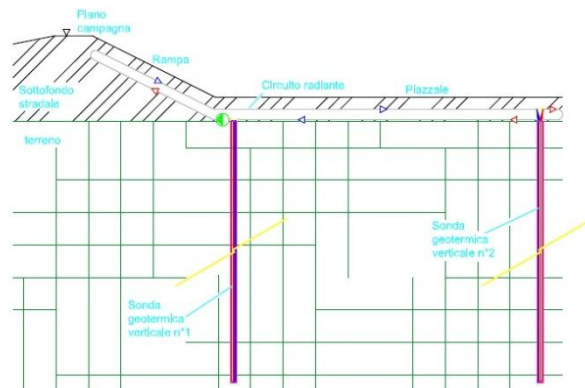


Figura 75 Progetto di Geothermal Snow Melting: sezione

6. *LE CONCLUSIONI FINALI*

Il lavoro di ricerca ha messo in luce, nella progettazione e nel testing di un sistema geotermico, le problematiche relative all'incertezza della stima dei parametri incogniti del sottosuolo, arrivando a quantificare la loro effettiva influenza sul risultato energetico finale del sistema.

Nello specifico:

- è stata analizzata la procedura nota come Test di Risposta Termica da un punto di vista probabilistico;
- è stata affrontata la progettazione in maniera integrata al fine di giungere all'ottimizzazione del sistema geotermico in termini di energia rinnovabile prodotta, consumo elettrico, ritorno dell'investimento ed impatto ambientale;
- sono state individuate, studiate e testate soluzioni innovative di geoscambio con un elevato potenziale di crescita.

BIBLIOGRAFIA

Articoli e pubblicazioni scientifiche

- AA.VV (2002) *Thermal Response Test – State of the Art 2001*. Report IEA ECES Annex 13
- Al-Khoury R. and others (2005) *Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: Steady state*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 63 (988 – 1013)
- Al-Khoury R. and Bonnier P.G (2006). *Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part II: Transient*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 67 (725 – 745)
- Al-Khoury R. and others (2010). *Efficient numerical modeling of borehole heat exchangers*. Computer & Geosciences, 36 (1301 – 1315)
- Acuna J. and Palm B. (2009). *Local Conduction Heat Transfer in U-pipe Borehole Heat Exchangers*. Proceedings from Comsol Conference 2009, Milan, Italy
- Acuna J. and Palm B. (2010) *A Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger: Description and First Distributed Thermal Response Test Measurement*. Proceedings from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia
- Acuna J. (2008). *Characterization and Temperature Measurement Techniques of Energy Wells for Heat Pumps*. Master of Science Thesis. School of Industrial Engineering and Management. Royal Institute of Technology, Sweden.
- Austin W.A. (1995). *Development of an in situ System for Measuring Ground Thermal Properties*. Master of Science Thesis. Oklahoma State University, U.S.A.
- Badescu V. (2006). *Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house*. Renewable Energy, 32 (845-855)

- Bandyopadhyay G. and others (2008). *Analytical and semi-analytical solutions for short-time transient response of ground heat exchangers*. Energy and Buildings, 40 (1816 – 1824)
- Basta S. and Minchio F. (2008) *Geotermia e pompe di calore*, Verona, Italia
- Bandos T.V. and others (2009) *Finite line-source model for borehole heat exchangers: Effect of vertical temperature variations*. Geothermics 38, (263–270)
- Bandos T.V. and others (2011) *Improving parameter estimates obtained from thermal response tests: Effect of ambient air temperature variations*. Geothermics, 40 (136 – 143)
- Bauer D. and others (2010). *Thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers*. International Journal of Energy Research, 35 (312 – 320)
- Bauer D. and others (2011). *Transient 3D analysis of borehole heat exchanger modeling*. Geothermics, 40 (250 – 260)
- Beier R. (2011) *Equivalent Time for Interrupted Tests on Borehole Heat Exchangers*. HVAC&R Research, 14 (489 – 505)
- Beier R. and others (2011). *Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis*. Geothermics, 40 (79 – 85)
- Bozdag S., and others (2008). *Ground water level influence on thermal response test in Adana, Turkey*. International Journal of Energy Research, 32 (629 – 633)
- Bozzoli F. and others (2011) *Estimation of soil and grout thermal properties through a TSPEP (two-step parameter estimation procedure) applied to TRT (thermal response test) data*. Energy, 36 (839 – 846)
- Bragadin G.L. (1996) *Idraulica*. Cedam, Padova, Italia
- Carslaw H. and Jaeger J. (1947). *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press. Londra, Inghilterra.
- Cerica L. (2007) *Caratterizzazione e modellizzazione di reservoir geotermico superficiale per impianti di condizionamento a uso civile*. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Bologna, Italia.

- Chiasson A.D. (1999) *Advances in modeling of ground-source heat pump systems*. Master of Science Thesis. Oklahoma State University, U.S.A.
- Chiasson A.D. and others (2000). *A Preliminary Assessment Of The Effects Of Ground-Water Flow On Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems*. ASHRAE Transactions, 106 (380-393)
- Chiles J.P. and Delfiner P.(1999). *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. Wiley, New York
- Clauser C. and Huenges E. (1995). *Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants*. Book section of Thomas J. Ahrens, Thermal conductivity of rocks and minerals
- Cocchi A. (1990) *Elementi di termofisica generale e applicata*. Società Editrice Esculapio, Bologna, Italia
- Cullin J.R. and Spitler J.D. (2011). *A computationally efficient hybrid time step methodology for simulation of ground heat exchangers*. Geothermics, 40 (144 – 156)
- Dai C. and others (2010). *Optimum Design of a Space Heating System Using Heat Pump Combined with Down hole Heat Exchanger*. Proceedings from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia
- De Carli M. and others (2010). *A computational capacity resistance model (CaRM) for vertical ground-coupled heat exchangers*. Renewable Energy, 35 (1537 – 1550)
- De Lucia M. (2008). *Influenza della variabilità spaziale sul trasporto reattivo*. Tesi di Dottorato. Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, Università di Bologna.
- Diao N. and others (2004). *Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection*. International Journal of Thermal Science, 43 (1203 – 1211)
- Eskilson P. (1987) *Thermal analysis of heat extraction boreholes*. Doctoral Thesis, Department of Technical Physics. University of Lund, Sweden.

- Fan R. and others (2007). *A study on the performance of a geothermal heat exchanger under coupled heat conduction and groundwater advection*. Energy, 32 (2199 – 2209)
- Fossa M. (2011) *The temperature penalty approach to the design of borehole heat exchanger for heat pump applications*. Energy and Buildings, 43 (1473 – 1479)
- Fujii H. and others (2005) *Optimizing the design of large-scale ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport modeling*. Geothermics, 34 (347-364)
- Fujii H. and others (2006) *Thermal response tests using optical fiber thermometers*. Geothermal Resources Council Transaction, 30 (545-551)
- Fujii H. and others (2007). *Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models*. Geothermics, 36 (459 – 472)
- Fujii H. and others (2009) *An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers*. Geothermics, 38 (399-466)
- Fujii H. and others (2010) *Field Tests of Horizontal Ground Heat Exchangers*. Proceedings from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia
- Fujimitsu Y. and others (2010). *Evaluation of subsurface thermal environmental change caused by a ground-coupled heat pump system*. Current Applied Physics, 2 (113 – 116)
- Gao Q., and others (2009). *Review of development from GSHP to UTES in China and other countries*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (1383 – 1394).
- Gehlin S. (1998) *Thermal Response Test – In situ measurements of thermal properties in hard rock*. Licentiate Thesis. Division of Water Resources Engineering, Lulea University of Technology, Sweden.
- Gehlin S. (2002) *Thermal Response Test – Method, Development and Evaluation*. Doctoral Thesis. Division of Water Resources Engineering, Lulea University of Technology, Sweden.
- Gehlin S. and Hellstrom G. (2002). *Influence on Thermal Response Test by Groundwater Flow in Vertical Fractures in Hard Rock*. Renewable Energy, 28 (2221-2238)

- Gehlin S. and Hellstrom G. (2003). *Comparison of Four Models for Thermal Response Test Evaluation*. ASHRAE Transactions, 109. Career and Technical Evaluation. (131-142) U.S.A.
- Gehlin S. and others (2003). *The influence of the termosiphon effect on the thermal response test*. Renewable Energy 28, (2239 – 2254).
- Gehlin S. and Spitler J.D. (2003). *Thermal Response Test for BTES application – State of the art 2001*. Proceedings from the FutureStock Conference, Warsaw, Poland.
- Hellstrom G (1991). *Ground heat storage. Thermal Analysis of duct storage systems: theory*. Tesi di Dottorato. Dipartimento di Fisica Matematica, Università di Lund, Svezia.
- Georgiev A. and others (2006). *Shallow borehole heat exchanger: Response test and charging–discharging test with solar collectors*. Renewable Energy, 31 (971 – 985)
- Gonet A. and Sliwa T (2010) *Modification of Method of Interpreting Thermal Response Test of Borehole Heat Exchanger*. Proceeding from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia
- Gustaffson A.M. (2006) *Thermal Response Test – Numerical Simulation and Analysis*. Licentiate Thesis. Division of Architecture and Infrastructure, Lulea University of Technology, Sweden.
- Gustaffson A.M. and Westerlund L. (2010) *Multi-injection rate thermal response test in groundwater filled borehole*. Renewable Energy, 35 (1061 – 1070)
- Gustaffson and others (2010). *CFD-modelling of natural convection in a groundwater-filled borehole heat exchanger*. Applied Thermal Engineering, 30 (683 – 691)
- Gustaffson A.M. and Westerlund L. (2011) *Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger and Investigation of the borehole thermal resistance*. Renewable Energy, 36 (2388 – 2394)
- He M. and others (2010) *Dynamic Response Simulations of Circulating Fluid and a Borehole Heat Exchanger*. Proceeding from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia

- Journel, A.G. and Huijbregts, Ch. J. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press.
- Kavanaugh S.P. and Rafferty K. (1997) *Ground-source heat pumps: Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*. Ashrae publications, Atlanta, U.S.A.
- Katsura T. and others (2006). *An Investigation between Ground Water Advection and Thermal Response with Thermal Probe Method*. Proceedings from Renewable Energy Congress 2006, Chiba, Giappone.
- Katsura T. and others (2006). *A geothermal heat pump system using steel foundation piles as ground heat exchangers*. Proceedings from Renewable Energy Congress 2006, Chiba, Giappone.
- Kim S-K., and others (2010). *Field-scale evaluation of the design of borehole heat exchangers for the use of shallow geothermal energy*. Energy, 35 (491 – 500)
- Kim E-J., and others (2010). *Numerical modeling of geothermal vertical heat exchangers for the short time analysis using the state model size reduction technique*. Applied Thermal Engineering, 30. (706-714)
- Lamarche L. and Beauchamp B. (2007). *A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes*. Energy and Building, 39 (188 – 198)
- Lamarche L. and Beauchamp B. (2007). *New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical borehole*. International Journal for Heat and Mass Transfer, 50 (1408 – 1419)
- Lazzarin R. (1982). *Intervista sulle pompe di calore*. Muzzio e Co. Editore, Padova, Italia.
- Lee C.K. and Lam H.N. (2007). *Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems*. Renewable Energy, 33 (1286 – 1296)
- Li X. and others (2006). *Simulation and experiment on the thermal performance of U-vertical ground coupled heat exchanger*. Applied Thermal Engineering, 26 (1564 – 1571)
- Lim K. and others (2007). *An experimental study on the thermal performance of ground heat exchanger*. Experimental Thermal and Fluid Science, 31 (985 – 990)

- Lund J.W. (2000). *Pavement Snow Melting*. Geo-Heat Center. Oregon Institute of Technology, USA
- Lund J.W. and others (2005). *Direct application of geothermal energy: 2005 worldwide review*. *Geothermics*, 34 (691–727)
- Magraner T. and others (2010). *Comparison Between Simulation and Experimental Results for a Monitored Ground Coupled Heat Pump System*. Proceedings from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia
- Marcotte D. and Pasquier P. (2008). *On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity tests*. *Renewable Energy*, 33 (2407 – 2415)
- Matheron G. (1967). *Eléments Pour Une Théorie des Milieux Poreux*. Paris, Masson et Cie.
- Matheron G.(1978). *Estimer et choisir*. Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. Paris, École des Mines de Paris: n° 7.
- Mattson N. and others (2008). *Advanced compact device for the in situ determination of geothermal characteristics of soils*. *Energy and Building*, 40 (1344 – 1352)
- Nagano K. and others (2006). *Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system*. *Applied Thermal Engineering*, 26 (1578 – 1592)
- Nam Y. and others (2008). *Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system*. *Energy and Buildings*, 40 (2133 – 2140)
- Nordell B. and Ahlstrom A.-K. (2009) *Freezing problems in borehole heat exchangers*. *Thermal Energy Storage for Suitable Energy Consumption*, 234 (193-203)
- Ohtani T. and others (2010). *Suitable Areas for Geothermal Heat Pumps Inferred from Geological and Hydrological Features: a Case Study in the Nobi Plains, Central Japan*. Proceedings from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.
- Olea R.A. (2007). *Declustering of Clustered Preferential Sampling for Histogram and Semivariogram Inference*. *Mathematical Geology*, Vol. 39: 453–467.

- Oppelt T. and others (2010). *Modelling of the borehole filling of double U-pipe heat exchangers*. Geothermics, 39 (270 – 276).
- Ozgener O. and others (2007). *A parametric study on the exergoeconomic assessment of a vertical ground-coupled (geothermal) heat pump system*. Building and Environment, 42 (1503 – 1509)
- Partenay V. and others (2011). *The influence of the borehole short-time response on ground source heat pump system efficiency*. Energy and Building, 43 (1280 - 1287).
- Pasquini A. (2008). *L'importanza dei parametri geologici per l'ottimizzazione di sonde geotermiche applicate a pompe di calore: stime teoriche e casi di studio*. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Siena, Italia.
- Pahud D. and Matthey Y. (2001). *Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ*. Energy and Building, 33 (503 - 507)
- Philippe M. and others (2010). *An Evaluation of Ground Thermal Properties Measure Accuracy by Thermal Response Test of Horizontal Ground Heat Exchangers*. Proceeding from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia
- Priarone A. and others (2009). *Numerical Evaluation of Long-Term Performance of Borehole Heat Exchanger Fields*. Proceeding from Comsol 2009 Conference, Milan, Italy
- Pyrcz M. J. and Deutsch C. V. (2004). *Declustering and Debiasing*. University of Alberta, Edmonton.
- Red'ko A. and others (2010). *The Analysis of Operating Conditions of Geothermal Heat Pump Units*. Proceeding from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia
- Rezza A. (2005). *La tecnologia Geoscambio: aspetti ambientali ed economici*. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Roma “la Sapienza”. Italia.
- Raymond J. and others (2011). *Borehole temperature evaluation during thermal response tests*. Geothermics, 40 (69 – 78)

- Raymond J. and others (2010). *A Novel Thermal Response Test Using Heating Cables*. Proceedings from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia
- Rohner E. and others (2010). *A new, small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design*. Proceedings from World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey.
- Roth P. and others (2004). *First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America*. Renewable Energy, 29 (1947 – 1963)
- Sankaranarayanan .K.P. (2005) *Modeling, verification and optimization of hybrid ground source heat pump systems in energyplus*. Master of Science Thesis. Oklahoma State University, U.S.A.
- Sanner B. (2003). *Current status of ground source heat pumps in Europe*. Proceedings from Futurestock 2003 conference, Warsaw, Poland.
- Sanner B. and others (2005). *Thermal Response Test. Current Status and Worldwide application*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey.
- Sanner B. and others (2008). *Thermal Response Test, a routine method to determine thermal ground properties for GSHP design*. Proceedings from the 9th International IEA Heat Pump Conference, Zürich, Switzerland.
- Schiavi L. (2009) *3D simulation of the Thermal Response Test in a U-tube Borehole Heat Exchanger*. Proceedings of Comsol 2009 Conference, Milan, Italy
- Sharqawy M. H. and others (2009). *Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers*. Geothermics, 38 (271 – 277)
- Shonder J.A. and Beck J.V. (1999) *Determining effective soil formation thermal properties from field data using a parameter estimation technique*. Ashrae Transactions, vol 105, no 1 (458 – 466)

- Shonder J.A. and Beck J.V. (2000). *A New Method to Determine the Thermal Properties of Soil Formations from In Situ Field Tests*. Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy, Oak Ridge, U.S.A.
- Signorelli S. (2004). *Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems*. Master of Science Thesis. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Swiss.
- Signorelli S. and Pahud D. (2007). *Numerical evaluation of thermal response tests*. *Geothermics*, 36 (141 – 166)
- Śliwa T. and Sakellariou K (2010). *Comparison Analysis of Use BHE in Different Climatic Conditions*. Proceeding from World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.
- Spitler J.D. and others (2000). *In Situ Measurement of Ground Thermal Properties*. Proceedings of Terrastock 2000, vol. 1 (165 – 170), Stuttgart, Germany
- Spitler J.D. (2000). *GLHEPRO -- A Design Tool For Commercial Building Ground Loop Heat Exchangers*. Proceedings of the Fourth International Heat Pumps in Cold Climates Conference, Aylmer, Canada.
- Tinti F. (2007). *Modelli di scambio termico in pozzo sulla base della caratterizzazione geotermica di un reservoir a bassa entalpia: studio di sensitività sulla efficienza dei sistemi di condizionamento con pompa di calore*. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Bologna, Italia
- Tinti F. (2008). *Geotermia per la climatizzazione*. Monografia. Dario Flaccovio Editore. Palermo, Italia
- Van der Heijden, and others (2004). *Classification, Parameter Estimation and State Estimation - An Engineering Approach using MATLAB*. Wiley, Chicester: 45-79.
- Van Gelder A.J. (2001). *Geothermal Response Test: the Design and Engineering of Geothermal Energy Systems*. European Workshop on Thermal Response Test, Lausanne, Swiss

- Yang W. and others (2009). *A two-region simulation model of vertical U-tube ground heat exchanger and its experimental verification*. Applied Energy, 86 (2005 – 2012)
- Yavuzturk C. (1999). *Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems*. Doctoral Thesis. Oklahoma State University, U.S.A.
- Wagner R. and Clauser C. (2005). *Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity*. Journal of Geophysics and Engineering, 2 (349 – 356)
- Wang H. and others (2008). *Experimental investigation of ice and snow melting process on pavement utilizing geothermal tail water*. Energy Conversion and Management, 49 (1538 – 1546)
- Wang H. and others (2010). *Improved method and case study of thermal response test for borehole heat exchangers of ground source heat pump system*. Renewable Energy, 35 (727 – 733)
- Witte H.J.L. and others (2002). *In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: the Dutch Perspective*. ASHRAE Transactions, 108. Career and Technical Evaluation.
- Witte H.J.L. (2009). *Thermal Response Testing for Borehole Heat Exchangers. Validation of assumptions*. Proceedings from the Symposium 10 years of VDI in Germany, Gottingen, Germany
- Witte H.J.L. and Van Gelder A.J. (2006). *Geothermal response tests using controlled multi-power level heating and cooling pulses (mpl-hcp): quantifying ground water effects on heat transport around a borehole heat exchanger*. Proceedings from ECOSTOCK Conference New Jersey, USA.
- Zanchini E. and Terlizzese T. (2008). *Finite-Element Evaluation of Thermal Response Tests Performed on U-Tube Borehole Heat Exchangers*. Proceedings from COMSOL Conference 2008, Hannover, Germany.

Normativa

- Decisione della Commissione del 9 novembre 2007 che stabilisce i criteri ecologici per l'assegnazione del marchio comunitario di qualità ecologica alle pompe di calore elettriche, a gas o ad assorbimento funzionanti a gas
- Direttiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.
- Decreto legislativo 11 febbraio 2010, n°22: Riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche, a norma dell'articolo 27, comma 28, della legge 23 luglio 2009, n. 99.
- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n°152: Norme in materia ambientale.
- Legge 23 luglio 2009, n°99: Disposizioni per lo sviluppo e l'internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia.
- SIA 384/6: Sondes Géothermiques. 2009, Svizzera
- UNI EN 15450: Progettazione degli impianti di riscaldamento a pompa di calore. 2008.
- UNI EN ISO 14040: Valutazione del ciclo di vita. Principi e quadro di riferimento. 2006.
- UNI TS 11300 parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. 2008
- UNI TS 11300 parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. 2008
- UNI TS 11300 parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva. 2010
- VDI 4640 parte 1: Thermal use of Underground: fundamentals, approvals, environmental aspects. Aggiornamento. 2010, Germania

- VDI 4640 parte 2: Thermal use of Underground: ground source heat pump systems. 2001, Germania
- VDI 4640 parte 3: Utilization of the subsurface for thermal purposes: underground thermal energy storage. 2001, Germania
- VDI 4640 parte 4: Thermal Use of underground: direct uses. 2004, Germania

Articoli pubblicati e atti di convegni

I. L'importanza della misurazione in situ delle proprietà termiche dei terreni nella progettazione di un campo di sonde geotermiche: casi studio di Test di Resa

Termica in differenti contesti geologici

Atti del 3° convegno Nazionale AIGA – Centro di Geotecnologie, San Giovanni Valdarno (febbraio 2009).

Sinossi

La presentazione effettuata verte sull'analisi critica di casi reali di Test di Risposta Termica ad iniezione di calore costante nel sottosuolo, realizzati in diversi contesti climatici, geografici e geologici del territorio italiano. I risultati hanno mostrato come la differente stratigrafia porti a diverse risposte termiche del terreno sottoposto ad un'iniezione di fluido. Hanno inoltre mostrato come con particolari condizioni al contorno, il Test di Risposta Termica possa non fornire un risultato di scambio termico puramente conduttivo.

II. Geothermal Potential of Emilia Romagna and Marche. Developments and future prospects for non – electrical, low – temperature applications

Seminario *Regional Developments of Geothermal Resources in Italy* – Geotherm Expo&Congress –
Offenburg (marzo 2009)

Coautori: Gabriele Cesari, Carlo Gorgoni, Marco Menichetti, Alberto Renzulli

Sinossi

La presentazione effettuata verte su una panoramica delle risorse geotermiche a bassa e media entalpia di Emilia Romagna e Marche. La presentazione si colloca infatti all'interno della giornata dedicata all'Italia del maggior evento fieristico europeo sulla geotermia. In particolare, sono stati presentati i risultati di alcuni Test di Risposta Termica effettuati nelle due regioni, con particolare attenzione alle temperature del terreno indisturbato rilevate.

III. Edificio bioecologico con monitoraggio in tempo reale

Tetto & Pareti, 34 (marzo 2009): 30 – 37

Sinossi

La pubblicazione, su rivista nazionale di architettura di carattere divulgativo, illustra il progetto di una casa in legno climatizzata da pompa di calore e reservoir geotermico. Vengono descritti i particolari costruttivi dell'edificio e dell'impianto termico, nonché l'analisi idrogeologica effettuata per poter dimensionare il campo sonde geotermiche. Vengono presentati inoltre i risultati del primo periodo di monitoraggio delle temperature di esercizio e dei consumi dell'impianto termico, della pompa di calore, e del terreno, per mezzo di un'apposita termocoppia calata sul fondo del foro attraverso il tubo di cementazione.

IV. Progettazione e dimensionamento di campi sonde geotermiche: risultati e considerazioni in merito ad alcuni test di risposta termica eseguiti e nuovi modelli di interpretazione

Seminario *La geotermia in Italia e in Europa. Quale futuro?* – Geotherm Expo Ferrara Fiere
(settembre 2009)

Sinossi

La presentazione riprende l'analisi critica dei Test di Risposta Termica effettuati sul territorio, fornendo spiegazioni teoriche ai risultati sperimentali acquisiti. Vengono illustrati il problema della convergenza dei risultati, al fine di determinare il parametro equivalente di conduttività termica del terreno, l'importanza della realizzazione di profili termici in sonda e il calcolo delle variabili che definiscono la resistenza termica del foro.

V. Sistemi geotermici per il condizionamento

La Termotecnica, 4 (maggio 2009): 30 - 33

Coautori: Roberto Bruno

Sinossi

L'articolo presenta, oltre a una panoramica sui sistemi geotermici, la convenienza di realizzare un investimento sul sistema geotermico rispetto a sistemi tradizionali a combustibili fossili, e i parametri della progettazione da ottimizzare per ottenere tale convenienza. L'analisi costi benefici viene presentata su diverse tipologie di terreno, che danno luogo a quote di estrazione di energia differenti.

VI. L'analisi di fattibilità tecnico economica degli impianti geotermici

Seminario. *Gli impianti geotermici a pompa di calore: progettazione e realizzazione* - Geotherm

Expo Ferrara Fiere (settembre 2010)

Sinossi

Viene presentata nel dettaglio l'analisi costi benefici di diverse soluzioni di sistemi geotermici, sia per quanto riguarda la tipologia di geoscambiatori, che la tipologia di pompe di calore (a gas, ad assorbimento). Vengono inoltre presentate diverse soluzioni di sistemi ibridi, quali l'integrazione con solare termico o solare fotovoltaico.

VII. Test di Risposta Termica per la geotermia superficiale: un approccio
geostatistico

Acque sotterranee, 122 (dicembre 2010): 37 – 41

Coautori: Roberto Bruno, Sara Focaccia

Sinossi

L'articolo presenta la tecnica originale di approccio probabilistico applicato ai Test di Risposta Termica, sviluppata nell'ambito del Dottorato di Ricerca. In particolare viene presentato il metodo della Deriva per la stima della conduttività termica equivalente del terreno, e il metodo della Stima Condizionale, per la stima della coppia di valori della resistenza termica del foro e della capacità termica volumetrica del terreno.

VIII. Lo sfruttamento termico del sottosuolo

Ecoscienza, 2 (maggio 2011): 28 – 29

Coautori: Roberto Bruno

Sinossi

L'articolo presenta, oltre ad una panoramica dei sistemi geotermici a bassa entalpia per la climatizzazione di edifici, un'analisi delle principali barriere che ne hanno ostacolato la diffusione. Tali barriere sono di tipo assicurativo, in quanto non sussistono ancora adeguate garanzie per i clienti, e di tipo finanziario, in quanto gli strumenti di incentivazione previsti per questi sistemi a ridotto impatto ambientale si sono dimostrati inefficaci al fine di mitigare l'oneroso investimento iniziale.

IX. Geostatistical modeling of a shallow geothermal reservoir for air conditioning
of buildings

Atti del convegno IAMG 2011 Salzburg. Mathematical Geoscience at the crossroad of theory and
practice. (settembre 2011): 146 – 163

Coautori: Roberto Bruno, Sara Focaccia

Sinossi

La presentazione effettuata verte sull'applicazione dell'approccio probabilistico per l'analisi dei Test di Risposta Termica e per la simulazione di un campo sonde geotermiche. Per quanto riguarda il Test di Risposta Termica, sono stati presentati i metodi originali "Best Time Interval" e "Drift and Conditional Estimation". Per quanto riguarda la simulazione di un campo sonde è stato presentato il Problema Inverso applicato ai reservoir geotermici superficiali, tramite software di simulazione di scambio termico e di massa agli elementi finiti.

X. Il test di risposta termica del terreno come strumento di progettazione esecutiva

Seminario. *Gli impianti geotermici a pompa di calore. Progettazione, verifica energetica e realizzazione* - Geotherm Expo Ferrara Fiere (settembre 2011)

Sinossi

La presentazione effettuata individua le potenzialità dell'utilizzo di un Test di Risposta Termica su una sonda geotermica verticale di prova ai fini della progettazione corretta di un sistema geotermico a bassa entalpia per la climatizzazione degli edifici. In maniera indiretta, mostra l'importanza di una corretta stima delle proprietà termiche del sottosuolo e dei geoscambiatori installati.

XI. Comparative life cycle assessment of renewable energy systems for heating
and cooling

Atti del convegno *International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities* (settembre
2011). *Procedia Engineering*: 591 – 597

Coautori: Alessandra Bonoli, Cristian Chiavetta

Sinossi

La presentazione effettuata, e l'articolo che ne è derivato, mostrano un'applicazione LCA sull'intero ciclo di produzione e smantellamento dei sistemi geotermici a bassa entalpia. In particolare, su un caso studio ben definiti, sono stati quantificati gli indici di danno ambientale (GWP, ODP, ...) conseguenti alla filiera del geotermico a bassa entalpia. I risultati hanno mostrato che, oltre alla fase di esercizio, è la tecnologia della pompa di calore ad essere la più impattante sull'ambiente. Limitatamente alla realizzazione del campo sonde, è la perforazione del sottosuolo ad essere l'operazione più impattante.

XII. Una nuova opportunità per le discariche: lo stoccaggio di energia termica

Atti del convegno Sardinia Symposium 2011. (ottobre 2011): 1-9

Coautori: Daniele Biondi, Gabriele Cesari

Sinossi

La presentazione ha mostrato i risultati di due Test di Risposta Termica effettuati su sonde orizzontali installate all'interno di un ammasso di rifiuti non pericolosi della discarica di Ravenna. I risultati hanno mostrato che, a seguito della mole dell'ammasso e dei fenomeni di fermentazione anaerobica interni con conseguente produzione di calore, lo scambio termico è incrementato rispetto ad una soluzione tradizionale a serpentine orizzontali. Sono state proposte infine alcune modalità di impiego del calore estratto tramite le sonde orizzontali.

XIII. Thermal Response Test for shallow geothermal applications: a geostatistical approach. Part I and II

Articolo per la rivista Mathematical Geosciences. Stampa in progress

Coautori: Roberto Bruno, Sara Focaccia

Sinossi

L'articolo, attualmente in corso di pubblicazione, descrive compiutamente e nel dettaglio le procedure "Best Time Interval" e "Drift and Conditional Estimation" per l'analisi di tipo probabilistico dei dati sperimentali desunti da un TRT. La tecnica probabilistica, insieme alla tecnica tradizionale di analisi, sono eseguite su un medesimo set di dati, al fine di ottenere una confrontabilità dei risultati ed individuare e quantificare, tramite l'utilizzo dei variogrammi e della varianza di stima, l'oggettiva qualità delle due tecniche di stima.

XIV. Annex 21 Thermal Response Test Final Report

Documento di fine progetto Agenzia Internazionale dell'Energia. Stampa in Progress

Coautori (in ordine alfabetico): J. Bereton, R. Bruno, F. Cruickshanks, H. Elviya, H. Fujii, S. Focaccia, S. Gehlin, G. Hellstrom, J. Kallio, M.Kharseh, N.Leppärharju, B. Nordell, D. Marcotte, I. Martinkauppi, A.Montero, K. Nagano, R. Nederbruecker, H. Paksoy, M. Proell, M. Reuss, B. Shim, H. Steger, H.Witte ,R. Zorn, e altri.

Sinossi

Il report finale del progetto Annex 21 TRT, attualmente in corso di pubblicazione, raggruppa tutte le tecniche di realizzazione e di analisi dati, tradizionali ed innovative, inerenti alla metodologia nota come Test di Risposta Termica. Vengono confrontate le diverse possibili configurazioni di macchine e metodi per l'esecuzione di un TRT; vengono definiti degli standard minimi di accuratezza dei sensori di misura; vengono confrontate le diverse tecniche di analisi; viene eseguita un'indagine sulla presenza del TRT nel mondo e sul numero di macchine attualmente operative.

XV. ETP-RHC Geothermal Panel Vision 2020-2030 e Strategic Research Agenda

Documenti del Panel Geotermico Europeo. Pubblicati (Vision) e in pubblicazione (SRA)

Responsabili: J. Urchugueia, B. Sanner, G. Van Gelder e altri

Sinossi

La Vision e la Strategic Research Agenda del Panel Geotermico della Piattaforma Tecnologica Europa per le Rinnovabili Termiche sono i documenti fondanti della politica della Piattaforma per l'incentivazione dello sfruttamento della risorsa geotermica, a bassa, media e alta entalpia.

Limitatamente al lavoro effettuato sulla geotermia superficiale all'interno del Panel:

- la Vision 2020-2030 fornisce delle stime, sulla base dei trend di crescita attuali e delle politiche in corso di attivazione o auspiccate, sul quantitativo di energia estraibile dalla risorsa geotermica superficiale in un lasso di tempo pari a una ventina di anni
- La Strategic Research Agenda definisce le politiche attuative a breve e medio termine da realizzare per raggiungere gli obiettivi definiti dalla Vision 2020-2030 e per dare un impulso alla ricerca, accademica ed industriale, con il fine di mantenere o ottenere un ruolo di prim'ordine nel panorama mondiale sui diversi settori della filiera di produzione dei componenti per lo sfruttamento della geotermia superficiale.

Tesi seguite come correlatore

a) Caratterizzazione della conduttività termica di una roccia a scala di laboratorio

Laurea Triennale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio.

Anno accademico 2008/2009

Candidato: Ettore Saluci. Relatore: Prof. Roberto Bruno

Sinossi

L'attività ha riguardato la valutazione delle proprietà termiche di alcuni materiali naturali alla scala di laboratorio. Sono state analizzate le diverse tecniche di misura e ne sono state individuate le criticità. E' stato inoltre indagato il problema del supporto ai fini dell'utilizzo delle misure sui materiali alla scala di laboratorio come strumento di progettazione.

b) Sistemi di climatizzazione mediante pompe di calore geotermiche e pali energetici

Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Anno accademico 2008/2009

Candidato: Alessio Verrone. Relatore: Prof. Roberto Bruno

Altri correlatori: Prof. Raffaele Poluzzi

Sinossi

L'attività ha riguardato l'analisi della tecnologia dei pali energetici. In particolare il lavoro ha messo in luce le potenzialità della tecnologia dei pali energetici in merito all'abbattimento dei costi iniziali per la realizzazione di un sistema geotermico, nonché i limiti che questa tipologia di geoscambiatore dimostra possedere, rispetto alla tecnologia delle sonde geotermiche verticali.

- c) Confronto di Life Cycle Assessments applicati a sistemi ad energia rinnovabile: sonde geotermiche e pannelli solari termici

Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Anno accademico 2010/2011

Candidata: Martina Gianello. Relatrice: Prof.sa Alessandra Bonoli.

Altri correlatori: Ing. Cristian Chiavetta

Sinossi

L'attività ha riguardato l'applicazione del Life Cycle Assessment su sistemi geotermici e solari, unitamente al loro confronto sulla medesima unità funzionale. E' stata effettuata una valutazione ambientale comparativa di queste due tipologie di energie rinnovabili termiche e sono stati valutati i "costi esterni" delle due tecnologie, cioè i costi che sono imputabili alla produzione dell'energia, ma che non vengono sostenuti dal singolo imprenditore o utente finale, ma dalla società nel suo complesso.

d) Aspetti geologici ed idrogeologici in relazione alle sonde geotermiche verticali

Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Anno accademico 2010/2011

Candidato: Mattia Quarantini. Relatore: Prof. Alessandro Gargini.

Altri correlatori: Geol. Gabriele Cesari, Prof. Marco Menichetti

Sinossi

L'attività ha riguardato la definizione degli aspetti geologici e idrogeologici che influenzano il quantitativo di scambio termico tra il terreno e le sonde geotermiche verticali. L'attività di ricerca ha fornito una panoramica delle tecniche e degli strumenti che è possibile utilizzare per la definizione dell'impatto termico della falda in movimento sul quantitativo di energia estraibile da un campo sonde geotermiche verticali.

e) Analisi di prove TRT (Thermal Response Test) in diversi contesti geologici

Laurea Triennale in Scienze Geologiche

Anno accademico 2010/2011

Candidata: Flaminia Mesiti. Relatore: Prof. Alessandro Simoni.

Sinossi

L'attività ha riguardato l'analisi di Test di Risposta Termica in diversi contesti geologici, al fine dell'individuazione della correlazione tra i risultati dei Test e i profili stratigrafici. In particolare, sono stati analizzati diversi valori di conducibilità termica dei terreni ottenuti tramite la realizzazione di TRT in contesti geologici differenti.