



ENEA

Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



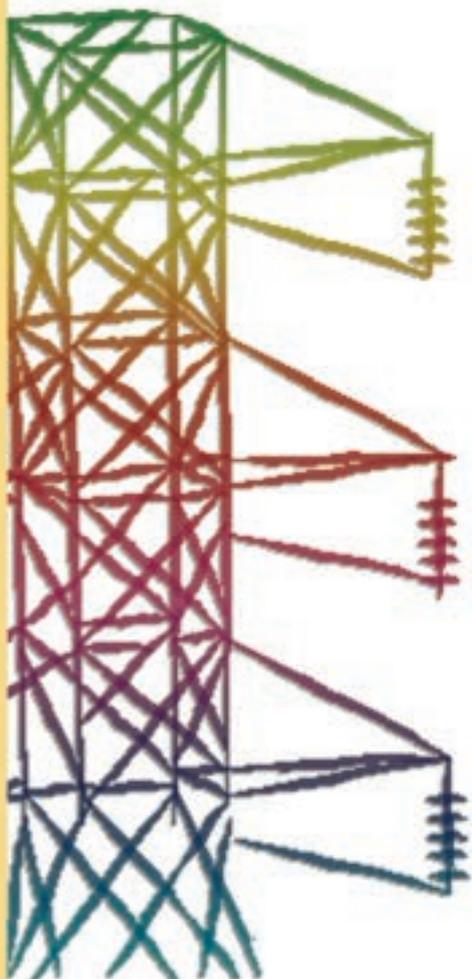
Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

E3: Energy and Economic Evaluation

Sviluppo di un tool per la stima dei consumi energetici di impianti termici

Arturo de Risi





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

E3: Energy and Economic Evaluation

Sviluppo di un tool per la stima dei consumi energetici di impianti
termici

Arturo de Risi



UNIVERSITÀ DEL SALENTO
DIPARTIMENTO INGEGNERIA DELL'INNOVAZIONE

Report RSE/2009/63

E3: ENERGY AND ECONOMIC EVALUATION

SVILUPPO DI UN TOOL PER LA STIMA DEI CONSUMI ENERGETICI DI IMPIANTI TERMICI

Arturo de Risi (Dipartimento Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Studio e dimostrazione di forme di finanza innovativa e di strumenti di programmazione e pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale e urbana

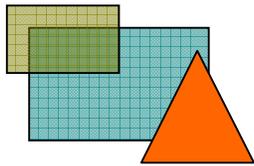
Responsabile Tema: Ilaria Bertini, ENEA



Università del Salento



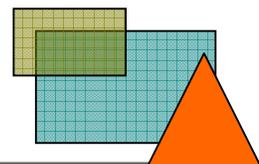
Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione



E3: Energy and Economic Evaluation.
Sviluppo di un tool per la stima dei consumi
energetici di impianti termici

Responsabile Scientifico
Prof. Arturo de Risi

30/04/2009



Sommario

PREMESSA	3
INTRODUZIONE.....	4
GLI SCAMBIATORI A TERRENO.....	6
LA TEMPERATURA DEL TERRENO INDISTURBATO	6
LE SONDE GEOTERMICHE.....	9
IL FLUIDO TERMOVETTORE.....	15
MACCHINE E SOLUZIONI IMPIANTISTICHE	17
METODI E MODELLI PER LA PROGETTAZIONE	19
DIMENSIONAMENTO SONDE GEOTERMICHE VERTICALI (SGV).....	19
IMPIANTI DI PICCOLA TAGLIA	19
DIMENSIONAMENTO DI SONDE GEOMETRICHE ORIZZONTALI.....	22
MODELLO FISICO E SIMULAZIONE NUMERICA	25
IL CODICE “MODELLO GEOTERMICO”	26
IL CODICE “MODELLO GEOTERMICO VERTICALE”	26
IL CODICE “MODELLO GEOTERMICO ORIZZONTALE”	36
BIBLIOGRAFIA	42

Premessa

Il terreno si presta particolarmente bene a costituire la sorgente termica dalla quale sottrarre o alla quale cedere il calore necessario per far funzionare una macchina a ciclo inverso operante rispettivamente come pompa di calore o come refrigeratore.

Il presente lavoro si propone, dopo averne analizzato in prima battuta le varie tipologie, di realizzare un modello software destinato alla simulazione dei flussi energetici di impianti geotermici. L'idea è quella di poter produrre simulazioni numeriche in contemporanea e/o in anticipo rispetto alla realizzazione degli impianti reali o prototipali.

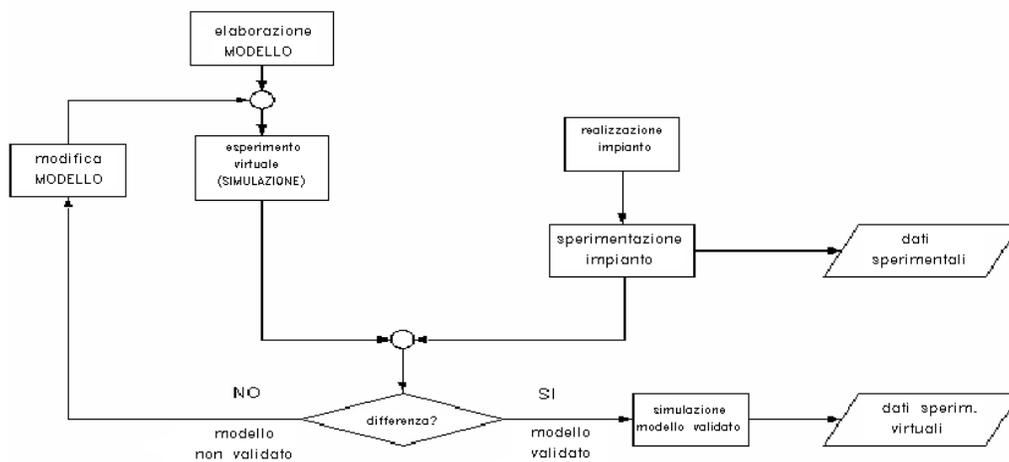


Figura 1.1: Schema logico dell'utilizzo della modellistica

Attraverso la discussione degli aspetti caratteristici della trasmissione del calore nel terreno e tra terreno e fluido termovettore e sulla base dei diversi modelli e metodi di calcolo sviluppati per la progettazione di impianti è stato formalizzato un modello matematico per la simulazione del comportamento energetico di sistemi geotermici. Questo lavoro è relativo alla formalizzazione ed all'implementazione del modello matematico sviluppato in ambiente Matlab/Simulink al fine di sfruttare le caratteristiche di modularità, di flessibilità nell'implementazione matematica e nelle funzioni I/O tipiche di questo ambiente di simulazione. E' costruito come una struttura modulare a blocchi in cui ogni blocco è costituito da una struttura a cascata composta da vari livelli: ogni blocco può essere sviluppato in maniera arbitraria utilizzando formulazioni matematiche predefinite o routine in linguaggio Matlab, Fortran, C, Ada.

Introduzione

La crescente esigenza di raffrescare gli ambienti nel periodo estivo, oltre che riscaldarli nella stagione invernale, ha portato negli ultimi anni alla diffusione delle pompe di calore reversibili, ossia di macchine termodinamiche in grado di sottrarre calore dall'edificio per cederlo all'ambiente esterno in estate e viceversa in inverno.

L'efficienza di queste macchine è influenzata in maniera importante dalle temperature di esercizio o meglio dal dislivello di temperatura tra ambiente interno e sorgente esterna. Un grosso limite delle pompe di calore che utilizzano l'aria come sorgente esterna è che in inverno la temperatura esterna risulta tanto più bassa quanto maggiore è la richiesta di calore per il riscaldamento. Queste considerazioni portano a due conclusioni:

- qualora ci si voglia avvalere delle pompe di calore, è opportuno abbassare la temperatura alla quale si deve fornire calore ovvero, nel caso del riscaldamento civile, orientarsi verso sistemi che possano fornire calore operando a temperature dell'ordine dei 35°C come nel caso di pannelli radianti anziché a 60 °C e oltre come nel caso dei sistemi tradizionali. Durante il raffrescamento il sistema lavora a temperature più alte di quelle di un normale condizionatore. I livelli di temperatura del fluido termovettore risultano perciò essere inferiori a 30°C in inverno e superiori a 15°C in estate. In quest'ottica ha senso definire un sistema LTS (Low Temperature System); un'altra peculiarità caratteristica di un LTS è la presenza di potenze di picco ridotte rispetto alle applicazioni tradizionali (peak-shaving), grazie all'elevata inerzia di questo tipo di impianto;
- l'aria esterna, la più comune sorgente termica per le pompe di calore è termodinamicamente poco efficiente, visto che il carico termico da soddisfare cresce quando la temperatura esterna diminuisce, facendo calare sia il COP (Figura 1.2) sia la potenzialità termica erogabile dalla macchina;

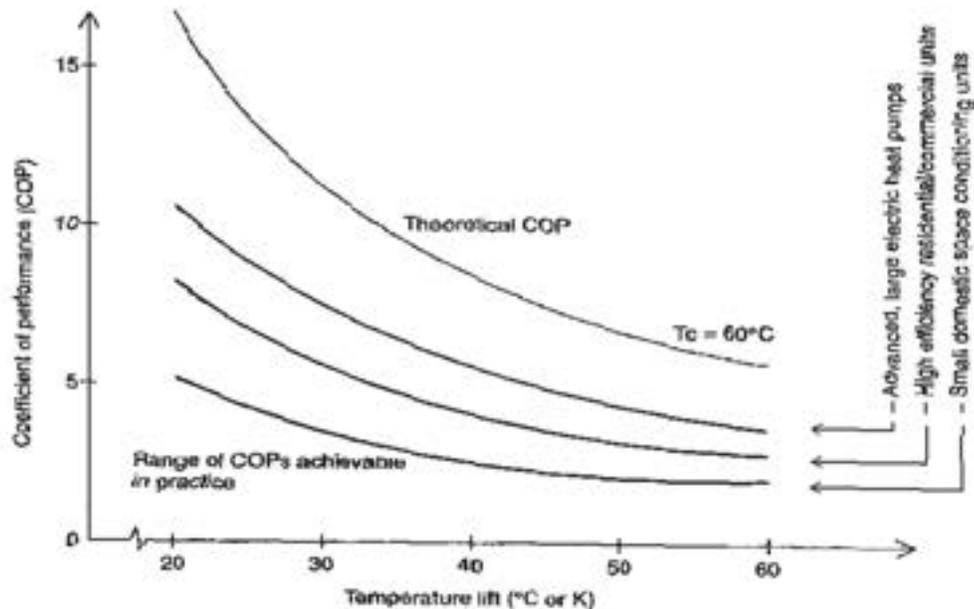


Figura 1.2 – Andamento del COP teorico e reale in funzione dell'incremento di temperatura, per una temperatura di riscaldamento di 60°C [1]

Un'efficace alternativa all'aria come sorgente esterna di calore è offerta dal terreno. Infatti, questo presenta alcune caratteristiche molto favorevoli: a causa della sua elevata inerzia termica, già a moderata profondità risente poco delle fluttuazioni termiche giornaliere e stagionali al punto che la sua temperatura si può considerare pressoché costante per tutto l'anno. Ciò porta ad avere differenze di temperatura tra sorgente termica ed ambiente da climatizzare inferiori rispetto a quanto si avrebbe utilizzando l'aria esterna come sorgente termica, con conseguente miglioramento dell'efficienza dell'impianto e minori costi operativi.

Oltre a questo, ci sono altri vantaggi rispetto allo sfruttamento dell'aria come sorgente di calore: principalmente minor rumorosità e minor impatto estetico.

L'accoppiamento della pompa di calore al terreno visto come sorgente termica esterna (GSHP: Ground – source Heat Pump) è realizzato mediante sonde geotermiche, ovvero tubazioni inserite nel terreno e percorse da un fluido termovettore, che non sono altro che un particolare tipo di scambiatore di calore.

Gli scambiatori a terreno

Le pompe di calore che sfruttano il terreno come sorgente termica si possono distinguere in tre categorie in funzione della modalità con cui avviene lo scambio termico con il sottosuolo:

1. impianti accoppiati direttamente con il terreno attraverso un sistema di tubazioni a circuito chiuso al cui interno scorre il fluido termovettore;
2. impianti che utilizzano l'acqua di falda come fluido termovettore, con o senza reimmissione nella falda stessa dopo l'uso;
3. impianti che sfruttano l'acqua dei laghi e dei bacini come sorgente termica attraverso un circuito che può essere sia aperto che chiuso.

Il caso 2 e il caso 3 richiedono situazioni ambientali particolari legate alla disponibilità idrica e soprattutto comportano maggiori vincoli legislativi sull'inquinamento termico delle acque. Invece il caso 1 è un sistema più adattabile alle diverse condizioni, anche per quanto riguarda la disposizione delle tubazioni stesse nel terreno, che possono assumere uno sviluppo orizzontale (lineare, a spirale, etc.) o verticale.

Come detto in precedenza, invece, la caratteristica principale a vantaggio del terreno come sorgente termica è la sua elevata capacità di accumulo, una temperatura media del terreno pressoché costante durante tutto l'anno e quindi buoni valori del coefficiente di effetto utile.

La temperatura del terreno indisturbato

In generale l'ampiezza della variazione giornaliera di temperatura si riduce di un fattore 10 a pochi centimetri di profondità, mentre quella della variazione stagionale si riduce dello stesso fattore dopo alcuni metri, mentre in ogni caso nel terreno indisturbato la temperatura oscilla rispetto ad un valore medio che è praticamente pari alla temperatura media annuale della località in esame.

Per valutare quantitativamente il comportamento del terreno rispetto alla variazione della temperatura esterna si può fare riferimento ad uno strato di materiale, considerato per semplicità omogeneo, limitato da una superficie piana di coordinata $x=0$ ed infinitamente esteso nel verso delle x positive (profondità).

Per conoscere l'andamento della temperatura al suo interno, noto quello sulla superficie, si deve risolvere l'equazione di Fourier:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

dove α è la diffusività termica del terreno.

Se si approssima l'andamento reale della temperatura durante il periodo considerato con una funzione di tipo sinusoidale, si può esprimere la temperatura superficiale t_s nel seguente modo:

$$t_s = t_0 + A \sin \omega t \quad \text{per } x = 0$$

dove A è l'ampiezza della variazione della temperatura superficiale avente valore medio t_0 , con periodo τ_0 e pulsazione $\omega = 2\pi/\tau_0$.

Trascurando il periodo di transitorio, si può esprimere la temperatura t ad una certa profondità x all'istante t nel seguente modo:

$$t_s = t_0 + A e^{-\gamma x} \sin(\omega t - \gamma x)$$

I termini γ e $e^{-\gamma x}$ sono rispettivamente la “costante di smorzamento” ed il “fattore di smorzamento”. La soluzione indica che la variazione di temperatura all'interno del terreno è ancora di tipo sinusoidale, ma con ampiezza ridotta rispetto alla variazione superficiale, nel rapporto $e^{-\gamma x}$ e con uno sfasamento dato da γx radianti (o $\gamma z/\omega$ unità di tempo). La riduzione di ampiezza e lo sfasamento, a parità di diffusività termica, sono tanto maggiori quanto maggiore è la profondità x e quanto maggiore è la frequenza dell'oscillazione (figura 1.3).

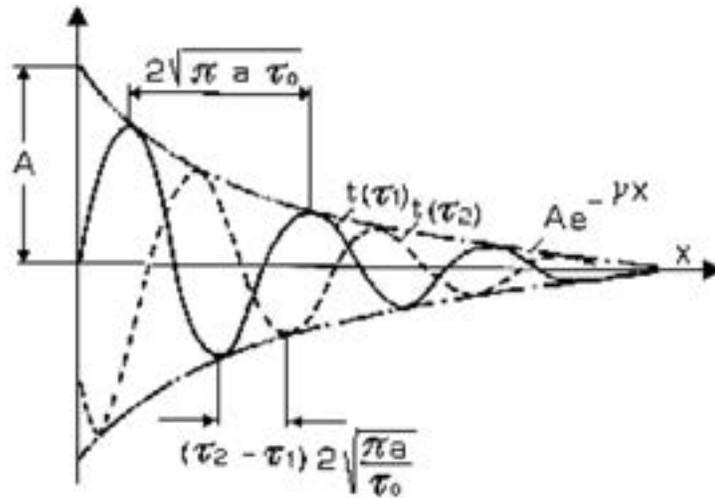


Figura 1.3 – Caratteristiche dell'oscillazione di temperatura all'interno di un corpo seminfinito [2]

In realtà il bilancio energetico del terreno sottoposto all'insolazione è complesso a causa della contemporanea presenza di tutte le modalità di scambio termico. Le frequenze principali delle interazioni tra aria, sole e suolo sono quelle relative al giorno e all'anno (le prime maggiormente influenzate da eventi casuali, le seconde molto più ripetitive). Esse possono essere descritte da una serie di Fourier ricorrendo ad un gran numero di armoniche; per gli scopi di questo lavoro, si può senz'altro ricorrere, però, ad una schematizzazione più semplice:

$$T(x,t) = T_M + a e^{-x \sqrt{\frac{\omega}{2D_t}}} \sin\left(\omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2D_t}} + b\right) \quad (1.1)$$

dove

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau}$$

$$b = \frac{(\tau - 4t_M)\pi}{2\pi}$$

- T_m = temperatura media nel periodo
 a = semiampiezza della massima differenza di temperature sulla superficie del terreno
 τ = periodo
 D_t = diffusività termica del terreno

t_m = tempo necessario a raggiungere la massima temperatura di superficie

Considerando ad esempio un valore medio della diffusività del terreno pari a $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$, si ricava che l'ampiezza dell'escursione termica giornaliera si riduce a un decimo a circa 35 cm di profondità, mentre quella dell'escursione termica stagionale si riduce dello stesso fattore mediamente a circa 6 m di profondità.

Si vede quindi che con sonde a sviluppo verticale, che possono superare i 100 metri di profondità, l'influenza dell'escursione stagionale è trascurabile e pertanto considerare il terreno come una sorgente termica a temperatura costante durante tutto l'anno risulta un'ipotesi giustificata; questo invece non è altrettanto vero per le sonde a sviluppo orizzontale, per le quali la profondità, per ovvi motivi economici, difficilmente può superare i tre metri (in tal caso con il valore di diffusività dell'esempio precedente si ottiene un fattore di riduzione di circa 2.8 per l'ampiezza dell'escursione stagionale).

Si deve ricordare, inoltre, che l'incremento di temperatura con la profondità, dovuto al nucleo terrestre comincia a percepirsi oltre i 100 m di profondità, con un incremento di temperatura di circa 3° C per ogni 100 m. Pertanto, a causa della minore fluttuazione stagionale della temperatura e del minore impegno di superficie del terreno, nella tecnica attuale si preferiscono le sonde geotermiche verticali a quelle orizzontali.

Le sonde geotermiche

Il ruolo essenziale in un impianto geotermico è rivestito senza dubbio dalle sonde geotermiche.

Le **sonde geotermiche verticali** sono particolarmente diffuse in Europa centrale e rappresentano la soluzione standard se ci si riferisce a installazioni commerciali ed edifici pubblici .

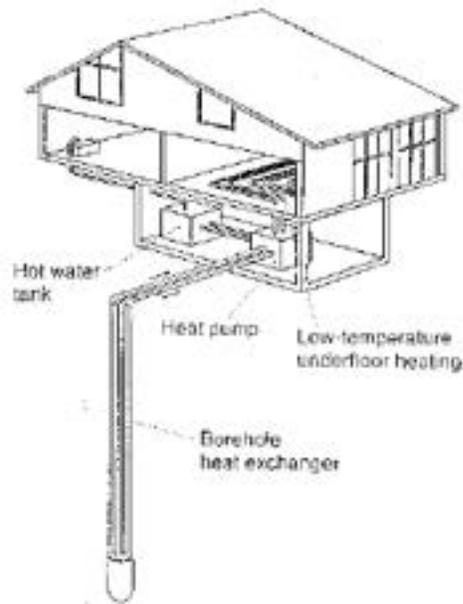


Figura 1.4 – Esempio di applicazione di un sistema SGV [3]

Le tipologie di scambiatori esistenti sono due che a loro volta si suddividono in:

- **Singola U:** all'interno della perforazione vengono inseriti un tubo di mandata e uno di ritorno collegati sul fondo, poi si esegue il getto di riempimento (figure 1.5 e 1.6a);
- **Doppia U:** è realizzato come il precedente, con la differenza che nella perforazione si inseriscono quattro tubi collegati a due a due sul fondo (figure 1.5 e 1.6b);
- **Tripla U e Quadrupla U:** variazione delle precedenti con rispettivamente sei e otto tubi collegati a due a due sul fondo;

Altra tipologia è costituita da scambiatori coassiali che si suddividono in:

- **Tubi coassiali semplici:** il tubo di ritorno è interno a quello di mandata, che occupa tutta la sezione della perforazione e quindi, se il diametro del tubo esterno è uguale o di poco più piccolo di quello della perforazione, non è necessario il getto di riempimento (figure 1.5 e 1.6c);
- **Tubi coassiali complessi:** simile al precedente, l'unica differenza sta nel fatto che tra tubo interno ed esterno ci sono delle alette di collegamento che garantiscono la coassialità e un migliore scambio termico; durante la fase di ritorno il fluido anziché nella tubazione interna

può essere fatto circolare in alcuni dei canali periferici di modo che possa scambiare calore con il terreno in entrambi i sensi di percorrenza (figure 1.5 e 1.6d).

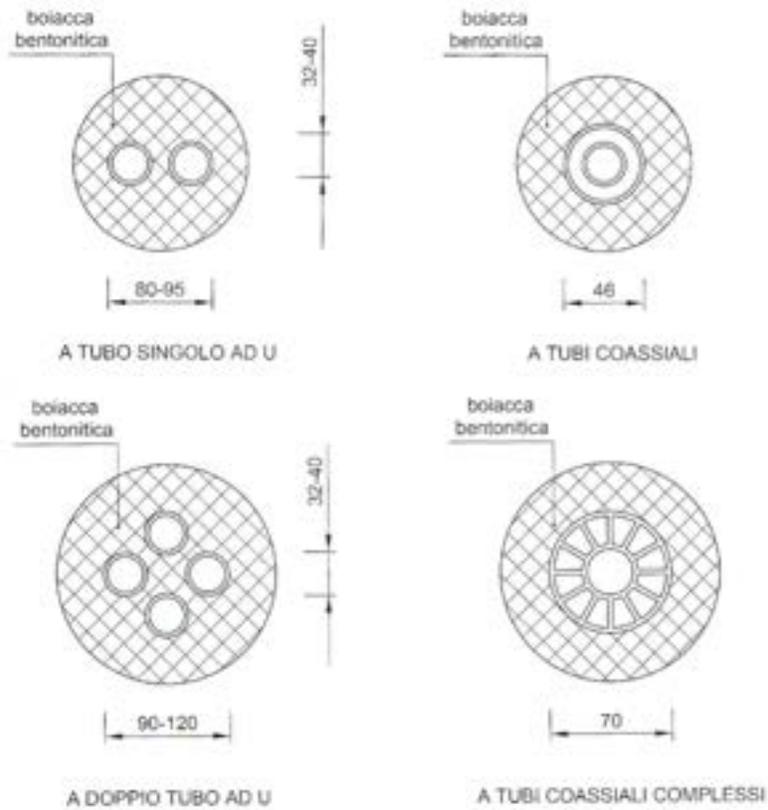


Figura 1.5 – Sezione trasversale delle sonde geotermiche verticali [3]

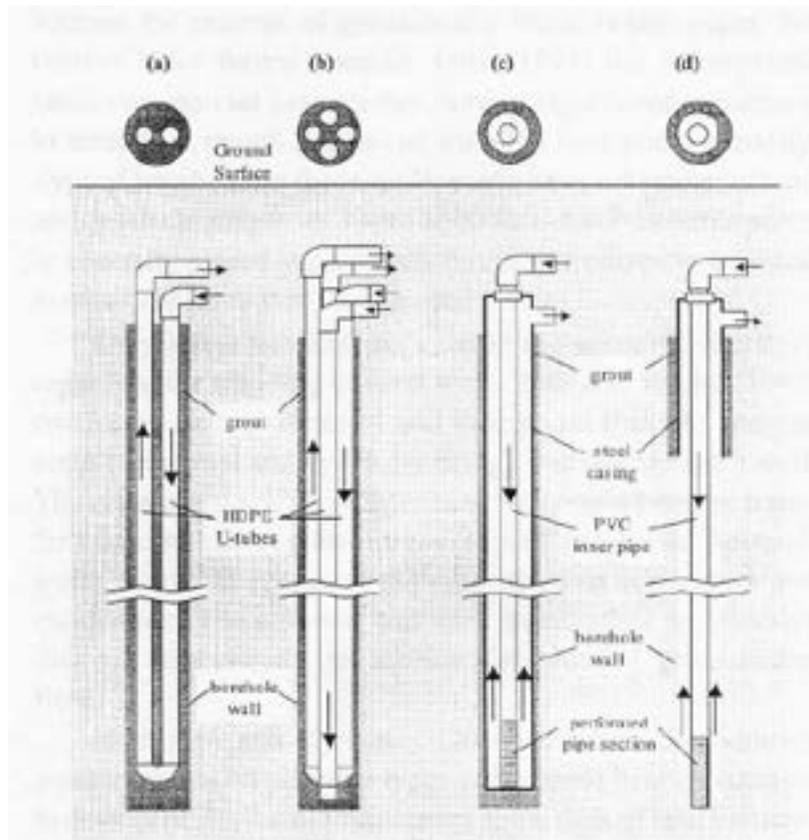


Figura 1.6 – Andamento del flusso d'acqua all'interno delle sonde illustrate in figura 1.5 [1]

I primi scambiatori a terreno vennero realizzati in metallo, generalmente rame, tuttavia nonostante le buone proprietà di scambio termico, difficoltà dovute a problemi di corrosione e la ricerca di un materiale che avesse costi minori portò l'affermarsi del polietilene ad alta densità HDPE. Negli ultimi anni in Europa sono stati installati impianti con tubazioni in polietilene reticolato ad alta pressione, che, rispetto al HDPE, presenta migliori caratteristiche quanto a scambio termico, resistenza alle crepe e un range di temperature di esercizio più ampio.

Un contatto termico ottimale tra il terreno e gli scambiatori è fondamentale per il funzionamento efficiente di uno scambiatore verticale. I valori della resistenza termica di uno scambiatore verticale a terreno dipendono quindi non solo dal materiale con cui è realizzato, ma anche dal materiale di riempimento. Benché le norme internazionali indichino un generico riempimento con bentonite, dal punto di vista termico la conducibilità termica della bentonite non è molto elevata [0,6 – 0,7 W/mK] ed è inferiore a quella della maggior parete dei terreni. Inoltre alcuni studi sperimentali hanno

confermato l'impatto negativo del materiale di riempimento bentonitico sulla trasmissione del calore, cosa che potrebbe determinare un aumento della lunghezza complessiva dei pozzi fino al 49% rispetto ad un riempimento effettuato con normale sabbia fine. Tuttavia ragioni di carattere ambientale non consentono però di agire unicamente nella direzione dell'ottimizzazione termica del sistema; il riempimento dell'intera perforazione con boiaccia è spesso richiesto dalle normative per la protezione dell'acqua di falda. Per garantire continuità termica fra le sonde e le pareti del pozzo, in sottosuoli rocciosi compatti ed impermeabili, come materiale di riempimento si potrebbe anche utilizzare acqua; aumentando la temperatura, l'acqua scambia per convezione e lo scambio termico complessivo ne risulta così migliorato.

Negli ultimi anni sono stati sperimentati una nuova serie di scambiatori che hanno affiancato le classiche sonde geometriche verticali. Gli **scambiatori orizzontali** a terreno sfruttano lo stesso principio noto per evitare che i tubi che trasportano acqua possono ghiacciare: se si installano a una certa profondità le temperature del terreno sono superiori a quelle dell'aria e quindi si evita di scendere al di sotto di 0 °C. E' quindi una soluzione che cerca di sfruttare le temperature più favorevoli del terreno rispetto all'aria esterna a piccole profondità.

Poiché le sonde orizzontali sono di norma posate a profondità che arrivano al massimo a 2,0 – 2,5 m e nella maggior parte dei casi intorno a 1,5 m, la profondità è tale da risentire ancora della variazione stagionale di temperatura dell'aria esterna.

Ciò ha due importanti conseguenze:

- la riduzione dell'ampiezza rende più stabili le temperature e più vicine al valor medio: ciò comporta un'efficienza superiore rispetto a una che usa come sorgente l'aria esterna;
- il minimo e il massimo della temperatura del terreno traslano rispetto a quella dell'aria esterna verso destra; ad esempio il minimo passa da fine dicembre – gennaio a fine febbraio a circa 2 m di profondità. Ciò ha come conseguenza che la temperatura più sfavorevole dell'impianto con sonde orizzontali vi sarà non in corrispondenza del picco di richiesta, ma in periodo dell'anno in cui il fabbisogno termico e di raffrescamento è meno rilevante. I COP più sfavorevoli ci saranno quindi con fabbisogno energetico giornaliero meno elevato e quindi la penalizzazione sul rendimento medio stagionale sarà limitata. In questo modo si compensa in parte la presenza delle oscillazioni al variare della temperatura dell'aria esterna.

Il sistema orizzontale utilizza quindi il flusso termico proveniente dalla superficie, determinato in modo diretto o indiretto dall'energia solare (radiazione solare, pioggia, ecc.) e soprattutto dallo scambio termico proprio con l'aria esterna stessa mentre il flusso di calore geotermico, pari a circa $0,1 \text{ W/m}^2$ alle profondità tipiche dei sistemi orizzontali, è trascurabile. E' importante installare gli scambiatori orizzontali su terreno libero e in grado di poter scambiare con l'aria esterna, preferibilmente su aree soleggiate; l'installazione su serpentini sotto agli edifici non consentirebbe, infatti, alle sonde orizzontali un funzionamento adeguato (vanno a scambiare con l'edificio stesso che sta loro sopra) con il rischio di raggiungimento di temperature troppo basse nei mesi invernali e troppo alte durante i mesi estivi.

La semplicità che caratterizza questo tipo di sistemi ha portato nel tempo allo sviluppo sul mercato di una quantità di soluzioni molto elevata (Figura 1.7); i sistemi orizzontali possono quindi essere classificati sulla base di vari parametri.

Una classificazione può essere rappresentata dalle modalità d'installazione, principalmente tramite sbancamento o scavo di una trincea. La prima soluzione consiste nello sbancamento tramite macchina movimentazione terra di una superficie ampia per una profondità che generalmente arriva ad un massimo di circa 1 m. La seconda soluzione invece prevede la posa degli scambiatori all'interno di trincee generalmente larghe circa 60 cm, con una notevole riduzione del materiale di scavo e un ridotto impatto di cantiere. A seconda della modalità di progettazione possono essere installati nella stessa trincea una quantità che va da uno (configurazione *single – pipe*) a sei (*multiple – pipe*) scambiatori. Oltre ai sistemi a tubo multiplo sono molto interessanti le soluzioni cosiddette *Slinky*, utilizzate prevalentemente per pose in trincea, ma anche in soluzioni a sbancamento. Si tratta di uno scambiatore a terreno in polietilene disteso formando cerchi sovrapposti. Attraverso la configurazione a trincea, prevedendo una configurazione *multiple – pipe*, si concentra lo scambio termico in superficie su un volume inferiore, riducendo così l'area necessaria e i costi di sbancamento del terreno.

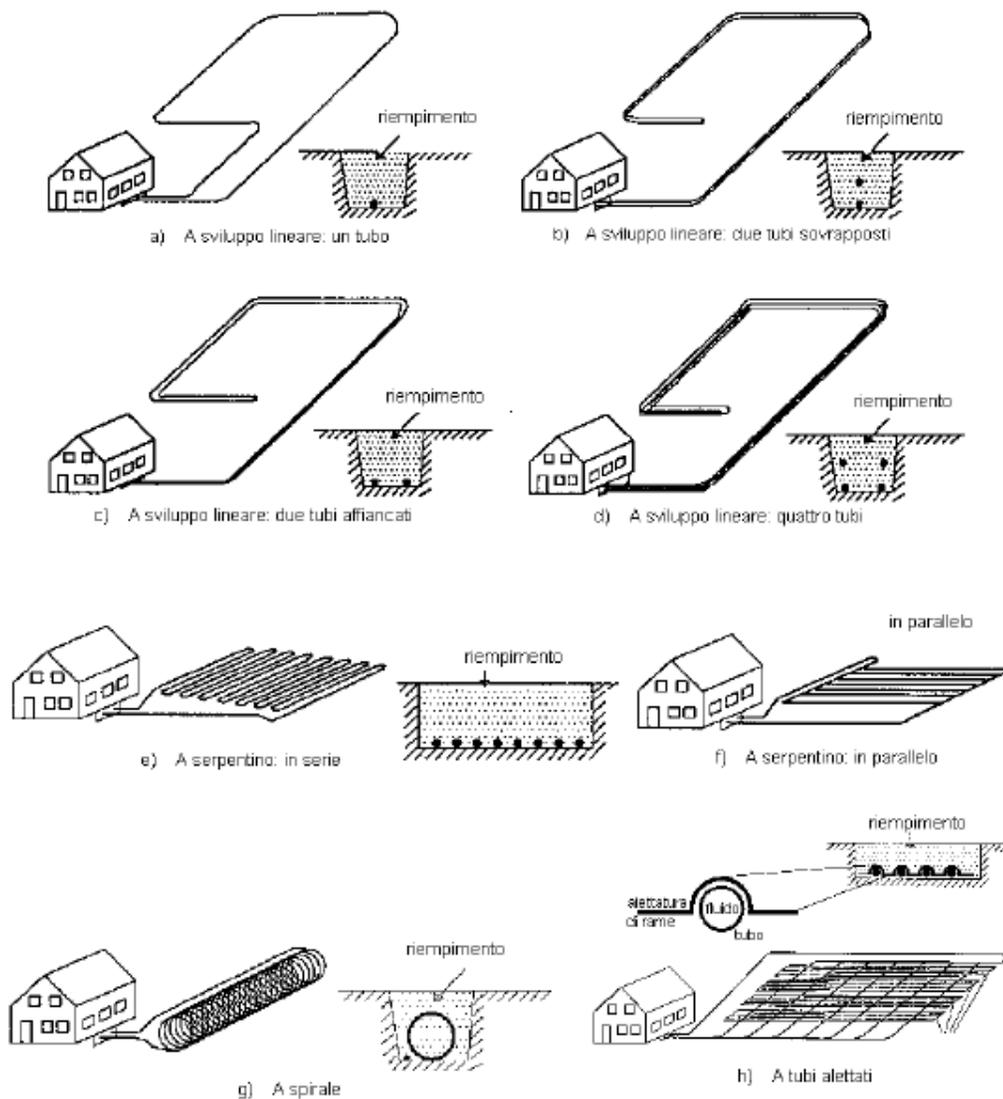


Figura 1.7 – Configurazioni di posa per sonde geotermiche a sviluppo orizzontale [1]

Il fluido termovettore

Il funzionamento sia estivo che invernale limita o addirittura elimina le variazioni termiche del terreno nel corso degli anni e diminuisce i tempi di recupero dell'investimento iniziale. Per contro, l'impiego sia estivo che invernale comporta la necessità di realizzare particolari scelte progettuali: mentre nei climi caldi il fluido termovettore può essere acqua semplice, nei climi freddi si deve in genere utilizzare una miscela di acqua e glicole etilenico perché nella fase di riscaldamento la temperatura nella sonda può essere inferiore a 0°C per poter assorbire sufficiente calore dal terreno.

In tali situazioni si richiede una valutazione articolata e dalle analisi più recenti le soluzioni praticabili sono due:

- impianto a glicole etilenico: la pompa di calore è così in grado di soddisfare tutti i carichi invernali in virtù del fatto che, utilizzando una miscela di acqua e glicole etilenico, può mandare in sonda un fluido a temperature inferiori a 0°C, potendo quindi scambiare tutto il calore necessario;
- impianto ibrido ad acqua semplice: per evitare malfunzionamenti il fluido in uscita dall'evaporatore e quindi in ingresso alle sonde non deve scendere al di sotto dei 4°C (per avere un margine di sicurezza sul congelamento); perciò in periodi invernali particolarmente freddi la pompa di calore da sola può non essere in grado di soddisfare completamente le richieste. La differenza tra la potenza termica richiesta dall'edificio e quella resa disponibile dalla pompa di calore deve quindi essere fornita da un sistema integrativo.

Entrambe le soluzioni hanno vantaggi e svantaggi; ne consegue che a priori non è possibile sceglierne una rispetto all'altra.

Un confronto tra le due tipologie di impianto permette di evidenziare i seguenti punti:

- il glicole etilenico è corrosivo ed inquinante: sono necessarie soluzioni impiantistiche più complesse idonee a limitare inconvenienti ed eventuali contaminazioni, che innalzano il costo dell'impianto;
- il glicole etilenico limita lo scambio termico convettivo sia in sonda che nello scambiatore lato terreno della pompa di calore; per contrastare questo effetto sono necessarie velocità superiori rispetto al caso di semplice acqua per mantenere un coefficiente di scambio convettivo analogo;
- il glicole etilenico ha un costo che va a sommarsi a quello dell'impianto innalzando gli investimenti iniziali e gli oneri di manutenzione;
- l'impianto ibrido ha una pompa di calore con dimensioni inferiori, dovendo mantenere un minor dislivello termico invernale tra fluido lato edificio e fluido lato sonde, e, sempre per lo stesso motivo, prestazioni termodinamiche (COP) superiori;
- il sistema integrativo può essere caratterizzato da caratteristiche termodinamiche limitate (rendimento basso) a vantaggio del costo ridotto, in quanto il suo funzionamento è limitato a brevi periodi;

- l'impianto ibrido, oltre alla fornitura elettrica necessaria al funzionamento del compressore della pompa di calore e delle pompe di circolazione, prevede anche l'alimentazione del sistema integrativo (allacciamento alla rete del gas o serbatoi di combustibile fossile per caldaie a gas o gasolio; disponibilità di personale nel caso di una caldaia a legna); negli edifici già esistenti il sistema integrativo non presenta grossi inconvenienti, in quanto solitamente si sfrutta l'alimentazione del precedente impianto di riscaldamento.

Macchine e soluzioni impiantistiche

Per sfruttare l'energia disponibile nel sottosuolo, prevedendo un funzionamento sia invernale che estivo, sono utilizzate solo pompe di calore reversibili. Queste macchine funzionano tanto meglio quanto più sono vicine tra loro le temperature di evaporazione e di condensazione nel ciclo termodinamico: questo porta a privilegiare gli impianti LTS, a bassa temperatura durante la stagione invernale e ad alta temperatura durante la stagione estiva. Con questo tipo di terminali d'impianto il COP della pompa di calore assume valori elevati (4÷4.5) richiedendo una minore potenza installata (a parità di fabbisogno) rispetto agli impianti tradizionali. Se durante il periodo estivo è richiesto anche il controllo dell'umidità ambiente, la temperatura di produzione dell'acqua refrigerata non può essere elevata (16°C) ma deve restare su valori tradizionali (7°C), introducendo una penalizzazione in termini di COP (si passa da circa 4.3 con acqua a 16-23°C a circa 3.6 con acqua a 7-12°C).

Le macchine più evolute utilizzate in questi impianti consentono il doppio valore della temperatura di evaporazione (per esempio 7°C oppure 16°C); inoltre per l'inversione del ciclo, oltre ad adottare la valvola a quattro vie nel circuito termodinamico, se il fluido refrigerante è di tipo non azeotropico, conviene utilizzare valvole a tre vie sui circuiti idronici per garantire il funzionamento in controcorrente nel condensatore e nell'evaporatore sia durante il funzionamento invernale sia durante il funzionamento estivo.

I terminali d'impianto che meglio si adattano alle pompe di calore geotermiche sono i sistemi radianti ed i ventilconvettori; in alcuni casi si può adottare lo scambio diretto con l'aria inviata agli ambienti. E' possibile anche utilizzare l'aria come fluido termovettore ma in tal caso si ha un maggiore ingombro rispetto ai sistemi a cambiamento di fase oppure ad accumulo sensibile d'acqua.

I sistemi a ventilconvettori necessitano di un certo sovradimensionamento perché la temperatura di mandata dell'acqua è compresa tra 35°C e 40°C, inoltre non consentono alcun effetto di peak – shaving (attenuazione e sfasamento del picco del fabbisogno).

I sistemi radianti hanno come punto di forza la bassa temperatura di alimentazione grazie alle ampie superfici che li caratterizzano. L'effetto della temperatura superficiale sul comfort interno consente di avere temperature dell'aria inferiori (durante la stagione invernale) e maggiori (durante la stagione estiva) di quelle richieste dai sistemi di tipo convettivo riducendo, di fatto, le dispersioni dell'ambiente e quindi il fabbisogno termico. Questo tipo di terminali è caratterizzato da una certa inerzia termica, che per molto tempo si è cercato di ridurre diminuendo il più possibile la massa coinvolta nello scambio di calore, al fine di rendere quanto più rapida possibile la risposta alla richiesta dei carichi interni.

Metodi e modelli per la progettazione

Dimensionamento sonde geotermiche verticali (SGV)

Ai fini del dimensionamento, i procedimenti di calcolo si differenziano se l'impianto è di piccola taglia, per cui il calcolo è empirico o si può ricorrere a tabelle reperibili in letteratura o presso i fornitori, o di grande potenza, oppure ancora con particolari caratteristiche, per cui sono necessari calcoli complessi o codici di simulazione.

Occorre sempre, tuttavia, indagare la composizione del terreno, l'eventuale presenza di acqua nel sottosuolo e la sua velocità, il rapporto tra calore ceduto e assorbito dal terreno, il surriscaldamento o il raffreddamento del terreno ed eventualmente il limite di gelo.

Qualunque normativa concorda su una soglia limite fino alla quale poter applicare metodologie semplificate sia per il calcolo che per la determinazione delle proprietà del terreno. La normativa tedesca VDI 4640 discrimina la scelta del metodo sulla base della potenza termica utile dell'impianto: metodi semplificati sono accettabili solo al di sotto dei 30 kW.

Impianti di piccola taglia

Secondo la normativa sopracitata la seguente metodologia di calcolo si applica a impianti di potenzialità termica non superiore ai 20-30 kW.

Condizioni al contorno sono:

- profondità della sonda 40-100 m; (se la lunghezza della sonda alla fine della progettazione è maggiore occorre prevedere più sonde)
- minima distanza fra le sonde 5 m per profondità di 40 – 50 m e 6 m per 50 – 100 m;
- scambiatore con doppio tubo ad U con diametri 19, 25 o 32 mm, singolo tubo a U o coassiale con diametro maggiore di 60 mm.

Le condizioni citate si riferiscono ad applicazioni di residenziale, terziario o lavorazioni artigianali leggere (uffici, magazzini, officine). Per applicazioni che vanno oltre tali condizioni, il metodo semplificato non è più applicabile.

Il dimensionamento di piccoli impianti si basa essenzialmente su tre elementi [3]:

- definizione della potenza di estrazione all'evaporatore della pompa di calore P_{ev} nelle condizioni di progetto o nelle medie stagionali;

- determinazione delle caratteristiche del terreno (conducibilità termica) come dato di input;
- determinazione delle ore di funzionamento equivalenti dell'impianto.

Gli ultimi due dati consentono di individuare in tabella il valore più opportuno della potenza di estrazione P_{ter} (espressa in W/m).

Si procede quindi ad analizzare quali sono i passi della procedura di calcolo. Si ipotizza di coprire l'intero fabbisogno con la pompa di calore e non di ricorrere all'impiego di sistemi ausiliari:

- calcolo del fabbisogno termico e di acqua calda sanitaria nonché della potenza di progetto P_t ;
- definizione dei livelli termici d'impianto: pavimento radiante (35 °C), ventilconvettori (45 – 50 °C);
- scelta della pompa di calore: si individua il valore del COP dai dati di catalogo riferito alle condizioni di lavoro B0/W35 o W45: con B si intende *brine*, cioè soluzione antigelo (all'evaporatore), con W *water*, acqua, (al condensatore) e i due numeri riportati indicano i livelli termici di riferimento; di norma si sceglie questo punto di lavoro poiché si considera che la temperatura minima con cui opera la pompa di calore sia 0 °C all'evaporatore in accordo con i principi secondo cui le tabelle di riferimento sono state elaborate; il valore del COP potrà essere uguale a 4 o 4,5; l'impiego diretto del COP nominale rappresenta in realtà una semplificazione poiché la cosa più corretta da fare sarebbe impiegare il valore del COP medio stagionale (SPF, *Seasonal Performance Factor*);
- calcolo della potenza scambiata a terreno P_{ev} :

$$P_{ev} = \frac{COP - 1}{COP} P_t$$

- determinazione da tabella del valore della potenza specifica di estrazione P_{ter} (espressa in W/m);

Il valore della potenza specifica di estrazione è individuato in funzione di:

- conducibilità termica del terreno: questo valore presuppone di conoscere almeno in linea di massima la natura del suolo sottostante;

- ore equivalenti di funzionamento dell’impianto: questo dato è indice dell’energia estratta annualmente dal terreno e influenza quindi l’aspetto di lungo periodo; le tabelle prevedono due soglie, fino a 1800 h o fino a 2400 h; secondo le indicazioni svizzere [1] la tabella più attendibile è quella “fino a 2400 h”.

Per un calcolo di massima si può assumere come riferimento, da verificare poi in sede di perforazione, un valore pari a 50 W/m.

La lunghezza complessiva dei pozzi risulta:

$$L = \frac{P_{ev}}{P_{ter}}$$

La definizione del numero di sonde dipende delle caratteristiche geologiche e delle portate necessarie per la pompa di calore; la portata per sonda è di norma compresa fra 1 e 3 m³/h [3]; si consiglia di utilizzare diametri di 32 mm al di sotto di 120 m e diametri di 40 mm per profondità superiori (nel caso di sonde *double-U*, [3]). Nel caso di più sonde è opportuno sovradimensionare del 10 – 20%.

Conoscendo la stratigrafia del sottosuolo e la conducibilità termica dei vari materiali, è quindi possibile valutare quale sarà lo sviluppo complessivo delle sonde. In condizione di utilizzo del sistema superiore a 2400 h/anno di funzionamento in riscaldamento, i rapporti di estrazione vanno diminuiti del 20 – 25%.

Se vi sono più installazioni indipendenti fra loro vicine, la potenza di estrazione va ridotta del 10 – 20% per via delle interferenze. Per meno di 1000 h operative la lunghezza dello scambiatore va ridotta del 10%.

Tipo di sottosuolo	Conducibilità termica [W/(m K)]	Potenza specifica assorbita [W/m]
Roccia mobile secca	< 1.5	20
Roccia dura o roccia instabile satura di acqua	1.5 - 3.0	50
Roccia dura a cond. term. elevata	3.0	70
Ghiaia o sabbia (secche)	0.4	< 20
Ghiaia o sabbia (acquifere)	1.8 - 2.4	da 55 a 65
Argilla, limo (umidi)	1.7	da 30 a 40
Calcare massiccio	2.8	da 45 a 60
Molassa	2.3	da 55 a 65
Granito	3.4	da 55 a 70
Basalto	1.7	da 35 a 55
Gneiss	2.9	da 60 a 70

Tabella I – Grandezze tipiche delle sonde in funzione del tipo di terreno [4]

Sono in fase di elaborazione delle tabelle correttive che tengono conto della porosità del materiale, dell'umidità relativa, dell'orientamento dei reticoli ecc. I dati raccolti fino ad oggi non sono ancora sufficienti e necessitano di ulteriori misure per poter essere validati. L'utilizzazione quasi esclusivamente invernale od estiva dei sistemi SGV richiede un'attenta valutazione di una progressiva variazione, su base pluriennale, della temperatura del sottosuolo, che induce un decadimento delle prestazioni nel corso degli anni; questo comporta la necessità di sovradimensionare inizialmente l'impianto.

Dimensionamento di sonde geometriche orizzontali

I sistemi che utilizzano sonde orizzontali presentano problematiche di dimensionamento simili a quelle degli altri sistemi GHP, avendo in comune la particolarità del mezzo (il terreno) con cui si va a scambiare. Naturalmente però le condizioni al contorno sono molto diverse rispetto a quelle di un sistema verticale poiché la limitata profondità comporta temperature del terreno indisturbato che

risentono ancora delle oscillazioni della temperatura dell'aria esterna ed in ogni caso lo scambio termico prevalente avviene proprio con la superficie esterna e non il volume di terreno circostante.

Per le soluzioni a sbancamento storicamente le valutazioni vengono fatte in termini di superficie, con coefficienti di dimensionamento espressi in W/m^2 di superficie occupata. Nel tempo questo approccio è cambiato con l'affermarsi delle soluzioni a trincea ed è ora prassi riconosciuta l'utilizzo di un parametro di dimensionamento riferito proprio alla lunghezza di trincea, espresso quindi in W/m di trincea.

In realtà, come già visto per i sistemi verticali, quello che conta è la temperatura minima invernale e massima estiva in ingresso del fluido termovettore in pompa di calore: è questo l'obiettivo del processo di dimensionamento, che deve assicurare nelle condizioni peggiori un'efficienza minima garantita. Una differenza rilevante rispetto alla soluzione verticale è connessa al fatto che per i sistemi orizzontali la verifica delle temperature è sufficiente sia effettuata a livello annuale e non sul lungo periodo, poiché lo scambio è caratterizzato dal ciclo annuale delle temperature dell'aria esterna e non vi sono significativi fenomeni di accumulo che interessano volumi rilevanti di terreno.

Il dimensionamento di un sistema orizzontale dipende dalle seguenti variabili [5]:

- a. clima locale;
- b. tipologia del terreno;
- c. configurazione di posa scelta.

Il fatto che la soluzione orizzontale sia destinata, per ovvie ragioni di spazi occupati, quasi esclusivamente a piccoli impianti residenziali fa sì che si adottino soluzioni semplificate e caratterizzate da un consistente margine di sicurezza.

Per quanto riguarda i sistemi a sbancamento esistono alcuni metodi semplificati, che a seconda del tipo di suolo indicano parametri di dimensionamento compresi tra i 10 e 40 W/m^2 . Per dimensionare gli scambiatori orizzontali sono a disposizione dei nomogrammi (riferiti comunque a condizioni climatiche più rigide rispetto a quelle italiane). Le condizioni di riferimento utilizzate per il terreno sono:

- Regolari: terreno umido, sabbioso esposto a regolare radiazione solare; rapporto di estrazione 20 – 30 W/m^2 ;
- Sfavorevoli: terreno pietroso, secco e ombreggiato; rapporto di estrazione 8 – 12 W/m^2 ;

- Favorevoli: terreno sabbioso, saturo d'acqua, con elevata radiazione solare; rapporto di estrazione 35 – 40 W/m².

Per i sistemi a trincea non vi sono molti parametri disponibili, i pochi dati a disposizione sono tratti dalla bibliografia nordamericana. *RetScreen International* prende come riferimento la trincea con il doppio tubo e fornisce indicando un valore da 20 a 30 m/kW di potenza termica installata, che corrisponde ipotizzando un COP pari a 3,5 a un valore di potenza termica scambiata fra 21 e 36 W/m. Considerando che un sistema doppio tubo scambia circa il 50% in più rispetto ad un singolo tubo, la resa termica per un sistema a singolo tubo risulta compresa tra 14 e 24 W/m.

La procedura di calcolo è del tutto simile a quella considerata nel caso di sistemi verticali:

- definizione della potenza termica nominale della pompa di calore, in relazione ai fabbisogni termo-frigoriferi dell'edificio;
- scelta del COP medio stagionale (o del punto di funzionamento di riferimento *Brine/Water*);
- calcolo della potenza all'evaporatore (che scambia con il terreno);
- scelta del valore W/m per superficie di perforazione R_{orizz} ;
- dimensionamento scambiatori: sviluppo complessivo trincee [m] = P_{evap} / R_{orizz}

Per quanto riguarda i sistemi SLINKY, la configurazione a spirale, è richiesta mediamente una lunghezza totale degli scambiatori superiore agli altri sistemi, circa 43,3 – 86,6 m/kW, ma riduce la lunghezza totale di scavo. La disposizione orizzontale prevede fosse ampie 0,9 – 1,8 m, con una spaziatura tra una fossa e l'altra di 3,7 m. Nel caso di disposizione verticale invece le fosse sono ampie 15cm.

Modello e simulazione numerica

L'attività svolta è mirata alla messa a punto di un software destinato alla simulazione dei flussi energetici di impianti geotermici. In particolare l'obiettivo proposto è quello di ottenere un pacchetto software affidabile, rendendo nel contempo più facile e intuitivo l'utilizzo così da estenderne le possibilità di impiego anche a utenti non particolarmente esperti. Questo obiettivo viene raggiunto attraverso un'interfaccia grafica (front – end) che consenta l'introduzione dei dati di input e il loro trasferimento al codice solutore (back – end). Inoltre questo punto risulta particolarmente importante al fine di un dialogo efficace con gli altri moduli.

Il primo fondamentale step per la realizzazione di un tool di simulazione numerica è l'individuazione del modello fisico più appropriato. Generalmente, la migliore scelta possibile è quello di adottare, il modello fisico più semplice per quel problema, ma che fornisca risultati adeguati. Il livello di approssimazione che si adotta è intimamente connesso al modello matematico, perché man mano che si utilizzano ipotesi sempre più restrittive, la matematica del problema si complica. Quindi attraverso le equazioni di bilancio, le condizioni al contorno e le relazioni costitutive, si passa ad una definizione rigorosamente matematica del problema.

Il modello fisico è quello basato sulla soluzione dell'equazione del trasferimento di calore tra un cilindro interrato e l'ambiente circostante. Il metodo proposto è basato sull'equazione sviluppata e valutata da Carslaw e Jaeger ed è proposta da Ingersoll come appropriato per la progettazione di impianti geotermici. Tuttavia la normativa VDI 4640 consente di poter applicare metodologie semplificate sia per il calcolo che per la determinazione delle proprietà del terreno. In particolare ci si basa su valori tabulati che riportano proprietà medie per tipo di sottosuolo, potenza specifica di estrazione e nomogrammi, nonché su algoritmi di calcolo semplificati. La simulazione rappresenta l'ultima fase del processo di risoluzione numerica del problema e prevede implementazione del modello matematico proposto nello schema di calcolo. Il codice è realizzato in *Matlab / Simulink* (release R2006b); in particolare quest'ultimo è utilizzato per i calcoli tecnico – scientifici, grazie alla sua versatilità, alla capacità di gestire grosse moli di dati, alla possibilità di ottimizzare le procedure implementate dall'utente, nonché a routine predefinite molto utilizzate nei problemi di analisi numerica. Per la realizzazione del codice si è utilizzato un approccio del tipo “bottom – up”, ossia sono state definite le singole procedure mentre il modello cresceva in sottoinsiemi via via più completi.

Questo permette di effettuare test durante lo sviluppo e di verificare il funzionamento dei sistemi più complessi aiutandosi con i risultati delle simulazioni dei modelli più semplici e si adatta bene al lavoro individuale e di gruppo. Ciò è utile non solo in termini di ottimizzazione del codice, ma anche in termini di manutenzione.

Il codice “Modello geotermico”

Il codice “Modello geotermico” consta di due sottomodelli: “Modello geotermico verticale” e “Modello geotermico orizzontale”. Una premessa importante è quella che nella realizzazione del codice, per comodità e al fine di direzionare al meglio il flusso di esecuzione degli algoritmi è stata valutata positivamente l’opportunità di poter utilizzare condizioni logiche (if ... then – else). A tale scopo sono stati utilizzati dei valori numerici interi per rappresentare delle variabili che numeriche non sono.

Il codice “Modello geotermico verticale”

Il modello “Modello geotermico verticale” riceve input riguardo:

1. Fabbisogno invernale ed estivo

Il fatto che l’impianto possa essere utilizzato sia per soddisfare il fabbisogno termico che l’eventuale fabbisogno frigorifero di un ambiente è posto all’utente in termini di scelta tra:

- **Funzionamento Invernale**
- **Funzionamento Estivo**

2. Definizione dei livelli termici d’impianto

L’utente decide la tipologia di impianto da utilizzare fissando di conseguenza la temperatura di mandata dalla pompa di calore lato unità abitativa (es. ventilconvettori o fan coil, nel caso di riscaldamento). E’ importante ribadire il limite significativo di queste macchine: avvalendosi dell’utilizzo di pompe di calore, è opportuno abbassare la temperatura alla quale si deve fornire calore ovvero, nel caso del riscaldamento civile, orientarsi verso sistemi che possano fornire calore operando a temperature che possano raggiungere un massimo di 40°C, anziché i 60 °C e oltre come nel caso dei sistemi tradizionali. Nel caso di raffrescamento la temperatura minima raggiungibile è di 5°C.

3. Ore equivalenti di funzionamento dell'impianto

Occorre che l'utente specifichi se l'impianto geotermico sia o no l'unica fonte di sostentamento energetico dell'unità abitativa. Questo dato è indice dell'energia estratta annualmente dal terreno e influenza quindi l'aspetto di lungo periodo:

- **impianto geotermico accoppiato a caldaia e collettore solare (stimato 1000 ore/anno)**
- **impianto geotermico accoppiato a collettore solare (stimato 2400 ore/anno)**
- **impianto geotermico (stimato oltre 2400 ore/anno)**

4.v Temperatura media terreno

Una delle caratteristiche più importanti del terreno inteso come sorgente/pozzo di calore è il valore della temperatura del terreno indisturbato, cioè non collegato all'impianto. Nel caso della configurazione a sonde verticali questo valore è pari, alla media annua della temperatura dell'aria esterna ed è quindi strettamente connessa alla località di perforazione.

5.v Sonda

Una valutazione dell'energia scambiata col terreno non può prescindere dalle caratteristiche delle sonde geotermiche.

Nel caso di configurazione verticale, l'utente deve specificarne lunghezza, numero di sonde, tipologia e materiale di riempimento ed eventuale presenza di installazioni indipendenti vicine per valutare fenomeni d'interferenza:

- a. **Lunghezza [m]**
- b. **Numero di sonde**
- c. **Tipologia e riempimento**
 - **Singola U**
 - bentonite
 - boiaccia specifica
 - acqua
 - **Doppia U**
 - acqua

- bentonite
- bentonite con distanziatori
- sabbia con distanziatori
- **Tripla U**
 - calcestruzzo con distanziatori
 - sabbia umida con distanziatori
 - sabbia secca con distanziatori
- **Quadrupla U**
 - rame con distanziatori
 - plastica con distanziatori
- **Coassiale**
 - Coassiale rigido
 - Coassiale flessibile
 - Coassiale multipipe

d. Eventuale presenza di installazioni indipendenti vicine

Il codice “Modello geotermico verticale” blocco principale del codice, calcola il COP, la potenza assorbita dalla pompa di calore nelle condizioni di operative e la potenza termica ceduta (o assorbita) all’unità abitativa.

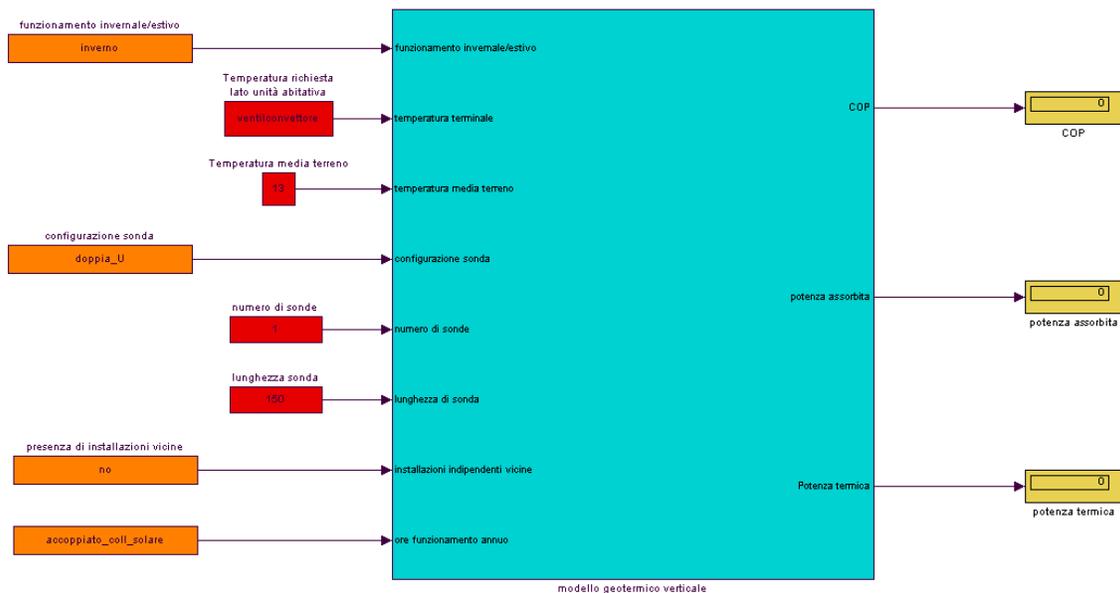


Figura 3.1 – Snapshot del “Modello geotermico verticale”

E' pratica comune dimensionare le sonde in modo che la differenza di temperatura fra mandata e ritorno della pompa di calore ΔT_{pdc} sia pari a circa 4°C , cioè ogni kg di acqua transitato nel circuito ha ceduto alla pompa di calore 4 kcal, che verranno poi trasferite al circuito dell'impianto di riscaldamento (caso invernale) che lavora a temperatura più elevata.

Il valore della temperatura lato unità abitativa è fissato dall'utente attraverso la scelta di un particolare terminale:

- % ventilconvettore riscaldamento = 45°C
- % pavimento radiante riscaldamento = 35°C
- % ventilconvettore raffrescamento = 15°C
- % pavimento radiante raffrescamento = 10°C

Fissato il valore della temperatura lato unità abitativa la temperatura della pompa di calore lato sonde dipende dal ΔT_{pdc} scelto in fase progettuale e dalla temperatura del terreno nell'intorno del pozzo T_b . Per ottenere il $\Delta T_{pdc} = 4^{\circ}\text{C}$ ad un certo T_b è necessario che la temperatura di immissione del liquido nella sonda sia:

$$T_{s_in} = T_b - 7^{\circ}\text{C}$$

funzionamento invernale

$$T_{s_in} = T_b + 7^{\circ}\text{C}$$

funzionamento estivo

Si può prevedere, specie nel caso di funzionamento invernale, di programmare la T_{s_in} in base alle condizioni di temperatura esterna più o meno rigide. Queste scelte sono implementate nel codice “Modello geotermico verticale” nel sottoblocco “ T_{s_in} ”. A questo punto avendo a disposizione la scheda tecnica della pompa di calore, in cui venga indicato il COP e la potenza assorbita in funzione della temperatura all’evaporatore e al condensatore è possibile implementarla in Simulink attraverso le *Look up Tables* presenti nel blocco “*Pdc*”.

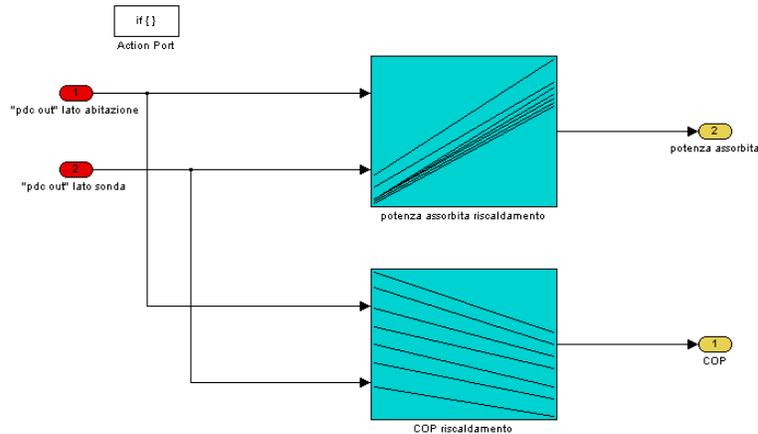


Figura 3.2 – Snapshot del blocco “PdC” in esercizio di riscaldamento

In particolare per il codice implementato è stata utilizzata la pompa di calore **SI 5MER – Dimplex** di cui sono riportate le curve caratteristiche di funzionamento:

- *esercizio di riscaldamento*

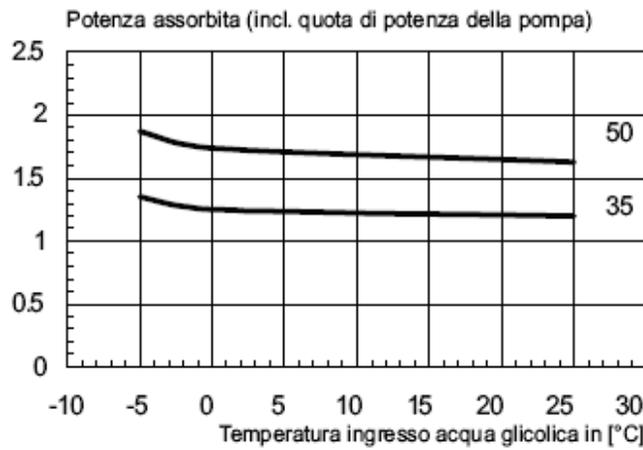


Figura 3.3a – Scheda tecnica della pompa di calore SI SMER – Dimplex

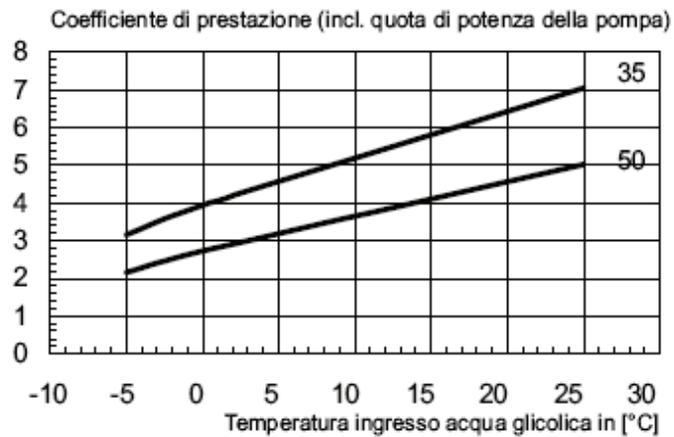


Figura 3.3b – Scheda tecnica della pompa di calore SI SMER – Dimplex

– esercizio di raffrescamento

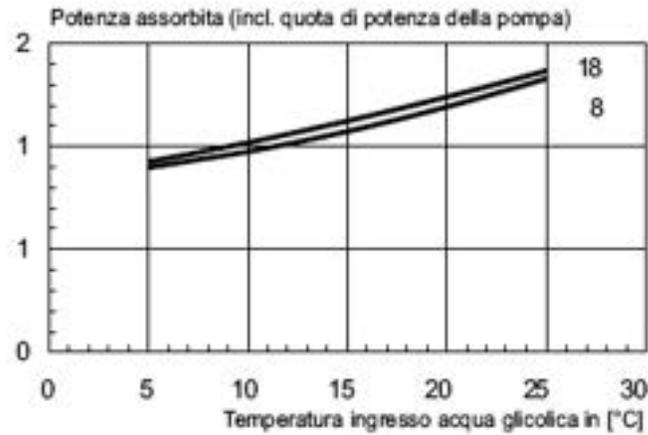


Figura 3.3c – Scheda tecnica della pompa di calore SI 5MER – Dimplex

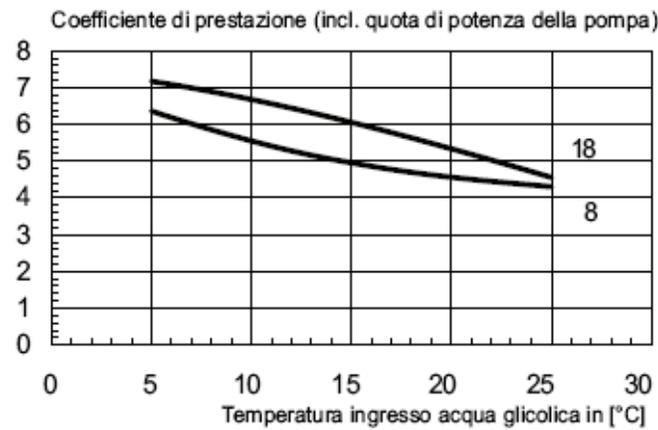


Figura 3.3d – Scheda tecnica della pompa di calore SI 5MER – Dimplex

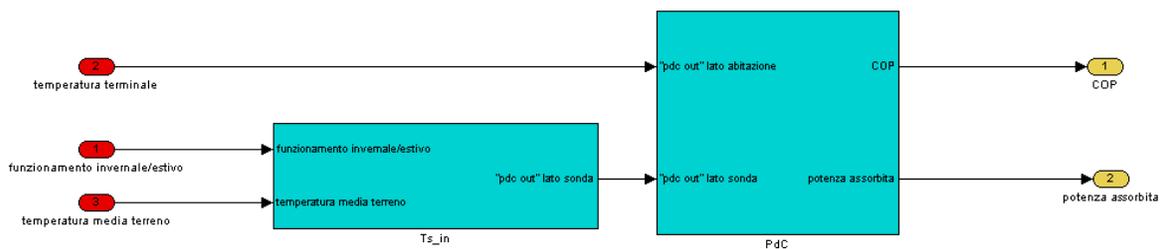


Figura 3.4 – Snapshot dei blocchi “Ts_in” e “PdC”

Il valore della resistenza termica equivalente R_b rappresenta un termine molto significativo poiché in via semplificata permette di determinare la relazione fra la temperatura del terreno nell'intorno dello scambiatore e la temperatura del fluido termovettore. Ad ogni configurazione e relativo riempimento è associato un certo valore di R_b . Se T_f è la temperatura media del fluido, la potenza specifica di estrazione q è data da:

$$q = \frac{T_b - T_f}{R_b}$$

Configurazione	Cantiere	Riempimento	R_b [mK/W]
Singola U	Germania, vari	Bentonite	0,10 - 0,13
Singola U	Germania, vari	Bolacca specifica	0,06 - 0,08
Singola U	USA, vari	Bentonite	0,13 - 0,15
Singola U	USA, vari	Bolacca specifica	0,09 - 0,10
Singola U	Svezia, vari	Acqua (riscaldamento)	0,06 - 0,08
Singola U	Studsvik	Ghiaccio	0,09
Doppia U	Lulea	Acqua (riscaldamento)	0,03
Doppia U	Burgdorf	Acqua (raffrescamento)	0,01
Doppia U	Montezillon	Bentonite	0,13
Doppia U	Montezillon	Bentonite con distanziatori	0,12
Doppia U	Montezillon	Bentonite/sabbia con distanziatori	0,11
Doppia U	Montezillon	Sabbia quarzifera con distanziatori	0,08
Doppia U	Stoccarda	Bentonite con distanziatori	0,09
Tripla U	Danimarca	Calcestruzzo con distanziatori	0,09
Tripla U	Danimarca	Sabbia umida con distanziatori	0,08
Tripla U	Danimarca	Sabbia secca con distanziatori	0,26
Quadrupla U	Canada	Rame con distanziatori	0,02
Quadrupla U	Canada	Plastica con distanziatori	0,06

Tabella I: Valori di R_b per sonde a U al variare del materiale, della configurazione e del grout [6]

Configurazione	Cantiere	Riempimento	Rb [mK/W]
Rigido in acciaio	Schwalbach		0,09
Rigido corrugato	Sigtuna		0,09
Rigido	Neckarslum		0,09
Rigido	Djusholm	Ghiaccio	0,09
Rigido	Djusholm	Sabbia quarzifera	0,09
Rigido	Djusholm	Acqua	0,11
Flessibile	Stocksundstorp		0,02
Flessibile	Musko		0,03
Flessibile	Cornotrequil		0,03
Multipe	Zurigo		0,03

Tabella II: Valori di Rb per sonde coassiali al variare del materiale, della configurazione e del grout [6]

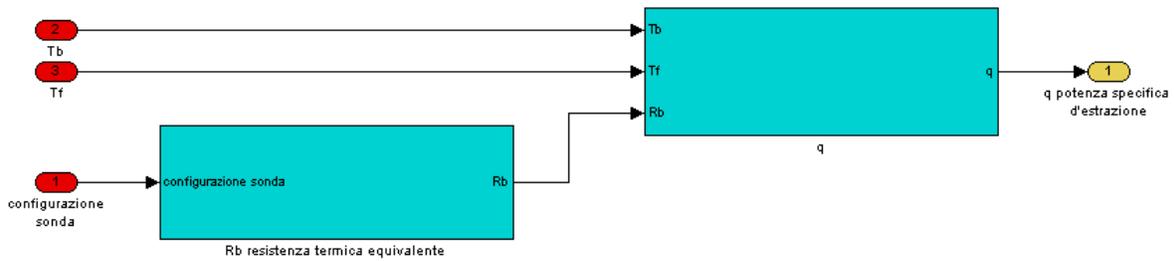


Figura 3.5 – Snapshot dei blocchi “ $R_{b,eq}$ ” e “ q : potenza specifica d’estrazione”

Questo valore di potenza specifica di estrazione teorico deve essere corretto per tener conto delle condizioni di utilizzo più o meno esclusivo a cui è destinato l’impianto geotermico e dell’eventuale presenza di installazioni indipendenti vicine che peggiorano le prestazioni diminuendo i rapporti di estrazione. Si arriva pertanto alla formulazione di una *potenza specifica di estrazione equivalente*.

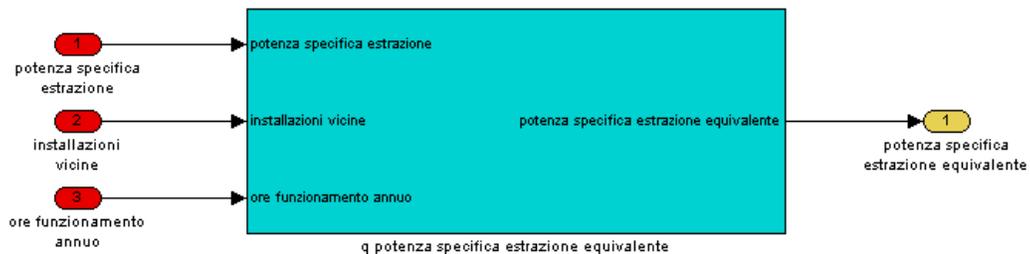


Figura 3.6 – Snapshot del blocco “ q_{eq} ”

Lo stesso tipo di approccio è quello nei confronti del valore di lunghezza di sonda che l'utente specifica nel menù principale. Anch'esso deve essere corretto all'interno del modello per arrivare alla determinazione di una *lunghezza equivalente* che tenga conto della presenza di più sonde, e delle condizioni di utilizzo.



Figura 3.7 – Snapshot del blocco “lunghezza equivalente”

Il prodotto tra la potenza specifica d'estrazione equivalente e la lunghezza equivalente è la potenza termica scambiata a terreno. La potenza termica ceduta (o assorbita) dall'unità abitativa è funzione del COP, in maniera diversa a seconda che si stia simulando nella stagione invernale o estiva:

$$P_t = \frac{COP_{inv} P_{sc}}{COP_{inv} - 1} \quad \text{funzionamento invernale}$$

$$P_t = \frac{(1 + COP_{est}) P_{sc}}{COP_{est}} \quad \text{funzionamento estivo}$$

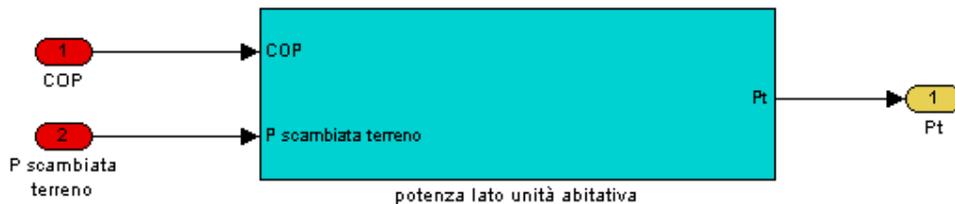


Figura 3.8 – Snapshot del blocco “ P_t ”

Il codice “Modello geotermico orizzontale”

Il fatto che la procedura di calcolo per sistemi orizzontali presentata nel paragrafo 2.2 sia del tutto coincidente a quella utilizzata per i sistemi verticali fa sì che il codice “Modello geotermico orizzontale” risulti formalmente identico al “Modello geotermico verticale”. In particolare risultano mutuati gli input 1, 2, 5 dichiarati nel paragrafo precedente. A questi è necessario che si aggiungano i seguenti input:

4.0 Temperatura media terreno

Nel caso della configurazione a sonde verticali questo valore è pari, alla media annua della temperatura dell'aria esterna. In un sistema a sonde orizzontali, vista la limitata profondità di posa, non è possibile svincolarsi completamente dal clima. Bisogna perciò ricorrere al modello [7] descritto dall'equazione (1.1) che descrive, attraverso una serie di Fourier, le interazioni tra aria, insolazione e suolo e che tiene conto degli effetti di lungo periodo.

E' necessario perciò che il modello riceva come input:

- **x: Profondità di posa [m]**

Visto che il profilo di temperatura dipende strettamente dalla natura del terreno, è necessario al fine di valutare la diffusività, avere delle informazioni riguardo alla natura del terreno:

- **Terreno argilloso**
- **Terreno sabbioso**
- **Terreno ghiaioso**

e il suo carico d'umidità:

- **Terreno secco**
- **Terreno umido**
- **Terreno molto umido**

Il modulo in questione deve invece ricevere come subroutine i seguenti dati dal programma principale:

- **t : tempo di simulazione**

- T_m : **Temperatura media annua dell'aria esterna – località perforazione [°C]**
- a : **Semiampiezza della max differenza di temperature sulla superficie**
- t_o : **Giorno dell'anno di max temperatura superficiale**

5.0 Sonda

Nella configurazione orizzontale l'utente deve specificare innanzitutto il tipo di sistema:

- **sistema a sbancamento**
- **sistema a trincea**

Nel caso di sistema a sbancamento occorre specificare:

- **lunghezza [m]**

Nel caso di sistema a trincea:

- **lunghezza di trincea [m]**

e date le diverse configurazioni possibili attraverso un menù a tendina la tipologia di sonda utilizzata:

- **slinky**
- **2 tubi**
- **4 tubi**

6.0 Tipo di sottosuolo, umidità ed esposizione solare

Al fine di un'adeguata valutazione dello scambio termico tra sottosuolo, sonde e ambiente esterno, a causa della limitata profondità di posa, bisogna tener conto della natura del terreno, del suo carico di umidità, dell'esposizione solare. E' opportuno che il modello riceva, presupponendo la conoscenza della natura del sito d'installazione, informazioni sulla situazione più conforme a quella che si vuole valutare:

- **Terreno sabbioso, saturo d'acqua e buona esposizione solare;**
- **Terreno sabbioso, umido e buona esposizione solare;**
- **Terreno sabbioso, umido e media esposizione solare;**

– **Terreno pietroso, secco e ombreggiato**

Il codice “Modello geotermico orizzontale” blocco principale del codice, calcola il COP, la potenza assorbita dalla pompa di calore nelle condizioni di operative e la potenza termica ceduta (o assorbita) all’unità abitativa.

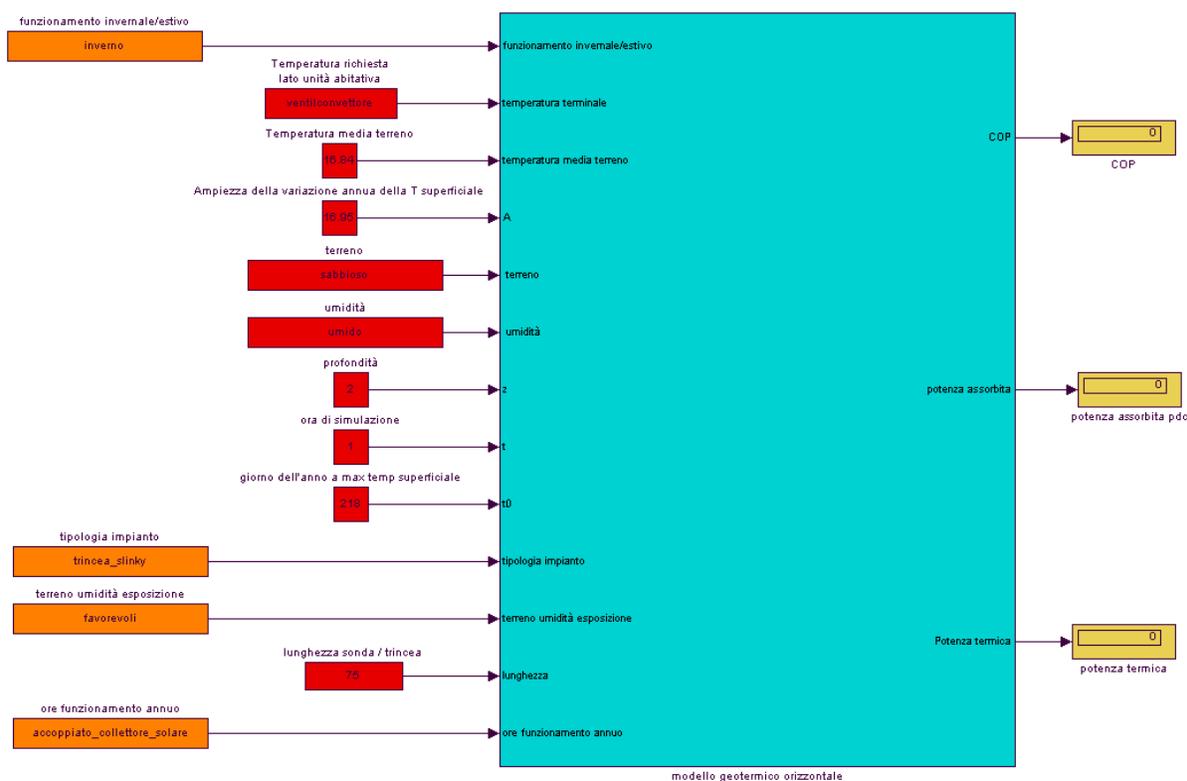


Figura 3.9 – Snapshot del “Modello geotermico orizzontale”

Nella progettazione dei sistemi orizzontali è necessario che la temperatura di immissione del liquido nella sonda sia:

$$T_{s_in} = T_{x,t} - 12^{\circ}\text{C}$$

funzionamento invernale

$$T_{s_in} = T_{x,t} + 12^{\circ}\text{C}$$

funzionamento estivo

Anche nel caso verticale si può prevedere, specie nel caso di funzionamento invernale, di programmare la T_{s_in} in base alle condizioni di temperatura esterna più o meno rigide.

Il blocco $T_{x,t}$, ricevendo gli input elencati al 4.o, è in grado di calcolare la temperatura del terreno ad una certa profondità in determinato istante temporale del periodo, che nel caso del sistema in esame vale 365 giorni. Per le proprietà termofisiche del terreno si è fatto riferimento alla tabella seguente, estratta dalla norma UNI 10351.

MATERIALE	Massa specifica o densità (kg/m ³)	Conduttività (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Calore specifico (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Diffusività (m ² /s)
terreno argilloso	2200	1,6 ÷ 2,1	880	0,83÷1,1·10 ⁻⁶
terreno sabbioso	1600	1,1	880	0,78·10 ⁻⁶
terreno ghiaioso	2000	0,5	1800	0,15·10 ⁻⁶

Tabella III – proprietà termofisiche terreno, estratto norma UNI 10351

La seguente tabella invece tiene conto del variare della diffusività a seconda del carico di umidità.

Tipo di terreno	densità a secco [kg/m ³]	5% di umidità		10% di umidità		15% di umidità		20% di umidità	
		λ	α	λ	α	λ	α	λ	α
		[W/(mK)]	[10 ⁶ · m ² /s]	[W/(mK)]	[10 ⁶ · m ² /s]	[W/(mK)]	[10 ⁶ · m ² /s]	[W/(mK)]	[10 ⁶ · m ² /s]
100% sabbia ordinaria	1920	2.08-3.29	1.03-1.61	2.42-3.46	1.00-1.40	2.75-3.78	0.91-1.20	-	-
	1600	1.38-2.42	0.83-1.40	2.08-2.60	1.03-1.29	2.24-2.76	0.96-1.18	2.41-2.92	0.90-1.08
	1280	0.86-1.90	0.65-1.40	1.04-1.90	0.65-1.18	1.03-2.07	0.55-1.08	1.20-2.06	0.56-0.97
100% argilla fine	1920	1.03-1.37	0.52-0.69	1.04-1.38	0.43-0.57	1.38-1.90	0.49-0.68	-	-
	1600	0.85-1.03	0.52-0.62	0.85-1.03	0.43-0.52	1.03-1.21	0.40-0.52	1.03-1.37	0.44-0.59
	1280	0.52-0.86	0.39-0.65	0.60-0.86	0.38-0.54	0.69-0.95	0.37-0.51	0.69-1.03	0.32-0.48

Tabella IV – Conducibilità e diffusività termica per alcuni tipi di sottosuolo in funzione dell'umidità e della densità a secco [8]

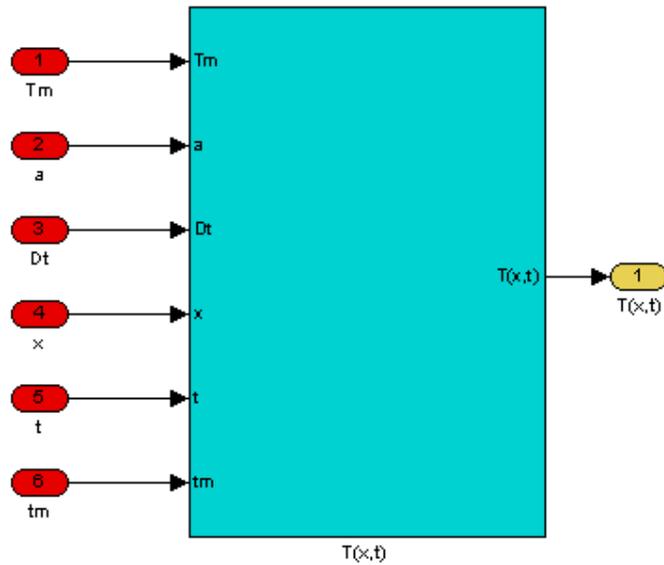


Figura 3.10 – Snapshot del blocco “Tx,t”

La valutazione della potenza specifica di estrazione nel caso di sistemi a sbancamento per l’assenza di parametri di riferimento disponibili a riguardo ha imposto l’utilizzo dei nomogrammi.

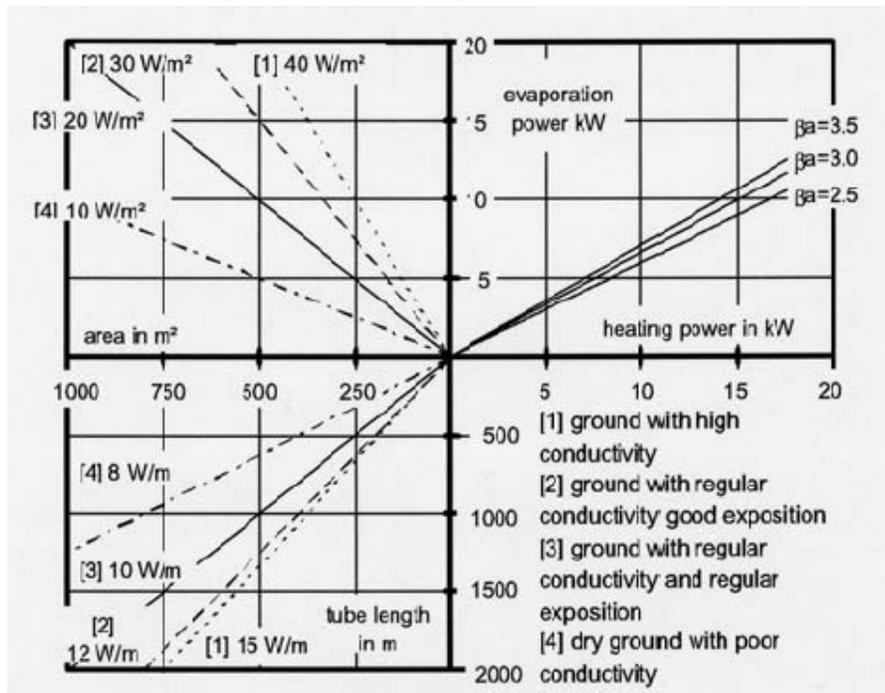


Figura 3.11 – Nomogramma per il dimensionamento dei sistemi orizzontali [9]

Per quanto riguarda i sistemi a trincea nelle varie configurazioni possibili, si è fatto riferimento allo studio condotto negli USA [10], che riporta la lunghezza di trincea necessaria per kW, al variare della temperatura del terreno indisturbato.

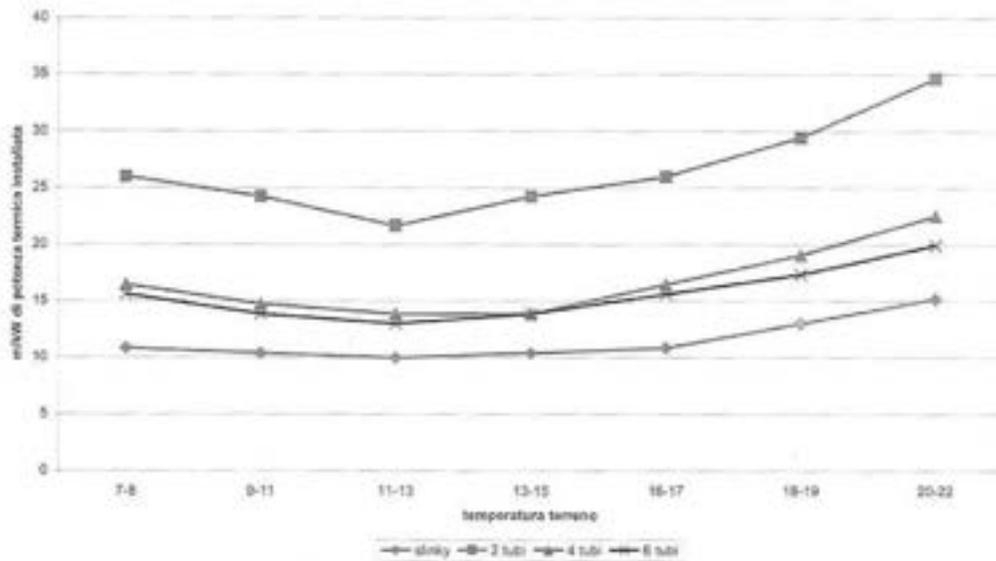


Figura 3.12 – Parametri di dimensionamento di massima per diverse configurazioni [10]

Anche nel “Modello geotermico orizzontale”, come nel “Modello geotermico verticale”, si passa attraverso la determinazione della lunghezza equivalente, e della potenza specifica equivalente a definire la potenza scambiata tra sonda e terreno e da questa in funzione del COP (invernale o estivo) ad ottenere la potenza ceduta (o assorbita) all’unità abitativa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Lazzarin: “*Ground as a possible heat pump source*”, Geothermische Energie 32/33, marzo/giugno 2001
- [2] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo: “*Trasmissione del calore*”, Ed. Cleup, febbraio 1994.
- [3] D. Pahud: “Energia geotermica e applicazioni”, SUPSI – 2006
- [4] M. Talleri: “*Applicazioni geotermiche negli impianti di attivazione termica della massa*”, Seminari Velta 2001, 2001/2.
- [5] S. Basta, F. Minchio: “*Geotermia e pompe di calore*” Ed. Geotermia.org 2008
- [6] G. Hellstrom: “*Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage System*” Lund Sweden: University of Lund, Department of Mathematical Physics, 2006
- [7] G. Colangelo, P. Congedo, G. Starace: *Art 05/06*, CREA – Lecce, Congresso nazionale ATI, Roma, 2005
- [8] M. De Carli, R. Del Bianco, F. Fellin, “*Sviluppi nelle pompe di calore: il terreno come sorgente termica*”, Dip. di Fisica Tecnica dell’Università di Padova
- [9] M. Reuss, B. Sanner: “*Design of closed loop heat exchanger*” International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy, Chapter 2.5 Bad Urach, 2001
- [10] A. Chiasson “*Geoexchange Technologies*”, Utility Geothermal Working Group Webcast, April 2006
- [11] G. Colangelo, P. Congedo, G. Starace: “*Horizontal Heat Exchangers for GSHP. Efficiency and Cost Investigation for Three Different Applications*”, ECOS2005-18th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2005, Norway
- [12] G. Colangelo, P. Congedo, G. Starace: “*Efficienza e costi legati all’adozione degli scambiatori di calore orizzontali in impianti con pompe di calore geotermiche*”, 60° Congresso Nazionale ATI - 2005 Roma
- [13] G. Colangelo, P. Congedo, G. Starace: “*Computational Modelling and Sensitivity Analysis of Horizontal Heat Exchangers for Gshps*”, ASME-ATI Conference “Energy: Production, Distribution and Conservation”, May 14th - 17th 2006, Milan

- [14] G. Colangelo, P. Congedo, G. Starace: “*Computational Modelling and Sensitivity Analysis of Horizontal Slinky Heat Exchangers for GSHPs*”, 22nd IIR International Congress of Refrigeration, August 21-26, 2007, Beijing (China)
- [15] G. Colangelo, P. Congedo, G. Starace: “*Computational Modelling and Sensitivity Analysis of Horizontal Helical Heat Exchangers for GSHPs*”, CLIMAMED 2007 Congress, September 5-7, 2007, Genova (Italy)
- [16] G. Colangelo, G. Starace, M. Ranieri: “*Impianto Integrato A Pompa Di Calore Con Scambiatore Geotermico E Collettore Solare Termico Per La Climatizzazione Civile*”, Convegno nazionale AICARR “Riduzione dei fabbisogni, recupero di efficienza e fonti rinnovabili per il risparmio energetico nel settore residenziale”, 5 giugno 2008 – Padova (Italy)