

Analisi di pompe di calore geotermiche con sonde orizzontali

MICHELE DE CARLI¹, MAURO MANTOVAN², LEONARDO PRENDIN², ANGELO ZARRELLA¹, ROBERTO ZECCHIN^{1,3}, ALESSANDRO ZERBETTO²

¹*Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Padova*

²*HiRef S.p.A.*

³*TiFS Ingegneria, Padova*

RIASSUNTO

L'attenzione per le pompe di calore geotermiche è in continua crescita e la loro applicazione si sta diffondendo soprattutto in ambito residenziale, riscontrando particolare interesse nella realizzazione con sonde geotermiche orizzontali. La letteratura tecnica non riporta molto in merito a questa tipologia; a tal fine è stato sviluppato un codice di calcolo, mediante il quale è possibile ottenere la resa termica specifica di un campo di sonde, note le caratteristiche geometriche, la portata del fluido termovettore e le proprietà termofisiche del terreno. E' così possibile individuare un plausibile compromesso tra resa termica e costo di installazione del campo geotermico.

E' stata quindi affrontata una valutazione comparativa tra una pompa di calore geotermica con scambiatore orizzontale sia per la climatizzazione che per la produzione di acqua calda sanitaria e una soluzione tradizionale a caldaia e refrigeratore in termini di costi di installazione e di esercizio, di efficienza energetica e di impatto ambientale.

E' stata riscontrata una convenienza energetica e tariffaria della soluzione geotermica rispetto ad una equivalente soluzione tradizionale, avendo stimato un tempo di ritorno dell'onere di installazione di circa 8,5 anni.

INTRODUZIONE

La crescente attenzione all'impatto ambientale degli impianti di climatizzazione impone il ricorso a sistemi di produzione energeticamente efficienti, cui si è aggiunta recentemente anche la necessità di diversificare gli impianti di riscaldamento, anche a seguito della recente crisi del gas fra Russia ed Ucraina.

Le pompe di calore geotermiche rappresentano in quest'ottica una soluzione efficace per la riduzione di emissioni inquinanti ed in particolare è sempre maggiore la richiesta di installazione di sonde geotermiche orizzontali, vista l'apparente maggiore economicità rispetto a quelle verticali. Inoltre, mentre per queste ultime esistono in letteratura diverse pubblicazioni [1, 2, 3] che permettono di trarre, anche in modo veloce ed abbastanza accurato, alcune valutazioni di carattere prestazionale, per le sonde geotermiche orizzontali non esiste un riferimento esauriente. Risulta pertanto interessante analizzare queste tecnologie e valutarne effettive potenzialità e limiti.

LE SONDE ORIZZONTALI

Il campo di sonde a sviluppo orizzontale può presentarsi in diverse configurazioni, differenti fra loro a seconda della forma disegnata dalla tubazione, del numero di tubi impiegati e della connessione fra i rami come illustrato in Figura 1. In questo lavoro è stata presa in considerazione la tipologia a serpentina in serie (Figura 1e).

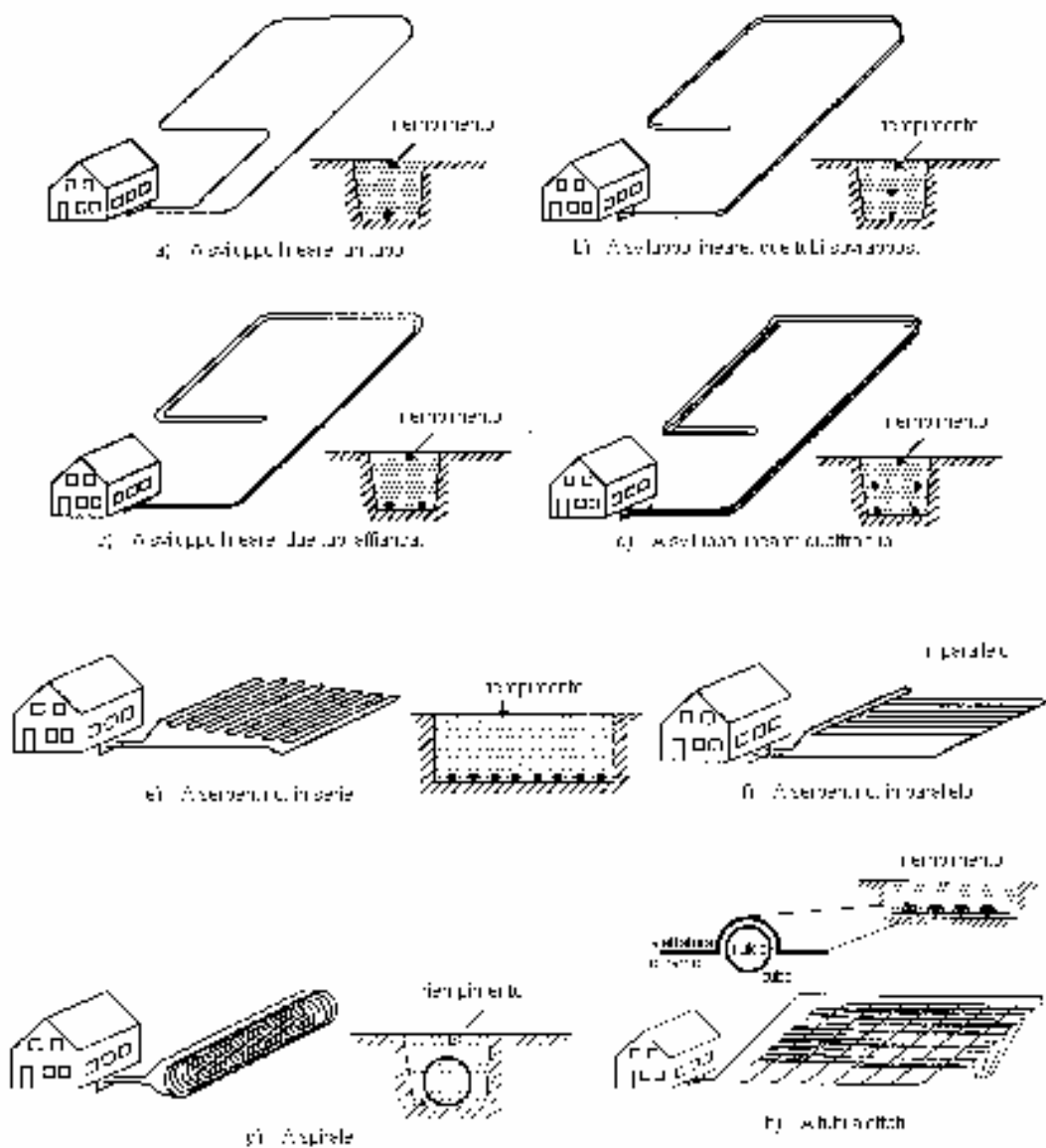


Figura 1 - Configurazioni di posa per sonde geotermiche a sviluppo orizzontale [7].

E' evidente che ad un maggiore fabbisogno termico dell'edificio corrisponde una maggiore estensione della superficie del terreno dedicato alla posa del campo di sonde. I parametri principali che influenzano il flusso termico scambiato fra la sonda e il sottosuolo sono sostanzialmente la lunghezza della tubazione, la profondità di installazione ed il passo tra i tubi; pertanto occorre valutare con attenzione la disponibilità di superficie di terreno da parte dell'utenza qualora si scelga di adottare un impianto a sonde geotermiche a sviluppo orizzontale.

Di importanza rilevante è anche la stima del costo dell'opera di sbancamento per la posa della tubazione. Occorre innanzitutto distinguere se il terreno risulta saturo di acqua in superficie, poiché in tal caso si manifestano problemi per la capacità operativa degli escavatori:

in presenza di falda acquifera occorre infatti prevedere un impianto di pompaggio (*Well-Point*) che prosciughi l'area e che consenta agli escavatori di transitare sul fondo del piano di scavo. Su un'area di 50x20 m ad esempio l'impianto di *Well-Point* richiede una maggiore estensione della superficie (60x30 m circa). Sul perimetro esterno vanno poi posizionati dei tubi verticali (aghi), ad una profondità superiore a quella complessiva dello scavo a distanza di 1 m. Occorrono perciò 180 aghi interrati fino a 6,5 m di profondità. Dopo un periodo di funzionamento delle pompe il terreno può essere sbancato, con scavi che procedono per livelli progressivi, prevedendo pertanto l'obbligo del noleggio di un autocarro che, posizionato in corrispondenza del perimetro dell'area, contenga all'interno di un cassone ribaltabile il materiale asportato. Dopo la posa della sonda geotermica orizzontale l'autocarro può effettuare il riporto di terreno, con l'ausilio di una pala meccanica. A titolo di esempio e sulla base dei dati indicati nel prezzario della Regione Veneto in materia di scavi, è stato valutato il preventivo per lo sbancamento, ipotizzato (50x20 m) a 5 m di profondità e riportato in Tabella 1, totalizzando un periodo di esecuzione dell'opera stimato in 20 giorni.

Nel caso di livello di falda molto prossimo al piano campagna si dimostra pertanto più vantaggioso lo scavo a filo falda. Per la stessa area è stata analizzato il costo di uno sbancamento limitato a 2,5 m di profondità. In questo caso il costo presunto (Tabella 2) è di circa 13300 Euro. Una possibilità per ridurre i costi è di effettuare l'opera di scavo non per un'intera area, ma per trincee parallele fra loro. In tal modo viene realizzata una serie di fossati profondi 2,5 m e larghi quanto la benna dell'escavatore impiegato (circa 70 cm, sufficienti per la posa del tubo). Il mezzo utilizzato può transitare sugli argini della trincea progressivamente formata, in modo da garantire la posa progressiva della tubazione in polietilene, che viene quindi rinterrata. E' comunque da tenere in considerazione la prova in pressione di tenuta della tubazione ed il passo adottato tra i rami della serpentina.

Tabella 1 – Preventivo di sbancamento di un'area di 1000 m² ad una profondità di 5 m con terreno saturo d'acqua.

Descrizione	Quantità	Costo unitario	Totale [€]
Aghi	180 unità	20,00 €/ago	3600,00
Well-Point	4 giorni	500,00 €/giorno	2000,00
Autocarro	160 ore	37,50 €/h	6000,00
Escavatore	160 ore	40,00 €/h	6400,00
Scavo di sbancamento	5000 m ³	4,00 €/m ³	20000,00
Totale			38000,00

Sempre basandosi sul prezzo della Regione Veneto si riporta in Tabella 3 il preventivo per questa seconda ipotesi di intervento, riferita ad uno scavo a trincee per la posa di una sonda orizzontale a 2,5 m dal suolo e con passo tra i tubi di 5 m.

Tabella 2 – Preventivo di sbancamento di un'area di 1000 m² ad una profondità di 2.5 m.

Descrizione	Unità	Costo unitario	Totale [€]
Autocarro	80 ore	37,50 €/h	3000,00
Escavatore	80 ore	40,00 €/h	3200,00
Scavo di sbancamento	2500 m ³	2,85 €/m ³	7125,00
Totale			13325,00

Tabella 3 – Preventivo di sbancamento di un'area di 1000 m² per trincee ad una profondità di 2.5 m.

Descrizione	Unità	Costo unitario	Totale [€]
Escavatore	50 ore	40,00 €/h	2000,00
Scavo di sbancamento	350 m ³	2,85 €/m ³	997,50
Totale			2997,50

Si può notare un notevole risparmio nel costo dell'opera di sbancamento, dato molto utile nell'ottica di un auspicabile incremento della diffusione degli impianti geotermici in ambito italiano.

Può risultare opportuno evidenziare infine come la soluzione a profondità ridotta limiti però l'utenza nella scelta di piantare alberi a radici profonde, poiché potrebbero essere arrecati danni al circuito idraulico geotermico.

A titolo di completezza e per una valutazione comparativa si riportano in Tabella 4 i prezzi per opere di sbancamento realizzate in alcune regioni italiane, nell'ipotesi di un campo di sonde posto alla profondità di 2,5 m dal piano campagna.

Tabella 4 – Prezzi per opera di sbancamento in alcune regioni italiane.

Regione	Scavo in sezione aperta [€/m ³]	Noleggio Escavatore comprensivo di operatore [€/h]
Lombardia	2,34	54,00
Emilia Romagna	2,30	52,50
Toscana (Firenze)	4,52 (in sez. obbligata, fino a 3,00 m)	52,00
Alto Adige (Bolzano)	3,82 (fino a 5,00 m)	55,00
Campania	2,36	53,00

IL MODELLO MATEMATICO

Al fine di valutare la resa termica specifica di una sonda geotermica orizzontale è stato sviluppato un codice di calcolo, denominato GAIA, basato sul metodo alle differenze finite, utilizzando una discretizzazione basata parzialmente su coordinate cilindriche. Ogni singolo volume risulta contenere un nodo dotato di una propria capacità termica e connesso agli altri mediante resistenze termiche, secondo un'analogia elettrica a resistenze-capacità. Il modello si basa sull'ipotesi che all'interasse tra i tubi non vi siano significativi scambi termici in senso orizzontale (condizione di adiabaticità).

Avendo dunque ipotizzato che il flusso termico scambiato all'interfaccia sonda-terreno abbia simmetria circonferenziale nella zona in prossimità del tubo (Figura 3), presi come parametri di discretizzazione cilindrici il raggio r e l'angolo θ e considerata una sezione trasversale della sonda si ottiene la schematizzazione di Figura 4.

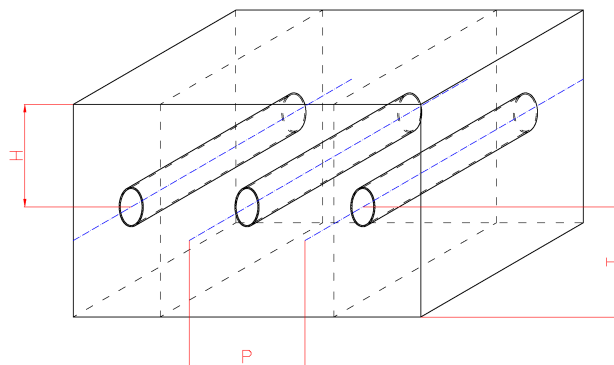


Figura 2 – Elementi longitudinali che compongono ciascun ramo del campo di sonde orizzontali.

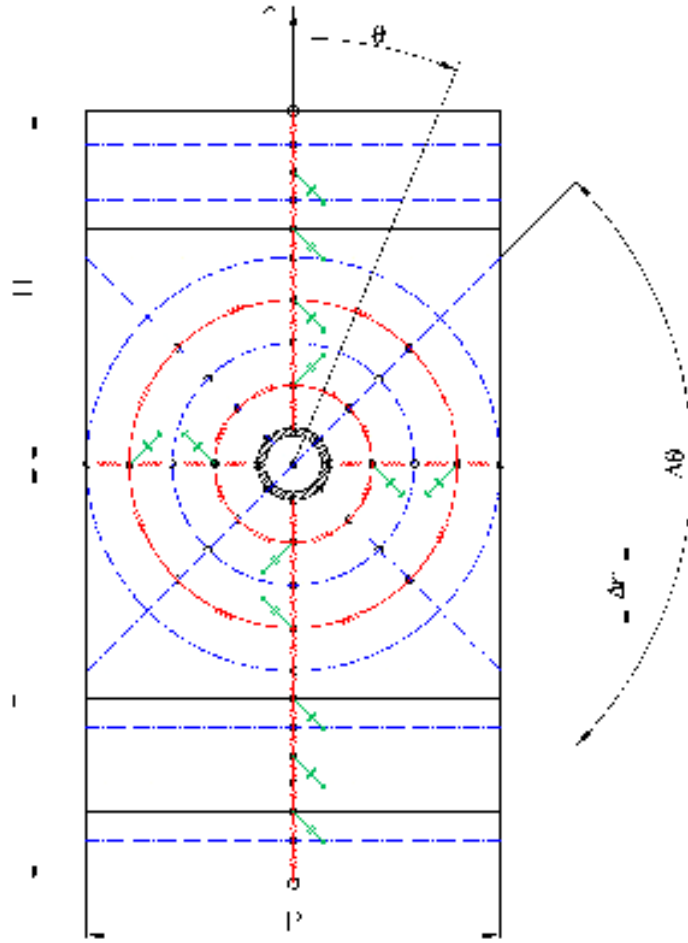


Figura 3 - Discretizzazione a volumi di controllo del macro-volume di indagine e nodi.

Secondo la nomenclatura adottata si ottiene la generica equazione di bilancio dei flussi termici (riferito all'unità di lunghezza del tubo) per il generico nodo con massa (i,j):

$$\begin{aligned}
 & \lambda_{i,j} \Delta r \frac{(T_{i,j-1} - T_{i,j})}{r_i \Delta \theta / 2} + \lambda_{i,j} \Delta r \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j})}{r_i \Delta \theta / 2} + \lambda_{i,j} \left(r_i - \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta \theta \frac{(T_{i-1,j} - T_{i,j})}{\Delta r / 2} + \\
 & + \lambda_{i,j} \left(r_i + \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta \theta \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{\Delta r / 2} = \rho_{i,j} c_{i,j} r_i \Delta \theta \Delta r \frac{(T_{i,j} - T_{i,j}^{\Delta \tau - 1})}{\Delta \tau}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Vengono inoltre scritte equazioni di bilancio dei flussi termici (con termine noto nullo) per i nodi privi di inerzia termica, al fine di perseguire un maggiore grado di dettaglio di calcolo.

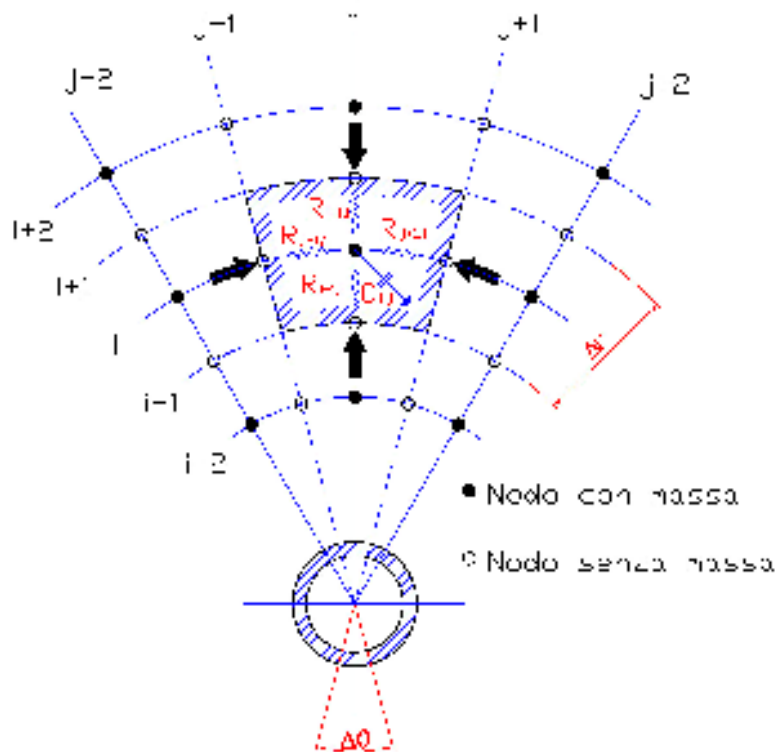


Figura 4 – Schematizzazione di un generico nodo nel programma GAIA.

Ogni sistema di equazioni, legato all'elemento di tubo considerato, viene connesso al successivo elemento mediante la condizione di continuità (portata di massa) e di congruenza (temperatura) del fluido (Figura 5).

Per ciascun elemento longitudinale preso in esame viene pertanto istituito un sistema di equazioni, risolto nelle X incognite temperature dei nodi

$$[A]\{X\} = \{B\} \quad (2)$$

Infine, in base alla portata di fluido termovettore nelle sonde, si può ricavare il flusso scambiato mediante l'espressione

$$q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

e quindi la resa termica specifica media per unità di lunghezza.

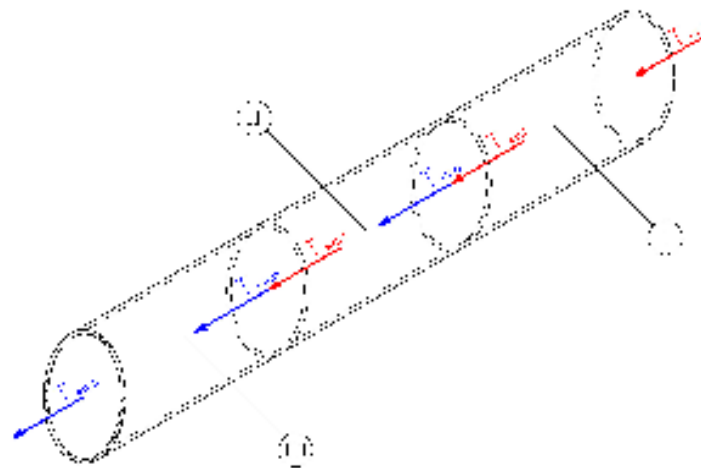


Figura 5 – Connessione dei diversi elementi di tubo.

Al fine di valutare l'effettiva attendibilità dei risultati derivanti dai calcoli del modello sono state effettuate diverse simulazioni, a parità di condizioni al contorno, anche con il programma dettagliato HEAT2 [4]. La durata della simulazione è stata pari a 2 anni (17520 ore), mentre i dati di output considerati per il confronto sono quelli relativi al secondo anno, evitando in tal modo possibili differenze all'inizio della simulazione. Quale condizione al contorno per le condizioni climatiche esterne sono stati utilizzati i valori dell'anno tipo di Venezia [5], combinati con opportuni coefficienti per tenere conto dell'influenza della radiazione solare diretta sul piano orizzontale. Lo scarto riscontrato è contenuto in un intervallo di $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ in prossimità del tubo, considerato come punto maggiormente indicativo per la validazione del modello.

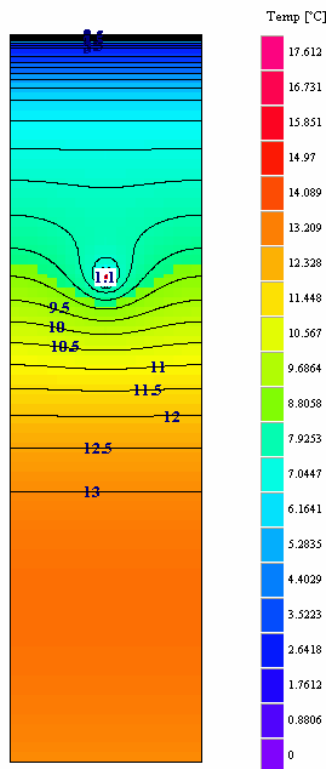


Figura 6 - Andamento delle temperature secondo HEAT2 alle ore 12 del 6 gennaio (temperatura media del fluido nel tubo 3.3°C; temperatura sole-aria 9.2°C).

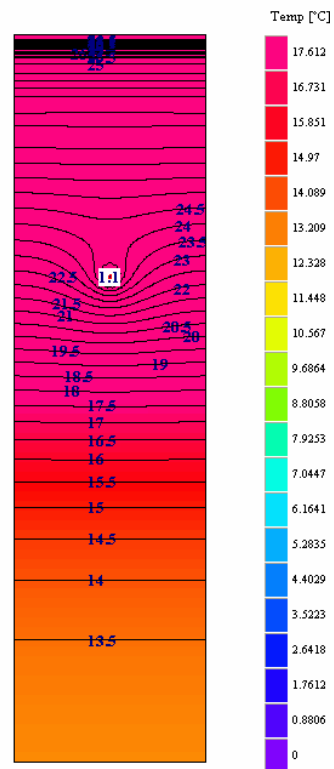


Figura 7 - Andamento delle temperature secondo HEAT2 alle ore 14 del 11 luglio (temperatura media del fluido nel tubo 29°C; temperatura sole-aria 37.6°C).

LA SCELTA DEL CAMPO DI SONDE

Una volta tarato il modello, è stata valutata l'influenza dei parametri geometrici sulla resa di una sonda geotermica orizzontale, mediante diverse simulazioni al variare del passo P e della profondità di posa H . In tal modo è stato possibile ricavare un confronto fra i vari casi sulla base della resa termica lineare nella stagione invernale ed estiva che risulta ovviamente maggiore per profondità e passo più elevati.

Tabella 5 - Resa termica specifica media stagionale ed annuale per quattro diverse disposizioni di sonda geotermica orizzontale (riferita ad un'area di terreno di 50x20 m).

H [m]	P [m]	Resa specifica media invernale [W/m]	Resa specifica media estiva [W/m]	Resa specifica media annuale [W/m]
2,5	2	6,5	7,6	7,1
2,5	5	8,2	8,6	8,4
4	2	7,8	10,4	9,1
4	5	9,4	11,0	10,2

Le simulazioni hanno evidenziato che all'inizio del periodo invernale si ha in generale un picco della resa termica grazie al fatto che nei mesi precedenti il sottosuolo viene progressivamente scaldato; analogamente all'inizio del funzionamento estivo si riscontra un picco della resa termica del terreno.

Inoltre la soluzione a profondità $H = 2,5$ m risente maggiormente della radiazione solare rispetto a quella con $H = 4$ m; particolare influenza risulta avere l'irraggiamento a partire dalla fine del mese di Gennaio, dimostrato dal fatto che da tale periodo in poi la resa tende ad aumentare a causa dell'incremento della temperatura esterna.

Durante il periodo invernale la configurazione con $H = 2,5$ m e $P = 5$ m risulta più efficiente rispetto a quella con $H = 4$ m e $P = 2$ m, oltre che decisamente più economica. D'altro canto, durante il periodo estivo, le sonde poste a $H = 4$ m smaltiscono una potenza termica maggiore, grazie alla minore influenza dell'irraggiamento solare e alla possibilità di sfruttare una massa a temperatura più prossima a quella del terreno indisturbato.

Si può notare come, passando dalla soluzione con $H = 2,5$ m e $P = 2$ m alla soluzione con $H = 4$ m e $P = 2$ m si ha un aumento del 28% circa nella resa termica specifica media annuale, mentre passando dalla soluzione con $H = 2,5$ m e $P = 5$ m alla soluzione con $H = 4$ m e $P = 5$ m si ha un aumento del 20% circa, dati che in questo studio peraltro non sembrano giustificati dall'extra-costi richiesto dallo sbancamento fino a 4 m di profondità.

A parità di area da dedicare alla posa della sonda geotermica orizzontale il miglior compromesso tra resa e costo di sbancamento sembra essere la configurazione con $H = 2,5$ m e $P = 2$ m.

APPLICAZIONE AD UN CASO DI STUDIO

E' stata effettuata una simulazione dinamica mediante il modello DIGITHON [8], prendendo il clima della città di Venezia come riferimento. E' stato così possibile ricavare il fabbisogno energetico di un'unità residenziale per quattro persone, di circa 160 m² di superficie su unico piano e con coefficiente S/V pari a 0,37. Le trasmittanze termiche ipotizzate risultano pari a 0,30 W/(m²K) per le pareti opache esterne, 0,25 W/(m²K) per il tetto e 1,5 W/(m²K) per le superfici finestrate.

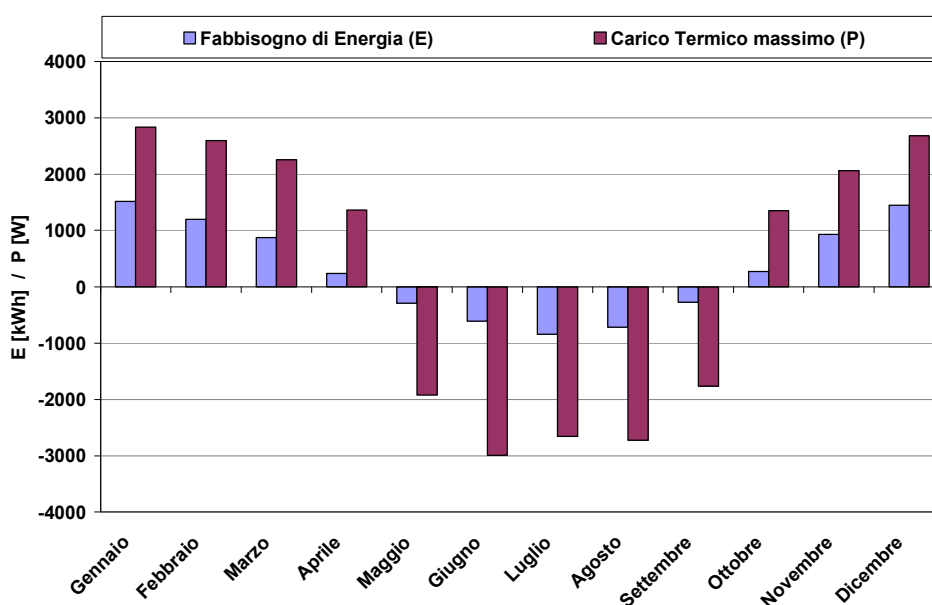


Figura 8 - Carico termico (P) e di fabbisogno energetico (E) dell'edificio secondo un anno tipo (T.R.Y.) calcolati con il codice DigiThon Multizone.

Le potenze di progetto, invernale ed estiva, sono rispettivamente pari a 4,39 e 2,8 kW. I valori contenuti dei carichi termici sono da imputare all'elevato isolamento termico ipotizzato per l'edificio, coerentemente con il principio che l'utilizzo di un impianto tecnologicamente avanzato è tanto più giustificato quanto più l'involucro dell'edificio prevede l'impiego di soluzioni ad alta efficienza energetica.

L'impianto di climatizzazione è del tipo a ventilconvettori con temperatura di mandata e ritorno rispettivamente pari a 35°C e 30°C in inverno, 7°C e 12°C in estate. E' inoltre prevista la ventilazione meccanica con recuperatore di calore di efficienza pari al 50%.

Per poter effettuare un confronto con la soluzione geotermica si è considerato un impianto di climatizzazione e di produzione di acqua calda sanitaria di tipo tradizionale, cioè costituito da una caldaia e un refrigeratore d'acqua con condensazione ad aria, a parità di edificio e di terminali di impianto (ventilconvettori).

Si è fatto riferimento ad una caldaia murale a condensazione, accoppiata ad un serbatoio di accumulo per la produzione di acqua calda sanitaria.

Quale alternativa alla soluzione tradizionale è stata considerata una pompa di calore acqua-acqua con dissipazione tramite campo di sonde geotermiche a sviluppo orizzontale. La macchina destinata alla climatizzazione dell'edificio è una pompa di calore acqua-acqua a singolo circuito frigorifero, operante a R-407c, con compressore "scroll" e con evaporatore e condensatore a piastre.

In particolare la pompa di calore ha una valvola di laminazione a controllo elettronico, una valvola di inversione di ciclo frigorifero e una valvola di inversione del flusso d'acqua negli scambiatori. Tali soluzioni permettono di garantire un deflusso in controcorrente negli scambiatori in entrambi i regimi di funzionamento, ottenendo *COP* medi pari a 4,7 in inverno e 5,5 in estate [6].

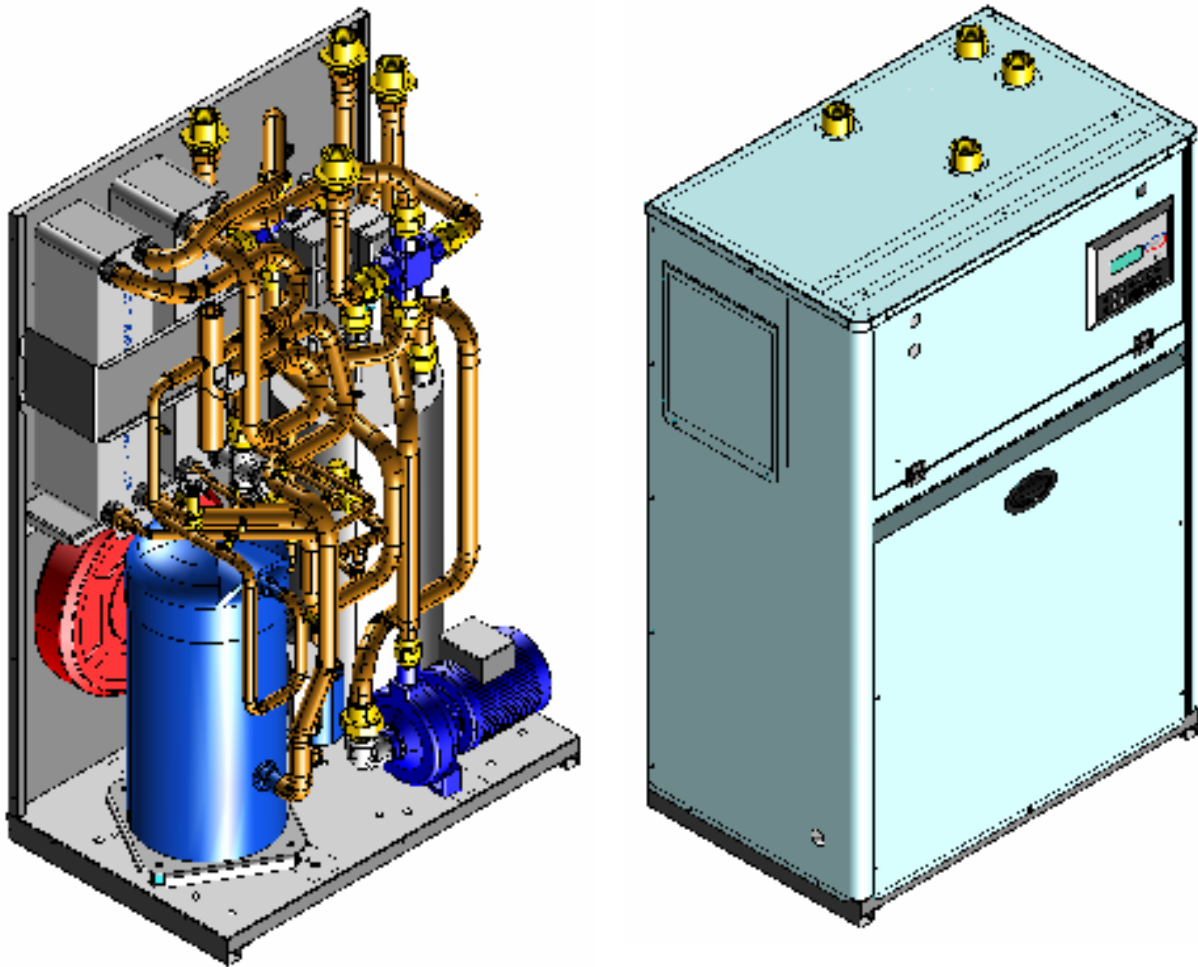


Figura 9 – Pompa di calore geotermica.

In parallelo alla pompa di calore dedicata alla climatizzazione è prevista una seconda pompa di calore geotermica per la produzione di acqua calda sanitaria a 55 °C con un accumulo di 300 l. La macchina funziona a R-134a e risulta più semplice della precedente in quanto non presenta alcuna valvola di inversione di ciclo, dovendo lavorare sempre con il condensatore in qualità di terminale per l'utente.

Infine il campo geotermico realizzato mediante una semplice tubazione in polietilene a bassa densità PE 40 per trasporto di fluidi in pressione. Nel caso dell'edificio considerato si prevede una tubazione di lunghezza complessiva pari a 235 m, mentre per l'impianto di produzione di acqua calda sanitaria sono sufficienti 30 m di tubo; il campo di sonde è installato a 2,5 m di profondità, con 2 m di passo.

RISULTATI

L'utilizzo di una moderna caldaia a condensazione permette di ipotizzare un rendimento termico medio stagionale pari all'unità per funzionamento a bassa temperatura, mentre per la produzione di acqua calda sanitaria è stato considerato un rendimento dell'80%.

Per quanto riguarda i costi di esercizio l'impianto geotermico porta ad un consumo annuo di 2620 kWh_e, mentre quello tradizionale di 1185 kWh_e ed un utilizzo di 1280 m³ di gas metano. In termini di spesa economica la soluzione con pompa di calore geotermica comporta un onere tariffario complessivamente pari a 440 Euro, quella tradizionale pari a 960 Euro.

In ambito di costi di installazione la soluzione geotermica potrebbe trarre un netto vantaggio qualora fosse applicabile la recente Legge 23 del Dicembre 2005 secondo la quale *"...Per i nuovi impianti energetici alimentati con fonti rinnovabili (solare termico fotovoltaico, caldaie a biomasse, ecc.) è prevista un'aliquota I.V.A. al 10 % per i materiali, progettazione e installazione."*

I risultati dell'analisi comparativa sono riportati in dettaglio nelle Tabelle 6 e 7:

Tabella 6 - Costi di installazione dell'impianto tradizionale.

	Quantità	Importo	I.V.A. [%]	Totale [€]
Caldaia	1	2889,00 €	20	3466,80
Camino	5 m	150,00 €/m	20	900,00
Refrigeratore	1	1970,00 €	20	2364,00
Bollitore	1	1015,00 €	20	1218,00
Totale				7948,80

Tabella 7 - Costi di installazione dell'impianto geotermico.

	Quantità	Importo	I.V.A. [%]	Totale [€]
Pdc clima	1	3000,00 €	20	3600,00
Pdc a.c.s.	1	2150,00 €	20	2580,00
Sonde clima	235 m	1,93 €/m	20	544,26
Sonde a.c.s.	30 m	1,26 €/m	20	45,36
Pompa lato sonde clima	1	100,00 €	20	120,00

Pompa lato sonde a.c.s.	1	100,00 €	20	120,00
Sbancamento	1	3841,69 €	20	4610,00
Termoaccumulatore	1	620,00 €	20	744,00
Totale				12363,62

Con una differenza sul costo di installazione di circa 4415 Euro a vantaggio della soluzione tradizionale e con un risparmio annuo sui consumi di circa 520 Euro a favore della soluzione geotermica si ha un tempo di ritorno dell'investimento pari a circa 8,5 anni.

Occorre poi considerare le emissioni di CO_2 nel funzionamento di entrambe le tipologie di impianto, tenendo conto della diversa natura dell'energia consumata. Per l'impianto geotermico si è stimata un'emissione annua di 1289 kg_{CO_2} , mentre per l'impianto tradizionale 3076 kg_{CO_2} , comportando quindi una riduzione di un fattore 2,4 nelle emissioni.

CONCLUSIONI

E' stata analizzata la possibilità di utilizzo di pompe di calore con sonde geotermiche orizzontali. A tal fine è stato implementato un modello matematico per determinare la resa termica specifica delle sonde orizzontali accoppiate ad una pompa di calore acqua-acqua. Noti i profili di carico termico dell'edificio è possibile, mediante tale modello, effettuare una stima della lunghezza della sonda necessaria per il fabbisogno dell'utenza e quindi avere a disposizione i dati di progetto per la realizzazione dell'impianto considerato.

Di grande importanza è l'analisi delle modalità e dei problemi tecnici di esecuzione dell'opera di sbancamento per la collocazione delle sonde. Una profondità idonea sembra essere pari a circa 2,5 m. La procedura di scavo può essere ottimizzata: ricorrendo allo scavo di trincee, anziché allo scavo dell'intera area, i costi di sbancamento per profondità medie fino a 2,5 m vengono notevolmente ridotti (in rapporto circa uno a quattro). Questa soluzione presenta comunque qualche criticità come ad esempio la prova in pressione di tenuta della tubazione ed inoltre la sua esecuzione è legata al passo adottato tra i rami della serpentina.

Un ulteriore aspetto particolarmente interessante della posa a 2,5 m di profondità riguarda la possibilità, rispetto ad una soluzione a 4 m di profondità, di beneficiare dell'irraggiamento solare da metà periodo invernale in poi. Questo si rivela particolarmente interessante nell'applicazione residenziale, che risulta spiccatamente centrata sul funzionamento in regime di riscaldamento e di acqua calda sanitaria piuttosto che di raffrescamento. L'influenza delle

condizioni climatiche estive consente infatti una parziale rigenerazione gratuita del terreno e pertanto prestazioni termiche più uniformi nel tempo.

E' stata infine effettuata un'indagine per valutare la convenienza energetica, economico-tariffaria e ambientale della soluzione geotermica, con ottimi risultati a favore della soluzione rinnovabile rispetto a quella tradizionale (caldaia+refrigeratore). Per gli elevati valori di *COP* conseguiti dalla macchina (circa 5,5 nella stagione estiva e 4,7 in quella invernale) la pompa di calore risulta energeticamente più conveniente rispetto alla caldaia accoppiata a refrigeratore con condensazione ad aria. Dal punto di vista economico la soluzione geotermica prevede costi di installazione superiori rispetto a quello tradizionale, ma decisamente contenuti qualora venga adottata la modalità di sbancamento proposta. Grazie al risparmio medio di circa 500 Euro l'anno, il tempo di ritorno dell'investimento (*pay-back time* semplificato) ammonta a 8,5 anni circa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Talleri, “*Applicazioni geotermiche negli impianti di attivazione termica della massa*”, Seminari Velta 2001, 2001/2.
- [2] S. P. Kavanaugh, K. Rafferty, “*Ground source heat pumps -Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*”, A.S.H.R.A.E. Applications Handbook 1997.
- [3] M. De Carli, R. Del Bianco, F. Fellin, M. Manente, M. Tonon, R. Zecchin, “*Sviluppi nelle pompe di calore: il terreno come sorgente termica*”, Convegno AiCARR, Padova, Giugno 2003.
- [4] T. Blomberg, “*Heat2 – A PC-program for heat transfer in two dimensions. Manual with brief theory and examples*”, Lund Group for Computational Building Physics, Ottobre 1999.
- [5] L. Mazzarella, “*Dati climatici orari per 67 località italiane*”, Atti della “Giornata di studio Giovanni De Giorgio”, Politecnico di Milano, Milano 18 Novembre 1997 – Ed. Esculapio, Bologna, Marzo 1999.
- [6] F. Bisco, M. De Carli, “*Ottimizzare le pompe di calore – Analisi teorica e sperimentale per applicazioni geotermiche*”, CDA n. 10, Novembre 2005, pagg. 56 - 62.
- [7] R. Lazzarin, “*Ground as a possible heat pump source*”, Geothermische Energie 32/33, Marzo/Giugno 2001. Tratto da <http://www.geothermie.de>

- [8] P. Brunello, G. Di Gennaro, M. De Carli, R. Zecchin, “*Mathematical modelling of radiant heating and cooling with massive thermal slab*”, Clima 2000, Napoli, Settembre 2001.