

**Facoltà di Ingegneria – Università degli Studi di Bologna**

***Dipartimento di Ingegneria Industriale***

---

**Marco Gentilini**

**Impianti geotermici superficiali.**

---

Quaderni del Dipartimento

**MARCO GENTILINI**

## ***IMPIANTI GEOTERMICI SUPERFICIALI.***

### ***1 - IMPIANTI GEOTERMICI.***

Gli impianti geotermici tipicamente utilizzati, sono sistemi idrotermali, interessati da circolazione di acqua che dalla superficie si inserisce in profondità, incontra anomalie termiche positive per la presenza di masse magmatiche risalite in prossimità della superficie dalle ordinarie profondità, e riaffiora a maggiore temperatura o allo stato di vapore.

La presenza in solo una minima parte della terra di tali aree, limita l'entità della potenza installabile, mentre rimangono comunque fissati i siti presso i quali situare i sistemi di utilizzo termico, salvo realizzare, nei bacini ad alta entalpia, impianti geotermoelettrici per produzione e trasmissione dell'energia in forma elettrica.

Le taglie degli impianti, relative alla disponibilità di fluido geotermico, comunque, risultano tipicamente rilevanti, escludendo in pratica, l'utilizzo privato di piccole potenzialità.

Parimenti lo sfruttamento del calore geotermico tramite circuiti a fluido con perforazioni artificiali del suolo, dati i livelli dei gradienti, (0,025 ÷ 0,03 °C/m), richiede tecniche e sistemi di trivellazione a profondità comunque rilevanti, (fino a 4÷5 km), risultando pertanto, una tecnica relativa a impianti di taglia medio-grande per uso civile o industriale, affidata a enti pubblici o privati di medio-grandi dimensioni.

### ***2 - IMPIANTI A POMPA DI CALORE GEOASSISTITI.***

L'efficienza dei sistemi a ciclo termodinamico di un fluido per il riscaldamento, (pompe di calore), a differenza dei sistemi termici tradizionali, risente delle temperature estreme del ciclo.

Sono pertanto vantaggio sistemi a emissione di calore all'utenza alla minima temperatura, ottenibile, a parità di potenza termica ceduta, con aumento della superficie di scambio tramite pannelli radianti a pavimento o a soffitto, mentre alla sorgente di calore, alla massima temperatura disponibile.

La temperatura dell'utenza di riscaldamento, tuttavia, (a meno di interventi sulle superficie di scambio e sulla circolazione dell'aria), non è modificabile, mentre disponendo di sorgenti di calore a temperatura maggiore dell'ambiente cui sottrarre calore da cedere

all'utenza dopo averne innalzato il livello termico, possono ottenersi aumenti delle efficienze dei cicli a fluido.

Alle latitudini del norditalia, la temperatura del suolo a modeste profondità risulta sufficientemente costante a valori di circa 14°C, a fronte di valori medi dell'atmosfera di 8 ÷ 9 °C in inverno.

Alimentando una pompa di calore con un fluido alla temperatura del suolo, si ottengono pertanto aumenti di efficienza dei cicli.

Si realizzano quindi, sistemi in cui la geotermia non è sfruttata come diretta fonte di calore che non risulta disponibile a temperatura utile, ma come serbatoio che per l'inerzia termica del terreno al variare delle stagioni, in inverno fornisce calore a temperatura superiore all'ambiente.

Tali sistemi sono installabili quasi ovunque e date le modeste profondità richieste, la tipologia di impianto non è riservata a sistemi di media-grande taglia, ma può essere impiegata anche in piccole dimensioni fino a utenze domestiche.

### **Tipologia di impianto.**

Nell'impianto di riscaldamento geoassistito, il comune sistema pompa di calore aria-aria, è sostituito da un ciclo liquido-aria, in cui il calore geotermico viene prelevato dal terreno tramite circolazione di un liquido in sonde geotermiche e attraverso il ciclo a fluido, elevato nel suo valore termodinamico, quindi ceduto all'utenza.

A seconda della disponibilità di terreno afferente all'utenza, le sonde geotermiche possono essere verticali od orizzontali, composte da tubazioni generalmente in materiale plastico, (polietilene), nelle quali il liquido circolante risulta acqua pura o additivata con glicole.

Le tubazioni verticali del diametro dell'ordine di 15 cm, vengono posizionate nel terreno tramite trivellazione fino a profondità di 100 ÷ 150 m, distanziate di non meno di 5÷6 m per evitare un eccessivo raffreddamento del terreno e conseguente riduzione di efficienza del ciclo, mentre quelle orizzontali vengono alloggiare in trincee a profondità di circa 2m.

Sono avvantaggiati i terreni con presenza di acque di falda per il miglioramento di scambio termico fra le sonde e il terreno.

### **Prestazioni del ciclo.**

In un ciclo a pompa di calore reale, l'efficienza, ( $h_p$ ), vale:

$$h_p = \frac{\text{energia termica ceduta all'utenza}}{\text{energia di compressione del fluido}} \times \text{rendimenti},$$

(meccanico, elettrico e relativo agli ausiliari).

Date le modeste variazioni del ciclo, i diversi rendimenti possono ritenersi costanti e pertanto, a parità di potenza termica utile, il rapporto di efficienza fra il ciclo geotermico e convenzionale risulta pari all'inverso del rapporto fra le diverse potenze di compressione del fluido nel ciclo.

Note le temperature dell'aria in caso di pompe di calore tradizionali e del terreno in caso di pompe di calore geoassistite, dall'analisi dei cicli sul diagramma di stato del fluido che descrive il ciclo a pompa di calore, si ottiene il rapporto fra le potenze elettriche spese e quindi fra le efficienze, relative alla soluzione geotermica e convenzionale:

$$g_k = h_{pg}/h_{po} > 1.$$

### 3 - VALUTAZIONI ECONOMICHE.

Il costo di investimento di un sistema misto geotermico-pompa di calore, risulta certamente maggiore di un sistema tradizionale di qualunque tipo, essenzialmente per le opere di trivellazione e posa delle sonde, ma l'aumento di efficienza può permetterne il recupero economico ed energetico.

Indicando con  $u$  il fattore di carico dell'impianto, il risparmio totale attualizzato di esercizio, risulta:

$$QuTc_k \left( \frac{1}{h_{po}} - \frac{1}{h_{pg}} \right) \frac{1}{t_{ek}} = \frac{QuTc_k}{h_{po}} \left( 1 - \frac{h_{po}}{h_{pg}} \right) \frac{1}{t_{ek}} = \frac{QuTc_k}{h_{po} t_{ek}} \left( 1 - \frac{1}{g_k} \right),$$

con:  $1/t_{ek}$ , fattore di annualità,  $T$  periodo rateale,  $c_k$  costo specifico dell'energia elettrica,  $Q$ , potenza termica all'utenza e  $h_{po}$  efficienza del sistema convenzionale.

Il costo delle sonde geotermiche risulta proporzionale alle loro dimensioni e quindi alla potenza termica scambiata, ( $Q_g$ ), pari alla potenza termica all'utenza, ( $Q$ ), meno la potenza elettrica, ( $P$ ):

$$Q_g = Q - P = Q \left( 1 - \frac{1}{h_{pg}} \right) = Q \left( 1 - \frac{1}{h_{po} g_k} \right).$$

Indicando con  $q_g$  il costo specifico di impianto riferito alla potenza geotermica, (tenendo eventualmente conto del minor onere per assenza degli scambiatori aria-aria), si ottiene quindi un maggior

onere di impianto pari a:  $q_g Q \left( 1 - \frac{1}{h_{po} g_k} \right)$ .

L'inserzione della sezione geotermica, tuttavia, riduce la potenza di compressione installata del fattore:  $\frac{Q}{h_{po}} \left(1 - \frac{1}{g_k}\right)$ , da cui, indicando con  $q_p$ , il costo specifico di impianto riferito alla potenza di compressione, si ottiene un risparmio pari a:

$$\frac{q_p Q}{h_{po}} \left(1 - \frac{1}{g_k}\right).$$

Il **VAN** dell'investimento relativo all'installazione della sezione geotermica in un sistema a pompa di calore, risulta pertanto:

$$\begin{aligned} \text{VAN} &= \frac{QuTc_k}{h_{po}t_{ek}} \left(1 - \frac{1}{g_k}\right) - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \left[ q_g Q \left(1 - \frac{1}{h_{po}g_k}\right) - \frac{q_p Q}{h_{po}} \left(1 - \frac{1}{g_k}\right) \right] = \\ &= \left[ \frac{QuTc_k}{h_{po}t_{ek}} + \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{q_p Q}{h_{po}} \right] \left(1 - \frac{1}{g_k}\right) - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) q_g Q \left(1 - \frac{1}{h_{po}g_k}\right), \end{aligned}$$

avendo indicato con **a** la frazione annua di costo impianto per opere di gestione e manutenzione e con  $1/t_{em}$ , il fattore di annualità riferito alle opere di gestione e manutenzione.

In funzione dell'utilizzo, l'investimento risulta pertanto, vantaggioso,

$$(\text{VAN} > 0), \text{ per: } u > \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) \frac{t_{ek}}{Tc_k} \left( q_g \frac{h_{po}g_k - 1}{g_k - 1} - q_p \right),$$

al di sotto del cui valore il risparmio per aumentata efficienza e ridotta sezione di compressione, non compensa i maggiori oneri di investimento per la sezione geotermica.

La pendenza della curva: **VAN** = **VAN**( $g_k$ ), risulta:

$$\frac{d\text{VAN}(g_k)}{dg_k} = \frac{Q}{h_{po}} \left[ \frac{uTc_k}{t_{ek}} - \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (q_g - q_p) \right] \frac{1}{g_k^2}.$$

Il risultato mostra che il **VAN** risulta crescente, (pendenza positiva), e quindi che la soluzione geoassistita è conveniente, se il risparmio totale attualizzato di esercizio:  $\frac{uTc_k}{t_{ek}}$ , è superiore alla differenza di

costi fra la parte geotermica e quella meccanica:  $\left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) (q_g - q_p)$ ,

per la stessa, (o qualunque altra), potenza:  $Q/h_{po}$ .

Infatti risultando la potenza  $Q_g$ , pari alla differenza fra la potenza termica, (costante),  $Q$  e la potenza di compressione spesa,  $P$ , alla diminuzione di  $P$  per aumentata efficienza, corrisponde un pari aumento della potenza  $Q_g$ , (nella derivazione la soppressione dei

termini costanti elimina la parte di potenza termica comunque sottratta al terreno in caso di ciclo invariato, come se detta potenza fosse comunque estratta con il sistema a sonde geotermiche).

In tal caso la funzione risulta monotona crescente con  $g_k$ , (ovvero con l'aumento di efficienza circa proporzionale all'aumento di temperatura del terreno), al valore asintotico:

$$VAN(\infty) = \frac{Q}{h_{po}} \left[ \frac{uTc_k}{t_{ek}} - \left( 1 + \frac{a}{t_{em}} \right) (q_g - q_p) \right].$$

Il tempo di ritorno, ( $TR$ ), risulta:  $TR = \frac{1}{\frac{uTc_k}{h_{po}g_k - 1} - a - q_g \frac{h_{po}g_k - 1}{g_k - 1} - q_p}$ .

Per riscaldamento di moduli abitativi di tipo civile o industriale, indicando con  $GG$  il numero di gradi-giorno della località, con  $DT$  il salto termico massimo di progetto e con  $S$  e  $R_t$ , rispettivamente la superficie totale di frontiera e la resistenza termica media pesata del modulo da riscaldare, si ha:  $Q = \frac{f_a S D T}{R_t}$ , ( $f_a$  coefficiente maggiorativo

per avviamento e regolazione);  $QuT = \frac{f_g S G G}{R_t}$ , ( $f_g$  numero di unità di

tempo/giorno), ovvero:  $uT = \frac{f_g G G}{f_a D T}$ , da cui:

$$VAN = \frac{f_a S D T}{R_t} \left\{ \left[ \frac{f_g}{f_a} \frac{G G c_k}{h_{po} t_{ek}} + \left( 1 + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{q_p}{h_{po}} \right] \left( 1 - \frac{1}{g_k} \right) - \left( 1 + \frac{a}{t_{em}} \right) q_g \left( 1 - \frac{1}{h_{po} g_k} \right) \right\}.$$

L'investimento risulta pertanto, vantaggioso per:

$$GG > \left( 1 + \frac{a}{t_{em}} \right) \frac{f_a}{f_g} \frac{D T t_{ek}}{c_k} \left( q_g \frac{h_{po} g_k - 1}{g_k - 1} - q_p \right),$$

ovvero per sufficienti periodi di utilizzo, al di sotto del cui valore il risparmio per aumentata efficienza non compensa i maggiori oneri di investimento, mentre al di sopra di tale valore, il  $VAN$  risulta positivo e crescente con  $g_k$ , ovvero con l'aumento di efficienza circa proporzionale all'aumento di temperatura del terreno.

Il tempo di ritorno, (**TR**), risulta: 
$$\mathbf{TR} = \frac{1}{\frac{f_g \mathbf{GG} c_k}{f_a \mathbf{DT} \left( q_g \frac{h_{po} k_g - 1}{k_g - 1} - q_p \right)} - a}.$$

#### **4 - ESEMPI DI APPLICAZIONE NUMERICA.**

Per una località del norditalia, assumendo:

<b>f<sub>g</sub></b>	= 24 x 3.600 = 86.400	s/g;
<b>f<sub>a</sub></b>	= 1,1	
<b>GG</b>	= 2.170	K g/anno;
<b>DT</b>	= 25	K;
<b>c<sub>k</sub></b>	= 2,78 10 <sup>-8</sup>	€/J;
<b>t<sub>ek</sub> ~ t<sub>em</sub></b>	= 0,08	anni <sup>-1</sup> ;
<b>h<sub>po</sub></b>	= 3,5	
<b>a</b>	= 0,02	anni <sup>-1</sup> ;
<b>q<sub>p</sub></b>	= 0,2	€/W;
<b>q<sub>g</sub></b>	= 0,12	€/W,

si ottiene: **VAN > 0**, per: **GG > 1.970 K g/anno;**  
**TR (GG = 2.170) = 10 ÷ 12 anni.**

L'analisi energetica delle apparecchiature impiegate, inoltre, mostra un tempo di ritorno energetico dello schema di impianto geotermico di 5 ÷ 7 anni.

#### **5 - IMPIANTI DI CONDIZIONAMENTO GEOASSISTITI.**

Note le condizioni termoigrometriche richieste in un ambiente da condizionare, sul diagramma di stato dell'aria umida ne rimane fissato lo stato fisico rappresentativo, (**h<sub>u</sub>, x<sub>u</sub>**).

Nota la potenza termica, (**Q**), e la portata di vapore, (**G<sub>v</sub>**), richiesti per la refrigerazione e deumidificazione, rimane fissata la "retta di lavoro", ovvero il luogo dei punti rappresentativi dell'aria in ingresso all'utenza che godono della proprietà di fornire il rapporto richiesto fra le suddette grandezze.

La scelta del punto sulla retta,  $(\mathbf{h}_i, \mathbf{x}_i)$ , e quindi della portata di aria da trattare:  $\mathbf{G} = \mathbf{Q}(\mathbf{h}_u - \mathbf{h}_i) = \mathbf{G}_v(\mathbf{x}_u - \mathbf{x}_i)$ , risulta mediata fra esigenze di uniformità di condizioni dell'ambiente da condizionare e limitazione della portata stessa, o anche dalla temperatura raggiunta dal relativo sistema frigorifero.

La temperatura ottenibile da un fluido circolante nelle sonde geotermiche, anche nel periodo estivo, è sufficiente ad alimentare direttamente utenze di condizionamento, mentre l'eventuale postriscaldamento della portata di aria deumidificata, fino alla retta di lavoro, può ottenersi, in ogni caso, tramite uno scambiatore di calore intermedio di recupero posto fra la portata di aria raffreddata e deumidificata e la portata di aria in uscita dall'ambiente.

Ne risulta che lo schema di condizionamento con raffreddamento geotermico permette il risparmio del costo di investimento ed esercizio della sezione frigorifera convenzionale a fronte del costo di investimento della sezione geotermica.

Indicando con  $\mathbf{Q}_f$ , la potenza frigorifera richiesta dall'ambiente da condizionare derivante dal dimensionamento del sistema, ovvero pari alla potenza frigorifera necessaria per portare la portata di aria da trattare dalle condizioni ambientali alla temperatura minima di cui all'umidità  $\mathbf{x}_i$ , meno la potenza recuperata nel postriscaldamento con  $\mathbf{q}_f$  il costo specifico riferito alla potenza elettrica installata relativo alla sezione frigorifera convenzionale e con  $\mathbf{h}_f$  il relativo coefficiente di effetto frigorifero, si ottiene quindi:

$$\begin{aligned} \mathbf{VAN} &= \frac{\mathbf{Q}_f}{\mathbf{h}_f} \frac{\mathbf{uTc}_k}{\mathbf{t}_{ek}} + \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \mathbf{q}_f \frac{\mathbf{Q}_f}{\mathbf{h}_f} - \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \mathbf{q}_g \mathbf{Q}_f = \\ &= \mathbf{Q}_f \left[ \frac{\mathbf{uTc}_k}{\mathbf{h}_f \mathbf{t}_{ek}} - \left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \left( \mathbf{q}_g - \frac{\mathbf{q}_f}{\mathbf{h}_f} \right) \right]. \end{aligned}$$

Il risultato mostra che il  $\mathbf{VAN}$  risulta positivo e crescente con la potenza frigorifera, ovvero che la soluzione geoassistita è sempre conveniente, se il risparmio totale attualizzato di esercizio:  $\frac{\mathbf{uTc}_k}{\mathbf{h}_f \mathbf{t}_{ek}}$ , è superiore alla differenza di costi fra la parte geotermica e quella meccanica:  $\left(1 + \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{t}_{em}}\right) \left( \mathbf{q}_g - \frac{\mathbf{q}_f}{\mathbf{h}_f} \right)$ , per la stessa, (o qualunque altra), potenza:  $\mathbf{Q}_f$ .



Circa il regime di funzionamento, l'investimento risulta pertanto

conveniente, ( $VAN > 0$ ), per:  $u > \frac{t_{ek} \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right) [q_g h_f - q_f]}{T c_k}$ ,

(per costo impianto geotermico inferiore a quello frigorifero convenzionale:  $q_g < \frac{q_f}{h_f}$ , l'investimento è comunque vantaggioso per qualunque valore del fattore di carico), mentre circa i costi di

impianto, per:  $q_g < \frac{u T c_k}{h_f t_{ek} \left(1 + \frac{a}{t_{em}}\right)} + \frac{q_f}{h_f}$ .

### 6 - ESEMPI DI APPLICAZIONE NUMERICA.

Assumendo i valori numerici:

$c_k$	= 2,78 10 <sup>-8</sup>	€/J;
$t_{ek} \sim t_{em}$	= 0,08	anni <sup>-1</sup> ;
$h_f$	$\sim h_{po} - 1 = 2,5$	
$a$	= 0,02	anni <sup>-1</sup> ;
$q_f$	= 0,2	€/W;
$q_g$	= 0,12	€/W,

si ottiene:  $VAN > 0$ , per:  $u > 1,14$  %, (100 h/anno), mentre posto:  $u = 11$  %, (8 h/giorno, per 4 mesi/anno), si ottiene:  $VAN > 0$ , per:  $q_g < 0,4658$  €/W.

\*\*\*\*\*