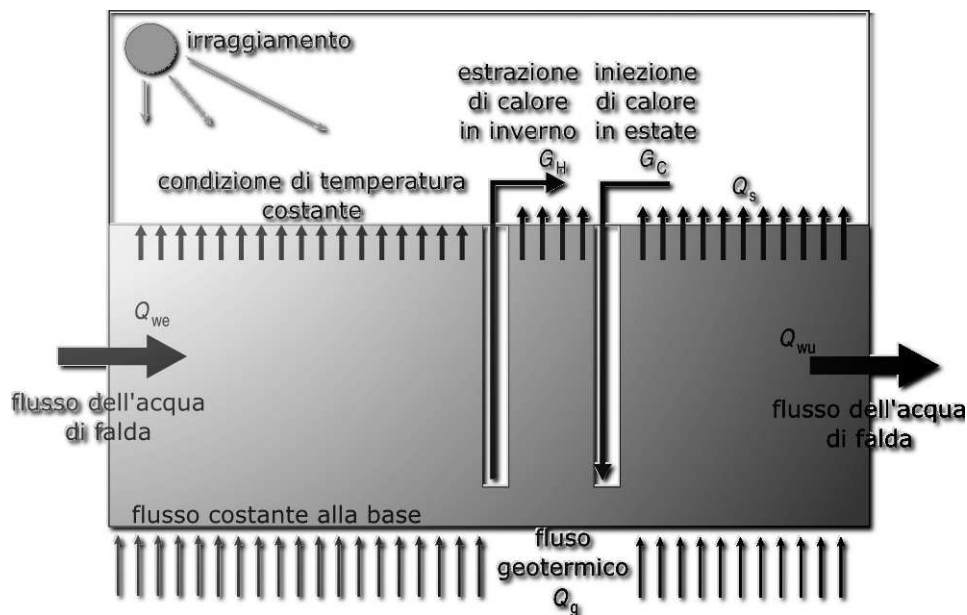




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria
Corso di laurea in Ingegneria Civile
Dipartimento IMAGE



Tesi di laurea
Nicola Rainiero

Aspetti legislativi e progettuali inerenti alla realizzazione degli impianti geotermici

Relatore
Prof. Ing. **Marco Favaretti**
Università di Padova

Correlatore
Ing. **Luigi Ferrari**
Provincia di Rovigo

A.A. 2008-2009

*Ogni cosa era più sua che di ogni altro perché
la terra, l'aria, l'acqua non hanno padroni
ma sono di tutti gli uomini, o meglio di chi sa farsi
terra, aria, acqua e sentirsi parte di tutto il creato*

Mario Rigoni Stern, "Stagioni"

Sommario

La redazione di questo documento cerca di inquadrare dal punto di vista geotecnico e ambientale i sistemi geotermici a bassa entalpia, offrendo una visione sintetica della materia e dei relativi pregi e difetti e approfondendo al contempo le teorie termogeologiche che ne stanno alla base.

La geotermia rappresenta una delle tante risorse rinnovabili che la natura offre in maniera costante e duratura, durante tutto l'arco dell'anno. Può essere impiegata come impianto di riscaldamento e raffrescamento per regolare il comfort delle nostre case ed ambienti di lavoro. Può abbattere l'uso delle fonti tradizionali di combustibile fossile e ridurre quindi le emissioni di CO₂ e polveri sottili, in ottemperanza agli obblighi presi con il protocollo di Kyoto e le norme comunitarie, nonché la recente certificazione energetica che dal 1° luglio 2009 è diventata obbligatoria per tutte le unità immobiliari, siano esse ad uso abitativo o lavorativo, di nuova costruzione o ristrutturazione.

In Italia i sistemi a bassa entalpia sono una tecnologia di recente applicazione e costituzione, essendo legati in maniera imprescindibile alle pompe di calore ed a una buona progettazione, che per poter assicurare un rendimento costante e duraturo nel tempo, deve essere rispettosa dell'ambiente circostante ed preservarlo il più possibile. Ovvero in questo caso più che in molti altri, l'interesse privato coincide con l'interesse pubblico.

Si ha quindi la necessità di fornire validi strumenti di analisi e di sostenibilità, per consentire a questo promettente mercato di svilupparsi in modo sano, corretto e rispettoso dell'ambiente. Per questo motivo si è cercato di analizzare la situazione in Paesi dove questa impiantistica è presente già da diversi decenni, come Svizzera, Germania e Stati Uniti; si sono considerati inoltre atti di convegno, bollettini, opere scientifiche che cercano di affrontare e caratterizzare aspetti chiave della tecnologia ed infine si è evidenziata la normativa italiana vigente in materia. Si sono quindi rilevati e confrontati gli aspetti vincolanti e costruttivi, le criticità tecniche ed i problemi aperti dalla gestione nel medio e lungo termine, adattando il tutto alla situazione idrogeologica della Provincia di Rovigo.

La tesi può essere un buon punto di partenza, rivolto non solo all'ente di controllo che è chiamato a rilasciare il permesso per l'utilizzo della risorsa sottosuolo, ma anche all'utente privato che intende predisporre impianti geotermici ed al professionista incaricato della progettazione e della realizzazione delle opere.

Allo stato attuale comunque manca una chiara ed armonica standardizzazione della materia anche a livello europeo ed ogni Paese, regione o provincia cerca a modo suo di favorirne la crescita, lasciando ampie libertà nelle concessioni, con il risultato di avere impianti mal progettati e con impatti negativi sull'ambiente o anche e purtroppo di ostacolarlo, con norme troppo vincolanti e ostruzionistiche che ne limitano lo sviluppo ed il perfezionamento.

Keyword: geotecnica, energia, geotermia, legge, sonde

Abstract

The editing of the present document is focused on low enthalpy geothermal systems studied from a geotechnical and environmental perspective. At the same time the document offers a concise vision of this subject with its merits and demerits analysing the thermogeological theories on which these systems are based.

During the year nature constantly and lastingly offers many renewable resources; geothermal energy is one of these resources which can be used as heating and cooling system to regulate the comfort in our houses and business places. Geothermal energy can reduce the use of traditional fossil fuels and thus reduce CO₂ emissions and the production of particulate matter as provided by the Kyoto Protocol undertakings and EU laws. Moreover from July 1st, 2009 it is compulsory for all buildings, either for domestic or business usage, new or renovated, to have an energy certification.

In Italy the use of low enthalpy systems is very new, as they absolutely need heat pumps and a good planning which must respect and preserve the natural surrounding environment as long as possible in order to assure a constant long-lasting performance. In this case, more than in many others, private interest agrees with the public one.

We need good analysis and governance's instruments to allow this promising market to develop correctly and respecting the environment. For this reason I have tried to analyse the situation in countries like Swiss, Germany and the USA where this type of plant engineering has been installed for several decades; I have also studied convention documents, bulletins and scientific works dealing with key aspects of this technology and finally I have highlighted the Italian law in force concerning this subject. Then I have pointed out and compared the binding and structural aspects, the technical difficulties and the opened problems issued from a middle or long-term management. The whole has been adapted to Rovigo's hydrogeologic situation.

The thesis can be a good starting point addressed not only to the authority, which has to allow the use of ground energy resource, but also to the private consumer who wants to install geothermal systems and to the planner responsible for works' planning and realization.

Nowadays there isn't a clear standardization of this subject. Therefore, on one hand every country, region or district encourages the geothermal systems' development by granting many permissions, with the result that there are bad planned systems with negative effects on the environment. On the other hand the local authorities may unfortunately limit any improvement and development with too much restrictive and obstructionist laws.

Keywords: geotechnical, energy, geothermal, regulation, borehole

Glossario	ix
Elenco dei simboli	xiii
Introduzione	1
1 Geotermia e termogeologia	3
1.1 Energia geotermica e calore del suolo	3
1.2 Geotermia	4
1.3 Un motore termico chiamato Terra	5
1.4 Sistemi geotermici	7
1.4.1 L'esempio di Larderello	9
1.4.2 L'utilizzazione della risorsa nel Veneto orientale	9
1.5 Classificazione in base all'entalpia	10
1.6 Termogeologia	11
1.6.1 Conduttività termica	12
1.6.2 Calore specifico	13
1.6.3 Diffusività termica	13
1.6.4 Misurazione	15
1.7 Trasmissione del calore nel terreno	15
1.7.1 Conduzione	16
1.7.2 Convezione	16
1.7.3 Irraggiamento	17
1.8 Temperatura del terreno	18
1.9 Bilancio energetico del serbatoio sottosuolo	19
1.9.1 Deriva termica del terreno	21
1.10 Analogie tra l'idrogeologia e la termogeologia	21
2 Sistema geotermico	23
2.1 Breve storia	23
2.1.1 Il mercato europeo	26
2.1.2 La situazione in Italia	28
2.2 Definizione e descrizione	29
2.2.1 Il fluido termovettore	30
2.2.2 La pompa di calore	31

2.2.3	Il sistema di distribuzione	34
2.3	Tipologie di impianti	36
2.3.1	Open loop	36
2.3.2	Closed loop	36
2.3.3	A sonde orizzontali	37
2.3.4	A sonde verticali	39
2.3.5	Ad espansione diretta	41
2.3.6	Fondazioni energetiche	42
2.3.7	Confronto finale	43
2.4	Pregi e difetti degli impianti geotermici	43
3	Open loop da falda sotterranea	45
3.1	Valutazioni preliminari	45
3.1.1	Difetti ricorrenti nella progettazione	48
3.2	Le falde sotterranee	48
3.2.1	Trasmissività idraulica	49
3.2.2	Tipi di falda	50
3.2.3	Prove di pompaggio	51
3.3	Caratteristiche dell'acqua	52
3.3.1	Scambiatori di calore	52
3.4	Caratteristiche del pozzo e sua realizzazione	54
3.4.1	Sistemi di perforazione	56
3.4.2	Completamento del pozzo	58
3.4.3	Le pompe	60
3.5	Pozzo di presa	61
3.5.1	Rendimento, profondità e abbassamento indotto	62
3.5.2	Pozzo e falda reale	64
3.5.3	Arredo idraulico	65
3.6	Smaltimento delle acque sotterranee	66
3.7	Pozzo di scarico	67
3.7.1	Arredo idraulico	68
3.8	Campo pozzi	68
3.8.1	Più pozzi di produzione	69
3.8.2	Sistema doublette	69
3.8.3	Feedback idraulico e migrazione di calore	70
3.8.4	Modellazione numerica delle falde	73
3.9	Criteri di dimensionamento dell'impianto	73
3.10	Sistemi ATES in equilibrio termico e inversione stagionale	74
3.11	Pregi e difetti dei sistemi idrotermici	76
4	Closed loop da sonde geotermiche verticali	77
4.1	Valutazioni preliminari	77
4.1.1	Difetti ricorrenti nella progettazione	79
4.2	Conduzione di calore nel sottosuolo	80
4.2.1	Il parallelo con l'idrogeologia	81
4.2.2	Ground Response Test	83
4.3	Soluzioni di Claesson e Eskilson	84
4.3.1	Fase iniziale d'estrazione di calore	85
4.3.2	Fase avanzata d'estrazione di calore (stato stazionario)	87
4.3.3	Calore disperso da una sonda geotermica	87
4.4	Sonde reali	88

4.4.1	Perforazione e completamento del foro	88
4.4.2	Cementazione del foro	89
4.4.3	Tipologie di scambiatori e posa	90
4.4.4	Fluido termovettore	92
4.4.5	Resistenza termica del foro	93
4.5	Collegamenti ai collettori	94
4.6	Collaudo dell'impianto	96
4.7	Criteri di dimensionamento dell'impianto	97
4.7.1	Vincoli progettuali	97
4.7.2	Piccoli impianti	99
4.7.3	Grandi impianti	101
4.8	Campo sonde	102
4.8.1	Interasse e disposizione delle sonde	104
4.8.2	Simulazione di carichi in raffreddamento	106
4.8.3	Simulazione del tempo	106
4.9	Sistemi UTES in equilibrio termico	106
4.9.1	Ipotesi progettuali	107
5	Valutazione geotecnica e ambientale	109
5.1	Analisi geotecnica	109
5.1.1	Gli approcci attuali	110
5.1.2	Sviluppi recenti	112
5.2	Possibile caratterizzazione geotecnica	112
5.2.1	Analogie con altre opere geotecniche	113
5.2.2	Stati limite per un sistema geotermico	115
5.3	Il contributo geotecnico	118
5.4	Analisi ambientale	118
5.4.1	Impatto idrogeologico	118
5.4.2	Impatto termogeologico	119
5.4.3	Il calore come inquinante	120
5.4.4	Condizioni termogeologiche preesistenti	121
5.5	Impatto per i sistemi open loop	122
5.5.1	Inquinamento termico delle acque sotterranee	122
5.5.2	Impatto sulla permeabilità e porosità dell'acquifero	124
5.6	Impatto per i sistemi closed loop	124
5.6.1	Rischi idrogeologici	124
5.6.2	Rischi termogeologici	126
5.6.3	Rischi chimici	128
5.7	Disattivazione dei pozzi e delle sonde	128
5.8	Vincoli sugli standard costruttivi	130
6	Normative, regolamenti, delibere	131
6.1	Quadro normativo nella Comunità Europea	131
6.1.1	Germania	131
6.1.2	Svizzera	132
6.1.3	Standardizzazione ed incentivazione	133
6.2	Quadro normativo italiano	134
6.2.1	Open loop	134
6.2.2	Closed loop	135
6.3	D.Lgs. 22/2010	136
6.4	Regione Veneto	137

6.4.1	Open loop	137
6.4.2	Closed loop	140
6.5	I sistemi di incentivazione e standardizzazione attuali	142
7	Possibilità geotermiche del Polesine	143
7.1	Inquadramento geografico	143
7.1.1	Considerazioni geomorfologiche	144
7.2	Inquadramento geologico	144
7.3	Inquadramento idrogeologico	145
7.3.1	Caratteristiche quantitative	146
7.3.2	Caratteristiche qualitative	146
7.4	Fattori di rischio idraulico ed idrogeologico	146
7.4.1	Subsidenza	148
7.5	Fattibilità geotermica nel territorio	149
8	Proposta per un iter autorizzativo	151
8.1	Competenze dell'ente di controllo	151
8.1.1	Pianificazione territoriale	152
8.1.2	Disciplinare	153
8.2	Competenze del committente	153
8.3	Domanda e relazione tecnica preliminare	154
8.3.1	Per sistemi open loop	154
8.3.2	Per sistemi closed loop	155
8.3.3	Compiti della direzione lavori	155
8.4	Relazione tecnica finale	156
8.4.1	Per sistemi open loop	156
8.4.2	Per sistemi closed loop	156
	Bibliografia	157

Assoggettabilità ambientale	La fase di verifica di assoggettabilità, detta anche screening, è finalizzata a valutare la possibilità di applicare la VAS ai piani e ai programmi di cui all'art. 6 comma 3 del D.lgs 152/2006 e s.m.i. secondo le modalità definite dall'art.12
active cooling	É un sistema di raffrescamento che sfrutta la differenza di temperatura con la sorgente esterna tramite PdC a funzionamento invertito
albedo	Per una determinata superficie è la frazione di luce o, più in generale, di radiazione incidente che viene riflessa indietro. L'esatto valore della frazione dipende, per lo stesso materiale, dalla lunghezza d'onda della radiazione considerata (dal latino albēdo, "bianchezza", da album, "bianco")
ATES	Aquifer thermal energy storage (stoccaggio termico dell'acquifero), è un sistema ottimizzato per stoccare grandi quantità di caldo (o freddo) in falde acquifere ad alta porosità e basso gradiente naturale per poi rilasciarlo nella stagione successiva invernale (o estiva)
BHE	É l'acronimo di borehole heat exchanger (traduzione letterale "scambiatore di calore di un foro di trivellazione"), non è altro che la sonda geotermica verticale

closed loop	Sono i sistemi a circuito chiuso che utilizzano un fluido termovettore intermedio circolante in un sistema di tubi come mezzo di scambio fra il terreno e la PdC
EGEC	Consiglio di Energia Geotermico Europeo (European Geothermal Energy Council), è un'associazione internazionale che ha come obiettivo primario quello di promuovere l'uso dell'energia geotermica
entalpia	Funzione di stato di un sistema che esprime la quantità di energia che esso può scambiare con l'ambiente esterno; viene usata per esprimere l'energia termica dei fluidi e fornisce un'idea del relativo valore
free cooling	Conosciuto anche come "geo-cooling", letteralmente raffreddamento libero, è un sistema di raffrescamento che sfrutta la sola differenza di temperatura con la sorgente esterna tramite uno scambiatore di calore
GRT	Ground Response Test o anche Thermal Response Test è una prova in situ che misura le proprietà termiche del sottosuolo, accoppiandole alla resistenza termica di una sonda pilota che poi sarà integrata nell'impianto geotermico stesso
GSHP	Ground Source Heat Pump, letteralmente pompa di calore con sorgente nel sottosuolo, è un termine generico che descrive tutto l'impianto geotermico a bassa entalpia
GWHP	Groundwater Heat Pump, letteralmente pompa di calore con sorgente nella falda sotterranea, è un termine che descrive l'impianto idrotermico
IGSHPA	International Ground Source Heat Pump Association è l'Associazione di maggior riferimento a livello mondiale della tecnologia legata alle pompe di calore geotermiche ed ha sede in Oklahoma USA

legge di Wien	Viene detta anche legge dello spostamento di Wien, è una legge sperimentale che esprime la relazione fra la radiazione emessa da un corpo nero e da una massa generica, la temperatura e la lunghezza d'onda massima. Fu scritta dal fisico tedesco Wilhelm Wien nel 1893
open loop	Sono i sistemi a circuito aperto che utilizzano l'acqua di falda locale o acqua in superficie come mezzo di scambio termico diretto
PdC	Pompa di Calore, è una macchina in grado di trasferire calore da un ambiente a temperatura più bassa ad un altro a temperatura più alta; essa opera con lo stesso principio del frigorifero e del condizionatore d'aria
plutone	É un corpo roccioso di dimensioni e forma estremamente varie, costituito da rocce ignee intrusive derivanti dal consolidamento di un magma all'interno della crosta terrestre
PTCP	Il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale rappresenta il principale strumento di ascolto e di governo a disposizione della comunità e costituisce lo strumento di pianificazione che delinea gli obiettivi e gli elementi fondamentali dell'assetto del territorio provinciale, in coerenza con gli indirizzi per lo sviluppo socio-economico e con riguardo alle prevalenti vocazioni, alle sue caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche, paesaggistiche e ambientali
SGV	É l'acronimo di sonda geotermica verticale
UTES	Underground thermal energy storage (stoccaggio termico del sottosuolo), è un sistema ottimizzato per stoccare grandi quantità di caldo (o freddo) in campi sonde verticali per poi rilasciarlo nella stagione successiva invernale (o estiva)

VDI

Associazione degli Ingegneri Tedeschi (Verein Deutscher Ingenieure), le linee guida che pubblicano e vengono poi adottate sono il frutto di un lavoro collettivo, tecnico e scientifico e rappresentano lo stato dell'arte per una determinata tecnologia, ogni 5 anni vengono controllate ed eventualmente aggiornate

Elenco dei simboli

α	diffusività termica in $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
λ	conducibilità termica in $\frac{\text{W}}{\text{m K}}$
Re	numero di Reynolds è una grandezza adimensionale usata in fluidodinamica, proporzionale al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosi, in una delle sue forme più comuni viene espresso in $\frac{\rho v d}{\mu}$, dove ρ , v e μ sono rispettivamente la densità, la velocità e la viscosità dinamica del fluido, mentre d è la sua lunghezza caratteristica
kWh	kilowattora, l'energia in unità di misura elettriche. Se per esempio si possiede una stufa elettrica della potenza di 2 kW e la si tiene accesa per 5 ore, si consumeranno $2 \cdot 5 = 10$ kWh
q	flusso termico in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
W	watt, l'unità di misura della potenza, cioè l'energia o il lavoro consumato nell'unità di tempo, in $\frac{\text{J}}{\text{s}} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$
W_e	watt elettrici
W_t	watt termici
COP	Coefficient of Performance, letteralmente coefficiente di prestazione, si utilizza per misurare l'efficienza di una pompa di calore ed è definito come rapporto tra la quantità di calore trasportato e la quantità di energia spesa per trasportarlo; è adimensionale
GWP	Global Warming Potential è la misura di quanto un dato gas serra contribuisce all'effetto serra. Questo indice è basato su una scala relativa che confronta il gas considerato con un'uguale massa di biossido di carbonio CO_2 , il cui GWP è per definizione pari a 1. Ogni valore di GWP è calcolato per uno specifico intervallo di tempo
K	conducibilità termica in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, descrive la quantità d'acqua che può fluire in un terreno
ODP	Ozone Depletion Potential di un composto chimico è il valore relativo di degrado della fascia di ozono che esso può causare. Come standard è assunto il trichlorofluoromethane (R-11), cui viene dato il valore di ODP pari a 1. Il Chlorodifluoromethane (R-22), ad esempio, ha 0,05 ODP .

- PCI* il potere calorifico inferiore (indicato anche con le sigle *Hi* oppure *LHV*), è la quantità di calore che si rende disponibile per effetto della combustione completa a pressione costante della massa unitaria del combustibile, quando i prodotti della combustione siano riportati alla temperatura iniziale del combustibile e del comburente (definizione del "potere calorifico superiore") diminuito del calore di condensazione del vapore d'acqua durante la combustione; si misura in J
- Q* quantità di calore in W
- S₀* immagazzinamento specifico, è adimensionale e descrive quanta acqua viene rilasciata dai pori o dalle fratture in una unità di volume di terra o roccia per 1 m di carico idraulico
- SPF* Seasonal Performance Factor, letteralmente fattore di performance stagionale, misura l'efficienza di una pompa di calore durante i due cicli di riscaldamento e raffreddamento, calcolando il valore medio dei *COP*, i coefficienti di prestazione; è adimensionale
- Stm³* è il metro cubo standard, indica la quantità di gas necessaria ad occupare un metro cubo di volume a 15 °C di temperatura e 1,013 25 bar assoluti (pressione atmosferica sul livello del mare); si misura in m³
- T* temperatura in K o °C
- T₀* trasmissività idraulica in $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- Z* portata è misurata in $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, viene anche espressa in $\frac{\ell}{\text{s}}$ (per l'acqua $1 \ell = 10^{-3} \text{ m}^3$)
- S_C* calore specifico in $\frac{\text{J}}{\text{K}}$
- S_{VC}* calore specifico volumetrico in $\frac{\text{J}}{\text{K m}^3}$

Oggetto

Nell'immaginario comune, il calore del terreno viene idealizzato con vulcani, sorgenti termali, fumarole ed altre manifestazioni superficiali, legate alla classica «alta entalpia» e in particolari e ristrette zone del globo sfruttate, per la sola produzione di elettricità e teleriscaldamento. Si trascurano così le ampie possibilità che la «bassa entalpia» del sottosuolo, ovunque e senza limitazioni, può offrire per la climatizzazione degli edifici, questo grazie all'aiuto delle pompe di calore.

Questa impiantistica è molto conosciuta ed apprezzata all'estero, soprattutto in Svizzera, Svezia e Germania per restare nel contesto europeo e negli Stati Uniti in ambito extracomunitario. Tanto è vero che la definizione di energia geotermica fornita dalle VDI 4640 tedesche e adottata dall'EGEC, la descrive semplicemente come «l'energia immagazzinata sotto la superficie della terra solida», inglobando la doppia possibilità di utilizzazione per la produzione di calore ed elettricità.

In Europa è la Svezia a guidare il mercato col maggior numero di GSHP o impianti geotermici pro capite (circa 140 000), mentre la Svizzera ha la maggiore densità (1,3 ogni km²). Nel corso degli ultimi anni il mercato geotermico a bassa entalpia ha mostrato un aumento consistente (ad esempio la Svizzera: circa il 20 % all'anno per 5 anni, la Germania: oltre il 100 % nel 2006) [Sanner, 2009]. Le ragioni di questo crescente interesse sono probabilmente imputabili alle pompe di calore, che rappresentano la tecnologia più efficiente per quanto riguarda i requisiti di energia primaria, con un risparmio del 30 ÷ 35 % rispetto alla caldaia ad olio combustibile o gas e 20 ÷ 35 % rispetto a quella a condensazione a gas. Inoltre l'uso di pompe di calore elettriche comporta l'abbattimento delle emissioni inquinanti, dal momento che queste non si verificano più nella sala tecnica, ma principalmente nelle moderne centrali dotate di costosi impianti di depurazione dei gas di scarico. Pertanto, viene assicurato un importante contributo alla riduzione delle emissioni in zone residenziali densamente popolate [VDI, 2000]. La situazione del mercato è molto positiva anche negli Stati Uniti, con più di 1 000 000 di pompe di calore presenti nel 2008 ed un incremento del 20 % rispetto al 2007 [National Renewable Energy Laboratory, 2009].

In Italia invece la diffusione su larga scala di tale tecnologia è avvenuta solo nel corso degli ultimi sei anni, diventando tumultuosa negli ultimi tre, restando però sempre confinata ad un mercato di nicchia. Gli operatori del settore hanno compreso in pieno le potenzialità economiche e ambientali, mutuando dalle esperienze all'estero. Quello che attualmente frena lo sviluppo delle PdC geotermiche può essere sintetizzato in tre mancanze: di riferimenti certi

(per la Pubblica Amministrazione e per i progettisti, installatori e proprietari di immobili), di competenze tecniche e di sensibilità per le problematiche ambientali.

Obiettivi e contenuti

Un argomento poco conosciuto, come la geotermia a bassa entalpia, necessita prima di tutto di essere esaminato e descritto, in modo sintetico e chiaro, cercando anche di chiarire le molte incertezze lessicali che accompagnano la giovane materia. Si sono trattati quindi gli aspetti principali degli impianti, le proprietà termiche dei terreni e la diffusione del calore nel sottosuolo. Parte del lavoro è stata dedicata al dimensionamento iniziale delle due tipologie principali: open loop da falda sotterranea e closed loop da sonde verticali. Si è investigata la componente legata al terreno, per fornire una visione dettagliata e critica della tecnologia e per agevolare la comprensione delle problematiche ambientali connesse.

Si sono quindi descritti i molteplici aspetti che possono caratterizzare e segnare in modo indelebile la risorsa sotterranea ed i rischi collegati all'ambiente. In particolare:

- aspetti geotecnici;
- aspetti idrogeologici;
- aspetti costruttivi e materiali idonei.

È stata analizzata la normativa italiana vigente e gli iter delle principali province, marcando gli aspetti positivi e negativi. Si sono inoltre studiate le soluzioni previste in altri Stati, anche in questo caso ci si è soffermati sulle linee guida dei Paesi che hanno sviluppato un'alta concentrazione di impianti geotermici, rimarcandone i pro ed i contro.

Si è caratterizzata poi l'idrogeologia della Provincia di Rovigo, sicuramente non esaustiva per la mancanza di uno studio sistematico e finalizzato alla tematica trattata, ma utile a far capire le criticità e le problematiche legate al sottosuolo e alle falde sotterranee presenti.

Con i risultati trovati, si sono quindi evidenziate delle semplici linee guida per la realizzazione di sistemi geotermici sostenibili.

Metodo

Il criterio seguito per comporre questo testo, si è basato principalmente sullo studio e sul confronto critico della letteratura esistente. Essa comprende manuali, pubblicazioni, atti di convegno e bollettini presenti per lo più in internet e nelle sempre maggiori associazioni che raggruppano enti, progettisti ed amministrazioni, italiane e soprattutto straniere.

Da questo materiale di base, dallo studio dei due impianti geotermici più rappresentativi e dalle osservazioni prodotte e rimarcate da progettisti ed operatori del settore, si sono potuti ricavare gli impatti ambientali derivati da una cattiva progettazione e messa in opera dell'impianto, ma anche i materiali più idonei e le criticità che spesso accompagnano le prescrizioni esistenti.

Lo studio in oggetto si è articolato quindi in due fasi distinte:

- I. bibliografica: comprendente, da un lato la raccolta dei dati e delle informazioni tecniche ed idrogeologiche, dall'altro l'indagine critica dal punto di vista ambientale e tecnico;
- II. analitica: caratterizzata dalla stesura delle norme e linee guida, sulla base di documentazione tedesca, elvetica e statunitense (realtà dove la penetrazione nel mercato è ampia e ben sviluppata) adattandola alla normativa italiana vigente ed alle osservazioni poste dagli operatori del settore, frutto di convegni ed incontri pubblici.

Geotermia e termogeologia

Un impianto geotermico veicola varie forme di calore, una piccola parte di queste deriva proprio dall'interno della Terra, mentre la maggior parte è frutto dell'attività dell'uomo e della variazione della temperatura esterna. Si cercherà allora di introdurre i concetti chiave di geotermia e termogeologia, discipline che studiano la sorgente ed il trasporto del calore, rispettivamente a grande e limitata profondità. Si partirà quindi dalla più classica e familiare geotermia, risorsa accessibile solo in alcune e limitate località geologiche o a grandissima profondità, un argomento che verrà trattato a grandi linee, con lo scopo di chiarire la meccanica e la natura del fenomeno e fugare eventuali ambiguità. Saranno evidenziati inoltre i concetti base, gli utilizzi, il sito di Larderello in Toscana e le utilizzazioni in Veneto.

Si passerà poi alla termogeologia, con lo studio delle teorie che permettono la conoscenza, il movimento e lo sfruttamento del calore a bassa entalpia nella geosfera poco profonda, ovvero dal piano campagna fino a circa 200 m di profondità. Si approfondiranno i parametri ed i concetti base per capire come funziona il "serbatoio di calore terra" e i parametri più importanti che lo caratterizzano, aspetti fondamentali per una corretta progettazione degli impianti geotermici.

La distinzione operata tra geotermia e termogeologia può far storcere il naso a molti specialisti, ma ha raggiunto un livello di maturità per completezza e sviluppo teorico che la distinguono nettamente dalla geotermia classica, inoltre presenta alcune analogie con l'idrogeologia che regola lo studio della presenza, il movimento e lo sfruttamento delle acque sotterranee.

1.1 Energia geotermica e calore del suolo

Nella consultazione e ricerca di materiale utile per la stesura della tesi, si è trovato un ampio e alle volte improprio uso di termini, definizioni e acronimi per la descrizione di questa materia ed impiantistica. Molte parole alle volte entrano in conflitto tra loro e possono generare confusione e equivochi che è bene cercare di chiarire. Ciò è dovuto principalmente alla giovane età di questa materia e alle diverse discipline che se ne interessano, lavorando per compartimenti stagni senza aver ancora prodotto uno standard univoco. Basti pensare alla definizione di bassa entalpia che viene applicata agli impianti per il comfort domestico, intendendo temperature dell'ordine di 30°C, quando invece nel campo geotermico classico la stessa definizione si riferisce a molteplici teorie con diverse temperature (minori di 90°C o 190°C) a seconda degli studiosi consultati (tabella 1.1 nella pagina 11).

Per ovviare a questo inconveniente si è cercato di distinguere la classica geotermia ad alta temperatura da quella che viene utilizzata per regolare la temperatura degli edifici, normalmente a bassa temperatura. Si utilizzeranno anche termini entrati nell'uso tecnico comune e che sono accompagnati dalla parola geotermico, per esempio con impianti geotermici ci si riferirà agli impianti che fanno uso delle risorse di calore del suolo per riscaldare o

raffrescare gli edifici. Fermo restando che solo in questo capitolo verrà introdotta e descritta sommariamente la geotermia classica per completezza e per far comprendere la provenienza di parte del calore che fa parte integrante della temperatura del suolo.

Quindi per *energia geotermica* e *geotermia* ci si riferirà alla energia ad alta temperatura che:

- deriva dal flusso di calore dall'interno profondo della terra;
- si trova o in pozzi molto profondi o in certe località specifiche o in entrambi.

Mentre per *calore del suolo* o *termogeologia* si intenderà il calore a bassa entalpia che:

- si trova ovunque nel sottosuolo poco profondo;
- può contenere una parte di energia genuina geotermica proveniente dal flusso di calore della terra, ma in genere sarà dominato dall'energia solare che viene assorbita e accumulata nel sottosuolo.

La termogeologia viene associata alla valutazione della fattibilità di questi impianti e comprende valutazioni nelle varie discipline delle scienze ambientali, quali fisica del trasporto di calore, microbiologia, chimica fisica dei contaminanti, idrogeologia ed ingegneria idraulica e ambientale. La termogeologia è una tipica materia in cui un approccio multidisciplinare è, in ultima analisi, indispensabile e fruttuoso.

1.2 Geotermia

Il termine *geotermia* deriva dal greco "geo"="terra" e "thermòs"="calore" ed il significato letterale è "calore della Terra". Per *energia geotermica* si intende quella contenuta al suo interno, sotto forma di calore, che si dissipa con regolarità verso la superficie del globo e che può o potrebbe essere estratta dal sottosuolo e sfruttata dall'uomo. Solo tra il sedicesimo ed il diciassettesimo secolo, quando furono scavate le prime miniere profonde qualche centinaio di metri, ci si rese conto, da semplici sensazioni fisiche, che la temperatura del sottosuolo aumenta con la profondità. Quindi in parole povere si comprese l'esistenza di un gradiente geotermico, che come afferma la Legge di Fourier, regola la trasmissione di calore attraverso un corpo nella direzione in cui la temperatura cresce.

A partire dal 1870 il regime termico della Terra è stato studiato con metodi scientifici moderni, però soltanto nel ventesimo secolo, dopo la scoperta del ruolo svolto dal calore radiogenico, è stato possibile comprendere pienamente i fenomeni come il bilancio termico della Terra e ricostruire la storia termica del pianeta. Tutti i moderni modelli termici della Terra, infatti, tengono conto del calore prodotto in continuazione dal decadimento degli isotopi radioattivi a lunga vita dell'uranio (U^{238} , U^{235}), del torio (Th^{232}) e del potassio (K^{40}), presenti nell'interno del globo terrestre [Lubimova, 1968]. A quella radiogenica, si aggiungono, in proporzioni non esattamente definite, altre fonti di calore, come il calore primordiale del pianeta. Comunque, teorie e modelli termici realistici non sono stati disponibili sino agli anni '80, quando è stato dimostrato che non c'è equilibrio tra il calore prodotto dal decadimento degli isotopi radioattivi presenti nell'interno della Terra ed il calore disperso dalla sua superficie verso lo spazio e che il nostro pianeta si sta lentamente raffreddando.

Da molte misurazioni effettuate è emerso che il *gradiente termico* cambia da località a località, sebbene valori tipici si trovino in un range compreso tra $2 \div 3,5^\circ C$ ogni 100 m. Di conseguenza se la temperatura nei primi $10 \div 15$ m sotto la superficie corrisponde in prima battuta alla temperatura media annua dell'aria esterna (in genere $15^\circ C$), si può prevedere che la temperatura sia $65 \div 75^\circ C$ a 2000 m di profondità, $90 \div 105^\circ C$ a 3000 m e via di seguito per alcune migliaia di metri. Vi sono comunque vaste regioni nelle quali il valore del gradiente

geotermico si discosta sensibilmente da quello medio, in aree in cui il basamento rigido sprofonda e si forma un bacino che si riempie di sedimenti geologicamente molto giovani, il gradiente geotermico può essere anche inferiore a 1°C ogni 100 m. Viceversa in certe aree geotermiche il gradiente può raggiungere valori superiori a dieci volte quello normale e si parla di «sistemi geotermici» o anche «anomalie geologiche».

La differenza di temperatura tra le zone profonde più calde e quelle superficiali più fredde, dà origine ad un *flusso di calore* dall'interno verso l'esterno della Terra, tendente a stabilire condizioni di uniformità che difficilmente saranno raggiunte. Il flusso di calore terrestre medio è di $65 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ nelle aree continentali e $101 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ nelle aree oceaniche, con una media ponderale globale di $87 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$. Questi valori sono basati su 24774 misure eseguite in 20201 siti che coprono il 63% circa della superficie terrestre [Pollack *et al.*, 1993].

1.3 Un motore termico chiamato Terra

La Terra in termini geochimici e mineralogici può essere vista come composta da (lo schema è riportato in figura 1.1 nella pagina successiva):

1. un nucleo interno solido di una lega metallica di Fe-Ni con un raggio di 1370 km;
2. un nucleo fisso esterno di Fe-Ni di spessore 2100 km;
3. un mantello fuso esterno di composizione ultra-basica ricca di Fe e Mg, la parte superiore è prevalentemente composta dai due tipici minerali (olivina e pirosseno) che costituiscono la periodotite;
4. una crosta molto sottile (il bordo situato tra la crosta ed il mantello si chiama *discontinuità di Moharovicic*).

Stacey e Loper [1988] hanno ipotizzato un bilancio termico nel quale il flusso di calore totale dalla superficie terrestre è valutato in $42 \cdot 10^{12} \text{ W}$ (conduzione, convezione e radiazione). Di questa grandezza, $8 \cdot 10^{12} \text{ W}$ provengono dalla crosta terrestre, che rappresenta soltanto il 2% del volume totale della Terra, ma è ricca di isotopi radioattivi, $32,3 \cdot 10^{12} \text{ W}$ derivano dal mantello, che è l'82% del volume totale della Terra, e $1,7 \cdot 10^{12} \text{ W}$ provengono dal nucleo, che costituisce il 16% del volume totale del pianeta e non contiene isotopi radioattivi. La stima del calore totale, assumendo una temperatura superficiale media di 15°C , è dell'ordine di $12,6 \cdot 10^{24} \text{ MJ}$ mentre il calore contenuto nella crosta è dell'ordine di $5,4 \cdot 10^{21} \text{ MJ}$ [Armstead e Schroeder, 1983].

Tutta questa energia racchiusa all'interno della Terra e anche le manifestazioni tangibili e visibili, quali i vulcani, i geysers, le fumarole e le sorgenti calde, possono essere spiegate con la *teoria della tettonica a placche* che paragona la Terra ad un motore termico. Considerando il dettaglio della figura 1.1 nella pagina seguente, l'astenosfera (zona situata nella parte alta del mantello, appena al di sotto della litosfera) ha un comportamento simile a quello di un fluido viscoso (con fenomeni che però si sviluppano in milioni di anni) e si può ipotizzare che qualche decina di milioni di anni fa, si siano innescate vere e proprie celle di convezione. I moti convettivi con un lento movimento verso l'alto hanno interessato le rocce profonde fuse più calde e meno dense, alimentate dal decadimento degli isotopi radioattivi e dal calore proveniente dalle parti più profonde del pianeta. Questo materiale incandescente spinge la litosfera verso l'alto fino a fratturarla, con la fuoriuscita di rocce parzialmente fuse e in prossimità dei rami ascendenti delle celle convettive.

Le *dorsali* si sono formate e si stanno ancora consolidando grazie a questo meccanismo, soprattutto nelle zone dove la crosta è più sottile, ovvero per oltre $6 \cdot 10^5 \text{ km}$ sotto gli oceani,

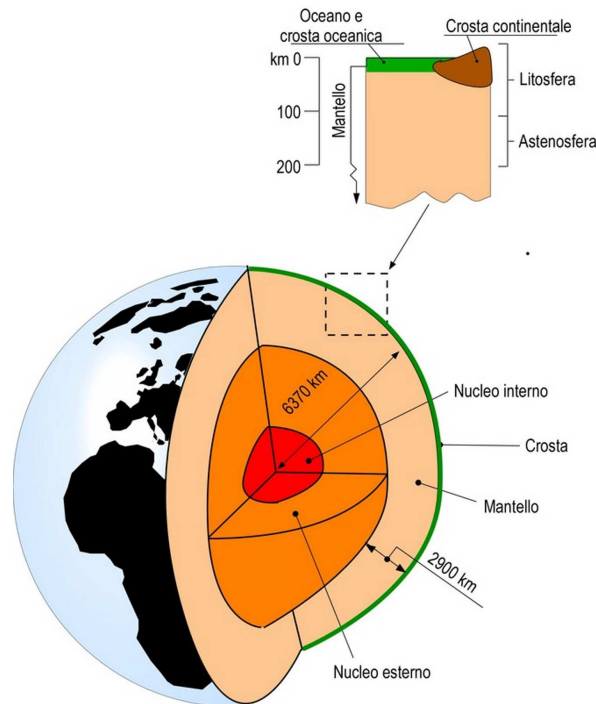


Figura 1.1: Schema della struttura interna della Terra: crosta, mantello e nucleo. A destra in alto, un dettaglio della crosta e della parte superiore del mantello [Fanelli e Dickson, 2004]

in alcune zone (Azzorre, Islanda) e talvolta insinuandosi tra i continenti come sul mar Rosso. Ciò implica la formazione di nuova crosta e un effetto di trascinamento dovuto ai due flussi, che provoca l'allontanamento dei fondali oceanici posti sui due lati delle dorsali che vengono così tagliate ortogonalmente da enormi fratture chiamate *faglie trasformi*. Tuttavia in altre parti del pianeta la formazione di nuova litosfera lungo le dorsali e l'espansione dei fondi oceanici si compensa con una riduzione o assorbimento della stessa in egual misura, si parla quindi di *zone di subduzione* (le maggiori si trovano in corrispondenza delle grandi fosse oceaniche). Per agevolare la compressione di quanto descritto si può fare riferimento alla figura 1.2.

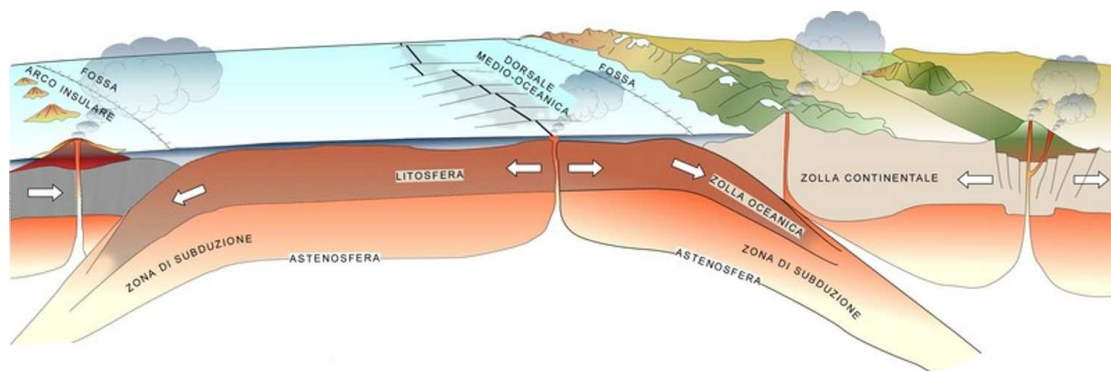


Figura 1.2: Il meccanismo della tettonica a zolle [Fanelli e Dickson, 2004]

Le *placche litosferiche* o *zolle* disegnano il reticolato che suddivide la Terra in base alle dorsali, faglie trasformi e alle zone di subduzione presenti. Queste zolle si muovono di qualche centimetro all'anno e ai loro margini corrispondono zone di fragilità e di forte fratturazione della crosta, caratterizzate da una elevata sismicità, dalla presenza di molti vulcani e ovviamente da un flusso di calore elevato. Nella figura 1.3 a fronte si può constatare

come i più importanti sistemi geotermici si trovino nei pressi dei margini delle zolle crostali.



Figura 1.3: Zolle crostali, dorsali, fosse oceaniche, zone di subduzione e campi geotermici. Le frecce indicano la direzione del movimento delle zolle. (1) Campi geotermici che producono elettricità; (2) dorsali interrotte dalle faglie trasversi (fratture trasversali); (3) zone di subduzione, nelle quali la litosfera volge in basso verso l'astenosfera, dove fonde [Fanelli e Dickson, 2004]

1.4 Sistemi geotermici

Inizialmente si consideravano solo le risorse idrotermali munite di un serbatoio in cui il calore si propaga per convezione a seguito dei moti convettivi dei fluidi contenuti e che possono essere ad acqua dominante (con contenuto energetico inferiore) o a vapore dominante (con contenuto energetico molto elevato).

Con le successive scoperte ed indagini in campo minerario e petrolifero si sono trovati sistemi geotermici formati in regioni con gradiente geotermico normale o poco più alto e, soprattutto, nelle regioni prossime ai margini delle zolle crostali, dove il valore del gradiente geotermico può essere anche notevolmente superiore a quello medio. Nel primo caso questi sistemi hanno temperature basse, di solito non più di 100 °C a profondità economicamente utili, mentre nel secondo caso si può avere una vasta gamma di temperature, da basse sino ad oltre 400 °C.

Per la definizione di sistema geotermico, Hochstein [1990] lo approssima come un sistema acquoso convettivo che, in uno spazio confinato dalla parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore da una sorgente termica al luogo, in genere la superficie, dove il calore stesso è assorbito (disperso o utilizzato).

In genere è formato da tre elementi:

la sorgente può essere un'intrusione magmatica a $T > 600\text{ °C}$, posta a profondità relativamente piccole comprese in $5 \div 10\text{ km}$, oppure il normale calore della terra, ma *deve essere sempre naturale*;

il serbatoio un complesso di rocce permeabili o fratturate artificialmente, nel quale i fluidi possono circolare, assorbendo il calore;

il **fluido** è quasi sempre acqua meteorica in fase liquida o vapore, in dipendenza dalla sua pressione e temperatura, in alcuni casi l'acqua trascina con sé sostanze chimiche e gas come CO_2 , H_2 , S ed altri, può anche essere immessa artificialmente.

Descrivere le leggi e i meccanismi che regolano la convezione dei fluidi alla base di questi sistemi non è affatto semplice ed esula dagli scopi di questo testo, poiché la costruzione del modello reale è molto complessa, richiede una vasta esperienza e può essere il frutto di varie combinazioni: geologiche, fisiche e chimiche.

I sistemi idrotermali sono finora gli unici ad essere sfruttati a livello industriale per la produzione di energia elettrica. Esistono poi altri tre tipi di sistemi ancora in fase di studio o di sperimentazione più o meno avanzata:

- i sistemi geopressurizzati, nei quali non si ha alcuna comunicazione con la superficie e in cui il calore si propaga per conduzione;
- i sistemi geotermici in rocce calde e secche, che non contengono in origine neanche il fluido, ma che possono essere artificialmente fratturate dando luogo ad un serbatoio geotermico artificiale;
- i sistemi magmatici dove si sfrutta l'idea di estrarre energia da magmi a profondità accessibile ai mezzi di perforazione.

A seconda delle temperature raggiunte dalle perforazioni, gli utilizzi del calore geotermico possono essere diversi: dalla balneoterapia, all'utilizzo in agricoltura (serre) o piscicoltura, al riscaldamento di edifici mediante perforazioni associate a pompe di calore, alla produzione di energia elettrica. Il classico diagramma di Lindal [1973] mostra i possibili usi dei fluidi geotermici alle varie temperature (in figura 1.4 una rielaborazione ad opera di Fanelli e Dickson [2004]) e si dimostra ancora attuale, con l'aggiunta però della generazione di elettricità con cicli binari e del condizionamento di ambienti mediante pompe di calore.

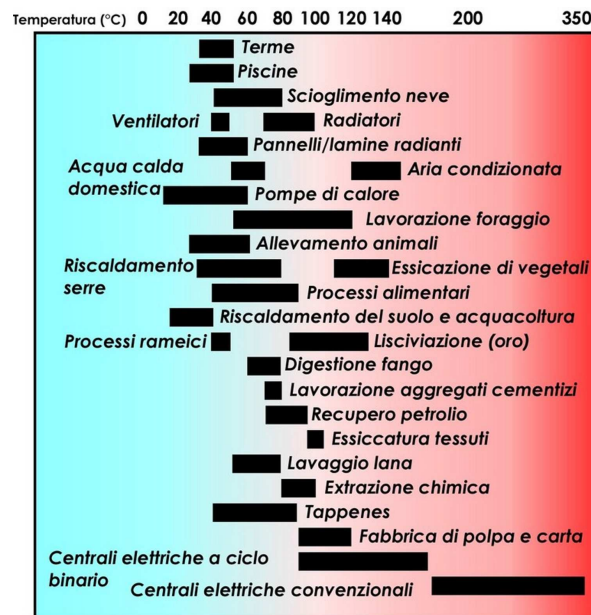


Figura 1.4: Diagramma con l'utilizzazione dei fluidi geotermici (derivato da Lindal [1973]) [Fanelli e Dickson, 2004]

1.4.1 L'esempio di Larderello

Un sistema geotermico molto conosciuto e sfruttato nel corso della storia fino ai giorni nostri è il sito di Larderello (PI) in Toscana, che può essere visto come il più importante precursore di tutti gli altri. L'area è rinomata per la sua attività vulcanica freatica che periodicamente si manifesta con eruzioni di vapore, l'ultima degna di nota risale al 1282, quando dal lago di Vecchienna sono fuoriuscite ceneri e blocchi di roccia. La sorgente geotermica secondo GVP [2006] può essere legata alla presenza di un plutone di granito situato ad una profondità modesta, sotto una copertura di rocce sedimentarie e metamorfiche.

Il fluido geotermico di Larderello è storicamente noto per il suo prezioso contenuto mineralogico. Le acque ricche di zolfo furono utilizzate dagli antichi Romani per la balneazione, più tardi vennero estratte da pozzi poco profondi per la produzione di acido bórico. A quel tempo la località era conosciuta come Montecerboli, ma la sua denominazione attuale la si deve al francese François de Larderel che nel 1827 fu il primo industriale a sfruttare il vapore geotermico per agevolare l'estrazione del boro dai calderoni di fango vulcanico, al posto del legname come combustibile che si stava drammaticamente esaurendo. Questa utilizzazione meccanica ha attirato l'attenzione verso le località termali per il loro potenziale idrochimico. Grazie a questa agevolazione l'industria chimica di Larderello detenne tra il 1850 e il 1875 il monopolio della produzione di acido bórico in Europa e tra il 1910 ÷ 1940 si avviò l'utilizzazione del vapore a bassa pressione per il riscaldamento di edifici residenziali, industriali e delle serre.

Fu a partire poi dal 1904, anno in cui si fece il primo tentativo di produrre elettricità dall'energia geotermica e soprattutto dal 1911 con la costruzione della prima centrale elettrica che Larderello mostrò a tutto il mondo il valore dell'energia geotermica e segnò di fatto l'inizio di una nuova forma di sfruttamento di questa risorsa che da allora cominciò a diffondersi in molti Paesi. A fine 2006 la potenza installata in Italia è stata di 810,5 MW_e, con la generazione di $5,5 \cdot 10^9$ kWh_{ea}⁻¹ lordi che rappresentano l'1,7% di tutta l'elettricità prodotta in Italia in quell'anno ed il 25% del consumo in Toscana, pari all'energia elettrica richiesta da 2,5 milioni di famiglie [UGI, 2007].

Lo sviluppo di questo sito geotermico offre uno spunto interessante sulle diverse priorità storiche: la produzione di minerali prima, l'utilizzazione per il lavoro meccanico poi ed infine il riscaldamento degli ambienti. Infatti in questi ultimi anni i combustibili fossili non si trovano più a buon mercato e ci si sta orientando sempre più verso impianti di riscaldamento sostenibili, economici e poveri di carbonio.

1.4.2 L'utilizzazione della risorsa nel Veneto orientale

Nel Veneto i rilievi eseguiti dall'Agip nel 1967 per la ricerca di idrocarburi hanno permesso di tracciare le isoterme a 2000 m di profondità (figura 1.5 nella pagina seguente) evidenziando, oltre all'area dei Colli Euganei, la fascia pianeggiante che va dalla laguna di Venezia a ovest fino a Monfalcone e delimitata a nord dalla fascia delle sorgive che corre da Treviso a Palmanova, parallelamente alla costa ad una distanza di circa 35 ÷ 40 km da essa. In questa zona sono stati realizzati diversi impianti che utilizzano il calore delle falde profonde, con temperature tra i 30°C ÷ 45°C, per il riscaldamento di edifici ed ultimamente si cominciano anche a sfruttare le proprietà chimico-fisiche dell'acqua per uso termale.

La peculiarità di questo sistema geotermico è dovuta principalmente alla massiccia presenza di acque sotterranee profonde con un bacino ipotizzato empiricamente di $2,5 \cdot 10^9$ m³. A questo va aggiunto il riscaldamento delle rocce e degli strati più profondi che si è formato nella piattaforma mesozoica-friulana (argomento che sarà approfondito nel capitolo 7) in seguito ai cedimenti e alle frammentazioni dovute ai movimenti delle placche continentali, provocando in alcune zone incrinature e favorendo una successiva formazione e sovrappo-

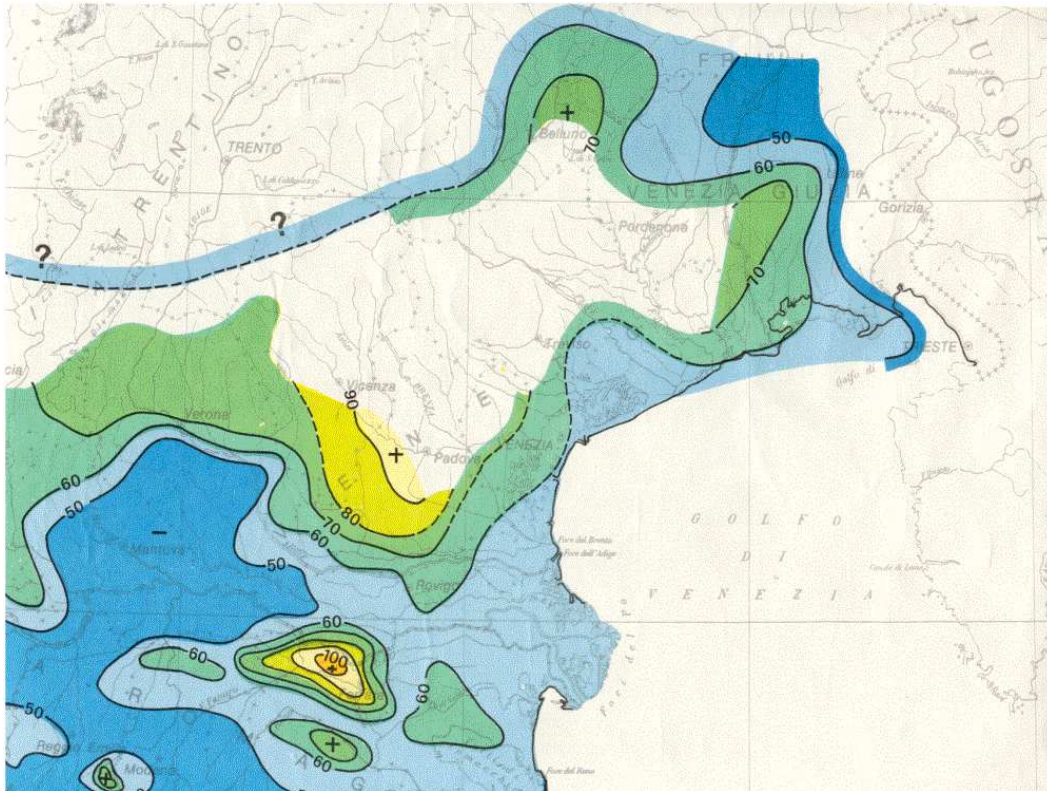


Figura 1.5: Isotherme della regione Veneto a 2000 m di profondità ricavate dai rilievi eseguiti dall'Agip nel 1967 [Drigo, 2005]

sizione di strati a diversa consistenza e composizione e quindi con diversa conducibilità termica.

Vengono sfruttate due tipologie di pozzi:

- la prima nella zona più a sud del tratto pianeggiante del fiume Tagliamento nei due versanti friulano e veneto, dove si estrae acqua quasi potabile da una profondità di 450 m, ad una temperatura di $40 \div 45^\circ\text{C}$, con portate di $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e a pressione di 0,25 MPa, è così possibile da un solo pozzo riscaldare superfici fino a 2000 m^2 ;
- la seconda in zone limitrofe dove si sono trovate falde a $30 \div 35^\circ\text{C}$ e ad una profondità variabile tra i $550 \div 650 \text{ m}$, l'energia ricavabile da uno di questi pozzi di diametro 0,8 m, con portata costante di $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e una temperatura di $30 \div 31^\circ\text{C}$, utilizzando per solo riscaldamento un salto di $12 \div 13^\circ\text{C}$ è di circa 850 MWh, con una potenza continua di 190 kW.

Per quanto riguarda la presenza di fenomeni simili nelle aree pianeggianti limitrofe ed un suo utilizzo sostenibile, non ci sono dati sufficienti, ma c'è la consapevolezza che con delle ricerche approfondite, che stabiliscano il tempo di residenza (periodo di ricarica), la portata e la permeabilità degli acquiferi profondi e quindi la velocità delle falde, si possa regolarizzare e regolamentare la risorsa con il suo massimo impiego e con il suo totale mantenimento in termini di capacità di emungimento e riducendone così l'impatto ambientale [Drigo, 2005].

1.5 Classificazione in base all'entalpia

Il più comune criterio di classificazione delle sorgenti geotermiche si basa sull'entalpia dei fluidi, che trasferiscono il calore dalle rocce calde profonde alla superficie. L'entalpia, che

può essere considerata più o meno proporzionale alla temperatura, è usata per esprimere il contenuto termico (energia termica) dei fluidi, e dà un'idea approssimativa del loro «valore». Le risorse sono divise secondo diversi criteri e autori (tabella 1.1).

Molti autori raggruppano l'utilizzo della risorsa geotermica, in funzione della temperatura crescente del terreno, in questo modo:

- (I) *alta entalpia* per la produzione di energia elettrica attraverso vapore ad alta temperatura che aziona delle turbine e trasforma il proprio contenuto energetico in energia meccanica;
- (II) *media entalpia* con utilizzo diretto del calore;
- (III) *bassa entalpia* basata sul semplice scambio termico con il sottosuolo, attraverso sistemi costituiti da sonde inserite nel terreno e pompe di calore geotermico.

Altri invece propongono una classificazione basata sulla distinzione tra le risorse più adatte alla generazione di elettricità (alta entalpia) e quelle più adatte all'uso diretto del calore (bassa entalpia). Per quanto riguarda il concetto di *uso diretto* del fluido geotermico, Lienau [1998] afferma che per basse temperature può adoperarsi per: riscaldamento, usi industriali, piscine, agricoltura e acquacoltura. Le pompe di calore possono essere o meno impiegate per fornire riscaldamento in questa tipologia, l'unica avvertenza è munirsi di uno scambiatore di calore per tenere sotto controllo la composizione chimica del fluido emunto, limitando le incrostazioni e le corrosioni a questa apparecchiatura e salvaguardando così il resto dell'impianto.

Tuttavia quando si parla di fluidi geotermici è bene, comunque, indicare la loro temperatura, o almeno un intervallo di temperatura, perché i termini bassa, media o alta possono avere significati diversi e creare errori di interpretazione.

Tabella 1.1: Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura [Fanelli e Dickson, 2004]

	Muffler e Cataldi (1978) °C	Hochstein (1990) °C	Benderitter e Comy (1990) °C	Nicholson (1995) °C	Axelsson and Gunnlaugsson (2000) °C
Bassa entalpia	< 90	< 125	< 100	≤ 150	≤ 190
Media entalpia	90 ÷ 150	125 ÷ 225	100 ÷ 200		
Alta entalpia	> 150	> 225	> 200	> 150	> 190

1.6 Termogeologia

La temperatura sulla superficie della terra è determinata da un equilibrio tra l'energia solare radiante, la radiazione termica nello spazio, il flusso di calore geotermico e le eventuali interferenze tra questi fattori (figura 1.6 nella pagina seguente). A causa del piccolo calore che scorre dall'interno della terra ($0,05 \div 0,12 \text{ W m}^{-2}$ rispetto alle radiazioni solari che arrivano fino a 1000 W m^{-2}) il contributo all'equilibrio energetico sulla superficie è piuttosto scarso. Ogni volta che lo stato naturale viene modificato dalla sottrazione o dall'apporto di calore, il deficit o surplus termico deve essere riequilibrato con un pari apporto di calore. Il trasporto di calore attraverso la conduzione e convezione (l'irraggiamento viene ignorato nel sottosuolo) si alimenta da tutte le fonti disponibili.

Appare anche evidente che il contributo del flusso di calore geotermico al bilanciamento termico complessivo del sottosuolo, varia di molto con la profondità. Nel caso di impianti

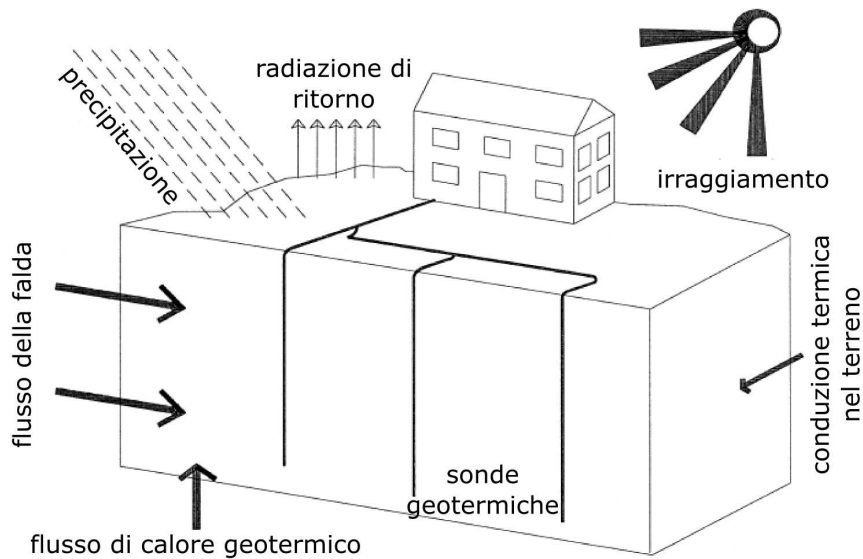


Figura 1.6: Regime termico nel sottosuolo [VDI, 2000]

vicino alla superficie ad una profondità compresa tra 10 ÷ 20 m, l'energia utilizzata per uguagliare il deficit o surplus termico consiste quasi esclusivamente nella radiazione solare e nella percolazione dell'acqua, così l'influenza del gradiente geotermico può essere ignorata. Solo a profondità comprese tra 20 ÷ 100 m si può osservare un importante contributo di questo gradiente che non può più essere trascurato (a tal proposito si veda la figura 1.8 nella pagina 19).

Il sottosuolo può essere quindi paragonato ad un enorme deposito di calore, che viene riscaldato durante l'estate per poi essere sfruttato opportunamente durante l'inverno, in quanto la maggior parte delle terre sono a base di silicati e possiedono un enorme potenziale per immagazzinare calore. Inoltre hanno una conduttività termica modesta: sufficiente a non far dissipare velocemente quanto immagazzinato e a permetterne il prelievo attraverso scambiatori di calore ben progettati. Ne deriva che *conduttività termica* e *calore specifico* sono due proprietà termogeologiche fondamentali, che vengono valutate da dati opportunamente tabulati (tabella 1.2 nella pagina 14) per il dimensionamento di impianti residenziali. Invece nelle grandi installazioni oltre a queste tabelle si realizzano delle specifiche misure in sito e/o in laboratorio, perché una stima eccessiva può comportare costosi ed inutili sovradimensionamenti, mentre una sottovalutazione può compromettere il funzionamento dell'impianto.

1.6.1 Conduttività termica

La conduzione di calore attraverso un corpo è regolata dalla legge di Fourier (1.6.1) che oltre ad introdurre il concetto di gradiente termico come la mancanza di equilibrio termico e la conseguente trasmissione di calore per contrastarla, presenta il coefficiente λ di conducibilità o conduttività termica funzione della temperatura e tipica del materiale. *Quindi questo coefficiente descrive l'abilità di trasferire calore attraverso la conduzione.*

$$Q = \lambda S \frac{dT}{dz} \quad (1.6.1)$$

dove:

Q è il flusso di calore in W; S è l'area della sezione in m^2 ; T è la temperatura in $^{\circ}C$ o K; z è la profondità in m; λ è la conducibilità termica delle terre in $W m^{-1} K^{-1}$.

Per quanto concerne i terreni, già nella seconda metà del XIX secolo, si era cominciato a misurarla:

- nel 1860 Thompson e altri avevano fatto le prime determinazioni della diffusività e conducibilità termica dei sedimenti e dei terreni;
- nel 1870 i professori dell'attuale università di Newcastle e Tyne presentarono una serie di determinazioni di conducibilità termica delle rocce.

1.6.2 Calore specifico

La capacità di qualsiasi mezzo, sia esso solido, liquido o gas, di accumulare calore, viene definita con il termine di calore specifico ed è misurata in $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$. L'acqua per esempio ha un calore specifico particolarmente elevato che si attesta in $4180 \text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ a 20°C , molti sedimenti invece hanno un calore specifico di $800 \text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$. Questo significa che se una massa di 1 kg di roccia si raffredda di 2°C allora si perdono

$$m s_C \Delta T = 1 \cdot 800 \cdot 2 = 1600 \text{J}$$

Dove il prodotto $m s_C$ è definito dalla fisica come capacità termica, ovvero il calore necessario per far variare di 1 K o equivalentemente 1°C , la temperatura del corpo stesso (è misurato in J K^{-1}).

Nella pratica progettuale viene sovente adoperato il calore specifico volumetrico S_{VC} , misurato in $\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}$ e definito in questo modo:

$$S_{VC} = \rho s_C$$

Dove ρ è la densità del materiale in kg m^{-3} . Per molti tipi di roccia S_{VC} è compreso tra $2,0 \div 2,4 \text{MJ K}^{-1} \text{m}^{-3}$, così 1m^3 di roccia può rilasciare fino a 10 MJ di energia, semplicemente facendo scendere la sua temperatura di 4 K. Viceversa bisogna aggiungere un importo analogo di energia per far aumentare di 4 K il medesimo metro cubo di materiale. Questo calore viene in definitiva immagazzinato come energia molecolare o cinetica.

Il calore specifico volumetrico è funzione della temperatura ed in piccola parte della densità del materiale, inoltre bisogna ricordare che una quantità addizionale di calore può essere conservata o ceduta da una sostanza durante il cambiamento di fase, questa quantità prende il nome di *calore latente* e tornerà utile quando si andrà a descrivere il funzionamento della pompa di calore (trattato nel sotto paragrafo 2.2.2 nella pagina 31).

1.6.3 Diffusività termica

Il coefficiente di diffusività termica α è definito dal rapporto tra conducibilità termica e calore specifico volumetrico, ovvero:

$$\alpha = \frac{\lambda}{S_{VC}} \quad (1.6.2)$$

Si misura in $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ed è una caratteristica intrinseca del corpo in quanto dipende esclusivamente da parametri relativi al materiale di cui è composto. Rappresenta la riluttanza di una sostanza a trasmettere il calore e dà informazioni su quanto rapidamente il calore si diffonde all'interno del corpo, può essere vista come l'analogo termico della viscosità cinematica.

Tabella 1.2: Esempi di conduttività termica (tra parentesi i valori tipici) e calore specifico volumetrico del sottosuolo alla temperatura di 20°C [VDI, 2000]

Roccia	densità ρ 10^3 kg m^{-3}	conduttività termica λ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	calore specifico volumetrico S_{VC} $\text{MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Rocce magmatiche			
basalto	2,6 ÷ 3,2	1,3 ÷ 2,3 (1,7)	2,3 ÷ 2,6
diorite	2,9 ÷ 3,0	2,0 ÷ 2,9 (2,6)	2,9
gabbro	2,8 ÷ 3,1	1,7 ÷ 2,5 (1,9)	2,6
granito	2,4 ÷ 3,0	2,1 ÷ 4,1 (3,4)	2,1 ÷ 3,0
peridotite	3,0	3,8 ÷ 5,3 (4,0)	2,7
riolite	≈ 2,6	3,1 ÷ 3,4 (3,3)	2,1
Rocce metamorfiche			
gneiss	2,4 ÷ 2,7	1,9 ÷ 4,0 (2,9)	1,8 ÷ 2,4
marmo	2,5 ÷ 2,8	1,3 ÷ 3,1 (2,1)	2,0
metaquarzite	≈ 2,7	≈ 5,8 (5,8)	2,1
micascisto	≈ 2,6	1,5 ÷ 3,1 (2,0)	2,2
argilloscisto	2,7	1,5 ÷ 2,6 (2,1)	2,2 ÷ 2,5
Rocce sedimentarie			
calcare	2,6 ÷ 2,7	2,5 ÷ 4,0 (2,8)	2,1 ÷ 2,4
marna	2,5 ÷ 2,6	1,5 ÷ 3,5 (2,1)	2,2 ÷ 2,3
quarzite	≈ 2,7	3,6 ÷ 6,6 (6,0)	2,1 ÷ 2,2
alite	2,1 ÷ 2,2	5,3 ÷ 6,4 (5,4)	1,2
arenaria	2,2 ÷ 2,7	1,3 ÷ 5,1 (2,3)	1,6 ÷ 2,8
antracite	–	0,3 ÷ 0,6 (0,3)	1,3 ÷ 1,8
siltite	2,5 ÷ 2,6	1,1 ÷ 3,5 (2,2)	2,1 ÷ 2,4
Terreni non consolidati			
ghiaia (asciutta)	2,7 ÷ 2,8	0,4 ÷ 0,5 (0,4)	1,4 ÷ 1,6
ghiaia (satura d'acqua)	≈ 2,7	≈ 1,8 (1,8)	≈ 2,4
morena	–	1,0 ÷ 2,5 (2,0)	1,5 ÷ 2,5
sabbia (asciutta)	2,6 ÷ 2,7	0,3 ÷ 0,8 (0,4)	1,3 ÷ 1,6
sabbia (satura d'acqua)	2,6 ÷ 2,7	1,7 ÷ 5,0 (2,4)	2,2 ÷ 2,9
argilla (asciutta)	–	0,4 ÷ 1,0 (0,5)	1,5 ÷ 1,6
argilla (satura d'acqua)	–	0,9 ÷ 2,3 (1,7)	1,6 ÷ 3,4
torba	–	0,2 ÷ 0,7 (0,4)	0,5 ÷ 3,8
Altre sostanze			
bentonite	–	0,5 ÷ 0,8 (0,6)	≈ 3,9
calcestruzzo	≈ 2,0	0,9 ÷ 2,0 (1,6)	≈ 1,8
ghiaccio (a –10°C)	0,919	2,32	1,87
plastica (PE)	–	0,39	–
aria (0 ÷ 20°C, secca)	0,0012	0,02	0,0012
acciaio	7,8	60	3,12
acqua (+10°C)	0,999	0,59	4,15

1.6.4 Misurazione

Stabilire le proprietà termiche del sottosuolo non è un'impresa facile, perché oltre a variare nel tempo, cambiano anche in relazione all'utilizzo della sonda geotermica. Inoltre la terra, essendo un mezzo trifase (solido, liquido e aeriforme), viene influenzata anche da:

Densità se aumenta, migliora il contatto tra i grani e quindi la conduttività termica del mezzo poroso aumenta. In genere la resistività di un terreno a grana grossa è maggiore di quella di un terreno a grana fine a parità di contenuto di umidità. I suoli rocciosi poi hanno conduttività superiore a quella dei terreni sabbiosi e argillosi.

Contenuto d'acqua dal momento che la conducibilità dell'acqua è quasi 30 volte superiore a quella dell'aria, un terreno che aumenta il contenuto d'acqua a discapito dell'aria migliora di conseguenza la propria conducibilità. Al contrario il compattamento del terreno ha un effetto benefico sulla resistività. La sua determinazione però è alquanto problematica, perché oltre a variare nel tempo, è influenzata dalla piovosità, dall'evaporazione, dalla vegetazione e dalle differenze di temperatura presenti nel terreno (tende a spostarsi dove il terreno è più freddo).

Matrice solida del suolo in esame.

Si deve quindi procedere ad una vera e propria modellazione del comportamento termico del sottosuolo che può effettuarsi mediante metodi analitici (empirici o derivati da modelli cinematici) e misure dirette in laboratorio o in sito (a regime stazionario o variabile).

Fra i metodi a regime stazionario si utilizza l'ASTM E1530, standard per i test di laboratorio, che permette di misurare e confrontare le proprietà termiche di diversi materiali in condizioni controllate e la loro capacità di mantenere i necessari livelli di conducibilità termica, richiede però tempi molto lunghi per essere eseguito. Mentre fra quelli a regime variabile il più noto è quello della sonda termica o «ago» termico che permette di valutare la conduttività termica del terreno in modo rapido e conveniente, misurando il gradiente dell'aumento di temperatura di un ago inserito nel terreno da analizzare che emette energia termica con flusso costante.

Tuttavia il metodo universalmente utilizzato, per la stima delle proprietà termiche in un campo sonde, è il *Ground Response Test* (trattato nel sottoparagrafo 4.2.2 nella pagina 83) che permette in cantiere di ottenere misure affidabili in tempi ragionevoli e con costi non eccessivi; il test fornisce un'informazione reale sulle effettive condizioni termiche del sottosuolo, dove si va ad installare il sistema.

1.7 Trasmissione del calore nel terreno

Restano ora da approfondire i meccanismi che assicurano al suolo di assorbire o cedere calore ed il modo in cui si forza il calore a trasferirsi in zone in cui sia più facile estrarlo o reintrodurlo. Il calore si trasmette quando tra due corpi vi è un contatto diretto o attraverso altri corpi. I tre meccanismi principali operano in presenza di un salto termico tra sistema e ambiente o all'interno dello stesso sistema e sono i seguenti:

- ▷ conduzione;
- ▷ convezione;
- ▷ irraggiamento.

Nell'ambiente sottosuolo, soprattutto a limitate profondità, la conduzione attraverso i minerali o i fluidi nei pori e la convezione attraverso l'acqua di falda sono i due più importanti dispositivi di flusso di calore. In particolare la conduzione interessa la parte solida e liquida del suolo, dal momento che la conduttività termica dell'aria presente nei vuoti è molto bassa. La convezione dà un contributo importante quando si instaurano rapide infiltrazioni d'acqua e/o si è in presenza di un non trascurabile moto di falda. Il calore latente del vapor acqueo poi contribuisce in modo significativo alla trasmissione del calore nei suoli lontani dalla saturazione, così come nei cicli di gelo/disgelo del terreno. In alcuni casi anche l'irraggiamento può essere preso in considerazione, soprattutto nei suoli secchi ad alte temperature [Basta e Minchio, 2007].

1.7.1 Conduzione

Il calore si trasmette in un solido, liquido o gas, attraverso processi di interazione molecolare, ovvero si manifesta come una diffusione di uno stato di agitazione molecolare, da un punto ad un altro. Quando si raggiunge l'equilibrio allora la temperatura è uguale in tutti i punti.

Il processo è regolato dalla equazione di Fourier (1.6.1) e la conduttività descrive l'abilità del materiale a condurre il calore: tra i metalli buoni conduttori, è il rame per esempio ad avere un'ottima conduzione, le rocce sono meno buone e le plastiche sono degli scadenti conduttori di calore. Come evidenziato in tabella 1.2 nella pagina 14, la conducibilità termica delle rocce e di altri materiali geologici tende a cadere all'interno di un range piuttosto ristretto di $1 \div 3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Inoltre emerge che nei materiali comuni che formano le rocce, il quarzo e i silicati hanno la più alta conducibilità termica, circa $6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, di conseguenza la conducibilità termica dei terreni sarà condizionata in maggior misura dalla presenza di questo minerale.

In termogeologia si tende a considerare la conducibilità come una costante, ma essa è di fatto dipendente dalla temperatura, ciò comunque si può trascurare perché le temperature variano in un range piuttosto ristretto. Altro fattore di dipendenza è la fase del materiale, per esempio il ghiaccio ha una λ molto superiore di quella dell'acqua, viceversa un calore specifico più basso.

Nell'edilizia per quantificare il flusso termico per conduzione di un materiale si utilizza la seguente formula:

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{\lambda (T_1 - T_2)}{s}$$

Dove:

q è il flusso termico in W m^{-2} , riferito all'unità di superficie S in m^2 , s è lo spessore in m del materiale, T_1 e T_2 sono le temperature dei due corpi nel verso delle T decrescenti.

Tuttavia i manufatti utilizzati per le costruzioni sono eterogenei e si ricorre allora a coefficienti di conduttività equivalenti opportunamente tabellati e forniti dalle case costruttrici, in questo modo si tratta il materiale come fosse omogeneo e fittizio.

1.7.2 Convezione

Nei fluidi e gas la trasmissione di calore avviene con spostamento di materia, tramite correnti convettive. I fluidi quindi contengono calore: per esempio l'acqua cede circa 4180 J m^{-1} per ogni $^\circ\text{C}$ di temperatura. Così se si muove dell'acqua calda dal boiler di casa al bagno per esempio, si sta spostando anche del calore, il fenomeno prende il nome di convezione. Se poi si crea con una azione meccanica il movimento di calore attraverso il fluido, allora si parla di convezione o avvezione forzata, perché il calore fluisce a causa di una forza imposta dall'esterno sul fluido vettore (si pensi alle pompe per l'acqua o ai ventilatori per l'aria).

Newton propose una semplice formula per quantificare il calore di convezione scambiato dal solido e assorbito dal liquido che è la seguente

$$q^* = \bar{\lambda} (T_c - T_f)$$

dove:

q^* è il calore trasportato dal corpo alla temperatura T_c al fluido alla T_f ed è misurato in W m^{-2} ;

$\bar{\lambda}$ è la conducibilità termica esterna che dipende dalla natura del fluido, dalla sua velocità, dalle proprietà della superficie del corpo e via dicendo.

La formula del raffreddamento di Newton, non è una vera e propria legge, ma può essere assunta come una approssimazione operativa che si adatta a tutte quelle situazioni dove la differenza di temperatura tra il corpo ed il fluido è abbastanza limitata.

La termogeologia analizza la convezione forzata che si viene a creare nel flusso delle acque sotterranee, dove si può asserire che il fluido si sposta secondo un gradiente di carico, dominato per lo più dalle forze gravitazionali e portando con sé una grande quantità di calore (circa $4,2 \cdot 10^3 \text{ J K}^{-1} \text{ m}^{-1}$). Con riferimento alla figura 1.7 si può osservare come durante l'emungimento si abbassa la linea di falda, formando un cono di depressione attorno al pozzo. Quest'acqua può essere usata a scopo idro-potabile, a uso domestico o industriale, ma anche per estrarne il calore trasportato. Si possono anche considerare delle celle di convezione naturale che vengono a formarsi nelle acque di falda (o persino nei gas del suolo) in prossimità o all'interno dei pozzi o delle sonde geotermiche.

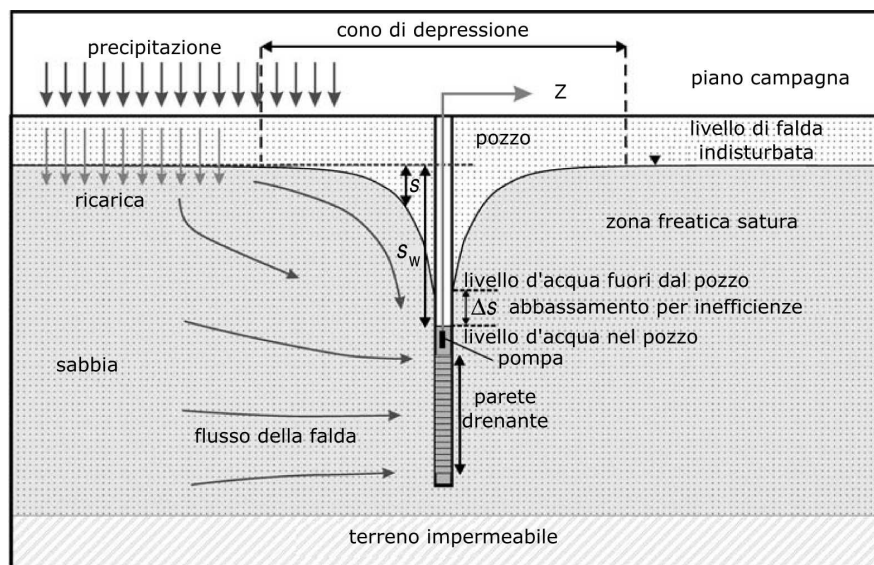


Figura 1.7: Modello concettuale di un pozzo di prelievo in falda freatica. La portata emunta trasporta con sé anche un carico di calore di convezione che può essere utilizzato; s rappresenta l'abbassamento della falda dalla situazione indisturbata a quella raggiunta a regime; Δs è l'abbassamento ulteriore dovuto alle inefficienze del pozzo

1.7.3 Irraggiamento

Un corpo a temperatura T emette energia sotto forma di onde elettromagnetiche, che si propagano nello spazio circostante, e non necessita di un mezzo per propagarsi. Quindi è un fenomeno che interessa ogni aggregato materiale, non importa se solido, liquido o gassoso, e

avviene anche nel vuoto. Il potere emissivo ϵ di un corpo, ha il significato di energia emessa per unità di tempo e per unità di superficie ed è funzione della quarta potenza della sua temperatura, secondo la legge di Stefan-Boltzmann (1.7.1):

$$\epsilon = \sigma e T^4 \quad (1.7.1)$$

Dove:

σ è una costante universale pari a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$;

e una grandezza detta emissività che può variare tra 0 e 1 (dipendendo dalle proprietà della superficie, se $e = 1$ allora si ha il massimo potere emissivo e la superficie è detta *superficie nera*);

T è la temperatura del corpo.

È attraverso il meccanismo dell'irraggiamento che il sole trasmette energia all'atmosfera terrestre nella misura di 1366 W m^{-2} . Questa è riferita al piano, occorre quindi considerare che sulla terra colpisce una calotta sferica per 1440 minuti, riducendosi del 75%. L'atmosfera filtra in una certa misura i raggi solari come ogni corpo provocando:

- una riflessione dei raggi dovuta all'albedo;
- un assorbimento che ne provoca un aumento di temperatura, a seguito del quale riemette radiazioni in accordo con la legge di Wien.

Circa metà della radiazione attraversa invece l'atmosfera senza modificazioni e prende il nome di *radiazione netta*. Metà della radiazione netta contribuisce infine all'evaporazione delle masse d'acqua e parte viene riemessa dal terreno sempre sotto forma di onde elettromagnetiche (radiazione di ritorno), di conseguenza l'energia disponibile è circa un quarto di quella complessivamente emessa (figura 1.8 nella pagina successiva).

Secondo Linacre e Geerts [1997] le medie annuali di radiazione netta sono: 100 W m^{-2} per le regioni tropicali, $40 \div 80 \text{ W m}^{-2}$ per le temperate e minore di 40 W m^{-2} per quelle nordiche dell'Eurasia e del Nord America.

La radiazione netta scalda la terra che ne cede una parte per evapotraspirazione, cioè la quantità d'acqua (riferita all'unità di tempo) che dal terreno passa nell'aria allo stato di vapore per effetto congiunto della traspirazione, attraverso le piante, e dell'evaporazione, direttamente dal terreno. Al terreno resta quindi una quantità di calore ulteriormente ridotta, che può essere trascurata nel lungo termine e rimossa per esempio da un impianto geotermico.

Rispetto al flusso tipico del calore geotermico, minore di $0,1 \text{ W m}^{-2}$, il calore assorbito dal terreno per la radiazione solare netta è di almeno due ordini di grandezza più grande, per questo gli impianti geotermici sfruttano per lo più il suolo come fosse un grande collettore solare e un magazzino. Non deve stupire quindi che la gran parte dei criteri di progettazione si concentri su tassi di estrazione di calore pari a $10 \div 20 \text{ W m}^{-2}$, valori compatibili con la quantità di radiazione solare utile e atmosferica che si è in grado di raccogliere con un impianto geotermico.

1.8 Temperatura del terreno

Le rocce ed i sedimenti che costituiscono la terra hanno alti valori di calore specifico volumetrico S_{VC} , ma modesti valori di conduttività termica λ , perciò la loro diffusività termica α (1.6.2) sarà piuttosto bassa. Perciò l'onda di calore si propagherà molto lentamente, senza raggiungere profondità significative (sempre che non vi sia avvezione di acque sotterranee).

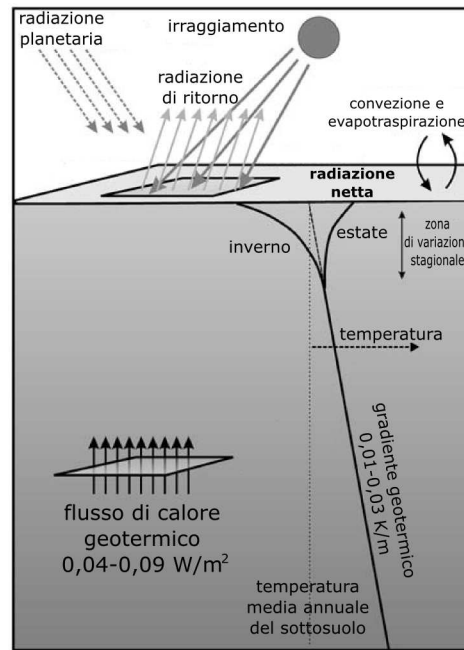


Figura 1.8: Lo schema mostra l'aumento della temperatura all'aumentare della profondità per la presenza: del gradiente geotermico, della zona di fluttuazione stagionale della temperatura, della grandezza relativa del flusso di calore geotermico e dell'irraggiamento

In estate il suolo si riscalda a causa dell'intensa radiazione solare e delle alte temperature dell'aria, questo riscalda il sottosuolo fino a raggiungere una zona di omotermia in genere situata ad una profondità compresa tra i 10 ÷ 15 m di profondità. In questa zona la temperatura del sottosuolo è notevolmente stabile e si avvicina ad un valore prossimo alla media annuale. In parole povere la temperatura del terreno è più calda di quella dell'aria esterna in inverno, ma più fredda in estate.

Per la provincia di Rovigo si può assumere una temperatura media annuale di 13 °C, basandosi sui dati climatici presenti nella [UNI 10349, 1994] che danno una temperatura di 13,33 °C. Il valore è stato confrontato anche con le medie mensili degli ultimi 30 anni [Il Meteo.it, 2009] che fornisce un valore minimo di 9,58 °C e massimo di 17,25 °C, con una media risultante di 13,42 °C.

1.9 Bilancio energetico del serbatoio sottosuolo

Molte sono le quantità di calore che vanno ad interessare il terreno e che contribuiscono a caratterizzarne la temperatura, per semplificare il tutto si può ipotizzare di considerare un volume di terra di volume V_t e calore specifico volumetrico S_{VC} assegnato e scriverne il bilancio termico imponendo le seguenti condizioni al contorno:

- i. un flusso costante di calore geotermico alla sua base (Q_g);
- ii. l'eventuale presenza di un flusso di falda che attraversa il volume (Q_{we} entrante da sinistra e Q_{wu} uscente a destra, come rappresentato in figura 1.9 nella pagina seguente), portando con sé un carico di calore (questo flusso si può considerare costante nel lungo periodo);
- iii. la temperatura media annuale della superficie all'interfaccia suolo-atmosfera (Q_s), può

essere considerata nel lungo periodo come una costante e costituirà la condizione al contorno della parte superiore.

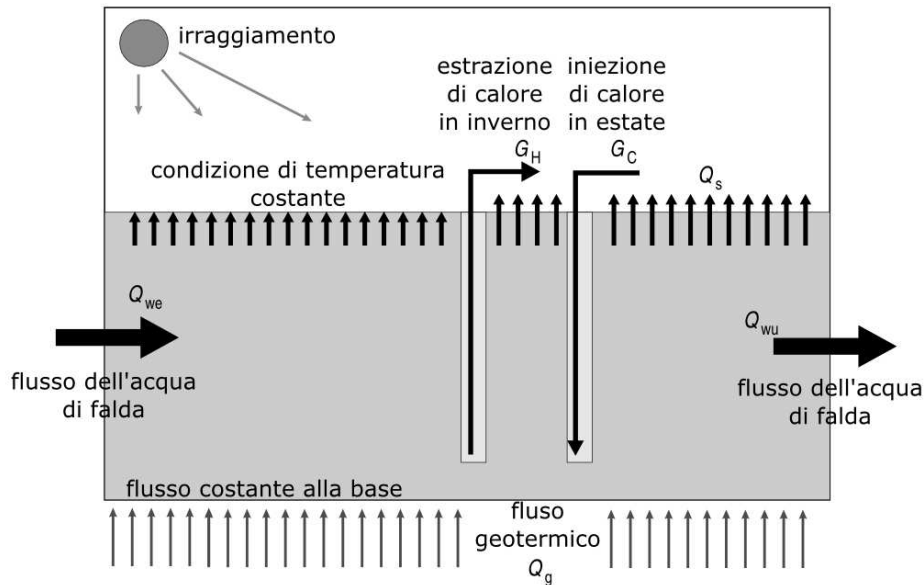


Figura 1.9: Una porzione di sottosuolo ed i contributi energetici per il suo equilibrio termico

Il volume di terra è in una situazione di equilibrio termico e si può a questo punto pensare di togliere del calore G_H (modalità riscaldamento) o di immetterne in quantità G_C (modalità raffreddamento). Chiaramente, durante un anno, si può estrarre calore in inverno e cederlo in estate. Se $G_H > G_C$ nel corso di un anno, si avrà un *riscaldamento netto a lungo termine* ed il terreno tenderà a raffreddarsi. Viceversa se $G_H < G_C$, si avrà un *raffreddamento netto a lungo termine* ed il terreno tenderà a raffreddarsi. In alcune circostanze particolarmente fortunate, il calore immesso in estate bilancia quello estratto in inverno, con conseguente minor danno al bilancio a lungo termine del terreno e quindi alla sua temperatura.

Se ora si analizza il calore immagazzinato nel terreno, un suo aumento è rappresentato da $V_t \Delta T S_{VC}$, dove ΔT è la sua variazione di temperatura; in condizioni naturali a lungo termine si avrà:

$$Q_{wu} + Q_s = Q_{we} + Q_g$$

Si presume però che esista un equilibrio e che la temperatura del terreno non cambi con il tempo. Tuttavia se si comincia ad estrarre il calore in uno schema di riscaldamento netto a lungo termine, si avrà:

$$G_H + Q_{wu} + Q_s > G_C + Q_{we} + Q_g$$

Quindi il calore immagazzinato si esaurirà e la temperatura scenderà, di conseguenza:

- Q_s diminuisce ed al limite diventa negativo, un flusso di calore (in definitiva solare) è indotto dalla superficie, più il gradiente di temperatura tra superficie e sottosuolo è maggiore, tanto più Q_s diventa negativo;
- Q_{wu} diminuisce.

L'estrazione di calore porta il sistema ad un nuovo stato di equilibrio termico, chiaramente caratterizzato da una temperatura minore. Se G_H dovesse essere troppo elevato, la temperatura del volume di terra potrebbe continuare a scendere fino al suo congelamento. La

situazione allora presenterebbe evidenti problematiche geotecniche, ambientali e operative. Pertanto la fonte di calore del terreno diventa sostenibile solo se si ha una buona conoscenza del bilancio di calore del terreno, altrimenti l'impianto avrà una durata limitata nel tempo.

Al contrario in uno schema di raffrescamento netto a lungo termine:

$$G_H + Q_{wu} + Q_s < G_C + Q_{we} + Q_g$$

il terreno inizierà a scaldarsi, così come Q_s ed in qualche caso anche Q_{wu} . Il terreno raggiungerà un nuovo equilibrio, con una temperatura maggiore che può essere più o meno sostenibile. Se però la temperatura supera i limiti imposti nella progettazione, l'impianto può diventare sempre più inefficiente ed infine inutilizzabile.

1.9.1 Deriva termica del terreno

La misura della variazione di temperatura del terreno negli anni, causata dallo sbilanciamento dei carichi estivi/invernali e da come le sonde o i pozzi sono disposti tra di loro, prende il nome di deriva termica. Il tutto si tramuta in una perdita di efficienza del sistema geotermico che ne preclude il funzionamento a lungo termine.

1.10 Analogie tra l'idrogeologia e la termogeologia

Nel bilancio del sottosuolo si è utilizzato un semplice diagramma (figura 1.9 nella pagina precedente) che mostra l'estrazione e la cessione di calore quasi come si trattasse di un pozzo per la presa d'acqua (figura 1.7 nella pagina 17). L'idrogeologia e la termogeologia hanno molti aspetti simili che vale la pena sottolineare.

L'idrogeologia si occupa in qualche caso di indagare l'accumulo di acqua sotterranea della terra, attraverso pozzi di perforazione e la porta in superficie con qualche tipo di pompa, dove può essere utilizzata.

La termogeologica cerca di sfruttare il serbatoio di calore della terra mediante fori di trivellazione e lo rende utilizzabile ai fini della climatizzazione con una pompa di calore.

Le analogie però non finiscono qui, vi è infatti una similitudine matematica diretta che riguarda il flusso dell'acqua sotterranea ed il flusso di calore del sottosuolo. Come dall'idraulica l'acqua sotterranea fluisce da un'area ad alta energia ad una a bassa, secondo l'equazione dei Bernoulli (1.10.1), che definisce il concetto di carico idraulico H in m come una misura dell'energia potenziale dato da:

$$H = z + \frac{P}{\gamma} \quad (1.10.1)$$

dove: H è il carico idraulico in m; z è la profondità in m; P è la pressione in N m^{-2} ; γ è il peso specifico dell'acqua pari a $9,81 \text{ kN m}^{-3}$.

In modo simile dalla termodinamica si afferma che il calore tende a fluire da un oggetto caldo ad uno freddo, mediante la legge di Fourier (1.6.1) che quantifica il flusso di calore trasportato attraverso un blocco di un assegnato materiale. L'idrologia ha una legge simile definita legge di Darcy (1.10.2) che definisce la portata d'acqua attraverso un blocco di materiale poroso:

$$Z = KS \frac{dh}{dx} \quad (1.10.2)$$

dove: Z è la portata in $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$; K è la permeabilità delle terre in m s^{-1} ; S è l'area della sezione in m^2 ; h è il carico in m e $\frac{dh}{dx}$ è il gradiente adimensionale.

Un idrogeologo sarà interessato a quantificare le proprietà del terreno per verificare se si tratta di un materiale adatto alla perforazione di un pozzo. Due proprietà sono fondamentali:

la **conducibilità idraulica K in m s^{-1}** proprietà intrinseca della terra, che descrive la quantità d'acqua che può fluire in essa;

il **coefficiente di immagazzinamento specifico S_0** descrizione della porosità, cioè quanta acqua sotterranea viene rilasciata dagli spazi nei pori o nelle fratture in una unità di volume di roccia per 1 m di carico idraulico.

Un acquifero possiede una sufficiente permeabilità e un coefficiente di accumulo adeguato per l'estrazione d'acqua sotterranea.

Anche nella termogeologia si ha a che fare con due parametri che descrivono l'abilità di un corpo di roccia di accumulare e trasmettere calore:

la **capacità volumetrica di calore S_{VC} in $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$** descrizione di quanto calore viene rilasciato da un volume di roccia al variare della temperatura di 1 K o 1 °C;

la **conducibilità termica λ in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$** definizione ricavata dalla legge di Fourier (1.6.1).

Tutte le terre hanno una adeguata conducibilità termica e una capacità volumetrica di calore sufficiente ad una estrazione economica del calore, ciò che penalizza gli impianti è semmai la loro taglia, come sarà evidenziato in seguito.

Tabella 1.3: Schema riassuntivo delle analogie tra l'idrogeologia e la termogeologia [Banks, 2008]

	Idrogeologia		Termogeologia	
Campo di interesse	flusso d'acqua sotterraneo		flusso di calore del sottosuolo	
legge fisica	legge di Darcy		legge di Fourier (solo conduzione)	
	$Z = K S \frac{dh}{dx}$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	$Q = \lambda S \frac{dT}{dz}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
proprietà intrinseca	$K =$ permeabilità		$\lambda =$ conducibilità termica	
misura del potenziale	$H =$ carico idraulico		$T =$ temperatura	
misura dell'accumulo	$S_0 =$ immagazzinamento specifico		$S_{VC} =$ calore specifico	
zona di sfruttabilità	acquifero		tutti i terreni	
mezzo di sfruttamento	pozzo e pompa		foro di trivellazione e PdC	
misura di efficienza	perdita di pozzo		resistenza termica della sonda	

Sistema geotermico

Conosciuto anche con il nome di pompa di calore geotermica e all'estero con la sigla GSHP (Ground Source Heat Pump, letteralmente pompa di calore con sorgente nel sottosuolo), comprende vari tipi di soluzioni, pompe di calore e impianti di distribuzione del calore all'interno dell'edificio. Si racconterà brevemente la sua storia per dimostrare che questa non è una tecnologia recente, ma ha delle solide basi che coprono quasi un secolo di vita e per introdurre alcuni termini di uso comune, favorendo così la lettura delle descrizioni successive. Analogamente si riporterà lo sviluppo del mercato in Europa e in Italia.

La descrizione della pompa di calore, dispositivo che ha permesso a questa tecnologia di diventare sempre più efficiente ed economicamente sostenibile, verrà trattata analizzando in particolar modo le macchine ad alimentazione elettrica, che sono le più diffuse e mostrando quanto un sistema a PdC sia economico in termini di *COP* rispetto agli impianti tradizionali. Si elencheranno brevemente i sistemi di distribuzione del calore adatti, rimarcandone pregi e difetti.

Nel capitolo si descriveranno poi le caratteristiche dei più comuni tipi di sistemi open e closed loop, dandone un primo dimensionamento legato ai parametri di progetto presenti nelle norme standard UNI EN 15450 [2008] che forniscono alcuni dati validi per l'Europa Centrale (presi dalle linee guida tedesche VDI [2001a]). Si riassumeranno poi i pregi e i difetti di questi impianti.

L'analisi dei due impianti più importanti, ovvero la presa da falda sotterranea per i sistemi a circuito aperto e le sonde verticali per quelli a circuito chiuso sarà affrontata in dettaglio rispettivamente nei successivi due capitoli.

2.1 Breve storia

L'idea di sfruttare la tecnologia della pompa di calore, ideata da Lord Kelvin nel 1852, per estrarre calore dall'ambiente circostante, venne trascurata per molti decenni. Non a caso il primo brevetto per un impianto geotermico lo richiese in Svizzera un ingegnere di nome Heinrich Zoelly nel 1912. Tra la fine degli anni '20 e '30, l'acqua di falda venne estratta da pozzi sia a Brooklyn sia a Long Island per essere utilizzata negli impianti ad aria condizionata, anche se non è chiaro se si servissero o meno delle pompe di calore.

Il primo impianto sperimentale risale attorno al 1925 ÷ 1930, quando T. G. N. Haldane dotò la propria abitazione di un impianto a pompa di calore utilizzando sia l'aria esterna sia la rete idrica. Questo impianto doveva essere molto sofisticato, perché era dotato di un compressore ad alimentazione elettrica (servita da una centrale idroelettrica) e come refrigerante utilizzava l'ammoniaca. Inoltre forniva il riscaldamento e provvedeva anche all'acqua calda sanitaria. Alla fine del 1930 diversi sistemi a pompa di calore ambientale furono installati per riscaldare gli edifici di Zurigo in Svizzera, tra questi va citato un GSHP

con un refrigerante R-12 per il municipio, che sfruttava l'acqua del fiume Limmat. Aveva una capacità nominale in riscaldamento di 70 kW e in raffreddamento di 55 kW.

La data della prima vera e propria installazione di un GSHP è alquanto incerta: c'è chi sostiene che nel 1940 negli Stati Uniti vi fossero 15 installazioni commerciali che utilizzavano l'acqua come fonte di calore e che sempre nel 1935 ci fosse un edificio a Salem nel Massachusetts riscaldato e raffreddato con acqua di pozzo. Tuttavia è assodato che a partire dal 1945, nella casa di Robert C. Webber, un dipendente della Indianapolis Power and Light Co., si cominciò a monitorare l'impianto che recuperava il calore prodotto dalla cella frigorifera interrata per scaldare l'abitazione (figura 2.1). Si può definire come il primo sistema geotermico a circuito chiuso e a circolazione diretta: una pompa di calore di 2,2 kW che usando il freon come fluido termovettore estraeva il calore dai tubi di rame disposti in trincee interrate.

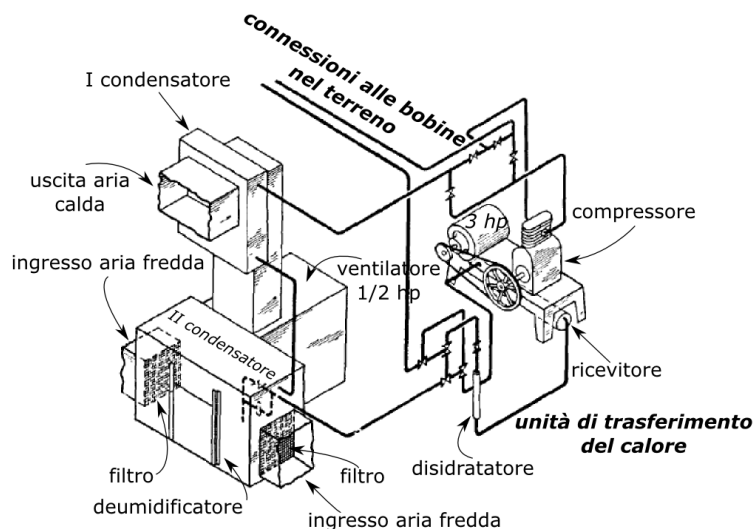


Figura 2.1: Schema della pompa di calore della casa di Webber [Sanner, 2001]

Nel 1945 John Sammer, un grande sostenitore visionario delle pompe di calore, costruì un impianto accoppiato al terreno a Norwich in Inghilterra, usando l'acqua del fiume Wensum. Tre anni più tardi fu assunto come consulente dal milionario filantropo Lord Nuffield per costruire 12 impianti in alcune case selezionate che utilizzavano delle bobine inserite nel terreno per un periodo di test di 2 anni, raggiungendo una potenza termica di 9 kW_t ciascuno e un COP_H di 3. Summer nel 1951 fu anche coinvolto in un progetto per riscaldare la Royal Festival Hall di Londra con una pompa di calore two-stage alimentata a gas e basata su compressori ottenuti modificando i motori degli aerei Merlin, utilizzando l'acqua del Tamigi come fonte di calore. Il progetto di 2,5 MW viene descritto come un piccolo fiasco, ma non è chiaro se questo fosse dovuto all'eccessivo calore prodotto, con un COP_H di $2,5 \div 3$ e acqua calda sanitaria a 82°C . Nella prima metà del 1950 Summer installò un GSHP a circuito chiuso per la propria abitazione, usando un tubo di rame come circuito chiuso riempito di antigelo e seppellendolo alla profondità di 1 m. Successivamente fece alcune sperimentazioni sistemando sul piano campagna un tubo di plastica nera per assorbire direttamente l'energia solare. Le pompe di calore di Summer potevano sembrare dei trionfi della tecnica, ma non rappresentarono una svolta per il mercato di quel tempo. I britannici infatti si dimostrarono poco interessati ai suoi prototipi, anche perché in quel periodo il carbone rappresentava una fonte molto economica ed illimitata. In particolare Summer si sentiva amareggiato nei confronti dei fornitori di energia elettrica che a suo parere erano poco propensi ad investire in tecnologie che avrebbero ridotto le proprie rendite del 60% [Banks, 2008].

In altri Paesi però l'interesse verso questa tecnologia era differente, per esempio negli

Stati Uniti Kemler già nel 1947 pubblicò gli schemi di molte tipologie d'uso del sottosuolo (nella figura 2.3 nella pagina seguente si può constatare come molti schemi siano rimasti ancora attuali). A Philadelphia furono collocati e monitorati dal 1948 al 1950 due impianti con tubi orizzontali e circuito in soluzione salina. Il compressore delle pompe di calore fu ottenuto da motori a 4 cilindri della Chrysler, che operava con un complesso sistema di controllo elettro-pneumatico. Sebbene fosse possibile farlo funzionare con diverse capacità, si rivelò molto inaffidabile e dal secondo inverno l'unità operò solo nell'unica modalità on/off. Durante i due anni di studio, molti problemi si verificarono in diversi componenti, tra cui 12 fughe di refrigerante. Tuttavia Harlow e Klapper nel 1952 affermarono nella relazione finale che «la terra si è dimostrata una fonte affidabile per l'immagazzinamento e la dissipazione di calore durante i due anni di funzionamento della pompa di calore, anche nei periodi in cui si sono registrati grandi richieste di riscaldamento e raffreddamento» [Sanner, 2001]. Il primo impianto canadese invece fu installato in una casa dell'università di Toronto e monitorato dal 25 ottobre 1949. Nel 1953 uno studio evidenziò la presenza di 28 ulteriori installazioni di tali impianti.

Dal punto di vista teorico, i primi studi portarono il nome di L. R. Ingersoll, dell'università del Wisconsin a Madison. Ingersoll e altri colleghi applicarono i metodi matematici per descrivere il trasporto del calore nel sottosuolo in combinazione con questi impianti e ne diedero una solida base fisica (la pubblicazione relativa è presente in bibliografia alla voce Ingersoll *et al.* [1948]).

Tuttavia è stata la crisi petrolifera dell'OPEC negli anni '70 a concentrare l'attenzione della pubblica opinione su fonti energetiche alternative e non più fossili. Svedesi e più tardi svizzeri, austriaci e tedeschi si interessarono al GSHP. La Svizzera aveva intravisto un modo efficiente per ottimizzare l'energia elettrica prodotta dalle centrali idroelettriche, così pure la Svezia era interessata a sfruttare l'energia elettrica prodotta dalle proprie centrali nucleari per riscaldare le abitazioni al posto del cherosene. Dal 1970 si è assistito quindi allo sviluppo dei sistemi a circuito aperto e chiuso orizzontale che impiegavano tubi in polietilene piuttosto che di metallo. Le prime esperienze di impianti a sonde geotermiche verticali (conosciute in Italia con l'acronimo SGV e all'estero come BHE) sono documentate in Germania e Svizzera a partire dal 1980.

Uno dei pionieri per il BHE in Germania è stato Helmut Hud, un imprenditore nel settore dell'ottica e dell'elettronica. Per un nuovo edificio destinato alla produzione di fibre ottiche a Verolum (figura 2.2), decise nella primavera del 1980 di installare 8 BHE coassiali a 50 m di profondità. L'edificio di Verolum aveva una superficie di 385 m² e veniva riscaldato da una pompa di calore di 22 kW di potenza termica [Sanner, 2001].



Figura 2.2: Edificio di Verolum, situato a Schöffengrund-Schwalbach (in Germania), riscaldato con un impianto GSHP dal 1980 (foto del 1995) [Sanner, 2001]

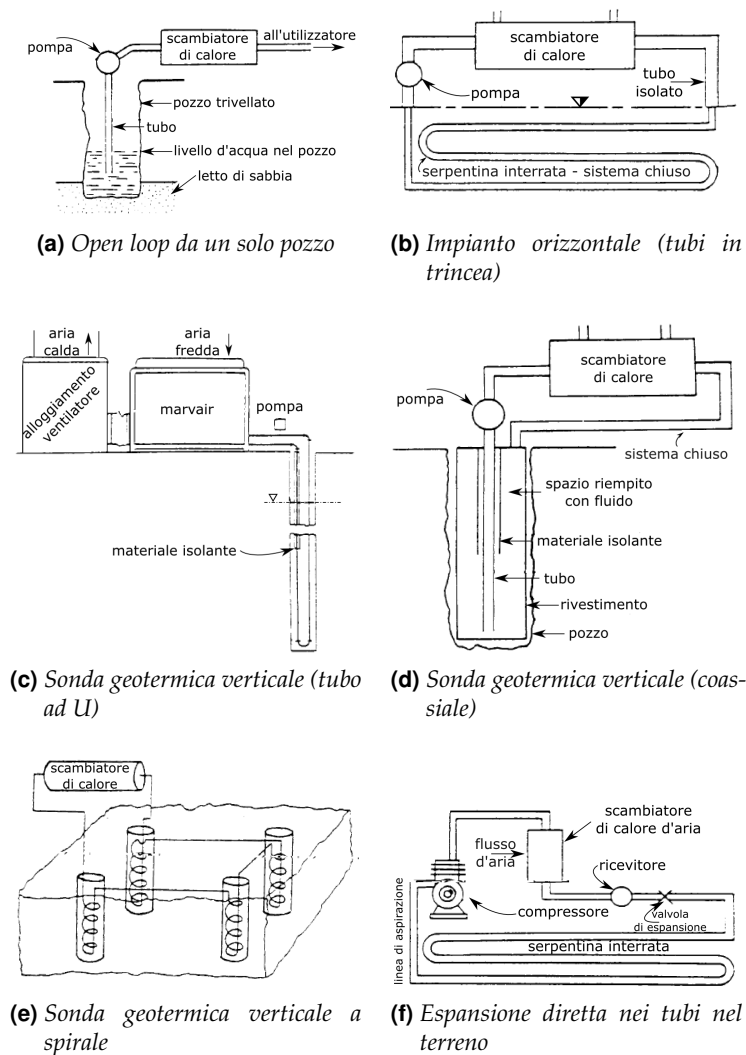


Figura 2.3: Gli impianti geotermici secondo Kemler (1947) [Sanner, 2001]

2.1.1 Il mercato europeo

Il numero di sistemi GSHP è aumentato costantemente nel corso degli ultimi anni e la tecnologia è stata ben assimilata. Per le abitazioni residenziali in alcuni paesi, il GSHP è già considerato un'opzione più che valida; tuttavia solo una piccola parte del suo potenziale viene attualmente utilizzata in Europa.

Nella maggior parte d'Europa la penetrazione del mercato dei sistemi geotermici è ancora modesta, le uniche eccezioni sono Svezia e Svizzera, seguite a distanza da Austria e Germania. La tecnologia è diventata popolare anche in Francia e in Benelux, e si sta affacciando in nuove regioni:

- Europa sud-occidentale e Mediterraneo, con particolare attenzione per il raffreddamento e il riscaldamento;
- Europa orientale e sud-orientale, dove lentamente sta crescendo la richiesta di un maggiore comfort nelle abitazioni, legato alla aumentata disponibilità economica di parte della popolazione;

- Regno Unito e Irlanda, cresce l'interesse ed il numero dei sistemi installati, inoltre alcuni impianti sono stati realizzati in strutture di prestigio.

Esiste un'ampia possibilità di crescita del mercato, suffragata dalle ampie prospettive tecnologiche. Infatti in alcuni paesi il mercato economico si sta orientando verso questi sistemi e sarà potenziato ulteriormente dal previsto incremento del prezzo del petrolio.

L'uso dei GSHP per le applicazioni commerciali può portare vantaggi economici e ambientali, in particolare quando è richiesto il riscaldamento e il raffreddamento: la terra infatti può agire come una sorta di deposito e buffer stagionale.

La dimensione delle singole unità GSHP varia dai circa 5 kW_t ad uso residenziale ad unità di grandi dimensioni di oltre 500 kW_t per gli impianti commerciali, istituzionali e industriali. In Europa, la maggior parte delle unità sono dimensionate per il carico di riscaldamento e sono spesso progettate per fornire il carico di base, con un picco garantito dai combustibili fossili negli impianti più esigenti.

L'Unione Europea è la principale regione al mondo ad utilizzare la tecnologia GSHP. Alla fine del 2008, il numero di impianti è stato stimato all'incirca a 800 000 unità, che rappresentano una potenza installata dell'ordine di 8 920 MW_t (i dati sono forniti da EurObserv'ER [2009] e vengono riassunti in tabella 2.1). Nel 2008, il mercato della pompa di calore geotermica ha superato il numero di 100 000 unità vendute, per il terzo anno consecutivo. In più le proiezioni per quanto riguarda la produzione di calore sono molto positive, se questo settore continua a crescere al ritmo di circa il 15 % all'anno fino al 2010, si potrebbe raggiungere una capacità complessiva di circa 12 000 MW_t.

Tabella 2.1: Numero degli impianti GSHP esistenti e capacità installata nel 2008 (nei Paesi con più di 10 MW_t di potenza termica) [EurObserv'ER, 2009]

	Numero	Capacità
	-	MW _t
Svezia	320 687	2 909,0
Germania	150 263	1 652,9
Francia	121 886	1 340,7
Finlandia	46 412	857,9
Austria	48 641	544,8
Olanda	19 310	508,0
Polonia	11 000	180,0
Irlanda	9 673	157,0
Italia	7 500	150,0
Repubblica Ceca	9 168	147,0
Gran Bretagna	10 350	134,6
Danimarca	11 250	123,8
Belgio	9 500	114,0
Estonia	4 874	63,0
Ungheria	350	15,0
Slovenia	1 125	12,2
Totale EU 27	782 461	8 920,2

Costi e prezzi

Il costo dipende dal sito e dalla profondità raggiunta per lo scambio termico. È tecnologicamente possibile ovunque non ci siano vincoli autorizzativi che limitino o interdichino gli

scavi nel terreno.

La spesa è poi influenzata dalla geologia del sottosuolo presente. Forare nel granito è facile e veloce in quanto è possibile farlo con aria compressa e martello (perforazione a rotopercolazione), al contrario è lenta e problematica nelle argille e nelle sabbie, dove potrebbe rendersi necessario un sistema di perforazione a rotazione con circolazione di fluido. La presenza o meno di acque sotterranee limita poi la scelta tra sistemi aperti o chiusi e le proprietà termiche del sottosuolo influenzano la lunghezza necessaria per i BHE.

I costi operativi sono principalmente influenzati dai prezzi dell'elettricità, del carburante e dall'efficienza del sistema. In genere un impianto utilizzato in riscaldamento e in raffreddamento è più efficiente dello stesso limitato ad uno dei due, perché si mantiene costante la temperatura del sottosuolo. In più il prezzo speso per climatizzare con un GSHP rientra nella stessa fascia delle alternative tradizionali, comprendendo l'ammortamento dell'investimento.

Per i grandi impianti commerciali, le pompe di calore geotermiche o lo stoccaggio di energia geotermica possono tradursi in una riduzione sostanziale dei costi, con un breve periodo di ritorno economico. In molti casi infine, il sistema geotermico permette una riduzione dello spazio (per esempio evitando l'installazioni delle torri di raffreddamento, o locali caldaie in posizioni poco funzionali), ottimizzando di fatto la superficie utile.

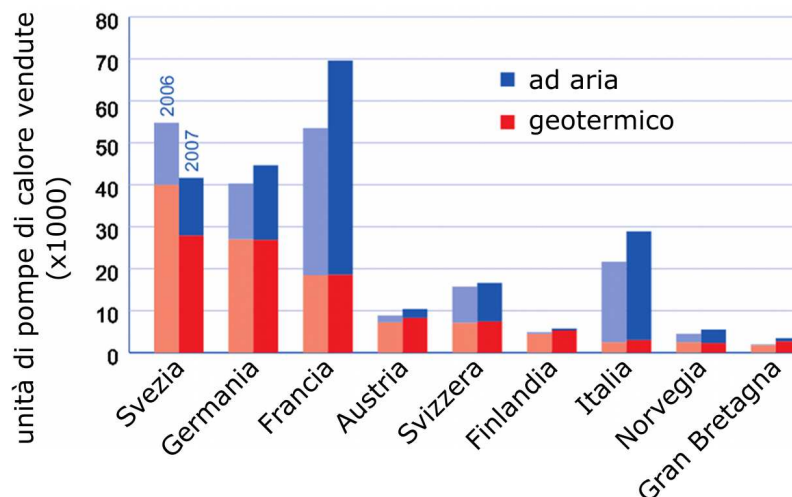


Figura 2.4: Vendita annuale di pompe di calore a sorgente geotermica e ad aria esterna (fonte: European Heat Pump Association) [EGEC, 2009]

2.1.2 La situazione in Italia

L'interesse e lo sviluppo di questo mercato in Italia è molto ridotto, rispetto agli altri Paesi europei e a quello interno delle PdC ad aria usate principalmente in estate per il raffreddamento (come evidenziato nel grafico di figura 2.4); le ragioni possono essere così riassunte:

- * il clima temperato dell'area mediterranea con temperature che normalmente variano tra $-3 \div 35^{\circ}\text{C}$;
- * il differente approccio per il riscaldamento; in Italia c'è l'abitudine di usare le caldaie a gas naturale, perché esiste una grande rete di distribuzione, che raggiunge a costi contenuti gran parte della popolazione (gli utenti che non sono coperti utilizzano caldaie alimentate a propano o cherosene);

- * la cultura in generale che identifica erroneamente il riscaldamento elettrico con la resistenza elettrica (effetto Joule), con un immediato richiamo ad elevati costi di gestione;
- * lo scarso interesse verso le energie rinnovabili.

Anche se negli ultimi tre anni si è assistito ad un crescente numero di installazioni e alla nascita di nuove aziende specializzate in materia, il mercato geotermico italiano rimane comunque di nicchia: la gente mostra un discreto interesse ed esistono differenti approcci tecnici. Gli installatori ed i progettisti poi hanno introdotto un gran numero di soluzioni legate al sottosuolo: alcune sono standard e ben testate, altre no. L'effetto principale è che si installano spesso impianti malfunzionanti o che saturano il circuito nel terreno. Capita poi che installatori o ingegneri termici confondano il cliente inducendolo a seguire direzioni opposte tra loro [Maritan e Panizzolo, 2008].

Per cercare di chiarire e semplificare la tematica si descriveranno brevemente le caratteristiche principali e i diversi tipi di impianti che sono presenti in letteratura e un loro iniziale dimensionamento.

2.2 Definizione e descrizione

L'impianto geotermico è un sistema di climatizzazione che utilizza come fonte termica il terreno, appoggiandosi se necessario ad una pompa di calore. Si dimostra molto versatile, essendo applicabile in qualsiasi tipo di sottosuolo ed in qualsiasi regione d'Italia. Inoltre la stessa sorgente termica invernale può essere utilizzata come serbatoio termico estivo, con lo stesso impianto cioè è possibile non solo riscaldare un edificio, ma anche raffreddarlo, sfruttando il freddo del sottosuolo, tramite una particolare tecnica chiamata «active cooling» se si utilizza la PdC o «free cooling» se non la si utilizza. Esistono poi molteplici tipologie di impianti che ricadono in due categorie principali: a circuito aperto o chiuso (come ben raffigurato in figura 2.5).

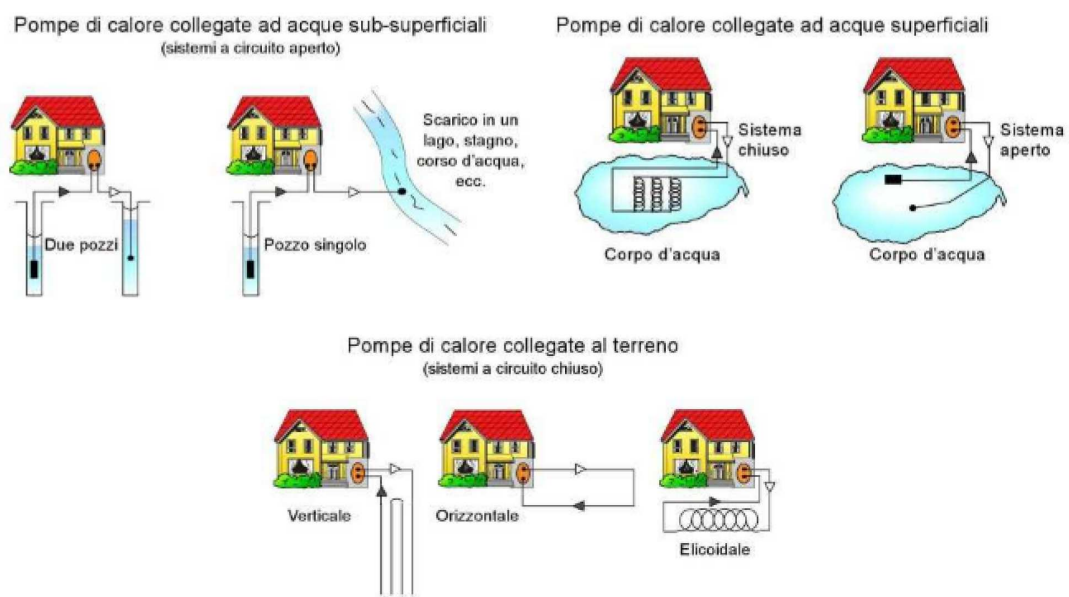


Figura 2.5: Schemi semplificati di sistemi con pompe di calore[Fanelli e Dickson, 2004]

Scegliere il corretto impianto per una specifica installazione richiede di considerare svariati fattori, in particolare:

- geologia e idrogeologia del sottosuolo (un'adeguata permeabilità è obbligatoria per gli impianti a circuito aperto);
- area e utilizzazione sulla superficie (gli impianti a circuito chiuso orizzontale richiedono un'abbondante spazio esterno);
- sorgenti di potenziale calore nelle vicinanze;
- caratteristiche termiche dell'edificio.

Nella fase di progettazione, una volta scelta la sorgente più adatta, si passa al dimensionamento della sala tecnica (figura 2.6), stabilendo i parametri chiave più adatti alle dimensioni dell'impianto, in modo tale da ottenere una prestazione ottimale al minimo costo. In particolare:

- il fluido termovettore che permette all'impianto di cedere o iniettare il calore al sottosuolo;
- la pompa di calore per portare il calore ad un livello di temperatura opportuno;
- il sistema di distribuzione del calore all'interno dell'edificio (pavimento o pareti radianti, bocchette di ventilazione, ventilconvettori, etc ...).

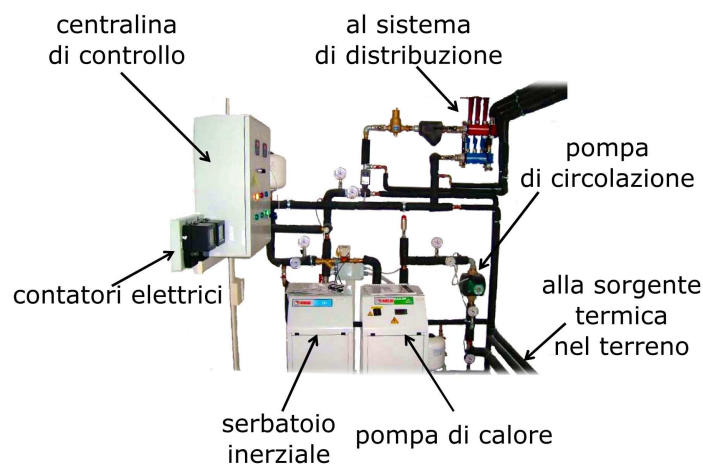


Figura 2.6: Una sala tecnica con i vari dispositivi evidenziati [Tinti, 2009]

2.2.1 Il fluido termovettore

Trasporta il calore ceduto dalla sorgente nel terreno all'impianto e viceversa, a seconda delle temperature raggiunte e delle caratteristiche chimiche può andare: direttamente all'impianto; allo scambiatore di calore o alla pompa di calore.

Negli impianti a circuito aperto, per esempio, può essere costituito dall'acqua emunta dai pozzi, che poi se non è di qualità adeguata dovrà scambiare il proprio calore in un opportuno scambiatore di calore per non corrodere o danneggiare la PdC (in questi casi è necessario fare delle analisi chimiche e biologiche per stabilire la qualità dell'acqua ed il suo carico inquinante).

Negli impianti a circuito chiuso invece si può utilizzare come fluido termovettore acqua pura o addizionata con sostanza anticongelante. Con acqua pura la PdC non può evaporare al di sotto di $5 \div 6^\circ\text{C}$ con il rischio di non soddisfare ai carichi più esigenti. In questi casi allora si aggiunge una sostanza anticongelante che permette di evaporare anche a temperature più basse e assorbire sufficientemente calore dal terreno, facendo così fronte a tutti i carichi invernali. Dal punto di vista tecnico ed ambientale, la sostanza anticongelante (in genere glicole etilenico o propilenico) può innescare fenomeni di corrosione ed in caso di perdite andare ad inquinare il sottosuolo e le eventuali falde acquifere, con danni assolutamente non trascurabili. Inoltre dopo un certo periodo di tempo la sostanza va reintegrata. L'accoppiata acqua ed anticongelante richiede quindi maggiore manutenzione ed attenzione ed è preferibile quindi sovradimensionare il circuito scambiatore a terreno (anche se questo fa aumentare il costo iniziale di installazione e quindi anche il tempo di ritorno dell'investimento) ed utilizzare acqua pura come fluido termovettore: ciò permette di avere più alte efficienze energetiche della PdC [Zarrella, 2009b].

2.2.2 La pompa di calore

È una macchina termodinamica a ciclo inverso che lavora tra 2 livelli termici, uno interfacciato con la sorgente fredda ed uno ad alta temperatura: il cosiddetto serbatoio caldo. In realtà il termine PdC andrebbe correttamente ad indicare il solo funzionamento in riscaldamento, cioè l'effetto utile che si considera è quello che viene indicato come Q_2 (flusso termico lato condensatore). In realtà molte di queste apparecchiature sono invertibili e funzionano anche come refrigeratore, quindi si va a sfruttare come effetto utile quello indicato come Q_1 (flusso termico lato evaporatore); uno schema utile della pompa di calore è rappresentato in figura 2.7 nella pagina seguente.

Rispetto agli usuali impianti di riscaldamento, la PdC offre il vantaggio di fornire più energia (calore), di quanta ne viene richiesta per funzionare. Ne esistono di molti tipi e si possono suddividere in base:

- al tipo di ciclo termodinamico: a compressione di vapore, a compressione termica, ad assorbimento/adsorbimento;
- al tipo di alimentazione: elettrica, a gas, a calore di recupero;
- al tipo di sorgente termica: aria, acqua superficiale o sotterranea, terreno, solare termico, calore di recupero.

In questa sede la pompa di calore presa come modello di riferimento, sarà la più semplice e anche la più presente sul mercato, ovvero quella ad alimentazione elettrica e a compressione di vapore.

Il circuito chiuso che la costituisce è composto da 3 diversi componenti, tutti percorsi da un fluido particolare chiamato frigorigeno¹:

1) due scambiatori di calore:

- l'evaporatore che si interfaccia con la sorgente fredda,
- il condensatore invece con il serbatoio caldo;

¹Il fluido frigorigeno utilizzato nelle pompe di calore presenta un elevato calore latente di vaporizzazione in modo da ottenere lo stesso effetto con una quantità minore di liquido. Non deve essere infiammabile, tossico e non deve presentare effetti corrosivi. Per ottenere delle caratteristiche ottimali sono stati sintetizzati chimicamente diversi composti che si possono dividere in fluidi refrigeranti (R410A, R407C) e solo in applicazioni recenti in fluidi cosiddetti naturali (propano, ammoniaca, anidride carbonica), un tempo si utilizzavano i Clorofluorocarburi (CFC), ma sono stati banditi dal Protocollo di Montreal [Cesi, 2001].

- 2) il compressore che porta il fluido dalla bassa alla alta pressione;
- 3) la valvola di laminazione che permette di invertire il processo.

Il condensatore e l'evaporatore non sono altro che tubi posti a contatto con un fluido di servizio (che può essere acqua o aria) nei quali scorre il fluido frigorifero. Questo cede calore al condensatore e lo sottrae all'evaporatore. I componenti del circuito possono essere sia raggruppati in un unico blocco, sia divisi in due parti (sistemi «split») raccordati dai tubi nei quali circola il fluido frigorifero.

Durante il funzionamento, il fluido subisce le seguenti trasformazioni:

- ▶ Compressione: il fluido frigorifero allo stato gassoso e a bassa pressione, proveniente dall'evaporatore, viene portato ad alta pressione; nella compressione si riscalda assorbendo una certa quantità di calore.
- ▶ Condensazione: il fluido frigorifero, proveniente dal compressore, passa dallo stato gassoso a quello liquido cedendo calore all'esterno.
- ▶ Espansione: passando attraverso la valvola di espansione il fluido frigorifero liquido si trasforma parzialmente in vapore e si raffredda.
- ▶ Evaporazione: il fluido frigorifero assorbe calore dall'esterno ed evapora completamente.

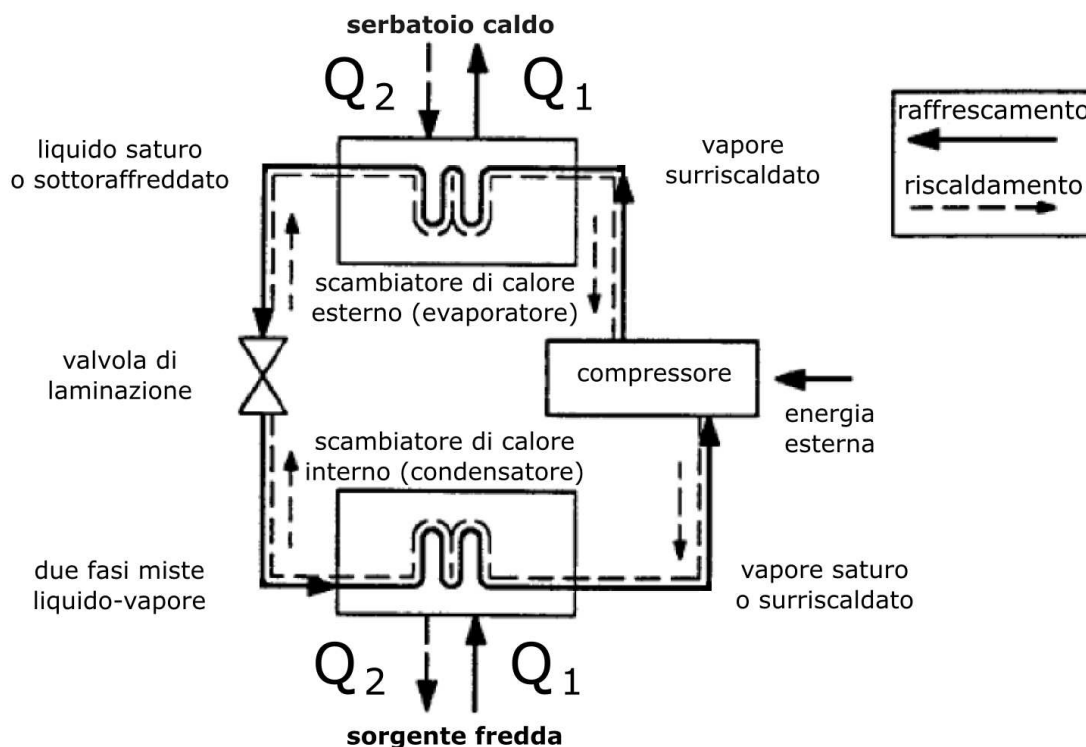


Figura 2.7: Schema semplificato di funzionamento di una PdC

L'insieme di queste trasformazioni costituisce il ciclo della pompa di calore: fornendo energia con il compressore al fluido frigorifero, questo, nell'evaporatore, assorbe calore dal mezzo circostante e, tramite il condensatore, lo cede al mezzo da riscaldare.

Come tutte le macchine, anche la PdC sarà caratterizzata da alcuni parametri caratteristici:

- la potenza (termica e/o frigorifera) espressa in kW;
- l'efficienza energetica, descritta dal *COP*, un coefficiente adimensionale.

Il *COP* in termini fisici di flusso di calore è la potenza assorbita tramite compressore, esprime un termine ideale, cioè il valore massimo di *COP* che si può ottenere dal punto di vista termodinamico. Misura l'efficienza di un impianto a pompa di calore, in riscaldamento ed in raffrescamento. Il valore medio annuale dei *COP* per un assegnato impianto è definito dal Fattore di Performance Stagionale (*SPF*) che per le pompe di calore geotermiche raggiungere valori molto alti.

$$\text{IN RISCALDAMENTO} \quad \text{COP}_H = \frac{|Q_2|}{|L|} = \frac{|Q_2|}{|Q_2| - Q_1} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (2.2.1)$$

$$\text{IN RAFFRESCAMENTO} \quad \text{COP}_C = \frac{Q_1}{|L|} = \frac{Q_1}{|Q_2| - Q_1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (2.2.2)$$

Al denominatore si può vedere il salto di temperatura tra la sorgente fredda e quella calda. Se questa differenza diminuisce, il *COP* aumenta: *più vicine sono le temperature delle 2 sorgenti, più alta è l'efficienza (in analogia ai serbatoi idraulici).*

La pompa di calore in regime di riscaldamento si comporta come una caldaia, chiaramente ci sarà dal punto di vista fisico generale un valore di *COP* limite per cui la PdC è conveniente rispetto alla caldaia (il calcolo viene evidenziato nella figura 2.8 e da un $\text{COP}_{\text{lim}} < 2,91$). Ciononostante il legislatore, pubblicando nella Gazzetta Ufficiale n. 224 del 26 settembre 2009 il decreto dal titolo «Disposizioni in materia di detrazioni per le spese di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, ai sensi dell'articolo 1, comma 349, della legge 27 dicembre 2006, n. 296», ha fissato dei valori limite piuttosto alti che non trovano spiegazione dal punto di vista fisico ($\text{COP} \in 3,1 \div 5,1$).

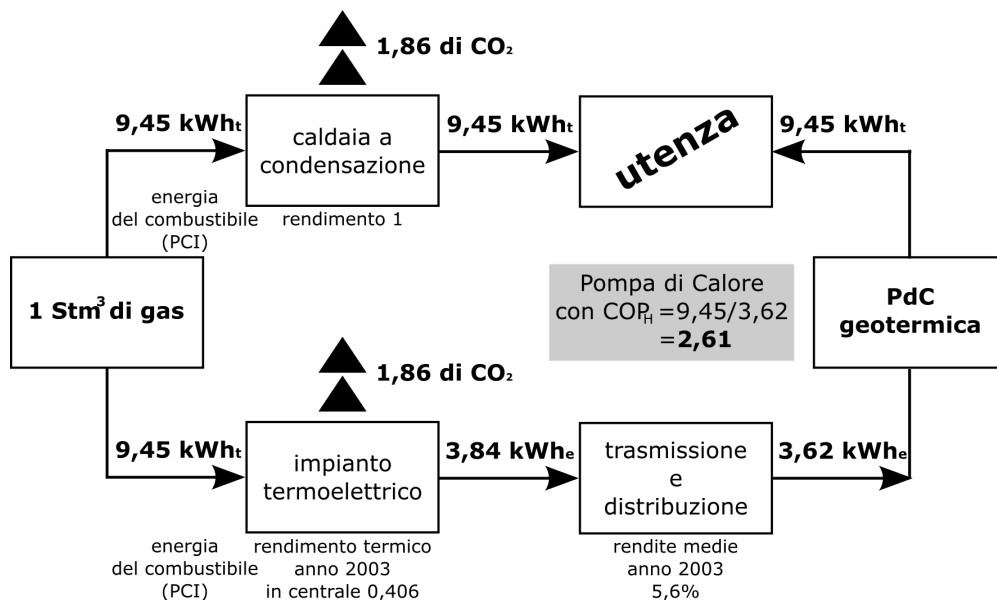


Figura 2.8: Calcolo del *COP* minimo termodinamico per assicurare la convenienza rispetto ad un impianto a caldaia a gas [Zarrella, 2009a]

Come sorgente termica la PdC può utilizzare anche l'aria esterna, che pur presentando delle facilitazioni dal punto di vista impiantistico, risente moltissimo delle variazioni termiche stagionali in regime di riscaldamento (soprattutto nei climi del nord Italia). In pratica

quando la temperatura esterna tende a scendere si evaporerà a temperature più basse, con il rischio concreto di formare brina sull'evaporatore. Questo impone cicli di sbrinamento, mediante resistenze elettriche che dal punto di vista energetico pesano tantissimo, andando a compromettere l'intera efficienza termodinamica dell'impianto.

Strategie per la scelta di un sistema a PdC

Le norme UNI EN 15450 [2008] fissano alcuni parametri e idee per la progettazione di un sistema a pompa di calore, che si riassumono in questo modo:

- Ottenere il più alto *SPF* nel rispetto della sorgente di calore scelta. *SFP* aumenta con il diminuire della variazione tra la temperatura della sorgente esterna e quella persa nella sorgente interna. Quindi sono preferibili alte temperature della sorgente esterna e ridotta dissipazione di quella interna (per ogni K risparmiato si incrementa il *COP* del 2 %).
- Rendere il *SPF* uguale o più alto del valore minimo richiesto dalle normative del proprio Paese. Se questo non fosse possibile sono presenti delle tabelle che riportano i valori minimi e standard tipici dell'Europa Centrale. Ad ogni modo la direttiva 2009/28/CE dispone che entro il 10 gennaio 2013 verranno stabiliti gli orientamenti sul valore che gli Stati membri possono conferire ai valori *SPF* per le varie tecnologie e applicazioni delle pompe di calore, prendendo in considerazione le differenze nelle condizioni climatiche, particolarmente per quanto concerne i climi molto freddi.
- Limitare il numero di cicli di avviamento della pompa di calore (per esempio 3 cicli per ora), in accordo con i regolamenti locali e con le specifiche tecniche della PdC.
- Minimizzare l'impatto ambientale dovuto al funzionamento della PdC, ovvero:
 - *ODP* uguale a zero;
 - *GWP* nel rispetto delle UNI EN 378-1 [2008];
 - evitare le emissioni di refrigerante nell'atmosfera per perdite durante il funzionamento dell'impianto e le operazioni di manutenzione.
- Realizzare un sistema user-friendly che richiede una limitata manutenzione.

2.2.3 Il sistema di distribuzione

Il geotermico diventa conveniente quando il salto termico è il più contenuto possibile, si useranno quindi impianti di riscaldamento che funzionano a bassa temperatura (30 ÷ 40°C), rispetto a quelli tradizionali che richiedono invece temperature dell'ordine di 70°C. Le due alternative possibili sono quindi: *i sistemi diffusi* (pannelli radianti in figura 2.9 a fronte), in cui la trasmissione del calore avviene per irraggiamento, e *i sistemi concentrati* (ventilconvettori in figura 2.10 nella pagina successiva), in cui la trasmissione del calore avviene per moto convettivo. Per tali motivi è conveniente pensare allo sfruttamento di energia geotermica solo nel caso di nuove costruzioni o ristrutturazioni complete, dove è possibile prevedere l'installazione di un impianto di distribuzione adatto (in tabella 2.2 a fronte, vengono evidenziati i pregi e i difetti dei due sistemi di distribuzione).

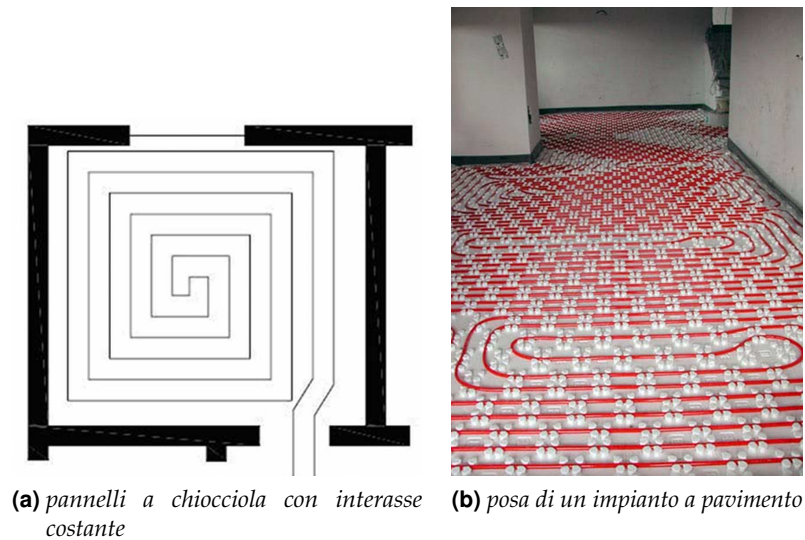


Figura 2.9: I pannelli radianti utilizzano il calore proveniente dalle tubazioni collocate dietro le superfici dell'ambiente da riscaldare, in questo caso il pavimento. Possono avere anche configurazioni a parete e a soffitto [Tinti, 2009]

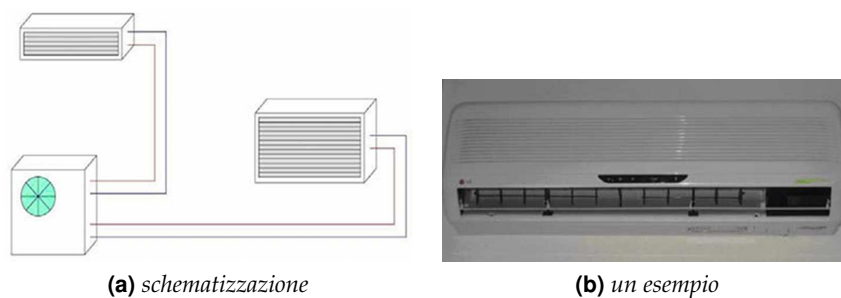


Figura 2.10: Il ventilconvettore preleva aria dall'ambiente (da scaldare o raffreddare), che viene prima filtrata e poi spinta dal ventilatore verso la batteria di scambio termico che per convezione forzata scambia calore con l'acqua [Tinti, 2009]

Tabella 2.2: Quadro riassuntivo per le due tipologie di impianto di distribuzione di calore [Tinti, 2009]

Tipologia	temperatura di esercizio °C	pro	contro
pannelli radianti	in inverno 30 ÷ 35 in estate 10 ÷ 15	▷ possibilità di freecooling ▷ integrazione architettonica ▷ assenza di moti convettivi	▷ necessità di deumidificare ▷ comfort non ottimale
ventilconvettori	in inverno 35 ÷ 40 in estate 15 ÷ 20	▷ inversione del ciclo ▷ adatti per ristrutturazioni ▷ deumidificazione interna	▷ circolazione di aria ▷ bassa integrazione architettonica

2.3 Tipologie di impianti

Le pompe di calore che adottano la geotermia per la climatizzazione degli edifici hanno il vantaggio, rispetto per esempio agli impianti che sfruttano l'aria esterna, di poter contare su una sorgente che presenta una variazione di temperatura molto contenuta durante la giornata e la stagione di funzionamento, ottimizzando quindi il *SPF*. Nel seguito si affronteranno gli impianti a circuito aperto e chiuso, rispettivamente open e closed loop, citando i criteri di dimensionamento forniti dalle norme UNI EN 15450 [2008].

2.3.1 Open loop

Questo sistema è caratterizzato dal fatto che il principale portatore di calore, l'acqua, circola liberamente nel sottosuolo o in superficie, a seconda se la presa avviene in falda o in laghi o fiumi. I sistemi ad acque sotterranee sono i più utilizzati e la parte tecnica di questi sistemi è costituita dai pozzi di presa, per estrarre o iniettare acqua dagli strati cuscinetto nel sottosuolo (gli acquiferi). In molti casi, sono richiesti 2 pozzi, uno per estrarre l'acqua, e uno per lo scarico nello stesso acquifero di produzione.

Con gli impianti a circuito aperto, una formidabile sorgente di calore può essere sfruttata economicamente, ma d'altra parte i pozzi in falda richiedono manutenzione e sono limitati a quei siti con una discreta disponibilità di acquiferi. Le principali richieste sono:

- sufficiente permeabilità, per permettere la produzione della portata richiesta dell'acqua con un piccolo abbassamento;
- buone proprietà chimiche, per esempio basso contenuto di ferro, per evitare problemi di incrostazione, intasamenti e corrosione.

Dimensionamento

Per quanto riguarda la qualità dell'acqua prelevata bisogna evitare danni all'impianto, dovuti cioè a corrosione e precipitazione. In genere si dovrebbero seguire i valori indicati dal produttore o, se non fossero presenti, quelli elencati in tabella 2.3 nella pagina successiva. Nel dubbio è raccomandabile una analisi chimica dell'acqua emunta. Se questi non fossero rispettati, è sempre possibile disporre di uno scambiatore di calore, che funge da intermediario tra l'acqua sotterranea inquinata e la PdC.

Per la temperatura dell'acqua, per i sistemi con una richiesta termica in riscaldamento minore di 30 kW, la temperatura media dell'acqua estratta può essere assunta come la temperatura media locale dell'aria esterna, fornita da un pozzo di estrazione situato almeno a 10 m di profondità. Questo valore può essere aumentato di 3 °C nelle aree urbane o nelle regioni con una grande copertura nevosa.

Per la quantità d'acqua, il rendimento del pozzo deve garantire una portata costante pari a quella nominale della PdC attaccata. Se non è disponibile alcun dato, si può assumere come parametro di progetto una portata di $0,25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ per kilowatt di capacità dell'evaporatore. La differenza di temperatura tra quella fornita e quella resa è compresa in genere tra $3 \div 4 \text{ K}$ per piccoli sistemi. I grandi impianti invece possono operare con differenze di temperatura più marcate.

2.3.2 Closed loop

Il calore può essere trasportato sia attraverso sonde geotermiche orizzontali, posizionate tra 0,2 e 2 m sotto il piano campagna (a seconda della regione) sia da sonde geotermiche verticali, trivellate nel terreno.

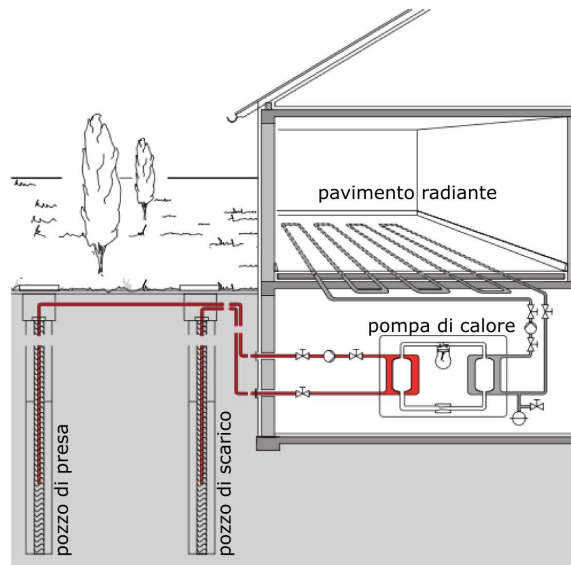


Figura 2.11: Sistema a due pozzi o "doublette" [VDI, 2001a]

Tabella 2.3: Requisiti dell'acqua estratta per gli impianti open loop [UNI EN 15450, 2008]

componenti	valore	unità di misura
materiale organico (possibilità di sedimentazione)	nessuna	-
valore di pH	6,5 ÷ 9	-
conduttività elettrica	50 ÷ 1 000	$\mu S cm^{-1}$
cloruro	< 300	$mg l^{-1}$
ferro e manganese	< 1	$mg l^{-1}$
solfato	< 2	$mg l^{-1}$
contenuto di O₂	< 2	$mg l^{-1}$
cloro	0 ÷ 5	$mg l^{-1}$
nitrate	0 ÷ 100	$mg l^{-1}$

Come già chiarito nel capitolo 1, la variazione stagionale della temperatura del suolo decresce con l'aumentare della profondità, ora vengono forniti alcuni valori tipici nel grafico di figura 2.12 nella pagina seguente. Per la progettazione del sistema (ovvero il calcolo del carico di calore), si prenderà in considerazione il più basso valore di temperatura (tipicamente 0°C).

I circuiti saranno installati (o meglio posati) ad una profondità tale da evitare il congelamento del supporto nelle condizioni estreme, che forniranno la temperatura esterna di progettazione. Per le sonde verticali invece, può essere assunta la temperatura esterna media annuale come valore di progettazione.

2.3.3 A sonde orizzontali

Tra i sistemi a circuito chiuso il più facile da installare è sicuramente quello delle sonde geotermiche orizzontali (sinonimi: ground heat collector, horizontal loop). Per ottimizzare lo spazio, in Europa centrale e occidentale i tubi interrati sono collegati in serie o in parallelo.

Per i sistemi densi di tubi, si rimuove completamente lo strato superiore del sottosuolo, si posano le tubazioni e poi il terreno di scavo viene ridistribuito sopra. Nel Nord Europa (e in Nord America), vista l'ampia possibilità di metratura esterna, si ricorre ai modelli in serie ed in parallelo.

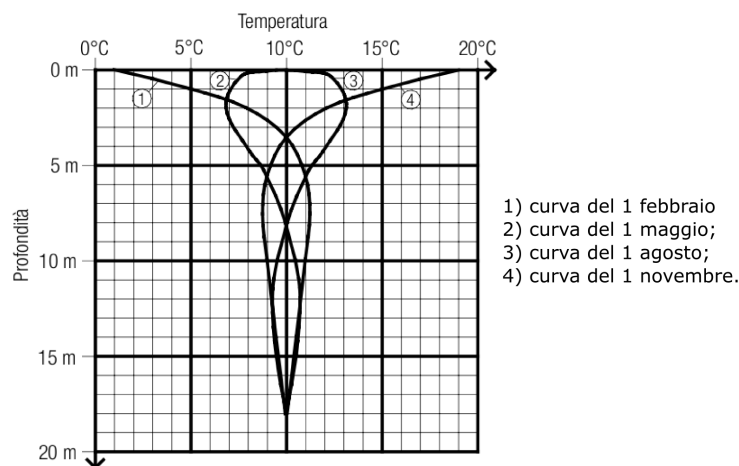


Figura 2.12: Andamento teorico della temperatura in funzione della profondità, per una località con una temperatura media esterna di 10 °C [UNI EN 15450, 2008]

In altre regioni invece per limitare la superficie di scavo, sono stati sviluppati alcuni scambiatori di calore che sfruttano un'area più piccola a parità di volume; questi collettori sono anche più adatti per il riscaldamento e il raffreddamento in quelle aree dove la temperatura naturale del terreno non è di vitale importanza. Sono ampiamente utilizzati in America del Nord, e solo un tipo, il raccoglitore in trincea, ha raggiunto una certa distribuzione in Europa, principalmente in Austria e Germania meridionale. Per il collettore in trincea, una serie di tubi a piccolo diametro sono attaccati alle pareti fortemente inclinate di una trincea scavata per alcuni metri di profondità. Altri tipi includono collettori simili a dei rotoli avvitati come i canestri energetici o i collettori slinky (figura 2.13).

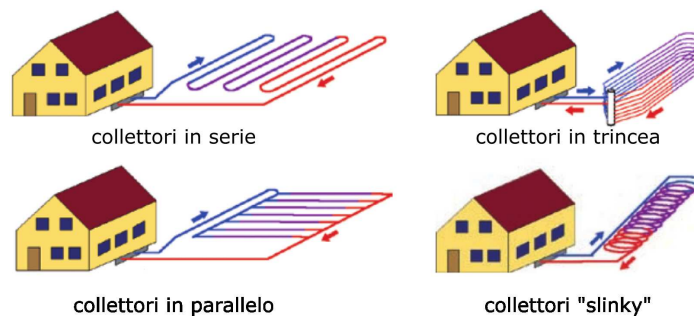


Figura 2.13: Varie soluzioni possibili di sonde orizzontali [EGEC, 2009]

Dimensionamento

Nei semplici casi come gli edifici domestici, la stima dei valori medi specifici per l'estrazione del calore può essere ottenuta determinando una valutazione per metro quadro dell'area del collettore nel sottosuolo in W m^{-2} . La stima dipende dalla qualità del suolo e dalla durata di funzionamento dell'impianto. I valori dati in tabella 2.4 a fronte assumono periodi di funzionamento di 1 800 e 2 400 ore per anno in modalità riscaldamento. La produzione di calore aggiuntivo per l'acqua calda domestica può essere determinata allungando il periodo di funzionamento.

Per periodi operativi più lunghi, il calore annuale estratto per metro quadrato di superficie del collettore (misurato in kWh m^{-2} per anno) deve inoltre essere preso in considerazione

nella progettazione del sistema, dal momento che questo valore riflette l'effetto a lungo termine di estrazione continua di calore. Il valore dovrebbe essere compreso tra 50 e 70 kWh m⁻² all'anno per il solo riscaldamento.

La diminuzione di temperatura, tra quella di ritorno del mezzo di scambio termico e quella del terreno indisturbato, non deve essere tale da arrecare problemi tecnici durante il funzionamento. Un valore tipico per l'Europa centrale è 12 K.

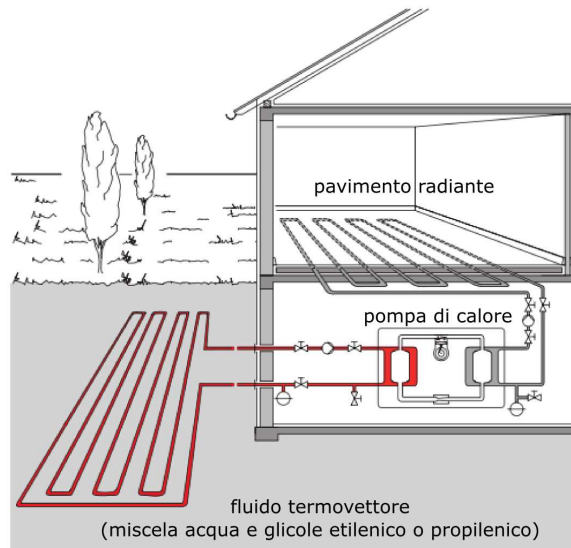


Figura 2.14: Schema classico di un impianto a sonde orizzontali [VDI, 2001a]

Tabella 2.4: Rendimento termico per alcuni tipi di suolo dell'Europa Centrale [VDI, 2001a]

Tipo di suolo	resa termica	
	1 800 ore all'anno W m ⁻²	2 400 ore all'anno W m ⁻²
terreno non coesivo secco	10	8
terreno coesivo umido	20 ÷ 30	16 ÷ 24
sabbia o ghiaia satura	40	32

2.3.4 A sonde verticali

Come si è visto, la temperatura al di sotto di una certa profondità ("zona neutra di omotermia", a circa 15 ÷ 20 m dal piano campagna) rimane costante nel corso dell'anno. Questo fatto e la necessità di garantire una capacità sufficiente di scambio di calore con una zona confinata della superficie, favorisce l'installazione dei scambiatori di calore verticali (sonde geotermiche verticali).

In una sonda geotermica verticale, i tubi di plastica (polietilene o polipropilene) che costituiscono lo scambiatore, vengono installati in fori trivellati, e lo spazio restante viene riempito con un malta cementizia opportunamente miscelata. In Svezia i pozzi in rocce cristalline e dure di solito rimangono aperti e si sfruttano le acque sotterranee per lo scambio termico tra i tubi e la roccia. Se è richiesto più di uno scambiatore di calore, i tubi devono essere collegati in modo tale da garantire una distribuzione uniforme del flusso nei diversi canali. I collettori possono essere posti o presso l'edificio, oppure collegati in trincea nel campo sonde.

Diversi tipi di scambiatori possono essere utilizzati (visibili in figura 2.15) e si possono così suddividere:

- tubi ad U, costituiti da una coppia di tubi diritti, collegati da un raccordo curvato di 180° alla estremità inferiore del foro. Uno, due o anche tre tubi ad U possono essere installati in un singolo foro. Il vantaggio del tubo ad U è il basso costo del materiale di fabbricazione, con il risultato di rendere il doppio tubo a U il più utilizzato tra le sonde geotermiche in Europa.
- tubazioni coassiali (tubi concentrici), ovvero due tubi di diametro differente verticali, o in configurazioni più complesse.

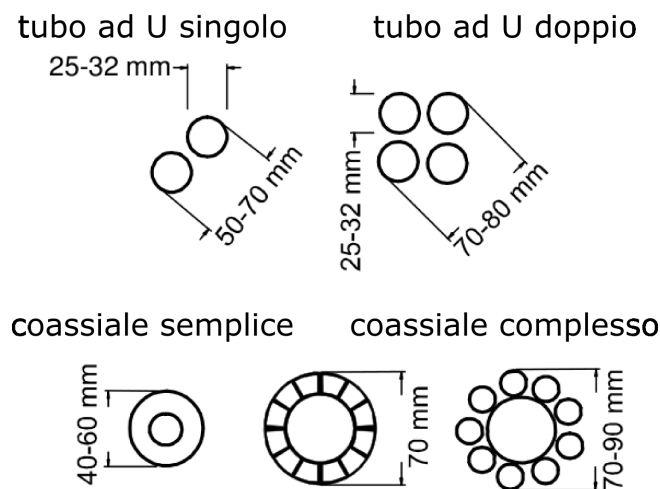


Figura 2.15: Tipi di sonde viste in sezione [EGEC, 2009]

Gli impianti realizzati con questo sistema, vanno dalle piccole abitazioni con un solo foro, agli edifici di grandi dimensioni, che richiedono veri e propri campi di sonde geotermiche.

La fonte di calore per il recupero termico delle sonde geotermiche è il calore solare (nella parte superiore) e il flusso di calore geotermico (nella parte inferiore), con qualche influenza dovuta al fluire delle acque sotterranee o di percolazione. Tuttavia, l'influenza delle acque sotterranee nella maggior parte dei casi non è molto grande e la conducibilità termica del terreno rimane il parametro principale.

Il foro di riempimento e le pareti dello scambiatore di calore rappresentano una ulteriore dissipazione, che può essere riassunta come una resistenza termica del foro. I valori di questo parametro di solito sono dell'ordine di $0,1 \text{ K W}^{-1} \text{ m}$, cioè per un'estrazione di calore di 40 W m^{-1} , questo si tramuta in una perdita di 4 K all'interno del foro. Per risolvere questo problema sono state sviluppate delle particolari malte cementizie.

Dimensionamento

Per piccoli sistemi, di capacità inferiore ai 30 kW, i valori medi specifici dell'estrazione di calore possono essere ottenuti valutando il calore per metro lineare di foro in W m^{-1} . Questo valore dipende dalla qualità del suolo e dalla durata dell'estrazione del calore (periodo di funzionamento della pompa di calore in ore per anno). I valori dati in tabella 2.5 nella pagina 42 assumono periodi di funzionamento della PdC di 1 800 e 2 400 ore per anno in modalità di riscaldamento. La produzione aggiuntiva di calore per l'acqua calda sanitaria dovrà essere considerata allungando il periodo di funzionamento. La tabella inoltre assume un range di

temperatura principale esterna tra 9 e 11 °C ed è valida per la modalità riscaldamento, con al massimo 5 fori di trivellazione. Se la qualità del suolo varia significativamente durante la procedura di trivellazione, la lunghezza della sonda e/o il numero delle sonde dovrà essere adattato in modo da compensare la variazione nell'estrazione del massimo flusso di calore.

Per periodi operativi più lunghi, il calore annuale estratto per metro lineare di foro (misurato in kWh m⁻¹ per anno) deve inoltre essere preso in considerazione nella progettazione del sistema, dal momento che questo valore riflette l'effetto a lungo termine di estrazione continua di calore. Il valore dovrebbe essere compreso tra 100 e 150 kWh m⁻¹ all'anno per il solo riscaldamento.

La diminuzione di temperatura, tra quella di ritorno del mezzo di scambio termico e quella del terreno indisturbato (cioè a 10 m di profondità), non deve essere tale da arrecare problemi tecnici durante il funzionamento. Un valore tipico per l'Europa centrale è 11 K.

Per le grandi installazioni sono richiesti calcoli specifici usando solutori analitici o metodi numerici.

Il materiale di riempimento ed il grouting delle sonde verticali potrebbe rendersi necessario, le distanze di separazione tra le sonde devono poi essere adeguate e rispettare i regolamenti locali.

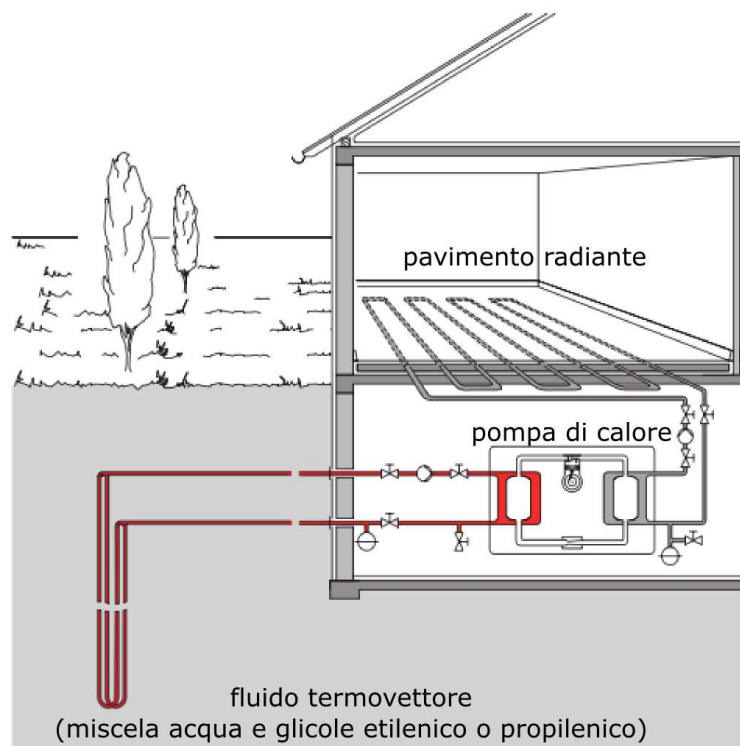


Figura 2.16: Schema classico a sonde verticali [VDI, 2001a]

2.3.5 Ad espansione diretta

A differenza della maggior parte dei closed loop, in questi impianti il fluido frigorifero della pompa di calore circola direttamente nei tubi del circuito lato terreno (in altre parole, l'evaporatore della pompa di calore è esteso al terreno). Il vantaggio è evidente: si evita un processo di scambio di calore, migliorando l'efficienza del sistema. L'espansione diretta richiede una buona conoscenza del ciclo di refrigerazione ed è limitata alle unità più piccole.

Tabella 2.5: Rendimento termico per varie tipologie di suolo nell'Europa Centrale [VDI, 2001a]

I valori sono accettabili per:

- il solo riscaldamento (inclusa l'acqua calda sanitaria);
- la profondità del foro tra 40 ÷ 100 m;
- l'interasse tra i fori di almeno 5 m per infissioni di 40 ÷ 50 m;
- l'interasse tra i fori di almeno 6 m per infissioni di 50 ÷ 100 m;
- i tubi a doppio U con DN 20, DN 25 o DN 32;
- una modesta densità di piccoli impianti.

Tipo di suolo	resa termica	
	1 800 ore all'anno W m ⁻¹	2 400 ore all'anno W m ⁻¹
In generale:		
terreno scadente (secco, $\lambda < 1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	25	20
suolo normale (saturo, $1,5 < \lambda < 3,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	60	50
suolo ben consolidato (con $\lambda > 3,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	84	70
In particolare:		
ghiaia o sabbia secca	< 25	< 20
ghiaia o sabbia satura	65 ÷ 80	55 ÷ 65
ghiaia o sabbia (con flusso di falda intenso)	80 ÷ 100	80 ÷ 100
argilla umida	35 ÷ 50	30 ÷ 40
calcare omogeneo	55 ÷ 70	45 ÷ 60
arenaria	65 ÷ 80	55 ÷ 65
magmatite silicia (granito)	65 ÷ 85	55 ÷ 70
magmatite basica (basalto)	40 ÷ 65	35 ÷ 55
diorite	70 ÷ 85	60 ÷ 70

(i valori possono variare in funzione delle discontinuità presenti e delle condizioni climatiche)

Inoltre è stato dimostrato che i tubi funzionano bene per l'estrazione del calore, ma non tutti per la sua iniezione.

Usando il glicole etilenico il terreno può anche essere utilizzato per il raffreddamento. Il calore viene respinto nel sottosuolo, sia per far funzionare la pompa di calore in senso inverso, sia per far funzionare direttamente l'accoppiamento tra il circuito nell'edificio e quello nel terreno.

2.3.6 Fondazioni energetiche

In edifici che richiedono fondazioni su pali, si possono fissare nella gabbia d'armatura tubi in polietilene, nei quali circolerà successivamente il fluido termovettore (figura 2.17a a fronte). Si dovrà però evitare che la temperatura di questo fluido scenda al di sotto di 0°C, in quanto ciò porterebbe al congelamento sia della struttura che del terreno circostante, con conseguenti ripercussioni statiche e geotecniche. Tutti i tipi di pali possono essere utilizzati (prefabbricati o gettati in opera), e il diametro può variare da 40 cm a oltre 1 m. Un'applicazione simile è quella in cui i circuiti scambiatori vengono distribuiti nel magrone di sottofondazione (figura 2.17b nella pagina successiva), anche in questo caso bisogna prestare attenzione alla temperatura d'esercizio.

Il vantaggio maggiore di queste ultime applicazioni è la notevole riduzione del costo di installazione: infatti nella prima viene meno il costo di perforazione, nella seconda, invece, quello di sbancamento. L'aspetto negativo è una diminuzione della resa termica rispetto ai sistemi classici presentati in precedenza.

(a) Palo energetico (dal sito www.rehau.it)

(b) Fondazione a platea energetica [Felderer, 2006]

Figura 2.17: Esempi di fondazioni profonde e superficiali con l'inserimento di tubi geotermici

2.3.7 Confronto finale

Acqua		Terreno		
▷ costo intermedio	▷ costo elevato			
▷ rendimenti elevati	▷ rendimenti medi			
▷ problemi autorizzativi	▷ minimo impatto ambientale			
	Sonde verticali	Sonde orizzontali	Fondazioni energetiche	
	richiesta di poco spazio	richiesta di ampio spazio	ipotizzabili con fondazioni profonde	
	massimo prelievo e immissione di calore nel terreno	rendimento influenzato dalla variabilità stagionale	progettazione termica/strutturale	

Fonte: Tinti [2009]

2.4 Pregi e difetti degli impianti geotermici

L'utilizzo delle energie rinnovabili, spesso e volentieri, viene abbracciato o bocciato per partito preso, senza andare a verificare criticamente quello che di buono e meno buono presenta. Si vuole comunque evitare un'analisi costi/benefici di questi impianti e un loro confronto con quelli tradizionali, riportando invece più semplicemente i pregi e i difetti di questa tecnologia, alcuni dei quali indirettamente sono già stati evidenziati.

Pregi

- Con un unico impianto si riscalda e raffresca l'ambiente, riducendo i costi di manutenzione che si hanno in genere con le caldaie (pulizia del camino, controllo del bruciatore, ecc.);
- l'arredo flessibile porta a una riduzione nello spazio meccanico, che non richiede ambienti dedicati e la canna fumaria, ottimizzando di fatto lo spazio interno e riducendo le opere murarie accessorie;
- si evita di usare l'aria esterna come sorgente di calore, così non sono più necessari i voluminosi, rumorosi ed antiestetici equipaggiamenti esterni come i gruppi frigo e le torri di raffreddamento;

- con un $COP > 2,61$ (legato alle temperature favorevoli del sottosuolo) si ha lo convenienza economica rispetto ad uno tradizionale a gas (come documentato da Zarrella [2009a] e riportato nella figura 2.8 nella pagina 33);
- l'acqua calda sanitaria può essere riciclata in qualsiasi momento nel compressore della PdC;
- si suppone che le sonde geotermiche odierne durino almeno 50 anni, mentre la vita media delle migliori PdC ammonta a circa 40 000 ore di funzionamento, cioè se si assume un funzionamento di $2\,000 \div 2\,500$ ore/anno, si arriva a circa 20 anni [Basta e Minchio, 2007];
- i combustibili fossili vengono bruciati in centrali termoelettriche dotate di filtri ed dispositivi antinquinamento e lontane dai centri abitati, si evitano così tutti i pericoli derivanti da:
 - perdita di gas e di monossido di carbonio;
 - emissione in ambito urbano di CO_2 e di altre sostanze nocive (ossidi di azoto, ossidi di zolfo, polveri sottili, particolato, PM10, PM2,5, residui che si depositano nell'ambiente dove si vive o si lavora o anche policiclici aromatici cancerogeni e diossine in caso di perdita di efficienza del bruciatore);
 - pericolosi stoccaggi ad elevato rischio di incendio e sversamento con successivo inquinamento di suoli e falde;
- l'uso della PdC (25 % di energia elettrica o gas equivalente, per produrre il 100 % di energia per il riscaldamento e la produzione di acqua calda) riduce la dipendenza dalle fonti energetiche fossili di cui l'Italia è dipendente per l'85 % dei suoi fabbisogni, di cui negli usi civili il 50 % è assorbito dal riscaldamento residenziale [Casale *et al.*, 2009];

Difetti

- Costo iniziale più elevato, in confronto ad un impianto tradizionale si ha:
 - residenziale $50 \div 80$ % in più rispetto ad uno convenzionale;
 - commerciale $20 \div 40$ % in più di un'unità roof-top single zone, a volume d'aria costante [Basta e Minchio, 2007];
- numero limitato di progettisti e tecnici installatori;
- consuetudine di proporre ed imporre soluzioni convenzionali più semplici, conosciute e meno innovative;
- mancanza di integrazione fra il settore delle perforazioni e quello degli installatori che tradizionalmente lavorano in ambiti completamente diversi;
- richiesta di sistemi di distribuzione a bassa temperatura;
- mancanza di riferimenti legislativi certi e concessioni autorizzative molto variabili (si passa dalle più blande che sono basate sul silenzio/assenso, ad altre eccessivamente vincolanti);
- qualsiasi perforazione nel sottosuolo comporta un potenziale rischio ambientale, in particolar modo per quanto riguarda le acque sotterranee; se sono ad uso potabile, la loro protezione ha la massima priorità, sia quando si sta installando il BHE sia per il loro utilizzo termico diretto.

Open loop da falda sotterranea

I sistemi a ciclo aperto o idrotermici da falda sotterranea (conosciuti all'estero con l'acronimo GWHP) pur essendo stati i primi ad essere installati, sono quelli meno approfonditi dal punto di vista progettuale. Anche se apparentemente sembrano molto semplici, questi sistemi richiedono una corretta progettazione, che comprende: la conoscenza del flusso delle acque sotterranee, la realizzazione dei pozzi, la selezione dell'eventuale scambiatore di calore e lo smaltimento di quanto emunto, in modo da risultare efficienti ed affidabili nel tempo.

L'installazione di un sistema open loop richiede come minimo l'esistenza di una falda acquifera, idonea a sostenere i carichi richiesti per la climatizzazione, quindi si procederà a descrivere i vari depositi nel sottosuolo esistenti in natura e a caratterizzarne le caratteristiche idrauliche fondamentali (conduttività e coefficiente di immagazzinamento specifico).

Un altro aspetto fondamentale da non sottovalutare è rappresentato dalla perforazione dei pozzi e da tutte le precauzioni da prendere in fase di progetto e realizzazione. Senza entrare troppo nel dettaglio si elencheranno le tecnologie di perforazione, le procedure di chiusura del pozzo e la scelta delle pompe.

Si elencheranno e descriveranno le tre tipologie principali di impianto, trattando molto dettagliatamente il sistema indiretto "doublette", cioè quello che comprende la presenza di uno scambiatore di calore per intercettare gli inquinanti presenti in falda salvaguardando così la PdC e la reimmissione delle acque in un pozzo di iniezione o scarico. Si accenneranno anche ai possibili problemi correlati, ovvero il feedback idraulico e la migrazione termica che devono essere presi in considerazione in fase di progettazione. La scelta di approfondire questo sistema a discapito degli altri, è stata operata perché minimizza l'impatto ambientale e ne permette la realizzazione in molteplici situazioni, anche quando le condizioni qualitative e quantitative della falda sono limitate.

3.1 Valutazioni preliminari

Gli impianti idrotermici da acqua di falda comprendono tre configurazioni impiantistiche di base (rappresentate in figura 3.1 nella pagina successiva), ognuna relegata a particolari situazioni di esercizio:

- (a) *L'open loop diretto* (l'acqua emunta va direttamente alla PdC), impiegato negli edifici residenziali e raramente nelle piccole applicazioni commerciali. Risente molto della qualità delle acque e dei problemi indotti da essa, il più comune dei quali è l'intasamento dello scambiatore di calore primario fra l'acqua e il refrigerante. È consigliabile solo per piccoli applicativi in cui la praticità e l'economicità escludono l'uso di uno scambiatore di calore di isolamento. O anche quando la qualità delle acque sotterranee è eccellente (la cui valutazione però deve essere attentamente documentata).

- (b) Il sistema *standing column* (dotato di un unico pozzo profondo per la presa e lo scarico) viene installato in molte località della parte nord-est degli Stati Uniti. Questo sistema viene realizzato in terreni rocciosi ed in acquiferi scadenti dove però la qualità dell'acqua è molto buona. I pozzi quindi raggiungono profondità notevoli, comprese tra i 300 ÷ 450 m, ed i sistemi funzionano a temperature comprese tra quelle de sistemi open e closed loop. In genere un 10% della portata uscente non torna al pozzo, per evitare eccessivi incrementi o abbassamenti della temperatura media a seconda del ciclo di climatizzazione.
- (c) L'*open loop indiretto* utilizza uno scambiatore di calore intermedio tra i circuiti lato pompa e lato PdC, così non solo si escludono i problemi che possono affliggere la macchina termica dovuti alla qualità dell'acqua, ma anche la conseguente gestione differenziata delle due parti rende le prestazioni del sistema ottimali. Se l'acqua viene smaltita in un pozzo di iniezione il sistema viene denominato "doublette". Questi sistemi offrono una efficienza energetica paragonabile ai sistemi a circuito chiuso, ad un costo di impianto notevolmente ridotto.

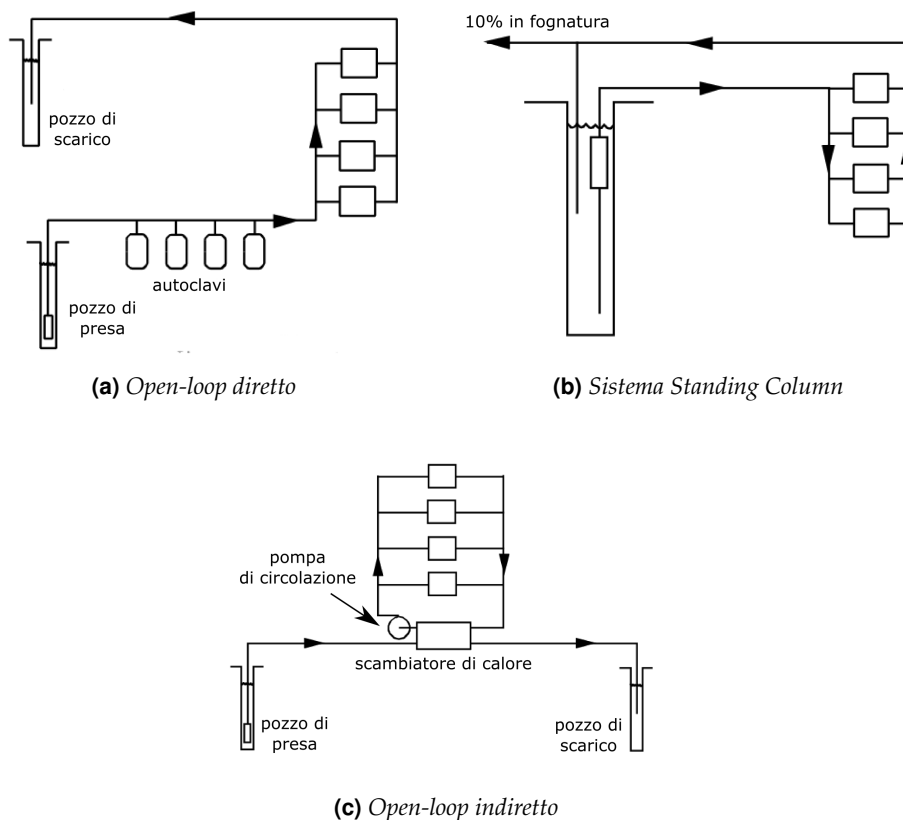


Figura 3.1: Configurazioni impiantistiche per impianti idrotermici [Rafferty, 2001]

Gli impianti open loop permettono di ottenere una sorgente di calore consistente a costi relativamente bassi. In condizioni ideali, la quantità di calore che è possibile estrarre da un flusso d'acqua è data dalla seguente equazione:

$$G = Z \Delta T S_{VCw} \quad (3.1.1)$$

Dove: G è il calore estratto nell'unità di tempo da un pozzo, misurato in W ; Z è la portata in $m^3 s^{-1}$; ΔT è il salto termico in K ; S_{VCw} è il calore specifico volumetrico dell'acqua, pari a $4180 J m^{-3} K^{-1}$.

Una PdC con un assegnato COP_H , avrà un carico totale Q_2 per il riscaldamento degli ambienti, che si può ottenere combinando le equazioni (3.1.1) e (2.2.1):

$$Q_2 = \frac{Z \Delta T S_{VCw}}{1 - (1/(COP_H))}$$

Analogamente per l'active cooling (con il relativo COP_C) si otterrà:

$$Q_1 = \frac{Z \Delta T S_{VCw}}{1 + (1/(COP_C))}$$

Se per esempio si considera un impianto che possiede $COP_H = 4$, per il riscaldamento e con un abbassamento conseguente di $\Delta T = 5$ K in falda (un valore tipico per molti sistemi a PdC), pompando l'acqua a 11 °C e a portata costante attraverso la PdC, si può ottenere:

$$\text{effetto in riscaldamento } Q_2 = \frac{1 \cdot 5 \cdot 4180}{3/4} = 28 \text{ kW}$$

Di questi 21 kW vengono forniti dall'acqua emunta e 7 kW dal compressore della PdC.

In raffrescamento, assumendo per esempio un $COP_C = 3$ e con una PdC perfettamente reversibile, si estrarrà un carico freddo di 21 kW dall'edificio, aggiungendo poi 7 kW dal compressore e fornendone 28 kW alla falda. Questo comporta un aumento della temperatura nella falda di 6,7 °C, come evidenziato nella seguente equazione:

$$\text{effetto in raffrescamento } Q_1 = \frac{1 \cdot 6,7 \cdot 4180}{4/3} = 21 \text{ kW}$$

Si vede come per una determinata portata e variazione di temperatura, il potenziale effetto di active cooling è in genere inferiore al potenziale effetto di riscaldamento, ovviamente a parità di condizioni. Ciò è dovuto al fatto che si sta usando il compressore della PdC in modalità raffrescamento, consumando energia elettrica. In pratica tuttavia, in raffrescamento il ΔT può essere superiore a quello che si ha in riscaldamento: usando un circuito nell'edificio più grande e un opportuno scambiatore di calore. È così possibile raggiungere ΔT significativamente più elevati rispetto ai 6 ÷ 7 °C e quindi un effetto di raffrescamento più accentuato.

Tuttavia è corretto asserire che l'active cooling di una PdC è meno efficiente della modalità di riscaldamento, così come l'energia del compressore si presenta sotto forma di calore di scarto. Si noti che quanto sopra calcolato assume un COP costante, in condizioni di temperatura assegnate, in realtà è una quantità variabile. Le equazioni inoltre trascurano le perdite di carico delle pompe in falda e quelle di circolazione nel circuito. A rigore, se si voleva includere queste perdite e calcolare la media annuale, si sarebbe dovuto usare il SFP piuttosto che il COP .

Questo semplice calcolo è stato inserito per dare un'idea della quantità di calore che l'acqua è in grado di fornire per la climatizzazione, ma la progettazione di tali impianti è molto più complessa ed articolata, inglobando tre considerazioni preliminari, di natura tecnica e amministrativa, che ne possono anche sconsigliare la realizzazione.

- ✓ La formula (3.1.1) usata, pur nella sua semplicità formale, contiene un termine di difficile valutazione e fondamentale per gli impianti idrotermici: *la portata disponibile e utilizzabile* nello scambiatore primario acqua-refrigerante. In genere è compresa tra 0,027 ÷ 0,054 $\ell \text{ s}^{-1}$ per kW, valori che possono portare a superare i limiti prefissati dalle regolamentazioni locali e prosciugare l'acquifero, con anche il rischio di intensificare i fenomeni di subsidenza.

- ✓ Un altro aspetto poi da considerare attentamente è la *qualità idrochimica dell'acqua*, che a causa soprattutto del contenuto di ferro può comportare problemi di incrostazioni, corrosione e occlusione nell'impianto. Inoltre possono insorgere problemi nel pozzo di scarico, a causa delle colonie di batteri che se arrivano a maturazione sono difficili da eliminare.
- ✓ Infine bisogna rispettare le indicazioni fornite dai codici e regolamenti locali per *lo scarico dell'acqua*, che si traduce in ulteriori oneri per la realizzazione dell'impianto.

3.1.1 Difetti ricorrenti nella progettazione

Prima di passare all'analisi dei singoli aspetti citati è bene rimarcare le lacune e le sottovalutazioni che accompagnano la realizzazione di questi impianti, a volte pregiudicandone il corretto funzionamento.

- Sottovalutazione del contributo che un idrogeologo o un ingegnere idraulico specializzato può fornire al progetto.
- Eccessivo ottimismo per le proprietà idrauliche della falda acquifera, è un errore ricorrente pensare che se un pozzo ha un rendimento di $5 \ell s^{-1}$, allora un campo di 10 pozzi produrrà $50 \ell s^{-1}$. Questo non è necessariamente vero, se per esempio non avviene la reiniezione, la resa totale sarà notevolmente inferiore a quella fornita dalla semplice moltiplicazione; d'altra parte, se le acque vengono immesse nella stessa falda, esse contribuiranno a sostenere la produzione e può essere possibile emungere più acqua di quella prevista nel caso di unica presa.
- Sottovalutazione nella progettazione del pozzo di scarico, che richiede invece un'attenzione pari se non superiore a quello di produzione e avrà inoltre bisogno di un'attenta gestione e manutenzione al fine di garantirne una lunga durata.
- Sottovalutazione della chimica e della microbiologia delle acque, che può influenzare le prestazioni a lungo termine del sistema.
- Sottovalutazione del feedback idraulico: cioè la possibilità che il caldo (o il freddo) delle acque scaricate possano andare a rifluire nel pozzo di produzione, compromettendo l'efficienza del sistema (o anche la sua sostenibilità a lungo termine).

3.2 Le falde sotterranee

Gli *acquiferi* (dal latino: portatori di acqua) sono opportuni strati di terreno dai quali è economicamente possibile emungere l'acqua contenuta. Le proprietà idrauliche di una falda acquifera, sono la conducibilità idraulica (K) e il coefficiente di immagazzinamento specifico (S_0) del materiale di cui è composto. È già stata introdotta la conduttività idraulica, con la legge di Darcy (1.10.2), mentre l'immagazzinamento si riferisce al volume d'acqua (in m^3) che una unità del materiale che costituisce l'acquifero può rilasciare (o riprendere) a seguito di un calo (o un aumento) di un metro di carico.

Volendo dare un campo di validità alla legge di Darcy si possono citare i risultati delle esperienze condotte da A. Veronese (1941) che fissano un valore di $Re \leq 5$ in accordo con quanto rilevato anche da numerose altre ricerche che lo fissano tra $3 \div 10 Re$. Bisogna però ribadire che in alcune zone del campo di moto (per esempio dove si abbia una sensibile concentrazione di portata) la velocità v assume valori tali da non verificare la legge di Darcy che invece lo rimane per la parte rimanente. Se comunque la zona è limitata si può applicare tranquillamente Darcy.

La determinazione del coefficiente K ha naturalmente notevole importanza, la sua valutazione in laboratorio si presenta del tutto agevole, basta risolvere l'equazione di Darcy conoscendo le altre grandezze in gioco. Negli ambienti naturali la situazione si complica, perché il valore o i valori di K devono essere determinati in sito, per avere indicazioni il più possibile attendibili delle reali condizioni del mezzo filtrante.

Le sabbie, le ghiaie e le rocce porose come l'arenaria, sono di solito dei buoni acquiferi e sono anche denominati *acquiferi permeabili per porosità*. Hanno una elevata K (come riportato in tabella 3.1) e una porosità considerevole, che implica un valore relativamente elevato di S_0 . In tali falde, l'acqua fluisce attraverso gli spazi nei pori tra i granuli, più ampi sono i pori, più alto sarà il valore di K .

I terreni a grana fine, come limi ed argille, possono avere una elevata porosità, ma gli spazi tra i pori sono molto ridotti. K mostra una dipendenza molto accentuata verso l'apertura degli spazi tra i pori; la conducibilità idraulica di tali sedimenti è molto bassa: il rendimento dei pozzi è scarso e vengono indicati come *acquitaridi* o *acquifugi* (sempre dal latino: acqua tardiva o respinta) o molto più semplicemente li si possono descrivere come *terreni impermeabili*.

Anche dalle rocce – in particolare, le rocce cristalline, come graniti, ardesie o gneiss – composti da silicati ben disposti, che pur non presentando alcun spazio intergranulare tra i pori, è possibile estrarre anche diverse centinaia o addirittura migliaia di litri d'acqua all'ora. Ciò è dovuto alle fratture che descrivono l'ammasso roccioso e che se sono interconnesse tra loro, possono trasportare le acque sotterranee. In questo caso si parla di *acquiferi permeabili per fessurazione*.

Infine, alcuni tipi di falda acquifera si possono trovare nei calcarei e nelle dolomie, che pur avendo una permeabilità piuttosto bassa, presentano anch'essi piccole fratture che grazie alla solubilità dei minerali carbonatici che li costituiscono, aumentano con il passare del tempo ed in casi estremi arrivano a formare vere e proprie grotte sotterranee, si parla allora di *acquiferi permeabili per carsismo*.

Tabella 3.1: Proprietà idrauliche tipiche delle formazioni alluvionali [Banks, 2008; Misstear *et al.*, 2006]

Tipo di suolo	porosità n %	immagazzinamento specifico S_0 %	conducibilità idraulica K m s^{-1}
argilla	30 ÷ 60	1 ÷ 10	10^{-12} ÷ 10^{-8}
limo	35 ÷ 50	5 ÷ 30	10^{-9} ÷ 10^{-5}
sabbia	25 ÷ 50	10 ÷ 30	10^{-7} ÷ 10^{-3}
ghiaia	20 ÷ 40	10 ÷ 25	10^{-4} ÷ 10^{-1}

3.2.1 Trasmissività idraulica

La descrizione delle proprietà idrauliche delle falde comprende un'altra importante grandezza, la trasmissività specifica (3.2.1), che ne completa la caratterizzazione. Infatti usando la legge di Darcy (1.10.2), per esempio, si osserva che una falda acquifera, compresa in uno strato di sabbia di 5 m di spessore, sarà in grado di produrre la stessa portata (per unità di larghezza), di una falda sottoposta allo stesso carico idraulico, ma di spessore doppio. Considerando che la conducibilità idraulica (K) è una proprietà intrinseca del materiale che costituisce l'acquifero, la trasmissività è una proprietà estrinseca che descrive la capacità della falda acquifera, come unità geologica, di trasmettere portata dalle acque sotterranee e viene definita come il prodotto della conducibilità idraulica (K) per lo spessore (D) dell'acquifero in m, misurata quindi in $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

$$T_0 = K D \quad (3.2.1)$$

trova. Quando infatti si pratica un foro in questi acquiferi l'acqua risale in superficie fino a raggiungere uno stato di equilibrio che prende il nome di linea piezometrica. La pendenza di tale superficie è il gradiente idraulico o di carico naturale. Questa grandezza adimensionale controlla la direzione e la velocità con la quale le acque fluiscono, secondo la legge di Darcy. Se la superficie piezometrica è superiore al piano campagna, un foro perforato in tale falda, porterà l'acqua ivi contenuta a tale livello e l'acquifero prenderà il nome di *falda artesiiana*. La trasmissività in queste falde è in genere costante.

La quantità d'acqua rilasciata per un metro cubo di falda acquifera a seguito di una diminuzione di 1 m di carico idraulico, prende il nome di *conservazione specifica* (S_S). È quindi una quantità molto piccola (dell'ordine di $10^{-5} \div 10^{-6} \text{ m}^{-1}$). Una unità di S_S si misura in m^{-1} , perché sottintende 1 m^3 di acqua per 1 m^3 di falda per 1 m di diminuzione di carico idraulico.

Volendo definire una quantità adimensionale per descrivere l'immagazzinamento specifico complessivo (S_0) della falda confinata si può moltiplicare S_S per lo spessore (D) dell'acquifero:

$$S_0 = S_S D$$

Acquifero non confinato

Una falda acquifera non confinata, non è tenuta in pressione da alcun terreno impermeabile, il suo limite superiore è costituito dalla superficie libera dell'acqua che coinciderà quindi con la linea piezometrica. Le precipitazioni (o altri tipi di contributi esterni) di solito possono percolare dalla superficie o dagli strati superiori. La porzione di strati insaturi si chiama zona vadosa¹, mentre la porzione satura di falda acquifera è la zona freatica. La trasmissività della falda acquifera, non confinata è data dalla equazione (3.2.1), ma bisogna prestare attenzione allo spessore della falda acquifera (D) che può variare a seconda delle stagioni e a seconda dell'emungimento dalla falda stessa.

Il coefficiente di immagazzinamento di una falda non confinata è chiamato *rendimento specifico* (S_Y). Se il livello statico scende di 1 m, una quantità d'acqua sarà rilasciata dal deposito e sarà minore della porosità (n); ci sarà sempre poi qualche piccola quantità di acqua che rimane aderente ai grani. Se si considera 1 m^2 di falda acquifera, si può asserire che:

$$S_Y < n$$

Una unità di S_Y è adimensionale in quanto indica 1 m^3 di acqua per 1 m^2 di superficie di falda per 1 m di diminuzione di carico idraulico. In mezzi porosi granulari, S_Y è spesso dell'1 % ma può arrivare anche al 10 %.

3.2.3 Prove di pompaggio

Per descrivere un'acquifero si può ricorrere alle prove di pompaggio che, in regime di moto vario o permanente quando il processo si è stabilizzato, forniscono un valido sistema per ottenere dati utili in tal senso. Alle prove si può attendere in vario modo: sottraendo portata e procedendo alla sua misura fino a raggiungere uno stato di stabilità; oppure, al contrario, immettendo una portata e procedendo ai rilievi per ogni stabile livello dell'acqua all'interno del pozzo. In dettaglio le due strade si possono così riassumere:

- 1) Con una successione di attingimenti ciascuno a portata costante per un adeguato numero di ore (da 24 a 72 ore a seconda dell'acquifero), rilevando a diverse distanze in altri pozzi

¹È quella porzione di terreno in cui l'acqua penetra verticalmente sotto il controllo preminente della gravità e in funzione delle dimensioni dei pori e delle fratture, l'acqua può percolare e infiltrarsi lentamente o fluire abbastanza liberamente.

se esistenti o in piezometri le quote piezometriche: disposizioni da adottare in quanto l'impianto sia importante e voglia aversi una esauriente documentazione intorno alle risorse disponibili. Ma provvedendo anche a rilevare l'andamento delle quote al cessare del pompaggio: una prova ulteriore per verificare la fondatezza dei rilievi svolti durante il pompaggio.

- 2) Con pompaggi ad incremento di portata e a intervalli di tempo costanti e regolari: ogni 2 ore, per esempio; e rilevando, naturalmente, nel pozzo e in quelli prossimi l'andamento piezometrico.

3.3 Caratteristiche dell'acqua

L'analisi idrochimica è di fondamentale importanza e deve sempre essere effettuata, sia per determinare i materiali più opportuni con cui realizzare l'impianto stesso, sia per evitare che problematiche ambientali preesistenti siano poi imputate alla presenza dell'impianto geotermico.

Per quanto concerne gli acquiferi sabbiosi si consiglia poi di monitorare la quantità di granelli di sabbia che viene aspirata con l'acqua, eseguendo un *Rossum Sand tester*.

In tabella 2.3 sono già stati introdotti i parametri forniti dalle norme UNI EN 15450 [2008], in questa sede verranno citate le considerazioni fornite da Basta e Minchio [2007], Busnardo [2006] e Rafferty [2001] in relazione alle caratteristiche chimiche dell'acqua nei sistemi open loop (tabella 3.2 nella pagina successiva).

Una volta appurate le caratteristiche si può valutare se è il caso di interporre uno scambiatore di calore tra il flusso delle acque sotterranee e quello che circola nella PdC. Uno scambiatore di calore moderno può essere altamente efficiente, in modo tale da garantire delle minime perdite di calore.

3.3.1 Scambiatori di calore

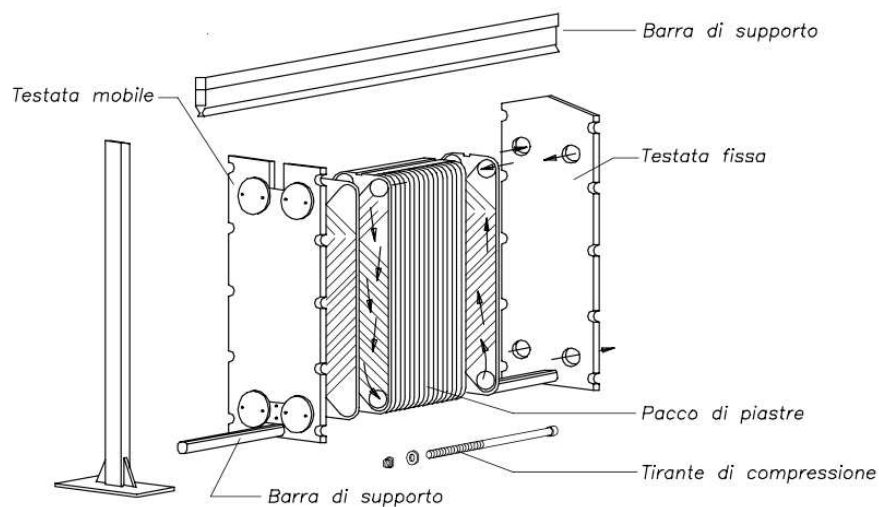
Gli scambiatori di calore sono dispositivi che in modo efficiente trasferiscono il calore tra due fluidi. Il radiatore dell'auto, l'orecchio di un elefante e la griglia posta sul retro di un frigorifero sono scambiatori di calore. Le forme più comuni possiedono una parete divisoria che fa circolare sui due lati i fluidi. In un efficiente scambiatore la superficie di separazione sarà la più grande possibile per ottimizzare il trasferimento di calore per conduzione, e viceversa la resistenza termica sarà la minima possibile. Probabilmente la forma più semplice di uno scambiatore di calore è costituita da due tubi coassiali, nei quali circolano con verso opposto i due fluidi a differenti temperature.

Nei sistemi open loop si impiega quasi esclusivamente il tipo a piastre (lo schema strutturale è riportato in figura 3.3 a fronte). Questi scambiatori sono costituiti da un pacco di piastre rettangolari tutte uguali, ottenute da lamiera per stampaggio secondo varie forme di corrugazioni superficiali. I fluidi lambiscono le piastre, percorrendo i canali che si formano tra di esse. Le piastre sono sostenute da un telaio e fortemente pressate da una testata mobile di questo. Sono modulari e quindi facilmente smontabili per pulitura o modifiche; hanno basse cadute di pressione e, in caso di perdite, assicurano l'impossibilità del trafileamento da un fluido verso l'altro, grazie al doppio effetto della guarnizione.

Per quanto riguarda i materiali, le piastre ed i collegamenti sono prodotti in acciaio inox 304 o 316, mentre le guarnizioni sono in materiale plastico elastomerico (in genere butile e neoprene). Se le acque sotterranee contengono più di 150 ppm di cloruro, è consigliato l'uso dell'acciaio 316, invece per concentrazioni superiori alle 375 ppm (acqua marina) sono preferibili quelle in titanio [Rafferty, 2001].

Tabella 3.2: Considerazioni relative alle caratteristiche chimiche dell'acqua nei sistemi open-loop [Basta e Minchio, 2007; Busnardo, 2006; Rafferty, 2001]

Parametri	range	interazione materiali	azioni correttive
pH	5,5 ÷ 8,5	pH acidi catalizzano la corrosione dei metalli, pH basici favoriscono le incrostazioni	evitare il ricorso a bacini idrici a cielo aperto, usare acciai compatibili
solidi in sospensione	200 ÷ 1 000 ppm	aumentano la possibilità di deposito, soprattutto in presenza di magnesio, calcio, carbonati e solfati	per concentrazioni > 500 ppm richiedere analisi ioni Mg, Ca, CO ₃ , SO ₄
ferro	0 ÷ 5 ppm	indice di potenziale presenza dei batteri del ferro	eseguire analisi
indice di Ryznard		indice del tasso di incrostazione/corrosione basato sul CaCO ₃	pH > 7,5 tendenza alla corrosione (utilizzare materiali idonei); pH < 6,0 tendenza incrostazioni (ridurre velocità dell'acqua)
cloro	6 ÷ 20 ppm	catalizza la corrosione dell'acciaio; realizza microfori	utilizzare materiali idonei
bicarbonato/CO ₂			se HCO ₃ > 100 ppm e pH > 8,0 mantenere sul fluido pressione elevata per contenere l'equilibrio chimico
acido solfidrico	≤ 0,5 ppm	aggressivo per Cu, Ni e relative leghe	Se H ₂ S > 0,2 ppm evitare ricorso a componenti in Cu e Ni
ossigeno	≤ 2,0 ppm	accelera corrosione dell'acciaio	degassificare
contenuto di sabbia	≤ 1 ppm per scarico in pozzo; 5 ÷ 10 ppm per scarico superficiale	abrasione dei componenti dell'impianto; depauperamento dell'acquifero con rischio di possibili cedimenti	dimensionare opportunamente il filtro drenante

**Figura 3.3:** Schema strutturale di uno scambiatore di calore a piastre [Guadagni *et al.*, 2003]

Naturalmente non è escluso che possa corrodersi o rovinarsi e quindi si deve provvedere affinché il collegamento e il posizionamento di questo dispositivo sia agevole, per consentirne un facile accesso per la manutenzione o l'eventuale sostituzione.

Il rischio di intasamento da particolato può essere ridotto con l'installazione di filtri rimovibili a monte dello scambiatore, mentre le incrostazioni chimiche o biologiche possono essere ridotte in questo modo:

- mantenendo una alta pressione all'interno del circuito delle acque sotterranee per evitare degassamento di CO_2 all'interno dello scambiatore;
- evitando che le acque sotterranee entrino in contatto con l'ossigeno atmosferico (ad esempio privilegiando l'installazione di sistemi chiusi);
- aggiungendo piccole quantità di prodotti chimici biocidi o riducendo le sostanze chimiche, per impedire rispettivamente la formazione di biofilm e l'ossidazione del ferro;
- facendo manutenzione periodica, questo potrebbe comportare il lavaggio dello scambiatore con acido o con detergenti o reagenti per rimuovere l'accumulo di depositi di idrossido di calcite e/o manganese e/o ferro.

3.4 Caratteristiche del pozzo e sua realizzazione

La costruzione di un pozzo prevede, prima di tutto, una serie di studi e ricerche di varia natura da svolgere nell'area interessata. Gli elementi saranno presi in parte dalla letteratura tecnica, in parte da esperienze precedenti realizzate nella zona e infine anche (con una ragionevole prospettiva di successo), da indagini dirette quali un pozzo di prova.

Il processo d'esplorazione e ricerca consiste nei seguenti passi:

- scegliere il sito o i siti per eseguire il pozzo di prova;
- ottenere rappresentativi campioni delle formazioni attraversate, classificando le carote estratte dal punto di vista idrogeologico;
- determinare il livello idraulico statico di ogni formazione permeabile;
- analizzare la qualità delle acque per definire fra i possibili ed eventuali, l'acquifero da cui attingere.

Il metodo d'esplorazione può essere anche assai diverso da caso a caso in dipendenza dalle formazioni idrogeologiche che si hanno intorno alle formazioni da attraversare e naturalmente dal valore della portata da estrarre. Nessun procedimento è applicabile in tutte le situazioni, inoltre capita che due diversi metodi di perforazione possano essere usati per uno stesso pozzo di prova, in funzione della profondità da esplorare e dello stato della parte superficiale della formazione. In ogni caso i due più importanti criteri da seguire nella perforazione sono quelli d'ottenere alle varie profondità campioni accurati, e dunque significativi e di procedere in modo relativamente rapido.

Il tipo o la modalità di perforazione può modificare la qualità dei campioni estratti: taluni forniscono indicazioni sulla granulometrica dell'acquifero; altri individuano meglio le profondità del contatto o dei contatti tra le diverse formazioni. Nel caso di formazioni non consolidate il campione estratto può suggerire la migliore scelta del filtro da impiegare: tipo e aperture o fessure. In una formazione relativamente compatta, il campione e la presenza d'acqua affluente al foro a una definita profondità, individuano le fessure o faglie o la presenza di una formazione permeabile nel contesto roccioso.

I metodi di perforazione sono ovviamente meccanici con varie tecniche e modalità di avanzamento, in funzione delle profondità da raggiungere e dei diametri da adottare. Ma anche i metodi geofisici, le indagini gravimetriche e i procedimenti elettrici offrono eccellenti modi di esplorazione specie se applicati, ovviamente per problemi di significativa rilevanza, per ricercare e definire le risorse che un sito possa presentare.

Esistono vari procedimenti di perforazione di un pozzo legati alla natura delle formazioni da attraversare: dai graniti alle sabbie, alla profondità da raggiungere; al diametro ma anche in qualche misura legate alla specializzazione, esperienza e attrezzatura del perforatore-costruttore.

In molte situazioni le operazioni per la costruzione di un pozzo consistono nella: *perforazione* (drilling); *infissione del tubo forma* (casing); collocazione entro l'acquifero dello *schermo drenante* (well screen), un cilindro variamente forato e sul contorno del *materiale filtrante* (filter pack); eventuale *tampone o intasamento con boiaccia di cemento o argilla iniettata* (grouting) nello spazio anulare tra il foro di scavo e il tubo forma per proteggere l'acqua dall'inquinamento esterno, con profondità anche di 15 m; *liberazione della fase fine* dei materiali disposti intorno al filtro estraendo con pompaggio la portata massima. Tutte queste operazioni possono avvenire in serie temporale o a seconda dei casi in parallelo e ovviamente in funzione del tipo di perforazione, come rappresentato nelle figure 3.4 e 3.7 nella pagina 60.

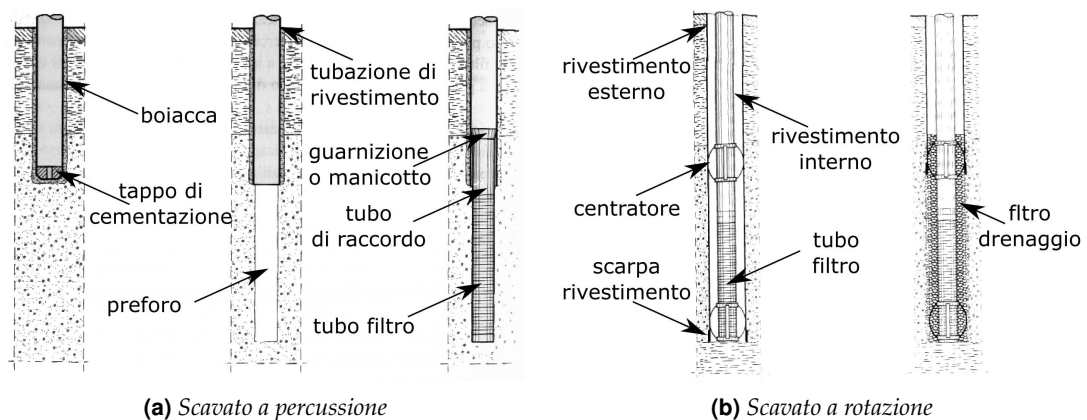


Figura 3.4: Le diverse fasi della costruzione di un pozzo [Da Deppo *et al.*, 2006]

Una volta realizzato il foro del pozzo e raggiunta la profondità prevista e quindi la falda da cui attingere, si deve provvedere a installare il pozzo vero e proprio. Esso è essenzialmente costituito da una tubazione con funzione di rivestimento e da un tratto terminale filtrante: un tubo finestrato con varie modalità. L'ufficio svolto dalla tubazione è quello di contenere il materiale, eventualmente non coesivo, disposto intorno al foro, specie nel caso dei pozzi a percussione realizzati con un tubo forma, da estrarsi, naturalmente, completata la collocazione dell'insieme tubazione e tratto filtrante. Il diametro della condotta è ovviamente minore di quello del pozzo: almeno di 10 e 5 cm rispettivamente nei pozzi a percussione e a perforazione. La colonna è solitamente realizzata d'acciaio trattato contro la corrosione, spesso di acciaio inox, usando i diametri della serie unificata, ma con l'avvertenza di non usare materiali diversi per evitare la formazione di pile anche nel rapporto con i terreni attraversati. I giunti tra i tubi sono variamente realizzati con saldatura testa a testa, con manicotti di vario tipo e con filettatura.

Per quanto riguarda i filtri, questi possono essere di varia forma e disposizione delle fessure (figura 3.5 nella pagina successiva), le dimensioni delle aperture sono dell'ordine del mm ($0,8 \div 2,5$ mm). Il rapporto tra la superficie aperta e quella totale è abbastanza variabile:

da pochi punti per cento fino al 30 ÷ 35 %. La scelta del tipo di filtro è strettamente legata alla distribuzione granulometrica del materiale entro il quale defluisce la falda.

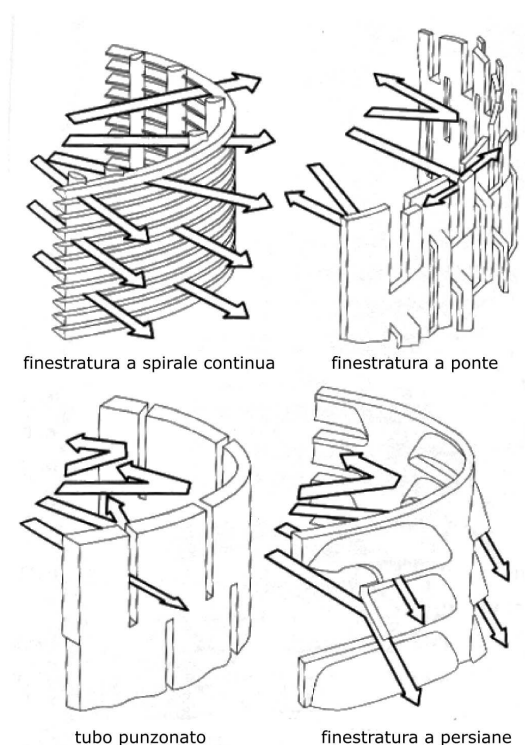


Figura 3.5: Tipi di finestratura dei filtri [Da Deppo *et al.*, 2006]

Per avere un'ordine di grandezza delle misure indicative del diametro dei pozzi, in funzione della portata da emungere e del diametro della girante della pompa sommersa utilizzata, sono state riportate alcune misure (in tabella 3.3). Poi in fase di progettazione esecutiva, bisognerà prendere in considerazione le caratteristiche tecniche e le curve caratteristiche della pompa che si intende utilizzare.

Tabella 3.3: Diametro del pozzo, diametro della girante della pompa e portate emungibili [Da Deppo *et al.*, 2006]

Portata emungibile ℓs^{-1}	Diametro		
	nominale girante pompa mm	ottimale del pozzo mm	minimo del pozzo mm
< 6	102 (4")	152 (6")	127 (5")
5-11	127 (5")	203 (8")	152 (6")
10-22	152 (6")	254 (10")	203 (8")
19-44	203 (8")	305 (12")	254 (10")

3.4.1 Sistemi di perforazione

I sistemi di perforazione sono essenzialmente due: a percussione e a rotazione, ma ne esiste anche uno misto a roto-percussione. Generalmente lo scavo di pozzi con percussione avviene a secco; con circolazione quelli perforati a rotazione.

Le perforazioni avvengono in modo relativamente rapido con terreni incoerenti (sabbie e ghiaie) e coesivi (limi, argille). In formazioni rocciose gli avanzamenti sono lenti ed in qualche caso difficili, si ricorre allora al sistema a roto-percussione che garantisce una apprezzabile rapidità.

- Perforazione a rotazione:
 - a circolazione diretta (a fango o ad aria o mista aria-fango);
 - a circolazione inversa (a fango o ad aria o mista aria-fango).
- Perforazione a percussione:
 - a circolazione inversa con acqua;
 - a secco con tubazioni di lavoro;
 - a secco, con infissione a pressione di colonna di rivestimento definitiva.
- Perforazione a sistema misto:
 - a rotopercussione.

Sistema a rotazione

La perforazione a rotazione con l'uso di fango di circolazione rappresenta il metodo di scavo dei pozzi a maggiore diffusione, viene eseguita per mezzo di un utensile, generalmente uno scalpello, sottoposto ad un peso appropriato che, ruotando sul fondo del foro, frantuma la formazione in detriti.

Nella perforazione a rotazione è importante la circolazione di un fluido (fango, acqua od aria compressa) ed il relativo impianto di pompaggio che ne determina l'afflusso nelle aste di perforazione, il quale carico di detriti (cutting) prodotti dallo scalpello, defluisce verso l'alto attraverso lo spazio anulare esterno alle aste. Il fango viene immesso in una vasca di decantazione, dalla quale liberato dai detriti sfiora in una successiva (eventualmente filtrato): per essere ripreso e rimesso in circolo dalla pompa.

Si può perforare qualsiasi tipo di terreno e l'uso del tubo forma può non essere necessario poiché il sostegno delle pareti dello scavo è assicurato dalla pressione idrostatica della colonna di fango. La profondità di perforazione ed il diametro dei fori dipendono dalla potenza e dal tipo d'impianto. La perforazione a rotazione, rispetto a come circola il fluido, può essere di due tipi:

- a circolazione diretta, quando il fluido è immesso nelle aste di perforazione e ritorna in superficie attraverso l'intercapedine foro-aste (figura 3.6a nella pagina successiva);
- a circolazione inversa, quando il fluido (acqua o fango) è immesso nello spazio anulare foro-aste e ritorna in superficie attraverso la batteria di aste (figura 3.6b nella pagina seguente). Nel caso di utilizzo di aria, come fluido di perforazione, essa viene inviata in corrispondenza dello scalpello oppure dei diffusori attraverso opportune intercapedini della batteria di aste.

Sistema a percussione

Il metodo a percussione è idoneo per formazioni con ghiaia, sabbia, e tutti i terreni fino a rocce di media resistenza; non è indicato per terre coesive molto consistenti e rocce con alta resistenza. Nella perforazione a percussione l'utensile di perforazione viene spinto nel terreno o per caduta dello strumento stesso o per infissione per mezzo di una mazza battente; quest'ultimo sistema è usato solo nei terreni incoerenti di copertura. L'impiego del metodo a percussione è di regola limitato alla perforazione eseguita nei terreni granulari o coesivi. La

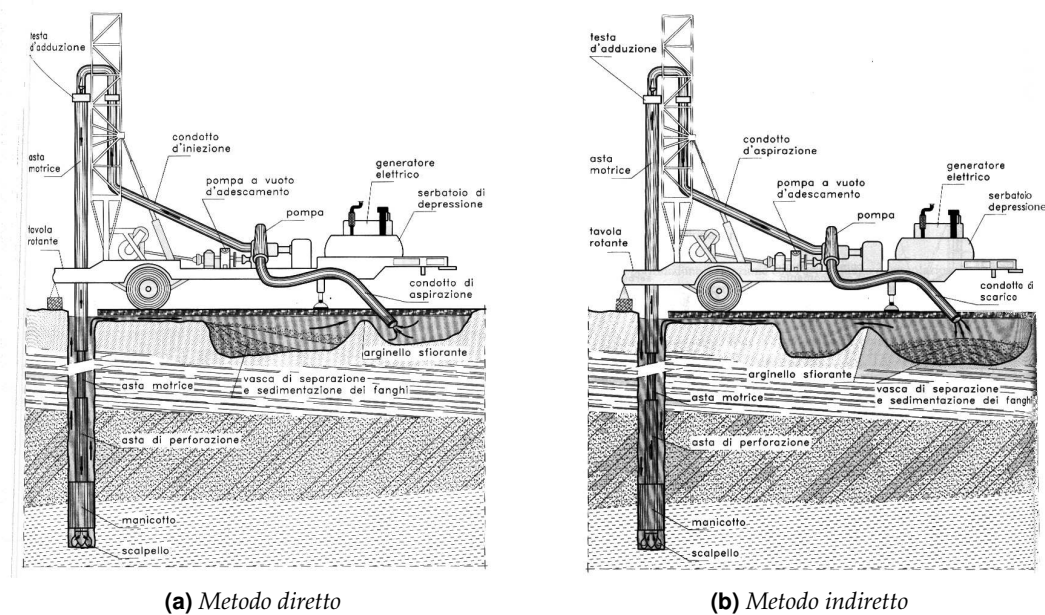


Figura 3.6: Dispositivi per la perforazione a rotazione [Da Deppo *et al.*, 2006]

profondità e il diametro dipendono dal tipo di utensile usato e dall'energia d'urto nonché dalla natura del terreno. I diametri usuali sono compresi tra 100 ÷ 900 mm e la profondità di riferimento è 40 ÷ 60 m.

Sistema a rotopercuSSIONE

Il sistema a rotopercuSSIONE si usa in rocce calcaree autoportanti allo scavo, perché è un sistema più veloce, non si ha il fango di circolazione ma solo aria compressa. I diametri sono compresi fra 200 ÷ 500 mm e le profondità sono molto elevate: quelle più profonde sono quelle petrolifere che raggiungono anche i 12 ÷ 13 km. Il sistema a rotopercuSSIONE è un sistema misto, può essere:

- con martello a fondoforo (DTH);
- con martello fuori dal foro (TH).

3.4.2 Completamento del pozzo

Praticata la perforazione si deve provvedere alla realizzazione del pozzo vero e proprio. L'operazione richiede, specie per alcuni interventi molta cura, per assicurare il corretto sfruttamento delle falde e per evitare che esse possano essere contaminate, per percolazione dalla superficie di sostanze inquinanti o degli strati attraversati.

Le operazioni consistono essenzialmente nelle seguenti fasi: rivestimento del foro; cementazione per sottrarre la falda a eventuali inquinamenti; creazione del drenaggio intorno al tratto filtrante variamente finestrato; scelta del filtro; spurgo e avviamento del pozzo. Ogni metodo di perforazione comunque impone differenti modalità di esecuzione e successione di queste operazioni, oltretutto entrano in gioco altri parametri in rapporto alla profondità raggiunta, alla tubazione di rivestimento sia a unico diametro sia con una successione a diametri decrescenti o telescopica.

In acquiferi confinati

In un acquifero confinato comprendente materiali porosi mal litificati (sabbie e ghiaie), è vivamente consigliato inserire uno schermo drenante per gran parte della lunghezza della falda acquifera, in modo da massimizzare il rendimento del pozzo di produzione. Driscoll (1986) suggerisce di schermare circa il 90 % dello spessore della falda acquifera, lasciando che parte del tubo forma si sovrapponga alla estremità superiore e inferiore della falda, onde evitare che le polveri sottili dai sovrastanti e sottostanti acquitardi argillosi migrino attraverso i pori dell'acquifero ed entrino nel pozzo (figura 3.7a nella pagina successiva).

Naturalmente, se il rendimento richiesto è trascurabile e viceversa la falda acquifera è molto trasmissiva e relativamente spessa (per esempio maggiore di 100 m), si può evitare di perforare tutta la falda acquifera e mettere solo uno schermo drenante nella parte superiore. Ciò ridurrà l'efficienza idraulica del pozzo, ma questo fa risparmiare nei costi di perforazione.

Se l'acquifero confinato è ben litificato e autoportante (ad esempio, una pietra calcarea o una arenaria ben cementata, un granito), il foro può essere lasciato aperto (cioè senza tubo forma) all'interno della falda stessa. Il tubo forma di solito viene installato nella parte superiore del pozzo (corrispondente all'acquitardo di confinamento, come rappresentato in figura 3.7b nella pagina seguente).

Per la perforazione in un acquifero confinato, specialmente se c'è il sospetto che possa essere artesiano, è buona pratica inserire del grouting nello strato confinante prima di raggiungere la falda acquifera. È consigliabile procedere con una perforazione continua ed iniezione di boiaccia alla base del tubo forma, per assicurare che non vi sia alcuna comunicazione idraulica tra la superficie (o qualsiasi altro acquifero sovrastante) e la falda acquifera da raggiungere. Essa consente inoltre di controllare gli straripamenti artesiani. Se dovesse capitare un tale fenomeno e non si è opportunamente cementato l'acquitardo sovrastante, può essere molto oneroso e problematico riuscire a bloccare il flusso d'acqua superficiale.

È auspicabile anche non deprimere troppo l'acquifero confinato. In altre parole, il livello di pompaggio dell'acqua nel pozzo di presa dovrebbe restare stabilmente nella parte superiore dell'acquifero o comunque superiore allo schermo drenante. Se si comincia a depauperare la falda acquifera oltre tali livelli, si introduce aria in un ambiente che era anaerobico in precedenza. Ciò può portare a molti tipi di reazioni chimiche indesiderate, come ad esempio l'ossidazione dei minerali solforati, l'ossidazione e la precipitazione di ferro e la stimolazione della crescita batterica.

Si può quindi affermare che l'abbassamento (s_a) è la differenza tra la superficie piezometrica indisturbata e la parte superiore della falda acquifera. In tutta onestà va detto che questa regola viene spesso "forzata" da parte degli operatori, soprattutto nel caso di pozzi aperti ed in acquiferi confinati litificati. In questo modo però si può abbreviare la vita utile del pozzo e/o mettere in pericolo il suo rendimento.

In acquiferi non confinati

In tale falda si avrà un abbassamento della linea piezometrica a seguito di estrazione delle acque sotterranee. Come orientamento generale si può assumere la regola di non superare il 30 ÷ 65 % dello spessore della falda acquifera.

Nella progettazione di uno schermo drenante per un pozzo di produzione in una falda acquifera non consolidata che comprende sedimenti relativamente omogenei e poco litificati, ci sono due scuole di pensiero.

Alcuni consigliano di mettere uno schermo drenante sul fondo per un 35 ÷ 70 % dell'acquifero, la gestione del pozzo sarà tale da mantenere lo schermo drenante sommerso e non farlo esporre così all'ossigeno che può favorirne la corrosione, le incrostazioni da batteri e

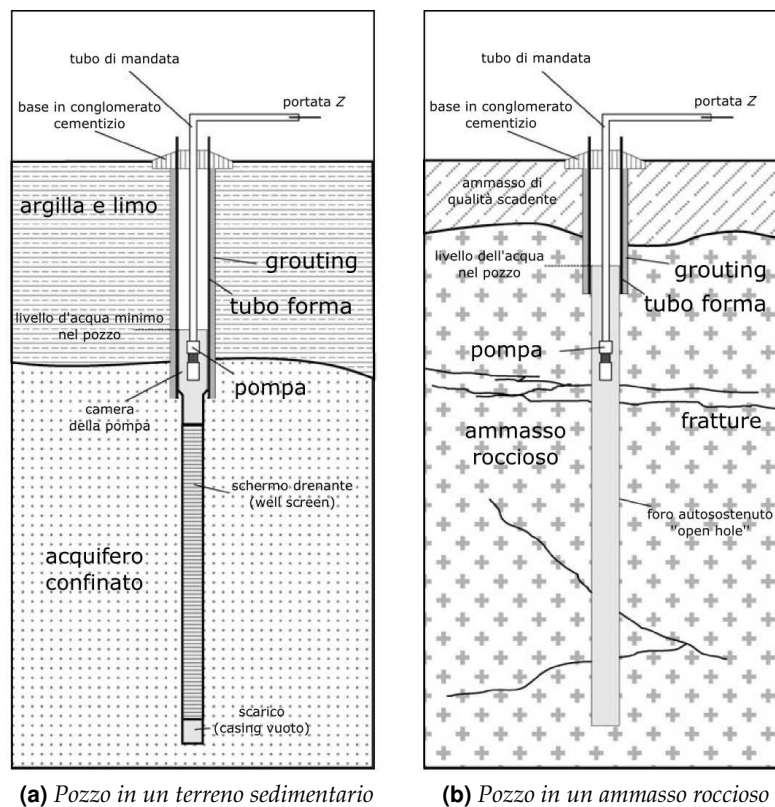


Figura 3.7: Caratteristiche del completamento di un pozzo al variare della qualità del terreno

chimiche. In questo caso il prelievo a disposizione è la differenza tra la falda freatica a riposo (nel suo stato indisturbato) e la parte superiore dello schermo drenante.

Altri semplicemente installano uno schermo drenante nell'intera sezione satura della falda acquifera e accettano che il pompaggio causerà alla parte superiore dello schermo drenante di essere alternativamente immersa e asciutta. Si è disposti ad accettare che la performance di questa sezione possa ridursi col tempo.

La prima filosofia ha senso se il costo dello schermo drenante è molto maggiore di quello del semplice casing; la seconda filosofia invece se i costi non sono troppo dissimili.

Se la falda acquifera non è omogenea, ma contiene specifici orizzonti ad alta trasmissività, le zone che vengono munite di schermi drenanti devono intercettarli.

Anche in questo caso, se il rendimento richiesto è trascurabile e la falda acquifera è molto trasmissiva (o alternativamente se la falda acquifera è molto spessa), si può scegliere di non raggiungere la base dell'acquifero.

In una falda litificata, ben cementata o cristallina, in genere si costruisce il pozzo a "buco aperto" (open hole). Una sezione del tubo forma vuoto di solito viene installata e si procede con il grouting nella parte superiore del pozzo per escludere che qualunque materiale, superficiale, mal esposto all'aria, o eventuali strati instabili e potenzialmente contaminati possano raggiungere la falda sottostante.

3.4.3 Le pompe

Un altro elemento importante che costituisce il pozzo è la pompa, che può essere: sommersa o ad albero verticale.

Pompa sommersa come indicato dal nome ha il motore situato nella parte più bassa del

pozzo, l'acqua viene aspirata attraverso la colonna sovrastante e rispetto al secondo tipo permette di estrarre maggiori quantità di acqua a parità di diametro della pompa. Non necessita della perfetta verticalità del pozzo, ma bisogna prestare attenzione negli acquiferi sabbiosi, in quanto le velocità elevate tendono a causare abrasione.

Pompa ad albero verticale lavora a velocità decisamente più contenute e necessita di una lubrificazione aggiuntiva (si usa olio lubrificante in modeste quantità), è legata indissolubilmente all'albero verticale e a tutti i problemi connessi alla sua installazione e alla profondità da raggiungere.

Secondo Basta e Minchio [2007] la scelta del tipo di pompa da impiegare dipende dalla coppia di variabili portata e profondità e sono preferibili i modelli a velocità variabile per ottimizzare la portata da prelevare al variare della richiesta termica; riassumendo:

- con pozzi poco profondi e basse portate sono preferibili le pompe ad albero verticale;
- con pozzi profondi e portate più elevate sono invece consigliate le sommerse.

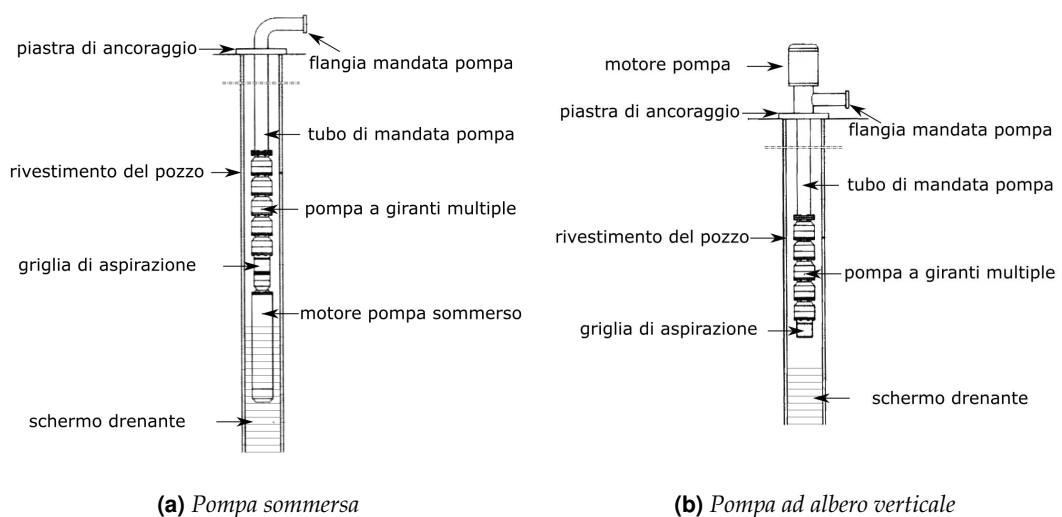


Figura 3.8: Elementi principali delle pompe [Basta e Minchio, 2007]

3.5 Pozzo di presa

Le informazioni necessarie per la progettazione di un pozzo da cui estrarre le acque da mandare all'impianto geotermico sono le seguenti:

1. *La profondità del pozzo*, che sarà legato alla profondità dell'acquifero, al livello statico delle acque sotterranee in falda ed in certa misura alla conducibilità idraulica dei suoli. I pozzi possono trovarsi a pochi metri di profondità in depositi alluvionali o alla profondità di alcune centinaia di metri.
2. *Il diametro del pozzo*, funzione della portata che a sua volta influenza il diametro della pompa richiesta (deve ovviamente adattarsi alle dimensioni del pozzo).
3. *Il rendimento del pozzo* sarà limitato dalle proprietà idrauliche della falda e dal carico desiderato per il riscaldamento e/o raffrescamento.

4. *La litologia della falda* che determina il tipo di pozzo richiesto e quindi il suo costo (per perforazione e sigillatura).

Non sempre è possibile ottenere il permesso per scavare un pozzo, specie se ci si trova in acquiferi di pregio o in fasce di rispetto. In genere le autorità competenti richiedono il rispetto di molteplici condizioni per rilasciare la concessione d'uso, che si possono così riassumere:

- una valutazione di impatto ambientale o una indagine sulle caratteristiche/qualità dell'acqua;
- una prova di pompaggio che attesti che il volume d'acqua richiesto non comporti rischi ambientali e pregiudichi gli altri eventuali utilizzatori locali;
- l'evidenza che l'acqua estratta sia utilizzata in modo appropriato ed efficiente.

3.5.1 Rendimento, profondità e abbassamento indotto

Le grandezze di maggiore interesse che descrivono un acquifero (K , S_0 , T_0) e il materiale che lo compone sono stati già introdotti, resta ora da approfondire come valutare la relazione funzionale tra portata e abbassamento del livello statico. Si tratterà il caso ideale di un acquifero confinato.

Durante il pompaggio la superficie piezometrica attorno al pozzo di presa si deprime, creando un campo radiale di flusso (e gradiente idraulico) verso il foro di pompaggio. La superficie in cui si stabilizza il livello delle acque sotterranee prelevate viene chiamata *cono di depressione*; la differenza verticale tra la superficie piezometrica iniziale e quella che si è formata a seguito dell'estrazione viene chiamata abbassamento indotto s_a .

L'idrogeologo americano Carlo V. Theis (una delle figure chiave dell'idrogeologia moderna) dedusse nel 1935 una formula per il flusso radiale transitorio (dipendente dal tempo) delle acque sotterranee, nei riguardi di un pozzo di presa. La formula prevede il rapporto tra la trasmissività (T_0), la portata (Z), l'immagazzinamento specifico (S_0) e l'abbassamento indotto (s_a) a una determinata distanza radiale (r) dal pozzo ed in un tempo (t) misurato a pompaggio avviato:

$$s(r, t) = \frac{Z}{4 \pi T_0} W(u) \quad (3.5.1)$$

L'equazione è nota come curva di Theis e il polinomio $W(u)$ può così esprimersi:

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2, 2!} + \frac{u^3}{3, 3!} - \frac{u^4}{4, 4!} + \frac{u^5}{5, 5!} - \dots$$

e

$$u = \frac{r^2 S_0}{4 T_0 t}$$

$W(u)$ converge rapidamente e di solito può essere calcolato prendendo in considerazione i primi, per esempio, cinque termini dello sviluppo in serie. Consente il calcolo manuale dell'abbassamento per un assegnato r , T_0 , S_0 e t .

Si può già osservare che:

- la portata è approssimativamente proporzionale alla trasmissività;
- l'abbassamento è approssimativamente proporzionale alla portata;
- l'abbassamento è inversamente proporzionale alla trasmissività;
- l'abbassamento aumenta con il tempo di pompaggio;

- l'abbassamento diminuisce con l'aumentare della distanza dal pozzo.

Cooper e Jacob (1946) semplificarono notevolmente l'equazione di Theis, se si assume che u sia piccolo (minore di 0,01), allora i termini dell'espansione polinomiale elevati a potenza diventano trascurabili e rimane:

$$s_a = \frac{Z}{4 T_0 \pi} \left[-0,5772 - \ln \left(\frac{r^2 S_0}{4 T_0 t} \right) \right] = \frac{2,30 Z}{4 \pi T_0} \log \left(\frac{2,25 T_0 t}{r^2 S_0} \right) \quad (3.5.2)$$

o alternativamente

$$s_a = \frac{2,30 Z}{4 \pi T_0} \log \left(\frac{2,25 T_0}{r^2 S_0} \right) + \frac{2,30 Z}{4 \pi T_0} \log t$$

Nella falda infinita e omogenea ipotizzata da Theis, il cono dell'abbassamento continua ad espandersi indefinitamente, nella realtà però questo non avviene. La falda raggiungerà una nuova condizione di stabilità, che bilancerà la quantità d'acqua estratta.

Molti anni prima di Theis, Adolph Thiem (1887) aveva trovato una soluzione stabile per il flusso di acque sotterranee radiali verso un pozzo. La seguente equazione differenziale (derivata dalla legge di Darcy in coordinate radiali) riassume i suoi risultati:

$$Z = 2 \pi r T_0 \frac{dh}{dr} \quad (3.5.3)$$

dove h è il carico idraulico in m e r è la distanza radiale dal pozzo di presa, sempre in m. Integrando tra due distanze radiali, r_1 e r_2 , si ottiene:

$$h_2 - h_1 = s_1 - s_2 = \frac{Z}{2 \pi T_0} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

dove h_1 e h_2 sono i carichi delle acque sotterranee che sottintendono alle rispettive distanze radiali, espressi in m; s_1 e s_2 sono gli abbassamenti indotti sempre in m. Se si considera il pozzo di presa come una di queste due distanze, si può affermare che l'abbassamento previsto (per la portata Z assegnata) è s_w , dove r_w è il raggio del pozzo di presa:

$$s_w - s_2 = \frac{Z}{2 \pi T_0} \ln \frac{r_2}{r_w}$$

Logan (1964) escogitò la più famosa e azzardata approssimazione nel campo dell'idrogeologia, stabilendo r_2 a una distanza r_e tale da rendere l'abbassamento s_2 praticamente nullo. Inoltre, ha ipotizzato che il rapporto r_e/r_w sia spesso pari a 2000. Così, ha ottenuto l'approssimazione Logan tra la portata (Z) e l'abbassamento indotto (s_w).

$$T_0 = \frac{Z}{2 \pi s_w} \ln \frac{r_e}{r_w} = 1,22 \frac{Z}{s_w} \quad (3.5.4)$$

Le ipotesi che hanno portato a queste assunzioni sono alquanto dubbie, tra l'altro Charles Theis dimostrò che non sono nemmeno raggiungibili in una falda ideale; sembra anche che Logan se lo fosse inventato di sana pianta il valore 2000. In realtà, la formula (3.5.4) può rivelarsi utile come prima stima del rapporto tra la trasmissività e il rendimento. Sempre per il calcolo della distanza radiale di falda indisturbata, Sichardt (1930) ha trovato:

$$r_e = C_r (h_1 - h_2) \sqrt{K}$$

con $C_r = (1500 \div 2000)$ misurato in $s^{1/2} m^{-1/2}$

Conoscendo la trasmissività della falda acquifera e definito un abbassamento compatibile con il pozzo (ad esempio la parte superiore dello schermo drenante), si può stimare il

rendimento massimo del pozzo. Allo stesso modo, se la falda acquifera è spessa e molto trasmissiva, si potrebbe pensare di stimare la profondità (D) necessaria per la perforazione nell'acquifero in funzione di una assegnata portata. Come la trasmissività è il prodotto della conducibilità idraulica per lo spessore della falda acquifera, e supponendo che il pozzo sarà idraulicamente efficiente, si può trovare:

$$K D = 1,22 \frac{Z}{s_w}, \quad \text{quindi} \quad D = 1,22 \frac{Z}{K s_w}$$

In questo caso, il pozzo a profondità ridotta non è idraulicamente efficiente come nel caso di completo attraversamento della falda, l'abbassamento (e quindi i costi di pompaggio) per un determinato rendimento sarebbero maggiori. Si stanno sacrificando così i costi di esercizio (energia elettrica o combustibile per la pompa) per un costo di perforazione minore.

Un approccio più sofisticato

Se l'approssimazione di Logan sembra un po' troppo primitiva (e in realtà dovrebbe essere utilizzata solo per una stima iniziale di portata), si possono sempre utilizzare le equazioni di Theis o Cooper-Jacob, se si è in grado di misurare la trasmissività e l'immagazzinamento specifico dell'acquifero. Per prevedere l'abbassamento indotto da una portata assegnata nel pozzo di presa, si dovrà settare r come il raggio del pozzo (r_w) e quindi risolvere l'equazione per tempo di pompaggio (t) assegnato.

3.5.2 Pozzo e falda reale

Tutte le equazioni utilizzate presuppongono che la presa sia al 100 % efficiente e che la falda sia "ideale" cioè infinita, omogenea ed isotropa, cosa che nella realtà non avviene mai.

Pozzi Reali

In un pozzo vero e proprio il filter pack ed il well screen producono moto turbolento e resistenza idraulica, molti altri fattori contribuiscono poi a ulteriori perdite di carico (figura 3.9 nella pagina successiva). Queste aumentano in generale con l'aumentare della portata, ma in modo non lineare. Mentre l'approssimazione di Logan (3.5.4) prevede una proporzionalità semplice tra abbassamento e portata, una equazione più realistica potrebbe essere la seguente:

$$s_w = B Z + C Z^n = \left(\frac{1,22}{T_0} + B' \right) Z + C Z^n$$

dove B rappresenta le perdite di carico lineari, entità naturali nella falda, dovute alla resistività idraulica, ma possono anche includere una componente B' minore di perdite lineari; C rappresenta le perdite non lineari (in genere perdite del pozzo); n è un fattore esponenziale, che spesso vale 2.

In realtà tutte queste approssimazioni aiutano a fare una prima stima del comportamento del pozzo. È una pratica comune utilizzare una versione modificata dell'approssimazione di Logan, con il coefficiente 1,22 aumentato (piuttosto arbitrariamente) a 2, per tener conto delle possibili perdite:

$$Z = \frac{T_0 s_w}{2}$$

Si ricorda che l'approccio di Logan è una approssimazione – serve solo per ottenere una prima stima della portata e dell'abbassamento indotto – non vale per la progettazione definitiva, che si servirà di analisi numeriche più complesse.

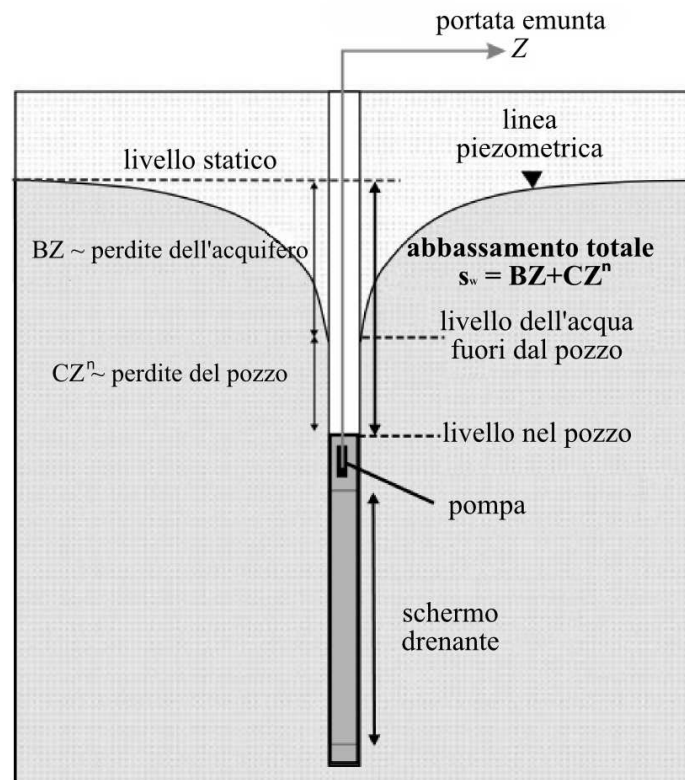


Figura 3.9: Perdite reali dovute all'acquifero e al pozzo di presa [Banks, 2008]

Acquiferi non confinati

Le equazioni finora presentate si basano sempre su un acquifero confinato. In realtà, si possono estendere facilmente anche agli acquiferi non confinati, a condizione però che l'abbassamento indotto sia piccolo rispetto allo spessore totale della falda. Se questo non fosse verificato, la trasmissività della falda acquifera potrebbe ridursi in modo significativo a causa della diminuzione del suo spessore saturo dovuto a emungimento. Si corre quindi il rischio di sottovalutare l'abbassamento previsto o sopravvalutare la portata. Alcune equazioni trattate per il caso di falda confinata possono essere adattate agli acquiferi non confinati. Ad esempio, l'equazione di Thiem (3.5.3) per una falda non confinata è la seguente:

$$H_2^2 - H_1^2 = \frac{Z}{\pi K} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

dove H_1 e H_2 sono le altezze in colonna d'acqua in corrispondenza dei raggi r_1 e r_2 , rispetto alla base della falda acquifera (figura 3.2b nella pagina 50).

3.5.3 Arredo idraulico

L'arredo idraulico tipico per la connessione del pozzo di produzione al sistema termico è illustrato in figura 3.10 nella pagina successiva. Non viene mostrata la valvola di controllo della pompa situata alla base del tubo di mandata vicino alla vasca di raccolta. La valvola di ritenuta mantiene l'acqua nella mandata e in questo modo si prevengono i danni di inversione di spinta in fase di avviamento della pompa. I motori sommersi sono dotati di un supporto per resistere alla spinta verso il basso che si sviluppa durante il normale

funzionamento. Nei sistemi più piccoli (in genere quelli dotati di uno scambiatore di calore), l'acqua pompata viene mandata ad una serie di autoclavi disposte in parallelo, nei sistemi di grandi dimensioni si evita questa soluzione per i conseguenti eccessivi volumi d'acqua richiesti. Prima di giungere all'impianto e dopo la saracinesca è opportuno posizionare un misuratore di portata.

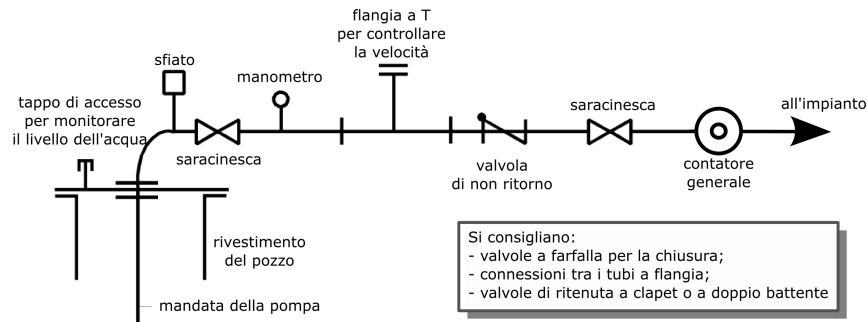


Figura 3.10: Arredo idraulico per un pozzo di presa [Rafferty, 2001]

3.6 Smaltimento delle acque sotterranee

Dopo che l'acqua ha ceduto o acquistato calore, si deve stabilire come smaltirla. Se le acque sotterranee in mandata avevano una temperatura iniziale per esempio, di 11°C e se si sono utilizzate per il riscaldamento, è possibile ritrovarsi con un fluido a temperatura di 6°C. Al contrario se si sono utilizzate per il raffreddamento, le acque reflue saranno più calde. Molte autorità ambientali prevedono due distinti permessi – una licenza per l'estrazione e una per il consenso allo scarico – che devono essere richiesti per un'operazione che comporti l'estrazione e lo smaltimento delle acque sotterranee. Di solito le possibilità di destinazione per lo scarico sono le seguenti:

In fognatura se si ha uno scarico pluviale a portata di mano ed inoltre se è assicurata la compatibilità della portata con la disponibilità della rete fognaria. Deve essere inoltrata una richiesta all'ente specifico.

In un corpo idrico superficiale si deve richiedere il permesso alla competente autorità di bacino ed è necessario eseguire qualche forma di valutazione di impatto ambientale, che dovrà rispondere alle seguenti domande:

- Come la temperatura (calda o fredda) delle acque di scarico incide sull'ecologia del corpo idrico superficiale, e sull'utilità degli altri utenti? Infatti la quantità di calore delle acque reflue è considerata come un potenziale inquinante da molte autorità ambientali.
- Le acque sotterranee scaricate sono geochimicamente compatibili con l'acqua del recipiente? Le acque sotterranee possono a seconda dei casi, essere: povere di ossigeno disciolto, ricche di ferro disciolto o salate. Tutti questi fattori potrebbero incidere in modo significativo sull'ecosistema di un corso d'acqua.
- Lo portata delle acque sotterranee può aumentare il rischio di esondazione del corso d'acqua?

Se lo scarico avviene a mare o in un estuario, può in alcuni casi essere meno strettamente regolamentato.

Nella stessa falda acquifera di estrazione è la migliore scelta possibile, perché ha poche o nessuna incidenza sulle risorse idriche (non c'è sottrazione di acqua dalla falda acquifera) e spesso riduce il rischio di abbassamenti del suolo, che possono verificarsi in alcuni terreni a causa della prolungata estrazione delle acque sotterranee. Questa soluzione può quindi essere interessante per l'ambiente e rassicurare le agenzie di regolamentazione che hanno il compito di garantire che le risorse idriche siano protette. In alcuni paesi l'operazione di estrazione e reiniezione nella stessa falda non richiede alcuna licenza. In altri la licenza può essere più facilmente ottenibile rispetto a quella per il solo emungimento. L'acqua iniettata può necessitare di sterilizzazione, per evitare l'intasamento batterico del filtro del pozzo o della falda acquifera, ma dovrà avere: un contenuto molto basso di particelle in sospensione, una bassa pressione e il suo contenuto di gas dovrà essere controllato in modo tale che le bolle che si liberano non intasino la falda acquifera e ne diminuiscano la permeabilità. Infine si deve prestare attenzione che la reiniezione dell'acqua sotterranea non sia così vicina al pozzo di presa da realizzare un "cortocircuito", che si verifica quando l'acqua reiniettata fredda (o calda, se si tratta di un sistema di raffreddamento) va ad influenzare il pozzo di produzione. Se ciò dovesse avvenire, la temperatura inizia a scendere (o a salire) con il passare del tempo, compromettendo l'efficienza del sistema.

In un'altra falda acquifera se vi è più di una falda acquifera sottostante il sito è possibile prelevare le acque sotterranee da un acquifero e disporre la reiniezione o infiltrazione in un altro. Se si fa questo, si depaupera un acquifero e si ricarica un altro corpo idraulicamente distinto. L'autorità di regolamentazione si comporta più o meno nello stesso modo dello smaltimento delle acque superficiali e si dovrà verificare che l'estrazione della prima falda acquifera non comprometta eccessivamente le sue risorse a discapito anche degli altri eventuali utenti e verificare l'impatto ambientale. Allo stesso modo l'autorità di regolamentazione dovrà accertare che:

- l'iniezione di acqua non causerà un aumento inaccettabile dei livelli delle acque sotterranee nella seconda falda acquifera;
- l'acqua iniettata sia geochimicamente compatibile con l'acqua naturale del secondo acquifero;
- qualsiasi bulbo di calore (cioè il calore o il freddo trasportato dalle acque sotterranee) non costituisca un inquinamento termico inaccettabile e non causi un impatto negativo verso altri utenti.

Nello stesso pozzo di presa è il caso del sistema standing column.

3.7 Pozzo di scarico

Il pozzo di iniezione può essere considerato come l'opposto di un pozzo di presa, in cui la portata di pompaggio Z cambiata di segno si sostituisce nelle formule di Theis (3.5.1), Cooper-Jacob (3.5.2) o di Logan (3.5.4). Il tutto si traduce in un pompaggio negativo, con la conseguente crescita della linea piezometrica che potrebbe rivelarsi come uno dei principali ostacoli al sistema, soprattutto se la piezometrica risultante raggiunge la superficie del terreno (figura 3.13a nella pagina 71). Se ciò dovesse verificarsi si deve o iniettare in pressione l'acqua in eccesso in un pozzo ben sigillato, o utilizzare un maggior numero di pozzi di iniezione convenzionali.

Questi pozzi richiedono un'attenta progettazione e costruzione per molteplici aspetti. L'iniezione dell'acqua deve essere priva di particelle, per evitare l'intasamento dello schermo drenante o della falda. Si deve inoltre garantire un ambiente microbiologicamente inattivo

per prevenire la crescita batterica sulla parete del well screen o del foro: è prassi applicare una sterilizzazione ai raggi UV nell'acqua iniettata. Inoltre non deve contenere bolle di gas o concentrazioni dei gas disciolti che potrebbero disciogliersi nella falda acquifera andando ad ostruire i pori o le fratture del terreno e compromettendo così il funzionamento del pozzo, allo stesso modo delle particelle sedimentate o del biofilm. Inoltre bisogna anche considerare la possibilità di precipitazione chimica e di intasamento del conferimento e dello schermo drenante, infine il contatto tra l'acqua e l'ossigeno atmosferico può aumentare il rischio di precipitazione di ferro e manganese. Come sempre le analisi chimiche delle acque sotterranee sono utili anche per prevedere questi rischi. La pressurizzazione e la sigillatura dell'opera di presa riducono al minimo il contatto tra l'acqua e l'atmosfera e possono ridurre al minimo il rischio di intasamento chimico.

Nonostante tutte queste precauzioni i pozzi di iniezione non si comporteranno idealmente: di solito c'è un certo rischio di deterioramento delle prestazioni che obbligano in fase progettuale ed esecutiva ad aumentare cautelativamente il numero di pozzi di iniezione (o la profondità del pozzo), in modo da accettare che una portata assegnata ritorni in falda, più di quanto sarebbe richiesto per la sua produzione.

3.7.1 Arredo idraulico

L'arredo idraulico di un pozzo di iniezione tipo è rappresentato in figura 3.11. Particolare importanza va posta nel tubo sommerso nel pozzo, in quanto si possono formare delle bolle d'aria che possono ostruire il flusso d'acqua. Per evitare ciò si usa uno sfiato che aiuta a minimizzare il quantitativo di aria nel pozzo di iniezione. È necessario anche dotare l'opera di scarico di un bypass per deviare il flusso d'acqua nel caso in cui il pozzo debba essere mezzo fuori servizio, per permettere al sistema di continuare a funzionare con la temporanea restituzione superficiale o in fognatura. Infine è importante monitorare la pressione (o il livello dell'acqua) nel pozzo per capirne il rendimento e l'eventuale accumulo di particolato.

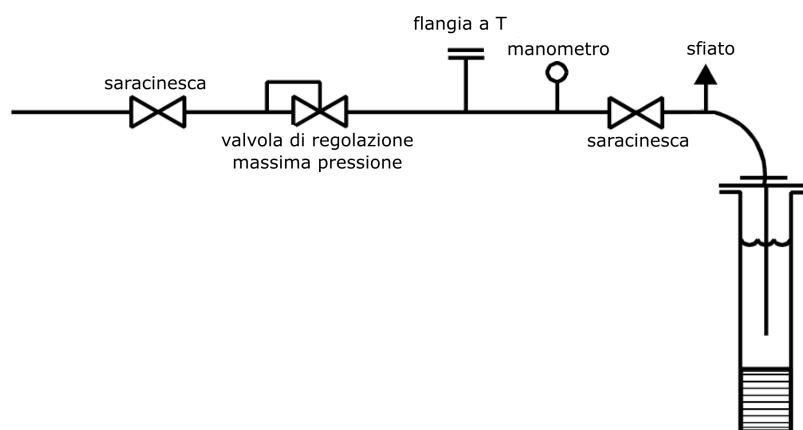


Figura 3.11: Arredo idraulico per un pozzo di scarico [Rafferty, 2001]

3.8 Campo pozzi

Alcuni schemi open loop sono basati su un singolo pozzo, molti però richiedono la perforazione di molteplici pozzi per ottenere la portata richiesta. In questo caso sarà opportuno verificare se:

- le proprietà idrauliche dell'acquifero sono sufficienti a sostenere una tale estrazione di progetto;
- i pozzi all'interno del campo non vadano in conflitto idraulico tra loro.

D'altra parte, se il sistema utilizza pozzi di iniezione per far tornare l'acqua di scarico nella falda acquifera originale, la portata disponibile potrebbe anche essere superiore a quella ottenuta in sola produzione. Il problema non è di facile soluzione e richiede in molti casi una modellazione numerica.

3.8.1 Più pozzi di produzione

Si provi ad immaginare un campo composto da tre pozzi di presa identici (A , B e C), muniti di un raggio r_w e posti ad una distanza di $r = 30$ m. Per semplicità si assuma che non ci siano pozzi di iniezione. L'abbassamento è una proprietà additiva: perciò l'altezza totale nel pozzo centrale (B) in qualsiasi momento non è data dal solo prelievo previsto dall'equazione di Theis o Cooper-Jacob, calcolata per il pozzo centrale (s_B) ed il suo raggio (r_w). Si dovranno aggiungere anche gli abbassamenti provocati dall'estrazione dei pozzi limitrofi A e C . Così, l'abbassamento totale in B (s_{wB}) e in un tempo t è:

$$s_{wB} = \frac{Z_A}{4\pi T_0} W(u_A) + \frac{Z_B}{4\pi T_0} W(u_B) + \frac{Z_C}{4\pi T_0} W(u_C)$$

dove:

$$u_A = u_C = \frac{r^2 S_0}{4 T_0 t} = \frac{30^2 S_0}{4 T_0 t} \quad \text{e} \quad u_B = \frac{r_w^2 S_0}{4 T_0 t}$$

Se i valori di u sono trascurabili, si può applicare l'approssimazione di Cooper-Jacob (3.5.2) e così pure per il prelievo in A e C .

In conclusione l'abbassamento in un determinato pozzo, formato da soli pozzi di estrazione, è maggiore di quello che si avrebbe avuto nel medesimo pozzo isolato (a parità di portata emunta). Pertanto la portata di ogni singolo pozzo in un campo multiplo, per un determinato abbassamento, sarà inferiore al caso di un unico pozzo. Si noti che le equazioni di cui sopra assumono pozzi idealmente efficienti: i prelievi reali possono essere maggiori a causa delle perdite di carico.

3.8.2 Sistema doublette

La stessa tecnica può essere applicata come descritto nel paragrafo precedente, ma questa volta sottraendo i termini relativi ai pozzi di iniezione. Si assume un semplice sistema doublette (figura 3.12 nella pagina seguente), con una portata (Z) e una sola iniezione ($-Z$) a distanza L , entrambi con raggio r_w . L'equazione relativa per l'abbassamento nel pozzo di estrazione (s_w), per piccoli valori di u (cioè grandi valori di t), è:

$$s_w = \frac{2,30 Z}{4\pi T_0} \log\left(\frac{2,25 T}{r_w^2 S_0}\right) - \frac{2,30 Z}{4\pi T_0} \log\left(\frac{2,25 T}{L^2 S_0}\right) + \frac{2,30 (Z - Z)}{4\pi T_0} \log t$$

Quando si instaura un campo di moto stabile, il termine dipendente dal tempo si annulla e l'abbassamento indotto diventa costante. L'abbassamento in un pozzo di presa doublette è inferiore a quello che si avrebbe nel caso di sola estrazione, ed è dato da Gringarten (1978):

$$s_w = \frac{2,30 Z}{4\pi T_0} \log\left(\frac{L^2}{r_w^2}\right) = \frac{Z}{2\pi T_0} \ln\left(\frac{L}{r_w}\right)$$

L'innalzamento indotto nel pozzo di iniezione dovrebbe essere pari a $-s_w$, se il pozzo fosse efficiente al 100%, questo però in realtà difficilmente avviene.

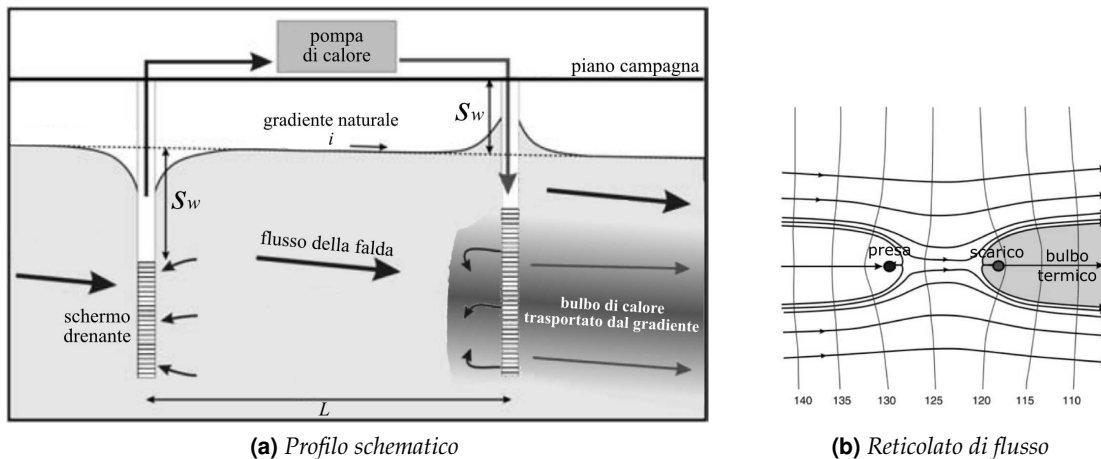


Figura 3.12: Un sistema doublette dove il pozzo di presa è a monte del gradiente e quello di restituzione a valle; la distanza L è tale da non generare un feedback idraulico. Nel reticolato, le frecce mostrano il flusso dell'acqua, mentre le linee più sottili e numerate rappresentano i contorni della falda con i valori del carico idraulico (decrescente da sinistra a destra) [Banks, 2008]

3.8.3 Feedback idraulico e migrazione di calore

Considerando un impianto idrotermico doublette in raffreddamento e assumendo di emungere acqua fredda ad una temperatura iniziale di T_{presa} e di reiniettarla nello stesso acquifero alla stessa portata Z ma ad una temperatura $T_{scarico}$ in un pozzo di scarico situato ad una distanza L in direzione del gradiente idraulico della falda, il calore immesso nelle acque sotterranee (G) è dato da:

$$G = (T_{scarico} - T_{presa}) S_{VCw} Z$$

Dove S_{VCw} è il calore specifico volumetrico dell'acqua. Il carico di raffreddamento (Q_1) consegnato all'edificio viene stimato così:

$$Q_1 = (T_{scarico} - T_{presa}) S_{VCw} \frac{Z}{1 + \left(\frac{1}{SPFC}\right)}$$

dove $SPFC$ è il fattore di performance stagionale per il sistema di raffreddamento. Questo dovrebbe essere molto alto ($1/SPFC \approx 0$) per i sistemi di raffreddamento, mentre $SPFC$ può essere circa $2 \div 3$ per i sistemi muniti di pompe di calore.

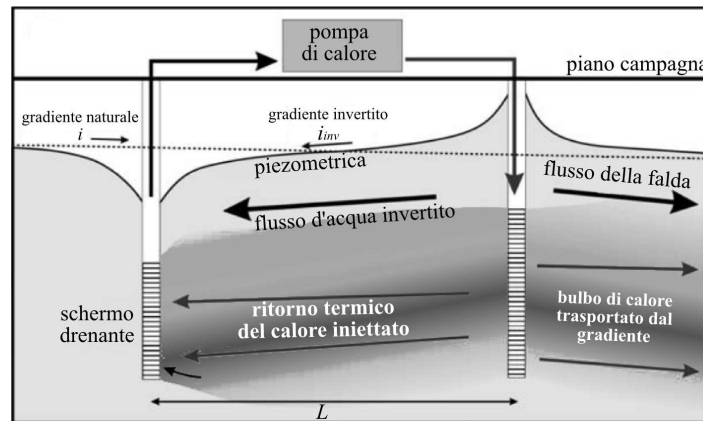
Nella migliore delle ipotesi, se si colloca il pozzo di presa a monte di quello di scarico (dove il gradiente idraulico è minore), tutto il calore iniettato sarà portato via dal flusso di acque sotterranee (figura 3.12) e il sistema funzionerà in modo sostenibile.

Naturalmente, il bulbo di calore prodotto dalla reiniezione può avere un impatto negativo su altri utenti che si servono della falda o sull'ambiente sottostante. Tuttavia, se il pozzo di iniezione si trova troppo vicino a quello di produzione (figura 3.13a a fronte), si può evidenziare una cortocircuitazione termica tra i due pozzi. Secondo Clyde e Madabhushi (1983) questo si verificherà se

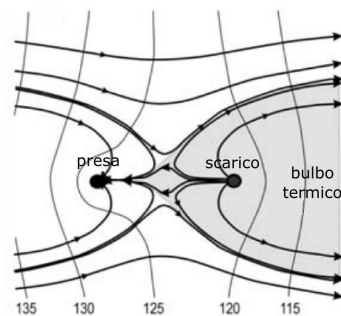
$$L < \frac{2Z}{T_0 \pi i} \quad (3.8.1)$$

dove: i è il gradiente idraulico naturale e adimensionale) e T_0 è la trasmissività della falda acquifera.

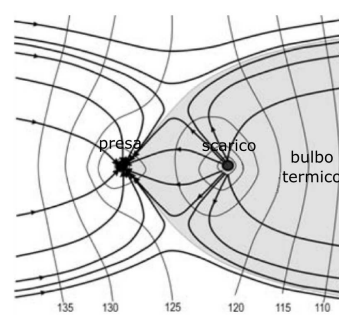
Se l'interasse tra i due pozzi è minore di questo valore critico, vi è la possibilità che una parte del calore reiniettato ritorni nel pozzo di emungimento. Ciò aumenterà la temperatura



(a) Profilo schematico



(b) Reticolato di flusso



(c) Reticolato di flusso

Figura 3.13: Un sistema doublette dove il pozzo di presa è a monte del gradiente e quello di restituzione a valle; la distanza L è tale da generare un feedback idraulico. Nel reticolato 3.13b, si è leggermente al di sotto del valore limite di L e c'è una minima influenza termica, mentre nel 3.13c, L è ampiamente sottodimensionata [Banks, 2008]

delle acque captate e diminuirà l'efficienza del sistema o addirittura, nel peggiore dei casi, lo renderà insostenibile.

La formula dà tuttavia delle distanze troppo elevate, infatti assumendo $T = 150 \text{ m}^2$ al giorno, $Z = 10 \text{ l s}^{-1} = 864 \text{ m}^3$ al giorno e $i = 1\%$, allora dall'equazione (3.8.1) risulta che la distanza L deve essere di almeno 367 m per evitare il rischio di feedback idraulico o termico. In molti casi è impossibile ottenere una distanza così elevata tra i due pozzi e si deve accettare il rischio di feedback termico. Comunque un tale sistema può essere ancora sostenibile e può avere una durata soddisfacente, perché:

- i. Il ritorno del calore nel pozzo di presa non avviene immediatamente. In realtà, potrebbero volerci molti anni (anche se negli acquiferi fessurati o carsici si potrebbe ridurre a settimane o mesi).
- ii. Solo una piccola parte dell'acqua estratta può provenire da quella reiniettata.
- iii. Se si sfrutta l'impianto in riscaldamento ed in raffreddamento, si è in grado di far funzionare il sistema in modo reversibile, recuperando efficacemente il calore delle acque reflue estive durante la stagione invernale e viceversa, senza arrecare alcun danno termico al sistema.

Per valutare il rischio di ritorno termico, si deve quindi considerare la velocità con cui le acque sotterranee viaggiano nel sottosuolo, tra i pozzi di iniezione e di estrazione. Prima di fare questo, però, si deve notare che, se in fase di installazione si è posto il pozzo di presa a

valle del gradiente idraulico, è molto probabile che si svilupperà una cella chiusa termica (figura 3.14), con tutta l'acqua calda iniettata che va ad alimentare il pozzo di presa.

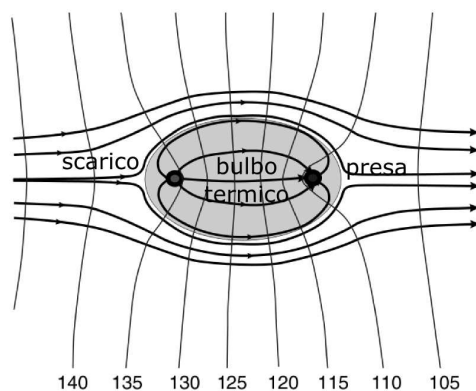


Figura 3.14: Posizionamento invertito dei pozzi doublette, rispetto al gradiente naturale della falda. Si nota come il bulbo termico chiuda perfettamente il circuito, pregiudicando il rendimento dell'impianto

Tempo di feedback idraulico

La soluzione ideale per scongiurare questo pericolo consiste nel valutare il tempo di feedback idraulico (cioè il tempo necessario alle acque sotterranee per raggiungere il pozzo di presa dal pozzo di reiniezione). Si utilizza di solito un modello numerico, che permetterà di simulare il movimento di un gran numero di molecole d'acqua, lungo diversi tubi di flusso (spesso considerando gli effetti di dispersione) e di calcolare un tempo medio di ritorno idraulico in quello che sta rapidamente diventando un problema complesso idrogeologico. Ci sono anche dei metodi analitici che si possono usare per una stima iniziale di questo tempo, ma sono delle semplici applicazioni della legge di Darcy e di approssimazioni geometriche.

Migrazione di calore attraverso la falda

Finora si è solo parlato del percorso inverso delle acque sotterranee, che dal pozzo di iniezione ritornano a quello di presa. Il calore però non viaggia alla stessa velocità delle acque sotterranee e non è semplicemente trascinato passivamente con esse, perché è soggetto a tre meccanismi:

1. conduzione attraverso i pori del terreno saturo;
2. avvezione con maggior flusso di acque sotterranee;
3. scambio tra il movimento delle acque sotterranee e la matrice dell'acquifero (grani minerali e qualche poro dove l'acqua rimane adsorbita).

Molti idrogeologi ritengono che lo scambio di calore sia molto rapido e che la matrice dell'acquifero si equilibri con la temperatura delle acque sotterranee rapidamente. De Marsily (1986) stima che l'equilibrio termico tra un granello di sabbia (1 mm di diametro) e le acque sotterranee circostanti richieda meno di 1 minuto, mentre l'equilibrio per una ghiaia di 10 cm occorrono 2 ore. Ciò significa che un singolo punto nel sistema acquifero può essere caratterizzato da una singola temperatura in ogni t di tempo (il che vale sia per la matrice

e sia per le acque sotterranee mobili). Questo fenomeno viene chiamato *ipotesi di equilibrio termico istantaneo* e può essere riassunto dalla seguente equazione monodimensionale:

$$\lambda^* \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - S_{VCw} \frac{dv_D T}{dx} = S_{VCacq} \frac{dT}{dt}$$

dove λ^* è la conducibilità termica effettiva della falda acquifera satura, S_{VCw} e S_{VCacq} sono i calori specifici volumetrici rispettivamente delle acque sotterranee e dell'acquifero saturo (cioè la matrice solida più l'acqua dei pori). v_D è la velocità di Darcy, relativa al flusso delle acque sotterranee attraverso la falda acquifera ($v_D = Ki$). Il primo termine descrive il trasporto di calore per sola conduzione, il secondo invece per sola convezione e il terzo il cambiamento di calore immagazzinato in una unità di volume di falda al variare del tempo.

3.8.4 Modellazione numerica delle falde

Naturalmente, più sono grandi gli impianti, più la progettazione si complica ed il numero di pozzi necessari aumenta, la falda acquifera potrebbe anche non essere omogenea o isotropa ed i carichi di raffreddamento e di riscaldamento potrebbero essere variabili, come pure la portata e le temperature di iniezione e presa. Ci possono anche essere altri pozzi di presa nelle vicinanze, che turbano la dinamica del flusso del sistema. Inoltre, potrebbe non essere possibile allineare perfettamente i pozzi di presa e scarico con la direzione del flusso sotterraneo.

Per affrontare i problemi di maggiore complessità, si ricorre ai modelli numerici, che simulano il flusso delle acque sotterranee accoppiandolo con il trasporto di calore, oltre agli elementi finiti o alle differenze finite. Il trasporto di calore nelle acque sotterranee è analogo al trasporto dei contaminanti.

In alcuni casi può essere possibile utilizzare (con molta attenzione) i modelli che sono stati progettati per simulare l'inquinamento delle acque sotterranee. Vi sono, tuttavia diversi programmi che vengono sviluppati con la possibilità esplicita di simulare il trasporto di calore in falde acquifere. Questi comprendono attualmente (ma non sono limitati a):

HST3D (Heat and Solute Transport in 3-Dimensional Groundwater Flow Systems). Questo è un codice alle differenze finite di dominio pubblico, è usato non solo per la simulazione del flusso di acque sotterranee e trasporto di calore, ma anche per il trasporto di contaminanti. È prodotto dalla United States Geological Survey.

SHEMAT (Simulator for HEat and MAss Transport) è un programma tedesco con funzionalità simili a HST3D.

FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) è un programma commerciale (e costoso) agli elementi finiti, con una notevole capacità di simulare problemi di flusso delle acque sotterranee con densità variabile, accoppiata al calore o al trasporto di soluti.

3.9 Criteri di dimensionamento dell'impianto

Secondo Basta e Minchio [2007] e Rafferty [2001] la progettazione di un sistema idrotermico a falda è un procedimento iterativo che ha come scopo quello di ottimizzare l'efficienza del sistema in funzione della portata prelevata. L'efficienza è ottenuta mediando sapientemente le richieste di funzionamento della pompa del pozzo, della pompa di circolazione e di quella di calore.

Per prima cosa bisognerà:

- individuare l'intervallo di portata prelevabile dal pozzo sulla base dei risultati in situ o in letteratura e adattarli alle indicazioni normative;
- determinare il mix ottimale fra COP e perdite di carico, considerando anche l'eventuale presenza dello scambiatore.

Poi di volta in volta si andranno a considerare i seguenti dati di input:

- carichi di climatizzazione che la PdC deve soddisfare;
- caratteristiche dell'impianto termico;
- vincoli normativi sulla portata di prelievo e salto termico dell'acqua scaricata;
- temperatura disponibile nel pozzo;
- caratteristiche tecniche della PdC.

Rafferty per semplificare il dimensionamento ha realizzato un foglio di calcolo (in unità di misura anglosassoni) che in base ai dati assegnati realizza un grafico rispettivamente per il funzionamento estivo ed invernale. L'indicazione visiva delle performance del sistema aiuta così il progettista a valutare l'impatto sul funzionamento in base alle diverse prestazioni, opportunamente modificabili nel foglio di calcolo (figura 3.15 a fronte).

3.10 Sistemi ATES in equilibrio termico e inversione stagionale

Gli Aquifer Thermal Energy Storage, acronimo che in italiano potrebbe adattarsi in *stoccaggio termico dell'acquifero*, sono molto usati all'estero e soprattutto nei paesi freddi per accumulare grandi quantità di calore durante l'estate per poi ricederlo durante il rigido inverno. Richiedono un acquifero ad alta porosità con un gradiente di falda molto basso. Esempi notevoli sono stati realizzati nell'edificio del Reichstag (Berlino) e negli aeroporti di Gardermoen (Oslo) e Arlanda (Stoccolma).

In questo paragrafo però si tratterà di impianti ATES progettati per avere un bilancio termico annuale e con la possibilità di invertire il funzionamento stagionale dei pozzi, per esempio prendendo acqua fredda dal primo pozzo e scaricandola al secondo in estate. In inverno, invece, dal secondo pozzo si emunge l'acqua calda che poi sarà reiniettata nel primo. L'estate seguente la polarità si invertirà di nuovo. Per un siffatto sistema, bisogna garantire che:

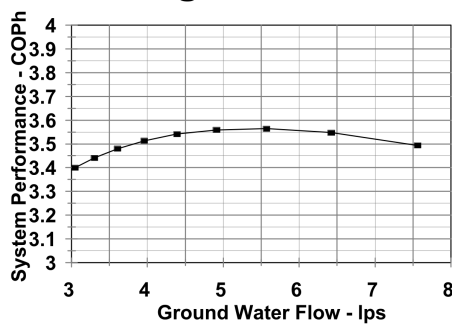
- il riscaldamento ed i carichi di raffreddamento siano circa equilibrati;
- il tempo di ritorno termico sia inferiore al periodo di riscaldamento o di raffreddamento (circa 6 mesi);
- la costruzione dei pozzi permetta la duplice funzione presa-scarico. Si è visto infatti che i pozzi di iniezione richiedono una cura particolare e delle strutture dedicate (in commercio sono disponibili particolari dispositivi da inserire alla base dei pozzi che consentono l'inversione).

Se si vuole "accumulare" la calura estiva nella falda acquifera per l'estrazione nell'inverno successivo, idealmente la falda acquifera dovrà avere un flusso naturale relativamente basso, in modo che il calore non si allontani troppo dal sistema. Si dovranno poi monitorare continuamente le portate delle acque sotterranee e le temperature dentro e fuori falda.

Wells					
GW temp	60	F Syst EER	13.10	Syst COP	3.49
Static	75	ft Flow	149	gpm loop pump	4.76 kW
Spec cap	2	gpm/ft gpm/ton	1.75	gpm/ton Unit COP	4.3
Flow	40	gpm		Loop out	54.2 F
Drawdn	25	ft Pump		Loop in	47.9 F
Aquifer t	150	ft Flow	149	gpm GW lvg	50.9 F
Inj Well ?	0	1-Y, 0-N Head	186	ft	
Inj Eff	0.8	Setting	174	ft GCHP	12.70 EER
		Heat Ex			
Building		GW in	60.0		F
Load	1020000	Btu/hr GW out	76.6		F
Htg Load	900000	Btu/hr Loop in	80.6		F
Htx dp	7	psi Loop out	69.0	F Control	
Hd loss	37	ft Area C	265.0	sq ft cool on	86 F
Approach	4	F Area H	204.6	sq ft cool off	75 F
Loop flow	213	gpm Inj Well		heat on	44 F
Loop head	65	ft Distance	0	ft heatoff	51 F
HP brand	8	Inj press	0	psi	
Syst vol	1000	gal			

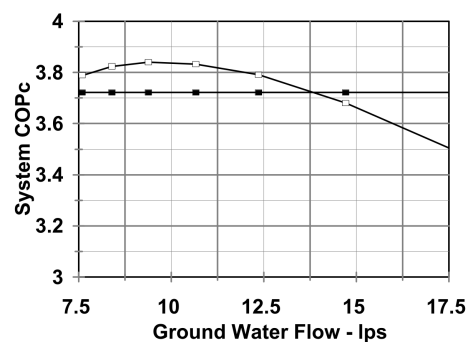
(a) Foglio di calcolo

Heating Performance



(b) Grafico portata-efficienza in riscaldamento

Cooling Performance



(c) Grafico portata-efficienza in raffrescamento

Figura 3.15: Metodo di dimensionamento di Rafferty [2001], costituito da un foglio di calcolo opportunamente tabulabile e dai grafici risultanti portata-efficienza del sistema, in modalità riscaldamento e raffrescamento

In alcune province olandesi si richiede un bilancio energetico per un periodo non inferiore ai 5 anni, le temperature della falda non dovranno scendere al di sotto dei 5°C e superare i 25 ÷ 30°C, infine sono vietati in prossimità di pozzi ad uso potabile.

Come ampiamente discusso è difficile garantire un bilancio termico annuale, anche perché entrano in gioco molti fattori. Al fine di equilibrare il calore respinto o estratto dal terreno, potrebbero impiegarsi i sistemi di condizionamento tradizionali, per fornire parte dei carichi non raggiunti con la geotermia.

3.11 Pregi e difetti dei sistemi idrotermici

Pregi

- Utilizzano un mezzo naturale (le acque sotterranee), che possiede una temperatura costante e ha un'elevata resa termica ($4\,180\text{ J m}^{-1}\text{ K}^{-1}$).
- Trasportano calore per convezione forzata delle acque sotterranee, piuttosto che per conduzione del sottosuolo. Tendono così ad estrarre più calore di quanto sia possibile fare con i sistemi a circuito chiuso.
- L'acqua emunta può avere anche un uso potabile, non è solo una risorsa termica. Anche se dovesse essere scadente, può ancora essere utilizzata come acqua industriale (ad esempio per gli sciacquoni, i lavaggi o come refrigerante).
- La qualità delle acque sotterranee non è necessariamente una questione di vitale importanza. Si possono realizzare impianti in siti dove le falde sono contaminate o in quelli di bonifica e nelle zone costiere dove la risorsa è salina.
- Molto spesso il numero ridotto di pozzi di perforazione, necessario per avviare tale sistema, tende a bilanciare il costo maggiore della sua progettazione, costruzione e licenza, rendendo il costo finale paragonabile ai sistemi closed loop (a parità di kW richiesti).

Difetti

- Dipendono dall'idrogeologia: richiedono una falda acquifera in grado di fornire una portata adeguata.
- Richiedono un contributo significativo nella progettazione, fornito da un idrogeologo o ingegnere idraulico.
- Necessitano di uno o più pozzi correttamente costruiti e durevoli nel tempo (cioè onerosi), con l'installazioni di pompe e di meccanismi di monitoraggio e controllo.
- Devono sostenere i costi connessi al pompaggio delle acque sotterranee (come regola generale, il consumo di energia dalle pompe di emungimento, di circolazione e di altre attrezzature ausiliarie dovrebbe essere $< 10\%$ del bilancio totale di energia elettrica del sistema GSHP).
- Devono smaltire legalmente la portata captata.
- Richiedono il consenso formale da parte di un'autorità preposta, sia per la presa sia per restituzione in una precisa destinazione. Può anche essere richiesta una tassa specifica.
- Necessitano del controllo costante dell'acqua emunta per monitorarne la qualità e la torbidità. Avranno bisogno di periodici interventi di manutenzione per evitare: intasamento, incrostazioni o corrosione della pompa di calore, degli scambiatori di calore o dei pozzi.

Closed loop da sonde geotermiche verticali

In assenza di falde sotterranee o di autorizzazioni che ne consentano l'uso, un buon sistema per scambiare il calore con il terreno è offerto dalle sonde geotermiche verticali (conosciute anche con l'acronimo SGV in Italia e BHE all'estero). La quasi totalità degli impianti è ad espansione indiretta: un fluido termovettore viene fatto circolare in un circuito chiuso disposto in uno o più fori perforati verticalmente nel terreno (le cosiddette sonde geotermiche). Poi cederà o acquisterà calore dalla PdC, funzionando come un vero e proprio "geoscambiatore" di calore. L'espansione diretta viene utilizzata raramente negli impianti orizzontali, ma sta piano piano scomparendo, perché prevede di far circolare nel terreno il fluido frigorifero della pompa di calore, con tutte le problematiche ambientali ad esso collegate.

Si introdurrà la teoria della conduzione di calore per una sonda geotermica, in particolare le soluzioni proposte da Claesson e Eskilson, per chiarire: i complessi meccanismi che regolano lo scambio termico; i limiti e le pesanti assunzioni delle teorie che stanno alla base di molti metodi di calcolo assistito; l'importanza della valutazione in fase di progetto delle temperature sul breve, medio e lungo periodo.

Dalla teoria si passerà alla sonda reale, dando spazio alle parti che costituiscono questo sistema geotermico chiuso: le tipologie delle sonde, le proprietà del fluido termovettore, la scelta della miscela per il riempimento del foro e la messa in opera. Non sarà tralasciato il collaudo, fondamentale per certificare le sonde e aumentarne la percezione di affidabilità al committente e a tutte le Aziende che partecipano alla sua realizzazione.

Per quanto riguarda il dimensionamento, si è parlato delle semplici regole pratiche per i piccoli impianti residenziali e degli approcci analitici/numerici per gli impianti più esigenti. Con l'ausilio di un software di calcolo si è mostrato per un ipotetico edificio, l'andamento temporale delle temperature del fluido termovettore, al variare della spaziatura delle sonde e del tipo di disposizione del campo sonde.

4.1 Valutazioni preliminari

Per capire il funzionamento dell'impianto a sonde geotermiche verticali si può ricorrere ad una semplice schematizzazione che descrive il percorso di un fluido termovettore in un circuito nel sottosuolo (figura 4.1 nella pagina successiva). Al crescere dei carichi ovviamente aumenterà la profondità e il numero dei fori, andando a formare il *campo sonde*.

In modalità di riscaldamento, per migliorare la conduzione con il terreno, si mantiene il fluido ad una temperatura media di $-1,5 \div -2^\circ\text{C}$. Nell'esempio in figura 4.1 infatti, la temperatura di mandata è di -4°C e quella di ritorno 0°C . Ovviamente in condizioni di carico di punta, il sistema potrà lavorare anche a temperature più fredde, in relazione però all'efficienza della pompa di calore, descritta dal COP_H .

Le scelte impiantistiche spaziano quindi dal tipo di: scambiatore da porre nelle sonde,

miscela per cementare il foro, fluido termovettore, disposizione delle sonde in sito e collegamento orizzontale alla PdC. Queste sono solo alcune delle variabili che un progettista dovrà soppesare nella progettazione dell'impianto, ognuna con specifici vantaggi e svantaggi e ognuna in costante studio e perfezionamento, in questo capitolo perciò si passeranno in rassegna i materiali, le tipologie e le modalità di installazione tipiche per questi impianti, evidenziandone le caratteristiche.

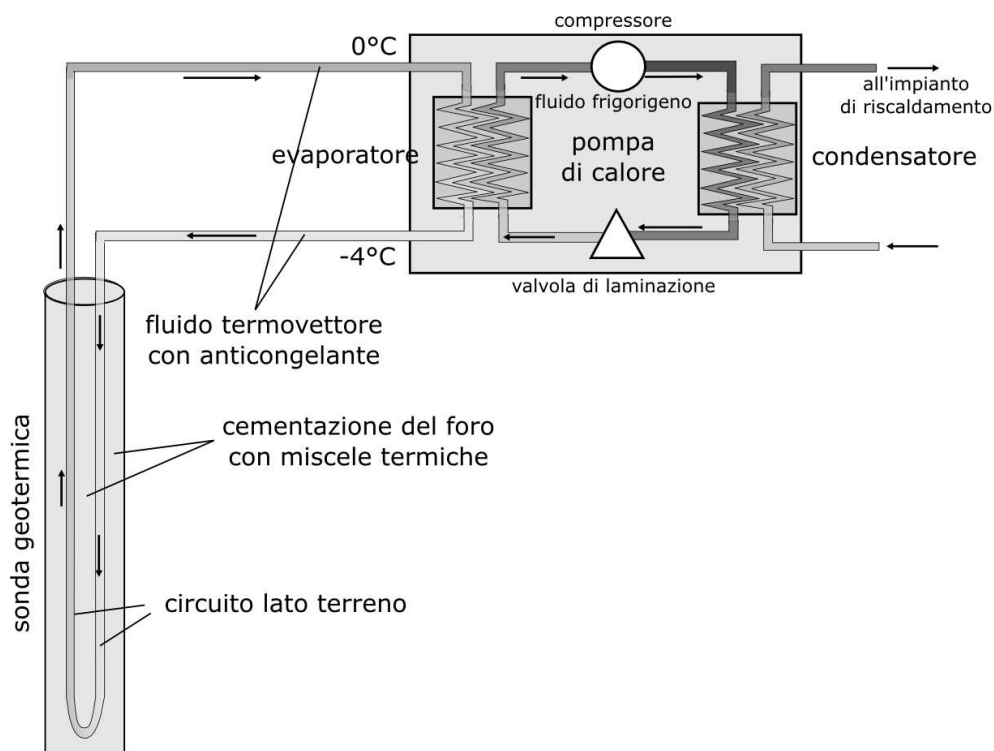


Figura 4.1: Schema di funzionamento in riscaldamento di un impianto dotato di un'unica sonda geotermica

Per quanto riguarda il dimensionamento degli impianti closed loop, in molti manuali consultati e anche nelle norme VDI e di conseguenza UNI EN 15450, si riportano delle "regole pratiche" per caratterizzare le sonde geotermiche, che forniscono un determinato range di watt per metro perforato. Molti progettisti aggiungono a questi valori tabellari una lunghezza extra di perforazione, per avere un margine di sicurezza e dimensionare anche l'acqua calda sanitaria. Questi dati di resa termica (riportati in tabella 2.5 nella pagina 42), sono puramente indicativi, perché valgono solo per la modalità riscaldamento, si riferiscono all'energia estraibile da una sonda singola realizzata a "regola d'arte" e hanno un campo di variabilità del 15 ÷ 20%. Possono essere utili come dato di partenza, ma va tenuto conto che trascurano:

1. *La conducibilità termica, capacità di calore specifico e temperatura del suolo.* Si è visto che il campo di variabilità della conducibilità non varia troppo da sedimento a sedimento (è tipicamente compreso in un intervallo di $0,2 \div 2,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e la capacità di calore specifico varia anche di meno (tabella 1.2 nella pagina 14). Anche la temperatura del suolo è relativamente costante all'interno di una determinata regione (anche se può essere significativamente più alta nelle aree urbane).

2. *Il modello di funzionamento del sistema.* Per esempio, il numero equivalente di ore di funzionamento a pieno carico per il periodo di riscaldamento e la durata di funzionamento di punta su base giornaliera. Il numero di ore a pieno carico per il riscaldamento domestico stagionale può variare da 3 000 ÷ 4 000 ore in Scandinavia ad appena 1 000 ore in Europa centrale.
3. *La temperatura di funzionamento del circuito lato terreno.* In modalità riscaldamento, questo sarà tipicamente intorno o appena al di sotto di 0°C (anche se può scendere ulteriormente nei periodi di maggior richiesta). Nei sistemi di raffreddamento, tuttavia, non vi è un limite superiore naturale. Infatti si è osservato che, ad esempio, aumentando la temperatura del ciclo di funzionamento da 29,4°C ad 32,2°C si potrebbe ridurre il circuito lato terreno del 14 %, anche se questo andrebbe ad influire negativamente sull'efficienza della pompa di calore.

Le regole pratiche inoltre sono sconsigliate per i progetti più impegnativi (le VDI [2001a] fissano una soglia di potenza di 30 kW_t), in quanto i requisiti di raffreddamento diventano sempre più dominanti ed il numero di sonde comincia ad essere elevato, rispetto alla superficie a disposizione. In queste circostanze, entrano in gioco i seguenti fattori aggiuntivi:

4. *Interferenza termica tra i pozzi.*
5. *Carichi complessi in riscaldamento e raffreddamento.* Nell'arco di una giornata, si può avere una domanda di riscaldamento alla mattina presto e una domanda di raffreddamento nel pomeriggio. Le differenze di temperatura del fluido vettore e dei COP_c saranno probabilmente diverse in modalità raffreddamento rispetto a quelle in modalità riscaldamento. I sistemi reversibili poi possono richiedere campi sonde più contenuti, in confronto a schemi in solo riscaldamento, perché durante l'inverno il calore viene estratto dal terreno riscaldato nell'estate precedente.

Pertanto, all'aumentare delle richieste termiche, le "regole pratiche" che si fondano su una serie di ipotesi standard, diventano sempre meno affidabili e rimangono solo un buon punto di partenza per la progettazione vera e propria. In questi casi non è più sufficiente una stima ipotetica della resa termica del terreno: una differenza del 25 % nella scelta della conducibilità, diventa significativa in termini di costi di perforazione per un campo sonde che comprende, ad esempio, 20 trivellazioni. Così, per progetti di notevole dimensione, bisogna ricorrere ad una comprensione più sofisticata dell'accumulo e del trasferimento del calore nel sottosuolo.

4.1.1 Difetti ricorrenti nella progettazione

Le lacune che accompagnano e segnano la realizzazione degli impianti a sonde geotermiche, possono essere riassunte come segue:

- Utilizzo di regole pratiche semplicistiche per sistemi di grandi dimensioni (per esempio assumere 7 kW per 100 m di sonda), senza considerare che alcuni dei presupposti alla base di queste teorie possono essere trasgredite (ad esempio, si potrebbe avere interferenza termica dovuta alla trivellazione, o una complessa mescolanza dei carichi in riscaldamento e in raffreddamento). Se i regimi sono unidirezionali o reversibili e, in quest'ultimo caso, se i carichi di riscaldamento e raffreddamento sono equilibrati o meno si può avere un impatto significativo sui metri necessari per la trivellazione.
- L'eccessiva vicinanza dei fori fa in modo che l'interferenza termica diventi significativa. Alcuni installatori usano distanze di 4 ÷ 5 m, che possono essere l'unica scelta possibile

se la superficie a disposizione è molto limitata. Per esempio Banks [2008] suggerisce di usare una distanza minima di 10 m come punto di partenza per la progettazione di impianti che abbiano un carico di riscaldamento o di raffreddamento estremamente dominante, invece per sistemi reversibili e ben equilibrati sono accettabili anche distanze minori.

- Sottovalutazione della maggiore lunghezza necessaria per la sonda in solo raffrescamento, rispetto alla medesima per solo riscaldamento (in dipendenza però della temperatura del ciclo di funzionamento).
- Utilizzo di una vita troppo breve di progettazione per la simulazione delle prestazioni di un campo sonde. Alcuni progettisti considerano un periodo di simulazione più basso di 10 anni. Si vedrà in seguito che il sistema raggiungerà un regime stazionario solo dopo una trentina d'anni o più.

4.2 Conduzione di calore nel sottosuolo

Le sonde geotermiche scambiano calore con il sottosuolo principalmente attraverso la conduzione, si adatterà allora la legge di Fourier, introdotta nel capitolo 1 e di seguito ripresa, ad un volume di terra:

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dL} \quad (4.2.1)$$

dove: Q è il flusso di calore in W; λ è la conducibilità termica della terra in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$; S è l'area della sezione in m^2 ; T è la temperatura in $^{\circ}\text{C}$ o K ; L è la distanza in direzione della diminuzione della temperatura (da notare che il segno negativo indica che il flusso di calore va nella direzione di diminuzione della temperatura); $d\theta/dL$ è il gradiente di temperatura in K m^{-1} .

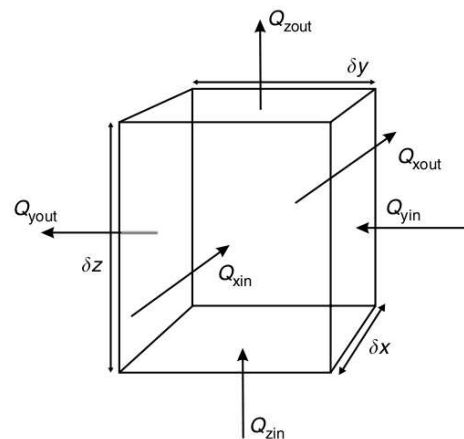


Figura 4.2: Un volumetto infinitesimo di terreno con evidenziate le quantità di calore per le tre direzioni principali

Volendola estendere allo spazio tridimensionale e al variare del tempo, si considera un volume infinitesimo di terra (V_t) di lati δx , δy , δz , di conducibilità termica λ (considerata per semplicità una quantità isotropa) e capacità specifica volumetrica S_{VC} (figura 4.2). Usando la legge di Fourier, il flusso di calore entrante nella direzione x è

$$Q_{x\text{in}} = -\delta y \delta z \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x$$

e il flusso uscente

$$Q_{x\text{out}} = -\delta y \delta z \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+\delta x}$$

Pertanto, la variazione di flusso di calore nella direzione x è data da

$$Q_{x\text{out}} - Q_{x\text{in}} = -\delta x \delta y \delta z \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = -V_t \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

Analogamente per le altre 2 direzioni y e z . Le dimensioni sono state assunte trascurabili, sarà quindi possibile costruire la seguente equazione differenziale, basata sul presupposto che per un incremento di tempo, l'afflusso netto di calore per il volume di terra, è pari alla capacità specifica volumetrica di calore, moltiplicata per la variazione di temperatura:

$$V_t \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + V_t \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + V_t \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = V_t S_{VC} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{S_{VC}}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2.2)$$

In sostanza per ogni minuscolo volume di terreno, il calore entrante deve uguagliare quello uscente, analogamente a quanto visto per il trasferimento di calore negli acquiferi nel paragrafo 3.8.3 nella pagina 72. Se ciò non avviene, si registrerà un progressivo cambiamento di temperatura nel tempo. Se più calore entra di quanto ne esce, la temperatura aumenta e viceversa.

L'equazione è anche la base teorica utilizzata nei modelli numerici per il trasferimento di calore: il terreno viene matematicamente suddiviso agli elementi finiti (una griglia di piccoli volumi di terreno) e l'equazione viene risolta dal computer contemporaneamente per ogni elemento. Si noti che l'equazione (4.2.2) presuppone che la conducibilità termica sia identica in tutte e tre le direzioni dello spazio. In realtà, i modelli numerici possono anche tenere conto dell'eventuale e reale anisotropia di λ .

L'equivalente idrogeologico di questa equazione, stabilisce che la quantità d'acqua entrante in un volume infinitesimo di acquifero, deve essere pari a quella che esce. Se ciò non dovesse avvenire, si determina un cambiamento nel carico idraulico:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_S}{K} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{S_0}{K D} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{S_0}{T_0} \frac{\partial h}{\partial t}$$

4.2.1 Il parallelo con l'idrogeologia

Se si considera la legge di Darcy (1.10.2) in analogia a quella di Fourier e se il bilancio termico (4.2.2) ha un parallelo diretto alla teoria del flusso delle acque sotterranee, allora in linea teorica si potrebbero adattare le formule di Theis (3.5.1), Cooper-Jacob (3.5.2) e Logan (3.5.4) al flusso di calore radiale verso la sonda. In verità molte "regole pratiche" che si riferiscono alla resa termica in funzione della profondità del foro, sono la versione termogeologica dell'approssimazione di Logan. Tuttavia vi è una differenza importante tra idrogeologia e termogeologia, che risiede nelle diverse *condizioni al contorno* che si hanno tra una falda acquifera e un volume di terreno.

Per una falda freatica (figura 4.3 nella pagina seguente), la base costituita di solito da un terreno impermeabile, ha una bassa permeabilità che può essere approssimata ad un contorno privo di flusso. La parte superiore è una superficie d'acqua (il livello statico di falda) con un carico potenzialmente variabile, ma che riceve (nel lungo termine) una ricarica annua costante dovuta alle precipitazioni. Concettualmente, quindi, si tratta di un contorno a flusso

costante (o, nel caso di un acquifero confinato, un contorno privo di flusso). Le equazioni di Theis e Cooper-Jacob prevedono che, se si pompa da un pozzo nella falda acquifera, si sviluppa in questa zona un cono di abbassamento di carico idraulico. Il cono di abbassamento continua a svilupparsi spazialmente (in teoria) all'infinito, in proporzione al logaritmo del tempo¹.

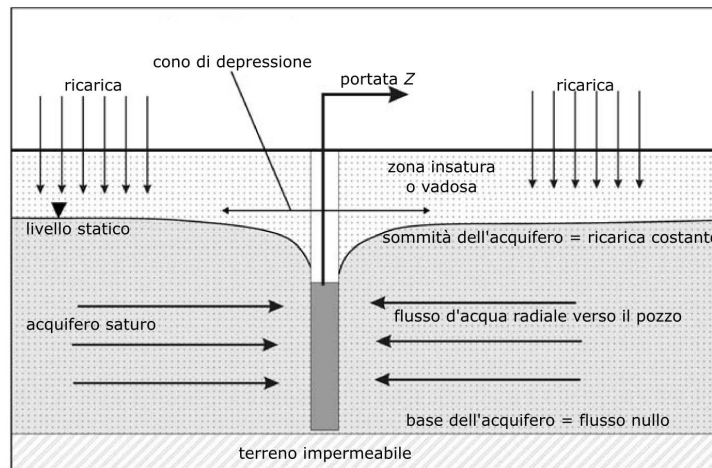


Figura 4.3: Condizioni al contorno di un pozzo in falda freatica

Per una sonda geotermica posizionata in un volume di terreno (figura 4.4 nella pagina successiva), si nota che quest'ultimo non ha una base fisica, ma concettualmente si può considerare il fondo del disegno come un contorno a flusso costante, rifornito da un calore geotermico di diverse decine di mW m^{-2} . La parte superiore non possiede un limite costante di flusso, ma può essere considerata come un contorno che raggiunge una temperatura costante a lungo termine (dopo diversi anni), pari alla temperatura media annuale dell'aria esterna. Se il terreno è più caldo rispetto alla temperatura media dell'aria, il calore andrà dissipato all'esterno. Se si estrae calore dalla sonda e si raffredda il terreno, quest'ultimo assorbirà calore dalla superficie. Più freddo è il sottosuolo, maggiore sarà allora il flusso di calore indotto dall'esterno.

Le condizioni al contorno per i terreni sono quindi diverse da quelle della falda. Il terreno ha un limite di temperatura costante, mentre la falda (almeno nelle ipotesi qui evidenziate) non ha alcun limite di carico costante. Così, prelevando calore dalla sonda, si sviluppa una zona di depressione termica nel terreno intorno al foro. Inizialmente il calore circostante sarà condotto radialmente verso il foro, poi la terra si raffredderà a tal punto che il flusso sarà sempre più indotto dalla superficie. Alla fine il flusso superficiale bilancerà il calore sottratto e si arriverà ad una condizione di stato stazionario.

L'altra differenza principale tra l'acquifero e il terreno è che nel primo c'è un basso o trascurabile gradiente di carico verticale prima del pompaggio (negli acquiferi ad alta permeabilità, il carico idraulico non cambia molto con la profondità). Nel secondo invece si ha inizialmente un gradiente verticale di temperatura corrispondente al gradiente geotermico. La sonda ha una temperatura media costante, ma visto che si fa circolare un fluido termo-

¹In realtà, il cono di prelievo di solito si stabilizza in una condizione di stato stazionario, ma per fare questo si deve o indurre una portata da un contorno a carico costante, come può essere un fiume, un lago o il mare, o bloccare lo scarico naturale, come il deflusso di base verso fiumi, sorgenti e zone umide

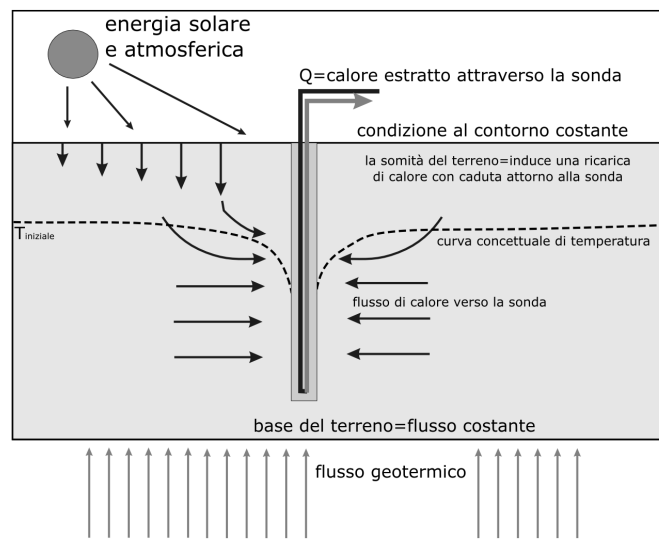


Figura 4.4: Condizioni al contorno per una sonda verticale

vettore al suo interno, sarà la temperatura di quest'ultimo che si andrà ad analizzare per la progettazione del sistema.

4.2.2 Ground Response Test

Per conoscere le proprietà termiche del sottosuolo e la resistenza termica della sonda geotermica, si utilizza il Ground Response Test (GRT) o anche noto Thermal Response Test (test di resa termica). La prova consiste nell'installazione di una vera e propria sonda geotermica nel terreno da indagare (la sonda poi sarà parte integrante del sistema geotermico), che una volta collegata ad un impianto calibrato, misurerà in continuo le temperature di ingresso e di uscita del fluido termovettore. Il GRT permette di:

- ricavare la temperatura indisturbata media del terreno, ossia la temperatura che si ha prima dell'installazione delle sonde;
- ricavare le caratteristiche termofisiche medie del terreno;
- verificare un modello, ossia vedere se le ipotesi fatte si avvicinano ai risultati del test, avere informazioni utili sulla stratigrafia del terreno.

È costituito da una pompa, un riscaldatore d'acqua a resistenza, un wattmetro, due termocoppie, un sistema di acquisizione e memorizzazione dati, tubazioni ben isolate ed un misuratore di portata. La resistenza elettrica può essere sostituita da una pompa di calore invertibile: in tal caso la prova può essere condotta sia in regime di riscaldamento che di raffrescamento (figura 4.5 nella pagina seguente).

La misura della temperatura indisturbata del terreno è la prima prova da effettuare, il modo più efficace per ottenerla è accendere la pompa e guardare subito le misurazioni di temperatura in uscita dalla sonda: questa raggiungerà un minimo che sarà da considerare il valore cercato. È importante che la misura sia fatta prima che il fluido passi attraverso la pompa di circolazione, in modo da evitare un riscaldamento e quindi un'alterazione della grandezza che si vuole misurare. L'acqua nella sonda è considerata in equilibrio termico con il terreno.

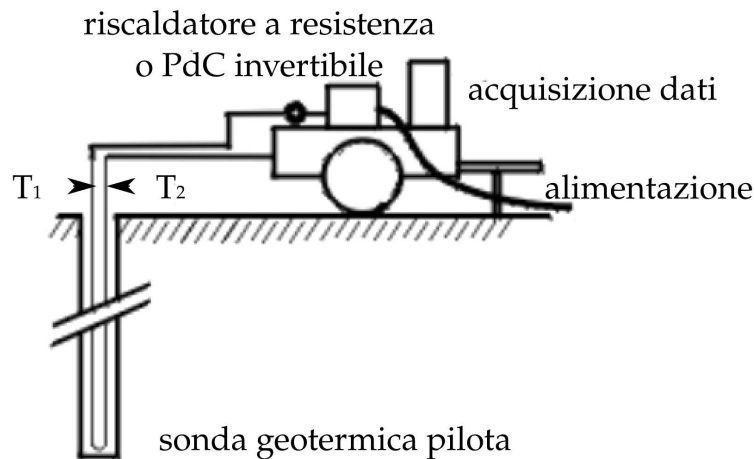


Figura 4.5: Schema di un Ground Response Test su carrello mobile

La ricerca della conducibilità termica equivalente del terreno si ottiene fornendo alla sonda una potenza termica costante. La portata deve essere misurata da un flussostato, la potenza termica consumata dalla resistenza sarà misurata dal wattmetro e le temperature dell'acqua in ingresso ed uscita dalle sonde, rilevate da termocoppie. Tutte queste informazioni saranno memorizzate periodicamente e diagrammate.

Affinché il test possa essere ritenuto valido occorre prestare attenzione ai tempi e alla potenza termica di prova. Una volta installata completamente la sonda, bisogna far trascorrere dalle 24 alle 72 ore prima di iniziare, perché la perforazione altera le proprietà del terreno e alza la temperatura del sottosuolo di qualche grado (per esempio a causa dell'idratazione del cemento), perciò si deve aspettare del tempo affinché si riassettino le condizioni iniziali. Indicativamente, da prove sperimentali, si è visto che dopo due giorni la temperatura si riporta ad un valore prossimo a quello indisturbato, mentre si è notato che per terreni a bassa conducibilità sono necessari anche 5 giorni di attesa.

Nel caso poi si volessero fare più test con la stessa sonda (fallimento del test precedente, cambio potenza termica), bisognerà attendere che gli effetti della prova precedente si riducano al minimo. Per un test di 48 ore il tempo di attesa può essere di $10 \div 12$ giorni.

I tempi di prova, l'attrezzatura usata e la valutazione dei dati misurati, hanno sì una indiscussa utilità, ma comportano dei costi che molte volte non è possibile sostenere. In questi casi si preferisce ricorrere a:

- tabelle generiche (come ad esempio la 1.2 e 2.5), pubblicazioni, valori elaborati dagli enti locali e in qualche caso anche alle basi di dati forniti con il software di progettazione;
- analisi di laboratorio da carote prelevate in sito.

4.3 Soluzioni di Claesson e Eskilson

L'elaborazione dei dati misurati dal GRT o meglio l'analisi della conduzione di calore verso un pozzo nel terreno e altre geometrie di scambio termico con il sottosuolo, sono stati sviluppati a partire da Ingersoll *et al.* [1948]. Ma è grazie allo studio degli svedesi Claesson e Eskilson [1987] che si è arrivati a fornire una trattazione particolarmente coerente dell'argomento, dandone soluzioni numeriche ed analitiche e sarà al loro lavoro che ci si riferirà nel seguito. Attraverso la modellazione numerica, sono riusciti infatti a ricavare delle

curve simili a quelle in figura 4.6 nella pagina successiva, che mostrano come i livelli termici non si possano verificare semplicemente in condizioni stazionarie, ma si debba valutare anche il raggiungimento di un nuovo equilibrio sul lungo periodo, per effetto dei meccanismi di scambio di lungo termine.

4.3.1 Fase iniziale d'estrazione di calore

Per risolvere il problema hanno posto due ipotesi iniziali:

1. gradiente geotermico trascurabile e temperatura del terreno pari a quella media T_{in} , per tutta la profondità del foro;
2. flusso di calore indotto dalla superficie nullo e si è solo considerato il flusso di calore radiale dal terreno al foro (in questo modo la sonda rimuove solo il calore dal serbatoio terreno).

Si può quindi risolvere l'equazione differenziale (4.2.2), in coordinate radiali (r), ignorando il gradiente geotermico e con le seguenti condizioni al contorno:

- $T = T_{in}$ per $t = 0$ ($\forall r, z$)
- $T = T_{in}$ per $r \rightarrow \infty$ ($\forall t$)

La soluzione non è banale, ma il problema è risolubile:

$$T_{in} - T_b = \frac{q}{4 \pi \lambda} E(u) = \frac{q}{4 \pi \lambda} \left[-\lambda - \ln(u) - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{u^n}{n, n!} \right]$$

Dove:

$E(u)$ è un'espressione polinomiale tipo quella di Theis (3.5.1);

$$u \text{ è pari a } \frac{r_b^2 S_{VC}}{4 \lambda t};$$

T_b è la temperatura media del fluido termovettore nel pozzo al tempo t in gradi centigradi, si suppone quindi un contatto ideale con il terreno, trascurando la resistenza termica del riempimento.

$T_{in} - T_b$ è l'abbassamento indotto della temperatura in K;

q è la resa termica per metro di foro in $W m^{-1}$;

λ è la conducibilità termica del terreno in $W m^{-1} K^{-1}$;

r_b è il raggio della sonda in m;

γ è la costante di Eulero pari a 0,5772.

In analogia a quanto proposto da Cooper-Jacob (3.5.2) nel campo dell'idrogeologia, si può semplificare anche questa espressione, sempre per bassi valori di u (e quindi elevati valori di t):

$$T_{in} - T_b \approx \frac{q}{4 \pi \lambda} \left[\ln \left(\frac{4 \lambda t}{r_b^2 S_{VC}} \right) - 0,5772 \right] \quad (4.3.1)$$

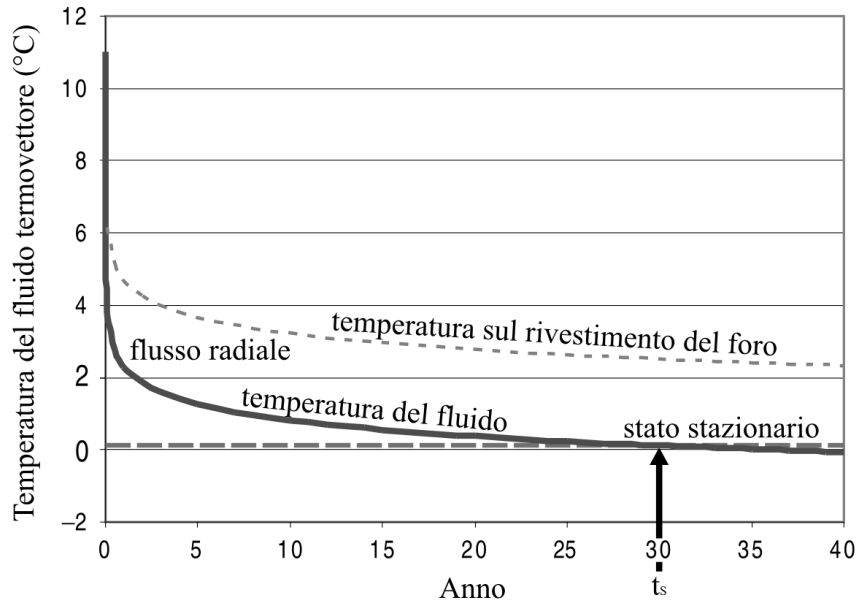
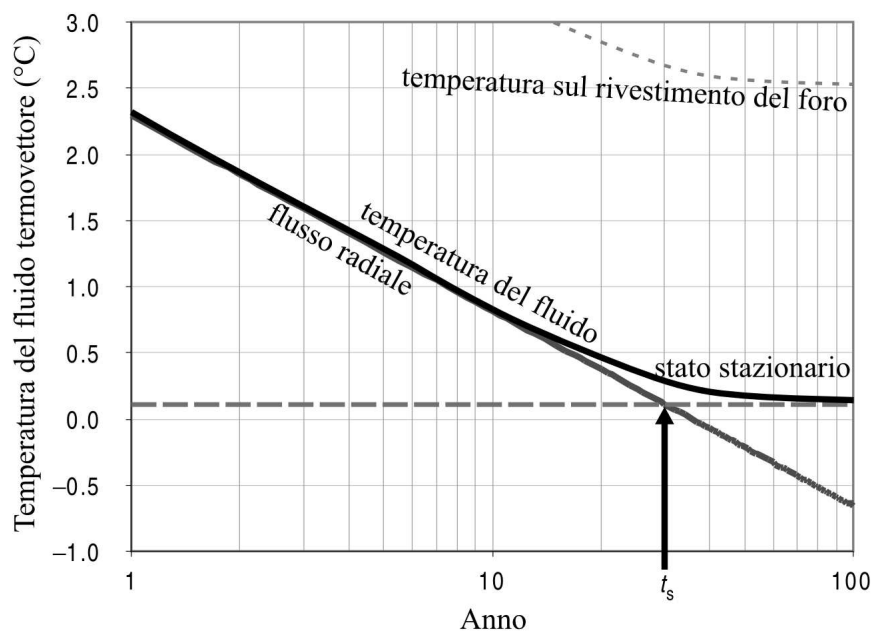
(a) *Evoluzione della temperatura media con il tempo*(b) *Evoluzione della temperatura media con il logaritmo del tempo*

Figura 4.6: I due grafici rappresentano l'andamento della temperatura media del fluido termovettore in una sonda geotermica reale. I dati sono: diametro del foro 126 mm; resa termica 2 kW; R_b resistenza termica del foro $0,12 \text{ K m W}^{-1}$; conduttività termica $2,48 \text{ W m K}^{-1}$, S_{VC} $2,4 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ e temperatura del suolo indisturbato 11 °C per la lunghezza di 100 m. Il diagramma mostra che la temperatura calcolata per la parete del foro è di $2,4 \text{ °C}$ maggiore del fluido termovettore [Banks, 2008]

Quest'ultima equazione implica che, nella fase iniziale di figura 4.6 a fronte, la temperatura del fluido vettore diminuisce con il logaritmo del tempo. L'approssimazione è valida per valori di t compresi nel seguente intervallo:

$$\frac{5 r_b^2 S_{VC}}{\lambda} < t < \frac{t_s}{10}$$

Se il valore di t è più basso, l'approssimazione matematica cade. Se t è troppo alto, la relazione lineare logaritmica tra il tempo e la temperatura T_b comincia a divergere, seppur di poco, dalla curva reale. Ciò significa che il sistema comincia a indurre un flusso di calore dalla superficie del terreno e lentamente si avvicina allo stato stazionario.

4.3.2 Fase avanzata d'estrazione di calore (stato stazionario)

Il tempo t_s segna il passaggio allo "stato stazionario" e offre una descrizione migliore dell'evoluzione della temperatura rispetto al flusso radiale iniziale. Claesson e Eskilson lo calcolano così:

$$t_s = \frac{e^\lambda D^2 S_{VC}}{18 \lambda} \approx \frac{D^2 S_{VC}}{9 \lambda}$$

Dove: γ è la costante di Eulero pari a 0,5772 e D è la profondità di trivellazione in m da cui avviene l'estrazione di calore.

La temperatura dello stato stazionario del fluido vettore, verso cui converge la curva di temperatura reale è data da

$$T_{in} - T_{s,b} = \frac{q}{2 \pi \lambda} \ln \left(\frac{D}{r_b \sqrt{4,5}} \right) \approx \frac{q}{2 \pi \lambda} \left(\frac{D}{2 r_b} \right) \quad \text{se } D \gg r_b \quad (4.3.2)$$

dove $T_{s,b}$ è la temperatura nello stato stazionario del pozzo ideale in K, ovvero trascurando la resistenza termica del materiale di ricoprimento dell'anello.

4.3.3 Calore disperso da una sonda geotermica

Per una sistema di raffrescamento geotermico, il carico termico respinto al suolo (G) è legato all'effetto di raffreddamento (Q_1) e al fattore di rendimento stagionale ($SPFC_C$) della pompa di calore in questo modo:

$$G \approx Q_1 \left(1 + \frac{1}{SPFC_C} \right)$$

Si usano le stesse equazioni viste per l'estrazione di calore, avendo cura di cambiare di segno alla resa termica q e ricordando che T_b sarà maggiore di T_{in} .

4.4 Sonde reali

Le equazioni fin qui descritte danno per scontato che il circuito chiuso sia idealmente in contatto termico con il terreno, senza alcuna ulteriore dissipazione all'interno del foro stesso. In realtà si devono considerare anche:

- la perforazione e la conducibilità del materiale di riempimento del foro (tipicamente malta o miscela bentonitica);
- il cortocircuito termico (perdita di calore tra il tubo di mandata e quello di ritorno all'interno del foro);
- la resistenza termica associata al materiale che costituisce lo scambiatore;
- le caratteristiche di moto e le proprietà del fluido termovettore.

Si passeranno in rassegna allora tutte le componenti che costituiscono la sonda reale ed in conclusione si fornirà il parametro chiave: la *resistenza termica della sonda* R_b , che introdotto nelle soluzioni di Claesson e Eskilson completerà il problema.

4.4.1 Perforazione e completamento del foro

I sistemi di perforazione sono gli stessi visti per i pozzi (trattati nel sottoparagrafo 3.4.1 nella pagina 56), quello che cambia è però il completamento del foro che a seconda della litologia, numero e disposizione delle falde sotterranee e vincoli normativi imposti può essere:

Aperto e riempito d'acqua (4.7a). Lo scambiatore può essere sospeso in un foro di trivellazione (di solito solo in litologie consistenti dove le pareti di trivellazione sono autoportanti). L'acqua anche se possiede una modesta conducibilità termica, fornisce un contatto termico tra l'ammasso roccioso e i tubi, migliorando l'efficienza del trasferimento, per la formazione di celle di convezione lungo il foro e di ghiaccio ad alta conduttività intorno al circuito e per il trasporto di calore attraverso il campo sonde. Questa soluzione è la preferita in Svezia e Norvegia.

Riempito con materiale poroso (4.7b). La trivellazione potrebbe essere riempita con ghiaia o quarzite e la parte superiore sigillata con una malta a base di cemento (per prevenire l'ingresso di qualsiasi inquinamento superficiale). Questo permette anche di estrarre il rivestimento temporaneo, se il foro si trova in strati poco consolidati. Sia la quarzite (possiede alta conduttività termica) sia le acque sotterranee che riempiono gli spazi intergranulari, forniscono un trasferimento di calore efficace tra lo scambiatore ed il terreno circostante. Questa soluzione è ipotizzabile in presenza di falde acquifere pregiate, dove un campo sonde potrebbe ostacolarne il transito.

Riempito con boiaccia o cemento a miscela termicamente avanzata (4.7c). I tubi possono essere messi in opera con la boiaccia. Idealmente la malta deve avere una elevata conducibilità termica (per facilitare il trasferimento di calore) e una bassa conducibilità idraulica (per impedire la migrazione di contaminanti all'interno del foro o mettere in comunicazione tra loro falde eterogenee). La prima proprietà può essere fornita da un alto contenuto di quarzite (tabella 1.2 nella pagina 14), mentre la bassa conducibilità idraulica può essere ottenuta da un impasto a base d'argilla, come la bentonite. In realtà, una malta termica avanzata è costituita da una miscela di sabbia o limi di quarzo e bentonite.

I primi due richiedono che il foro sia in gran parte riempito con le acque sotterranee, al fine di ottenere un buon contatto termico, mentre il terzo è l'unica opzione realistica che fornisce un buon contatto termico per un "foro secco" o situato sopra le falde. L'opzione boiacca può essere spesso preferita e/o imposta dall'autorità ambientale per tre ottimi motivi:

- i. impedisce il movimento incontrollato delle acque sotterranee da un acquifero ad un altro;
- ii. impedisce all'inquinamento superficiale di entrare nell'ambiente geologico;
- iii. offre una protezione supplementare contro la contaminazione del liquido antigelo contenuto nel fluido termovettore, in caso di rottura o guasti dell'impianto.

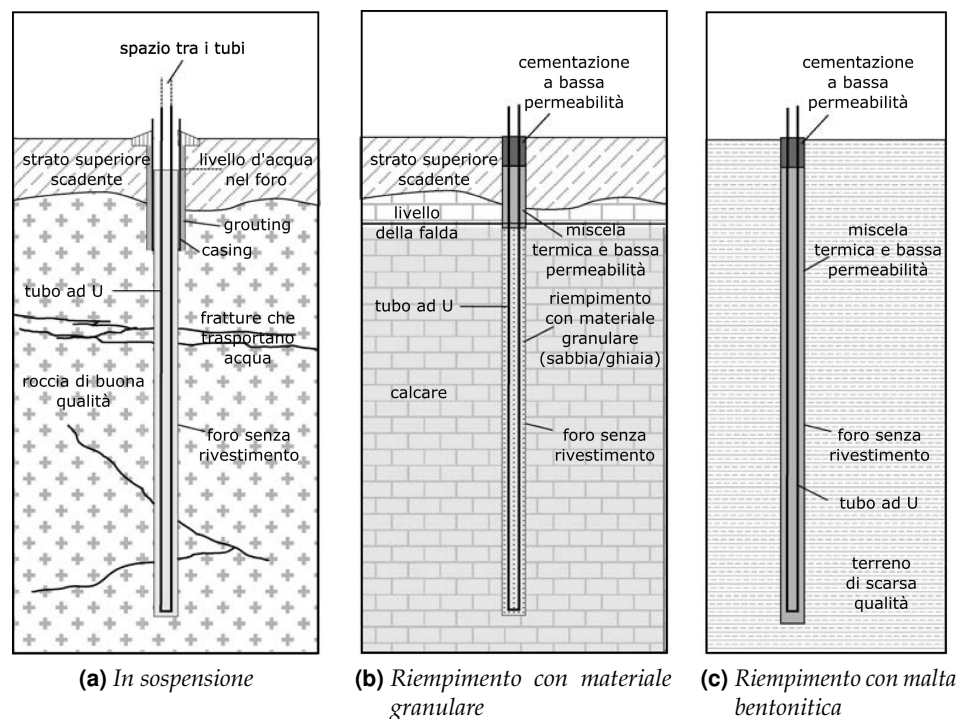


Figura 4.7: Schemi che illustrano le possibili opzioni per l'installazione di uno scambiatore in un foro: (a) in sospensione in un pozzo riempito d'acqua; (b) riempito con materiale poroso; (c) riempito con una malta ad alta efficienza termica. La buona resa termica dei casi (a) e (b) deve essere assicurata da un livello di falda adeguato

4.4.2 Cementazione del foro

La cementazione della sonda è fondamentale non solo per gli aspetti ambientali, ma anche per garantire e assicurare nel tempo le performance di progetto dell'impianto. Secondo Basta e Minchio [2007] un buon materiale di riempimento deve essere:

- environmental friendly ovvero compatibile con l'ambiente circostante, visto che potrà interessare le falde sotterranee;
- non solubile in acqua onde evitare l'alterazione di eventuali falde intercettate;
- dotato di una conduttività termica paragonabile a quella del sottosuolo con cui è a contatto;

- pompabile in sospensione acquosa;
- leggermente espansivo, al fine di sigillare il foro e non permettere che falde più superficiali vengano in contatto con falde profonde;
- debolmente elastico, in modo da non fratturarsi a seguito di lievi sollecitazioni da parte di naturali bradisismi.

Alcuni ricercatori svedesi sostengono che l'uso della bentonite nelle miscele, a causa delle molecole di acqua adsorbite, le rende inadeguate dopo ripetuti cicli di gelo-disgelo. Infatti si potrebbero costituire delle sacche d'aria vere e proprie che comprometterebbero l'integrità dell'impasto e andrebbero a sovraccaricare i tubi. È opinione comune però che un impasto a base di cemento, sabbia e bentonite sia più che valido, possedendo una conducibilità termica ragionevole.

Le malte a base di cemento Portland possono però avere la tendenza a non aderire perfettamente allo scambiatore (a meno che non vengano aggiunti additivi per evitarlo), ciò riduce il contatto termico e fornisce una via preferenziale per far defluire le acque superficiali contaminate. Inoltre il cemento Portland rilascia un calore considerevole di idratazione durante la presa e può danneggiare i materiali plastici che costituiscono nella maggior parte dei casi i tubi. Si prediligono cementazioni con un alto contenuto di quarzite (e quindi una buona conducibilità termica), ma anche un alto contenuto di cemento o di bentonite per garantire una bassa permeabilità e una buona tenuta idraulica.

Le malte termicamente avanzate sono generalmente di due tipi:

1. A base di bentonite, sabbia/limo e acqua. Alcuni autori riportano miscele con conducibilità maggiore di $1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, altri invece con λ maggiori di $2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Le VDI [2000] sconsigliano l'uso di grandi quantitativi di bentonite, perché può danneggiarsi in caso di congelamento e le VDI [2001a] suggeriscono le miscele a base di bentonite, limo o sabbia di quarzo e cemento d'altoforno, perché possiedono buone proprietà meccaniche e una resistenza al gelo fino a -15°C , anche se hanno una conducibilità termica molto modesta (più di $0,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$).
2. A base di cemento. Allan e Philippacopoulos [1999] hanno studiato la composizione e le proprietà di diverse miscele. Quella in uso nel New Jersey per esempio, è costituita da un rapporto 2:1 in massa di sabbia silicea fine e cemento, con piccole quantità di bentonite sodica e un additivo superplastificante di naftalen solfonato. Poi hanno testato la miscela "Mix 111" (2,13 parti di sabbia e 1 di cemento più l'aggiunta di un superplastificante), trovando un campo di conducibilità termica maggiore di $2,19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, e registrando però alcuni problemi di ritiro, senza intaccare troppo la permeabilità idraulica complessiva (circa 10^{-9} m s^{-1}). Hanno anche analizzato la "Mix 114" e "Mix 115", in cui una quantità analoga di cemento è stata sostituita rispettivamente con scorie granulari e ceneri, per ridurre il calore di idratazione.

Qualsiasi tipo di riempimento scelto deve essere posizionato lentamente nel foro, procedendo dal basso verso l'alto, utilizzando un tubo getto Tremie, al fine di evitare sacche d'aria e per garantire un buon contatto termico tra la malta e i tubi. L'impatto della conducibilità termica della malta sul R_b è mostrato in figura 4.8 nella pagina successiva per varie tipologie di riempimento.

4.4.3 Tipologie di scambiatori e posa

Le tipologie sono già state introdotte, così pure le più comuni geometrie (figura 2.15 nella pagina 40), resta da approfondire la differenza tra il singolo e il doppio tubo a U, i materiali e i criteri di posa.

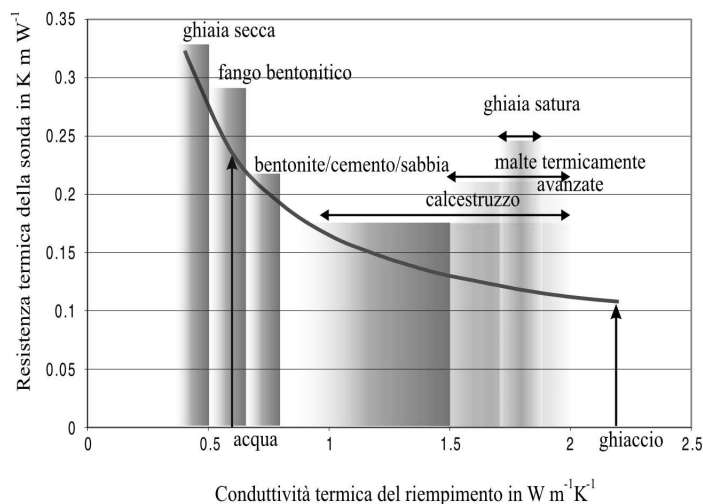


Figura 4.8: Dipendenza della resistenza del foro R_p al variare del materiale di riempimento usato [Banks, 2008]

Sostanzialmente si può utilizzare un tubo ad U singolo o doppio, con uno o due condotti di mandata e uno o due di ritorno collegati o in serie o in parallelo (figura 4.9 nella pagina successiva). La soluzione ad U è la più comune, perché è un buon compromesso tra caratteristiche tecniche, praticità e costi di realizzazione. La doppia U ha una maggiore affidabilità, perché in caso di blocco o occlusione di uno dei due, l'altro resta operativo, permettendo la riparazione del guasto in tutta tranquillità e senza arrecare alcun disagio per l'utenza. Rispetto al singolo U, ha però una maggiore cortocircuitazione termica e presenta maggiori difficoltà di posa. I tubi coassiali non riscuotono lo stesso successo delle prime due tipologie, ma sono in corso ricerche e sperimentazioni su nuovi materiali e geometrie che forse potrebbero aiutare a rivalutarli.

Parlando dei materiali la scelta ricade quasi ed esclusivamente sul polietilene che, pur avendo una modesta conducibilità termica rispetto ai metalli, è esente da corrosione ed è molto più economico e flessibile. In Italia la quasi totalità delle installazioni usa scambiatori in PEAD o HDPE o PN (polietilene ad alta densità) con caratteristiche meccaniche fino a 16 bar.

La resistenza a 16 bar potrebbe sembrare un valore insufficiente, perché in condizioni di riposo a 100 m di profondità di sonda, la pressione è già pari a 100 m di colonna d'acqua (10 bar) e se a questo valore si aggiunge poi la quota data dalla pompa di circolazione si può arrivare tranquillamente a superare i 20 bar di pressione ai piedi della sonda. Il problema però non si pone, perché a compensare gran parte del carico ci pensa la coibentazione bentonitica del foro, non a caso in Svezia alcuni impianti si realizzano in PN8. Inoltre si vedrà nel paragrafo 4.6 nella pagina 96 che i test di pressione fugheranno ogni possibile dubbio al riguardo.

A livello europeo vengono anche installati scambiatori in polietilene reticolato ad alta pressione che, rispetto al PE, presentano migliori caratteristiche meccaniche e termiche, anche se hanno un costo decisamente più elevato che al momento ne penalizza la diffusione in Italia.

Per quanto riguarda la posa (figura 4.10 nella pagina 93), il punto più delicato e critico è alla base dello scambiatore stesso, ovvero dove si inverte il moto rispetto alla verticale. Per risolvere alla radice il problema, le società produttrici forniscono opportune sonde complete di terminale zavorrato, per agevolare il posizionamento in loco, evitare la giunzione per saldatura e mantenere correttamente la spaziatura lungo la sonda.

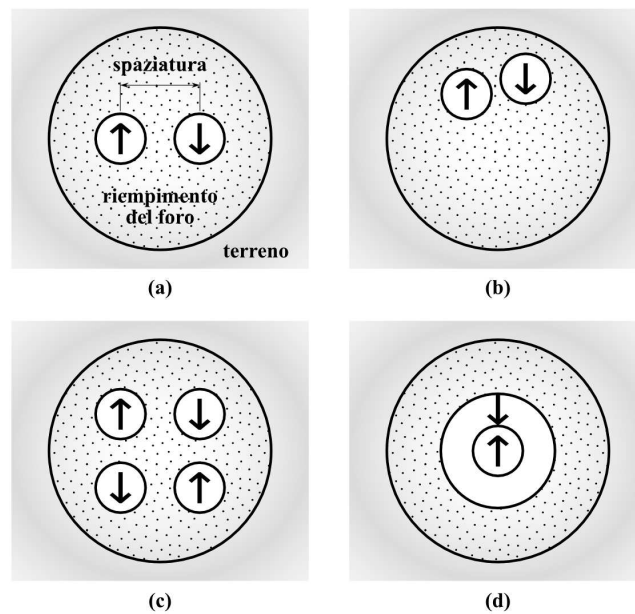


Figura 4.9: Vista in sezione di diversi tipi di scambiatori e loro installazione: (a) posa corretta di un singolo tubo ad U; (b) tubo ad U mal posizionato e con una spaziatura insufficiente; (c) doppio tubo a U; (d) tubi coassiali. Le frecce indicano la direzione del fluido, verso l'alto uscente dalla sonda, verso il basso entrante

4.4.4 Fluido termovettore

Le sonde geotermiche una volta posate, vengono riempite di una soluzione di acqua e anticongelante (se si stima che la temperatura del fluido possa scendere sotto i 0°C). L'anticongelante che va per la maggiore è il glicole propilenico 1,2 propandiolo, perché come evidenziato nella tabella 4.1 a fronte, presenta il minor impatto ambientale.

Comunque tutti i fluidi geotermici sono generalmente soluzioni di acqua più un determinato composto chimico in bassa percentuale (attorno al 20%), che abbassa la temperatura di congelamento a valori minori di -10°C . Nel corso degli anni si sono provate molteplici soluzioni, volte a ricercare il miglior compromesso. Per Begal [1995] un fluido ideale dovrebbe essere:

- non tossico;
- non infiammabile;
- stabile;
- compatibile con i materiali degli altri componenti del sistema;
- a basso impatto ambientale (nel rispetto di determinati limiti, come la domanda biologica di ossigeno BOD per la biodegradabilità);
- non corrosivo;
- economico;
- con ottime caratteristiche di scambio termico;
- con bassa viscosità.

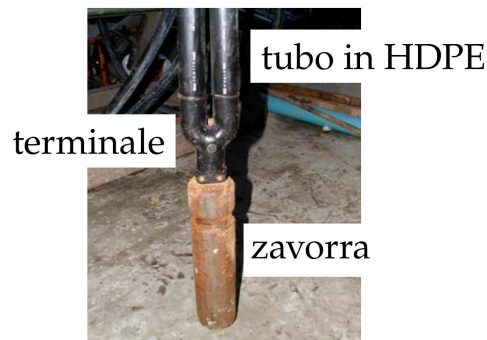


Figura 4.10: Scambiatore semplice ad U [Felderer, 2006] con evidenziati i particolari per la posa

Ovviamente nessun fluido può soddisfare contemporaneamente tutte queste proprietà e un ottimo mezzo per scegliere l'anticongelante può rifarsi allo studio condotto negli Stati Uniti da Heinonen *et al.* [1996] e ripreso da Mehnert [2004], che analizza il comportamento di sei fluidi anticongelanti sulla base di sei aspetti di riferimento. Di questi i primi quattro sono attualmente in uso, mentre l'urea e l'acetato di calcio e magnesio (CMA) lo saranno forse in futuro.

L'analisi è stata condotta utilizzando la metodologia "risk analysis", cioè attribuendo dei coefficienti di valutazione da 1 a 3, dove 1 indica potenziali problemi, 2 è un valore intermedio e 3 è un rischio minimo o assente. Il risultato di questa ricerca è mostrato in tabella 4.1.

Tabella 4.1: Fattori di rischio nella valutazione degli anticongelanti [Heinonen *et al.*, 1996], il glicole etilenico è stato aggiunto da Basta e Minchio [2007]

Coefficienti di valutazione:

- 1 potenziali problemi e possibili precauzioni richieste;
- 2 rischio minore;
- 3 problemi quasi del tutto assenti.

Fattore	Anticongelante						
	metanolo	etanolo	glicole propilenico	acetato di potassio	CMA	UREA	glicole etilenico
Costi operativi	3	3	2	2	2	2	3
Corrosione	2	2	3 ^a	2	2	1	3
Perdite	3	2	2 ^a	1 ^b	1	1	-
Rischi per la salute	1	2	3	3	3	3	2
Infiammabilità	1 ^c	1 ^c	3	3	3	3	3
Rischi ambientali	2	2	3	2	2	3	2
Divieto all'uso	1	2	3	2	2	2	2

a) DOWNFROST HD

b) GS-4

c) per il fluido puro, invece la soluzione al 25% è classificata 3

4.4.5 Resistenza termica del foro

Le sonde reali dunque sono caratterizzate da una molteplicità di materiali e tecniche di perforazione e posa che risulta difficile ipotizzare un loro contatto termico ideale con il terreno circostante. In realtà come per le perdite di carico del pozzo e della falda, viste per gli impianti open loop, anche qui si dovranno assumere delle dissipazioni che provocano

una ulteriore perdita di temperatura tra terreno e fluido termovettore, oltre a quanto previsto dalle equazioni (4.3.1) e (4.3.2). Queste dissipazioni vengono raggruppate in un unico valore che prende il nome di resistenza termica del foro R_b e va ad aggiungersi alle equazioni precedentemente calcolate, che diventano così:

$$T_{in} - T_b = q R_b + \frac{q}{4 \pi \lambda} E(u) \quad (4.4.1)$$

$$T_{in} - T_b \approx q R_b + \frac{q}{4 \pi \lambda} \left[\ln \left(\frac{4 \lambda t}{r_b^2 S_{VC}} \right) - 0,5772 \right] \quad \text{per } \frac{5 r_b^2 S_{VC}}{\lambda} < t < \frac{t_s}{10} \quad (4.4.2)$$

$$T_{in} - T_b = q R_b + \frac{q}{2 \pi \lambda} \ln \left(\frac{D}{r_b \sqrt{4,5}} \right) \approx q R_b + \frac{q}{2 \pi \lambda} \ln \left(\frac{D}{2 r_b} \right) \quad \text{se } D \gg r_b \quad (4.4.3)$$

R_b è una quantità empirica che dovrebbe essere misurata in tutti i fori, mediante una prova di conducibilità termica. Tuttavia diversi autori hanno suggerito alcune formule per stimarla. Per esempio, il software gpm di Shonder e Beck ne fornisce una molto semplice:

$$R_b = \frac{\ln(r_b/r_U)}{2 \pi \lambda_g}$$

dove r_U e r_b sono rispettivamente i raggi del tubo ad U e del foro, λ_g è la conducibilità termica della malta (o del materiale di riempimento).

Riduzione della resistenza termica

È molto importante ridurre al minimo la resistenza termica del foro. Lo si può capire per esempio considerando una sonda di lunghezza 100 m e resa termica 45 W m^{-1} (vale a dire 4,5 kW). Se si assegna una resistenza termica di $0,14 \text{ m K}^{-1} \text{ W}^{-1}$, allora ci sarà un conseguente calo di temperatura di $45 \cdot 0,14 = 6,3^\circ\text{C}$ tra il rivestimento del foro e il fluido. Se R_b la si pone pari a $0,1 \text{ m K}^{-1} \text{ W}^{-1}$, il calo si attesterà a $4,5^\circ\text{C}$, permettendo così alla PdC di lavorare con un fluido termovettore di quasi 2°C più caldo rispetto al primo caso.

Si possono seguire due diverse strade per ottimizzare R_b :

- 1) fornendo al fluido termovettore una velocità adeguata per produrre condizioni di moto turbolento;
- 2) assicurando una costante ed opportuna spaziatura tra il tubo di mandata e quello di ritorno all'interno del foro, per ridurre al minimo il cortocircuito termico (allo scopo si utilizzano opportuni distanziatori).

4.5 Collegamenti ai collettori

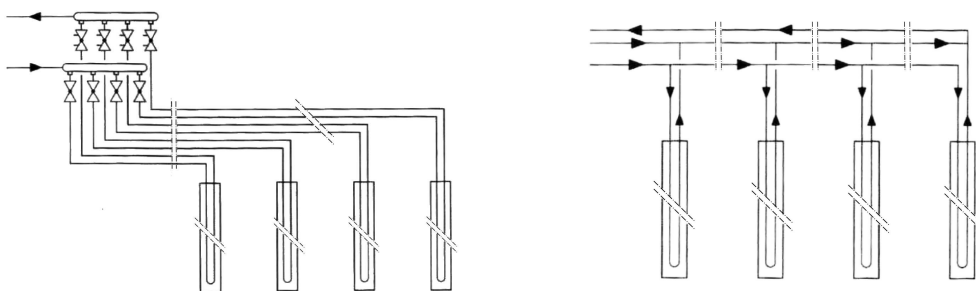
Le sonde geotermiche rappresentano sì la parte più importante dell'impianto, ma non l'unica. Si dovranno valutare anche i collegamenti al circuito della pompa di calore e l'inserimento di pompe di circolazione per garantire ai fluidi velocità che aumentino lo scambio termico nel terreno da una parte e limitino le dissipazioni dall'altra. In particolare se si ha a che fare con un campo sonde, questi vengono di solito raccordati in parallelo, attraverso una serie di collettori di andata e ritorno (figura 4.11a a fronte), può anche adottarsi il sistema di ritorno inverso (figura 4.11b nella pagina successiva). Nel progettare la rete di collettori e le loro connessioni si dovrà:

- Realizzare un moto turbolento nel circuito lato terreno (al fine di ottimizzare il trasferimento di calore), dovendo superare le resistenze al moto idraulico, gravate anche dalla bassa temperatura del fluido che ne aumenta la viscosità, mentre nei tubi lato impianto è preferibile avere un moto laminare (per ridurre al minimo le perdite di calore e la resistenza idraulica). Così i collettori di solito hanno un diametro notevolmente più grande di quelli ad U e vengono isolati.
- Dotare ogni sonda di valvole di regolazione per poter escludere dall'impianto quella difettosa (ad esempio soggetta ad una perdita).
- Equilibrare le portate per ogni sonda (assumendo che tutte abbiano la stessa lunghezza). Questo può essere effettuato regolando le saracinesche al collettore (anche automaticamente in risposta alla temperatura del circuito), o equilibrando le diverse lunghezze (e quindi resistenze idrauliche simili).

Per quanto concerne la velocità del fluido termovettore, oltre a garantire il moto turbolento, bisognerà verificare che sia in grado di trasportare la quantità di calore richiesta dalla PdC. Se si assume che un tipico impianto geotermico realizza un abbassamento della temperatura di circa $\Delta T = 4 \div 5^\circ\text{C}$ nel fluido vettore, la portata necessaria del liquido può essere stimata così:

$$\begin{aligned} \frac{[1 - (1/COP_H)] \cdot 1000 \text{ W}}{S_{VC \text{ fluido}} \Delta T} &= \frac{0,75 \cdot 1000 \text{ W}}{4000 \text{ J K}^{-1} \cdot 4 \text{ K}} \\ &= 0,047 \text{ l s}^{-1} \\ &\approx 3 \text{ l min}^{-1} \text{ per ogni kW di domanda termica di picco} \end{aligned}$$

Per esempio, in un ambito domestico con un carico di 6 kW si può stimare una portata del fluido vettore di 18 l min^{-1} . Si deve sempre controllare che ci sia una portata sufficiente a provocare un flusso turbolento all'interno del tubo ad U, questo dipenderà dal numero di Reynolds, che a sua volta dipende dal diametro del tubo, dalla densità e dalla viscosità del fluido vettore. La velocità del fluido vettore può essere ottenuta dotando l'impianto di una piccola pompa elettrica che può essere incorporata nella pompa di calore stessa (per sistemi di piccole dimensioni), o essere indipendente.



(a) Schema a collettori distributori con valvole di regolazione

(b) Schema del ritorno inverso

Figura 4.11: Le due tipologie di schemi idraulici per collegare il campo sonde. Nel caso (a) i due collettori (uno di mandata e uno di ritorno) collegano rispettivamente tutte le mandate e tutti i ritorni delle sonde e vengono tutte munite di valvole di regolazione. Si ricorre al caso (b) quando il campo sonde ha una disposizione complessa o è costituito da molte sonde, perché tende a equilibrare le perdite di carico in ciascuna sonda (a parità di sviluppo lineare) [Basta e Minchio, 2007]

4.6 Collaudo dell'impianto

Si sono descritte le parti che compongono l'impianto e le possibili scelte progettuali, aspetti che nel mercato attuale vengono eseguiti da diverse aziende, perché la progettazione, la perforazione, l'installazione delle PdC richiedono una competenza molto specialistica, raramente conciliata in un'unica entità. Le diverse installazioni poi avvengono in fasi temporali distinte e si rende quindi necessario produrre della documentazione che attesti la correttezza di quanto realizzato, evitando così le contestazioni successive al completamento dei lavori tra le varie parti, in particolare per quel che riguarda la progettazione e le sonde geotermiche. I collaudi poi possono essere richiesti dagli enti autorizzativi.

Secondo [Noce, 2009] in assenza di Normativa tecnica, le prove di collaudo devono essere:

- incontrovertibili, semplici, svolte con strumentazione di facile comprensione anche per chi non è del settore;
- commisurate alla complessità dell'impianto;
- ad ampio spettro, per coprire tutti gli aspetti tecnici del lavoro;
- su un campione rappresentativo dell'opera, eventualmente tutta;
- devono essere soprattutto concordate e realizzate in contraddittorio tra i diversi attori.

La procedura di collaudo è costituita da tre fasi: definizione del protocollo (prove, tempistica, esecuzione, strumentazione e risultati attesi), test e misure in presenza delle parti interessate e stesura del verbale con la loro firma.

Per impianti di ridotte dimensioni (< 30 kW), il collaudo normalmente si limita all'ispezione visiva della sonda geotermica prima e dopo la posa, alla verifica della lunghezza complessivamente perforata e alle prove di tenuta. Si consiglia vivamente di completarlo con la prova di flusso, in quanto costa poco e toglie alcuni ulteriori dubbi sulle eventuali ostruzioni presenti nella sonda. Per impianti sopra i $30 \div 50$ kW si ritiene necessario anche eseguire il test di resa termica (GRT), generalmente eseguito prima del completamento del campo sonde con la finalità principale di confermare le ipotesi progettuali: lo stesso test può anche essere utilizzato per verificare la qualità dell'istallazione. Sarebbe anche consigliabile la verifica delle caratteristiche fisiche della cementazione del foro (permeabilità, fluidità, conducibilità termica) tramite analisi in laboratorio di campioni prelevati durante la fase di grouting. Tutte le prove destinate ai collaudi possono essere significative in diverse fasi del cantiere. Il GRT in particolare può costituire uno strumento per la progettazione, le prove di flusso e di pressione spesso vengono utilizzate in corso d'opera come verifica interna dell'Impresa.

Le prove di pressione, verbalizzate in contraddittorio con la direzione lavori, servono per verificare la tenuta idraulica delle tubazioni, caricando il circuito a una pressione di test superiore alla pressione di esercizio (tipicamente di $2 \div 3$ bar) e controllando tramite manometro, che questa rimanga costante nel tempo. Sulla scelta della pressione, dei tempi di prova e di quando eseguirle, esistono molteplici teorie, si citerà quanto proposto dalle norme [VDI, 2001a] che ne raccomandano tre, da effettuarsi:

- all'inserimento dello scambiatore nel foro prima del grouting e riempito d'acqua (la testa della sonda sarà verificata prima dell'inserimento ad una pressione pari a 1,5 volte quella nominale del tubo usato);
- a cementazione avvenuta sempre con lo scambiatore riempito d'acqua (test di pressione al massimo a 6 bar, con un precarico di 30 minuti, una durata del test di al massimo 60 minuti, con perdita di pressione ammissibile di 0,2 bar);

- all'atto del collegamento dell'impianto, con una pressione pari a 1,5 volte quella di esercizio.

Va ricordato che il collaudo dell'impianto non va solo a vantaggio e tutela delle Aziende che hanno contribuito a realizzarlo, ma lo si può pure inquadrare come una certificazione di qualità che ne aumenta la percezione di affidabilità al cliente e all'ente amministrativo chiamato a regolamentarlo.

4.7 Criteri di dimensionamento dell'impianto

Si descriveranno le soluzioni tipiche per la progettazione delle sonde geotermiche, suddividendole per piccole e grandi installazioni. È una fase fondamentale per assicurare una buona resa dell'impianto nel tempo, anche perché una sua errata valutazione può avere risultati catastrofici sui risparmi in termini di gestione (sovradimensionamento) e sui costi per rimediare al progressivo depauperamento termico del sottosuolo (sottodimensionamento).

Gli aspetti fondamentali per gli impianti a terreno e per assicurare un corretto dimensionamento sono due:

- ▶ conoscenza delle proprietà del terreno;
- ▶ valutazione dello scambio termico sul breve, medio e lungo periodo.

Un quadro esaustivo di tutti i parametri utili per iniziale il calcolo lo offrono Basta e Minchio [2007], suddividendoli in due gruppi, uno relativo al sottosuolo e uno all'impianto (riportati in tabella 4.2 nella pagina seguente).

Si possono seguire due approcci distinti, in relazione alla potenza necessaria al riscaldamento e al raffrescamento degli edifici. Nel caso specifico si prenderanno in esame le normative tedesche VDI [2001a] che fissano un valore di potenza termica limite di 30 kWt e prevedono:

- per i piccoli impianti ($P_t < 30 \text{ kW}_t$), metodi semplificati/tabellari;
- per installazioni di rilievo ($P_t > 30 \text{ kW}_t$), GRT e metodi di simulazione software.

4.7.1 Vincoli progettuali

Indipendentemente dall'approccio scelto, il parametro chiave che deve guidare lo studio dell'impianto riguarderà la temperatura minima del terreno e/o del fluido termovettore durante l'estrazione di calore, per tre diverse ragioni:

Economiche il COP_H della PdC può raggiungere un'efficienza così bassa, da rendere più conveniente l'uso dell'aria esterna come sorgente.

Geotecniche anche se il congelamento del terreno può essere vantaggioso per l'impianto (il ghiaccio ha un'elevata conducibilità termica), lo stesso non si può dire per le fondazioni degli edifici, soprattutto se sono situati al di sopra o in prossimità delle sonde. Inoltre, le proprietà meccaniche di alcune argille saranno compromesse dai cicli di gelo e disgelo.

Pratiche le temperature non dovrebbero cadere così in basso da congelare il fluido termovettore (una soluzione al 25 % di glicole etilenico, ha un punto di congelamento di -14°C).

A seguire vengono riassunte le soluzioni praticate in alcuni Paesi (da non considerare come "criteri assoluti"). La temperatura vincolante sarà definita dai vincoli geotecnici e in seconda battuta dalle considerazioni di efficienza e operatività:

Tabella 4.2: Parametri utili per il dimensionamento delle sonde geotermiche [Basta e Minchio, 2007]

Sottosuolo	Impianto
1) matrice	1) temperature di lavoro dell'evaporatore e del condensatore della PdC
2) umidità relativa	2) fabbisogno termico dell'edificio
3) porosità	3) eventuale fabbisogno frigorifero estivo
4) densità	4) potenze di picco in condizioni di progetto
5) gradiente termico	5) curve di carico termico e frigorifero
6) conduttività termica	6) ore di funzionamento degli impianti
7) capacità termica	7) fabbisogno termico relativo alla produzione di acqua calda sanitaria
8) eventuale presenza di falde	8) eventuale presenza di integrazioni all'impianto geotermico (pannelli solari, termocamini, etc.)
9) velocità, altezza, periodicità stagionale della falda	
10) tipologia di materiale di cementazione del foro	
11) fluido termovettore	
12) temperatura del terreno indisturbato (assimilabile alla media annuale delle temperature dell'aria esterna)	

1. La temperatura media del fluido termovettore sotto le condizioni di carico medio, non dovrebbe raggiungere valori sensibilmente inferiori a 0°C, per tutta la vita utile del sistema. La temperatura operativa del fluido termovettore è tipicamente compresa nella gamma che va da -4 a 0°C.
2. Se il primo vincolo è troppo oneroso, allora la temperatura del fluido non dovrebbe scendere al di sotto della temperatura corrispondente al prodotto $-q R_b$ in °C per tutta la vita utile, dove q è la resa termica specifica. Ciò significa che, per un tipico assorbimento termico di base di 20 W m^{-1} e un foro di resistenza termica di $0,1 \text{ m K W}^{-1}$, si calcola che il calo medio della temperatura tra la parete e il fluido vettore della trivellazione sarà di 2°C. Così, si può operare con una temperatura media di carico del fluido termovettore più bassa di -2°C senza il rischio di congelare il terreno circostante (anche se la temperatura del riempimento può scendere al sotto di 0°C).
3. La temperatura minima del fluido vettore non deve avvicinarsi in alcun caso al punto di congelamento durante le condizioni di picco. Si ricorda che la temperatura di mandata del fluido dalla pompa di calore può essere di $3 \div 5^\circ\text{C}$ più fredda della temperatura di ritorno e quindi di circa 2°C inferiore alla temperatura media del fluido termovettore. Non è esclusa la possibilità che la formazione di cristalli di ghiaccio possano iniziare a verificarsi sull'evaporatore ben prima che la temperatura del fluido giunga al suo punto di congelamento.

Le VDI [2001a] avvalorano queste assunzioni, suggerendo che la temperatura di ritorno del fluido vettore non deve essere inferiore a 11°C, rispetto alla temperatura del suolo indisturbato in condizioni di carico di base (media settimanale) e a 17°C in condizioni di carico di punta.

Nella progettazione di un sistema a circuito chiuso, bisognerà dunque garantire che, nel tempo e nelle prevalenti condizioni di funzionamento, la temperatura del circuito lato terreno rimanga a livelli accettabili.

4.7.2 Piccoli impianti

Nel caso di impianti con una capacità termica fino a 30 kW, in modalità solo riscaldamento (compresa l'acqua calda, se necessario), si può ricorrere ai valori di resa termica specificati in W m^{-1} nella tabella 2.5 nella pagina 42.

Per il calcolo della lunghezza della sonda, le VDI [2001a] propongono un semplice nomogramma. Si calcola la resa termica annuale che determina l'effetto a lungo termine, questa può essere data in kWh (m a)^{-1} per ciascuna sonda geotermica (ne sono previste al massimo due) e dovrebbe essere compresa tra $100 \div 150 \text{ kWh (m a)}^{-1}$. Ciò vale per l'operazione di puro riscaldamento e può essere adattato al caso di iniezione di calore durante l'estate (quindi raffreddamento e ricarica).

Il nomogramma è stato sviluppato per le condizioni climatiche svizzere dall'ente per le energie rinnovabili. Non è stato convalidato da misurazioni sul campo, ma fornisce buoni punti di riferimento per l'Europa Centrale. In Germania per esempio, nei sistemi a nord del Paese, i valori ottenuti per la lunghezza di trivellazione della sonda vengono opportunamente aumentati. Va osservato che il valore di input nel nomogramma non è identico al *SPF* o *COP*, ma rappresenta invece il fattore di rendimento annuo al netto di energia necessaria per le operazioni ausiliarie. Può essere calcolato con la formula seguente:

$$a = \frac{Q_H}{(Q_H/\beta_a) - P_p}$$

Dove:

a valore in ingresso del nomogramma riportato in figura 4.12 nella pagina seguente;

Q_H richiesta energetica annuale in kWh a^{-1} ;

β_a fattore di prestazione annuale;

P_p fabbisogno energetico annuale delle componenti ausiliarie (pompe di circolazione, sistema di distribuzione) in kWh a^{-1} ;

Il nomogramma si applica se sono rispettati i seguenti limiti:

- fabbisogno di energia termica $4 \div 16 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$;
- capacità di riscaldamento $3 \div 8 \text{ kW}$;
- altitudine s.m.m. $200 \div 1\,400 \text{ m}$;
- conducibilità termica del suolo $1,2 \div 4,0 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$;
- lunghezza per un'unica sonda $60 \div 160 \text{ m}$;
- lunghezza per due sonde $60 \div 100 \text{ m}$;
- a valore di input del nomogramma $3,8 \div 4,6 \text{ m}$.

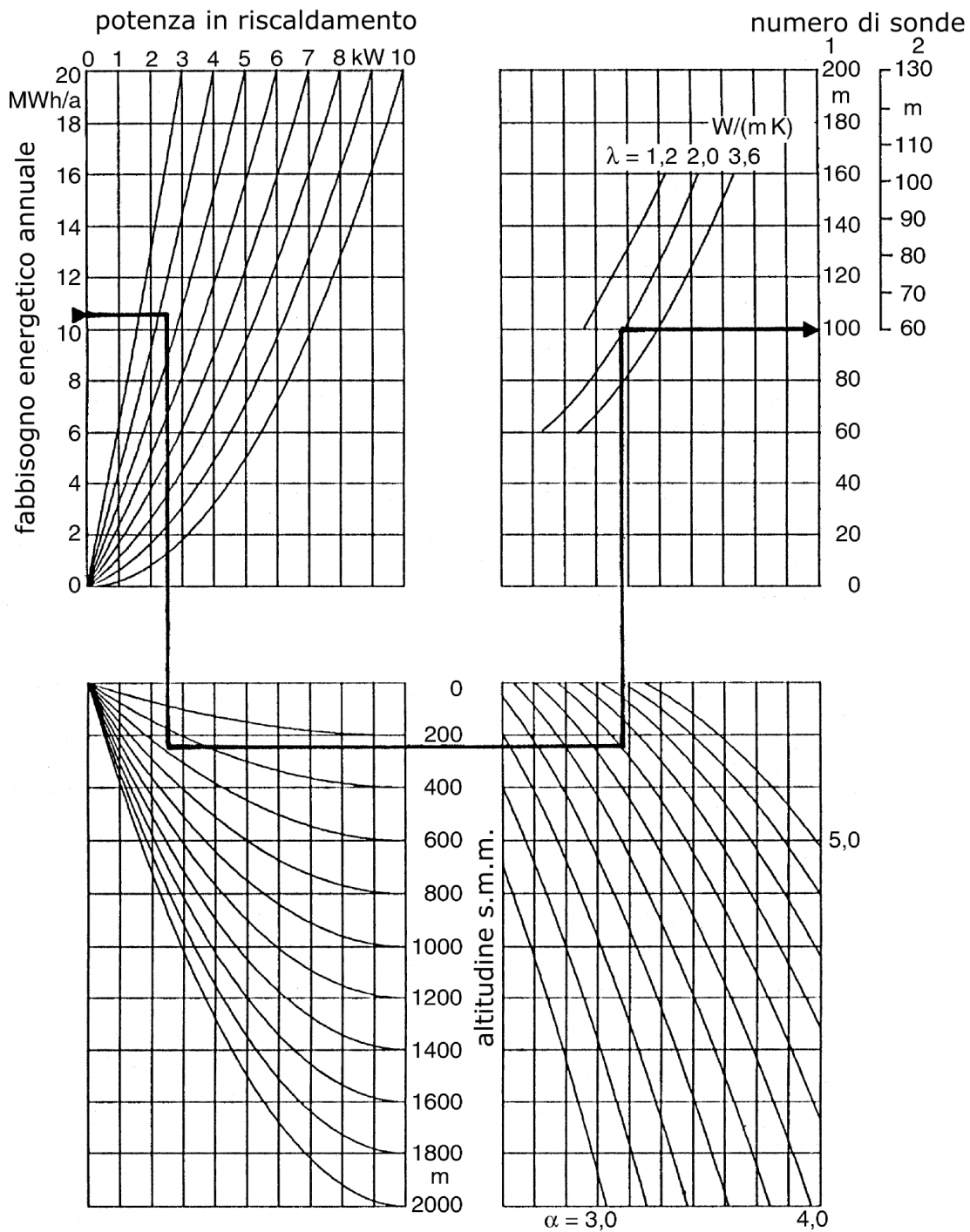


Figura 4.12: Nomogramma proposto dalle norme VDI [2001a] per il dimensionamento di piccoli impianti

4.7.3 Grandi impianti

Per i grandi impianti, le VDI [2001a] prevedono un test di resa termica e metodi di calcoli analitici ibridi o numerici raggruppando in questa categoria non solo gli edifici con potenza termica maggiore di 30 kW_t, ma anche:

- piccole ma numerose installazioni geotermiche concentrate in un'area limitata;
- edifici con oltre 2 400 ore di funzionamento annuale previsto;
- impianti con fonti di calore o dissipazione supplementari (ad esempio il raffrescamento);

Calcoli

I metodi analitici, come si è visto trattando le soluzioni di Claesson e Eskilson, considerano solo la conduzione di calore, tralasciando l'apporto termico delle acque sotterranee (per le VDI [2001a] si possono trascurare in installazioni di potenza termica minore di 100 kW). Volendo la loro influenza può essere stimata utilizzando l'incremento di temperatura del secondo anno di funzionamento dell'impianto.

Le VDI come metodo analitico per il calcolo delle temperature intorno a una sonda geotermica si basano sull'equazione di Guernsey che deriva da Ingersoll *et al.* [1948] (sviluppo della teoria della sorgente lineare di Kelvin). Le temperature sono calcolate in dipendenza della conducibilità termica, della capacità di estrazione/iniezione e della distanza dal tubo e sono valide solo se $\alpha t/r^2 > 1$. Convertita in unità SI, questa equazione diventa:

$$T_{in} - T_b = \frac{0,1833 Q}{\lambda} \left(\log \frac{\alpha t}{r^2} + 0,106 \frac{r^2}{\alpha t} + 0,351 \right)$$

Dove:

$T_{in} - T_b$ è la variazione di temperatura in K;

Q è il flusso di calore per metro lineare di foro in W m⁻¹;

λ è la conducibilità termica in W (m K)⁻¹;

r è la distanza dal centro del tubo in m;

t è il tempo in s;

α è la diffusività termica in m² s⁻¹.

La diffusività termica può essere calcolata come:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

dove: ρ è la densità del terreno in kg m⁻³ e c_p è il calore specifico a pressione costante in kJ kg⁻¹ K⁻¹.

Software specifico e simulazione numerica

I metodi fin qui introdotti non offrono alcuna garanzia per i sistemi complessi o di grandi dimensioni. Si è anche ampiamente discusso che il trasferimento di calore dal terreno è un fenomeno transitorio che deve essere studiato con un arco temporale anche di 30 anni, per assicurare che le temperature minime e massime di ingresso e uscita dalla pompa di calore e dall'impianto rimangano coerenti con i valori di progetto. In questi casi allora si ricorre a programmi informatici specifici, in grado di simulare come le temperature del circuito lato terra si evolvono in scenari complessi. I più usati sono:

- EED [2009] (Earth Energy Designer), un programma svedese sviluppato tra l'altro anche con la collaborazione di Claesson e Eskilson;
- GLHEPro (Ground Loop Heat Exchanger Professional) dalla Oklahoma State University, è analogo a EED ma con più possibilità di input;
- TRNSYS (TRaNsient SYstems Simulation program) dalla Università del Wisconsin è un programma di simulazione di sistemi transitori con una struttura modulare e tra le sue numerose librerie ne presenta alcune inerenti agli impianti geotermici a pompa di calore.

I primi due utilizzano un modello a simulazione numerica (SBM), basato su dati analitici del flusso di calore derivanti da diverse combinazioni di struttura e geometria delle sonde (funzioni di scambio "g"). Si possono così simulare oltre 300 disposizioni di sonde, che spaziano per numero, interasse e layout del campo. Il carico di base è in genere indicato come il carico di riscaldamento e di raffreddamento per ogni mese di un anno tipico e viene simulato come la combinazione di passi sequenziali mensili. Nel paragrafo successivo, si approfondirà con un esempio il funzionamento e i risultati prodotti dal programma EED, per mostrare la variazione delle temperature in funzione dell'interasse e del layout scelto per un ipotetico campo sonde.

Un calcolo esatto per i grandi impianti può essere effettuato solo mediante simulazioni numeriche. Ciò è particolarmente necessario per i sistemi complessi in cui i fori si possono influenzare a vicenda o nei casi in cui il flusso delle acque sotterranee deve essere soppesato. Tali metodi sono adatti anche per calcolare il comportamento a lungo termine e per valutare l'impatto ambientale in generale dei sistemi geotermici. Due metodi sono adatti per la simulazione del trasporto di calore e del flusso delle acque sotterranee nel sottosuolo:

- alle differenze finite (formule matematiche più semplici);
- agli elementi finiti (maggiore flessibilità spaziale).

4.8 Campo sonde

Si è visto come una sonda verticale generi, in analogia alla curva di depressione dei pozzi, un bacino termico a forma cilindrica nel terreno, dove le temperature subiscono una brusca variazione man man che ci si avvicina alla fonte o al dissipatore di calore.

In un campo sonde al crescere del numero di scambiatori verticali, alla loro disposizione e al loro interasse si assisterà a una diversa risposta termica, in risposta all'effetto di interferenza che si instaura fra di loro (a parità di conduttività termica del sottosuolo, della profondità delle sonde e del grado di saturazione del terreno). A queste semplici considerazioni si dovrebbero aggiungere: l'effetto delle acque sotterranee che tendono a disperdere il calore accumulato; la deviazione dalla verticale dei pozzi nella fase di installazione e gli obiettivi

perseguiti (riscaldamento, raffrescamento, entrambi o accumulo termico per la stagione successiva).

Se a tutte queste incognite si aggiungono i molteplici fabbisogni termici dell'edificio e le problematiche imposte dalle installazioni dell'impianto (PdC, pompa di circolazione, acqua calda sanitaria, etc.) allora la progettazione di un campo sonde diventa un processo interattivo difficilmente risolvibile con le equazioni proposte in questo capitolo.

Per agevolare la comprensione di quanto esposto e mostrare il funzionamento dei software geotermici, si mostrerà un esempio in regime di riscaldamento svolto con il software EED [2009] da Banks [2008]. Un tipico file di input di carico per EED può essere simile a quello proposto in tabella 4.3. Il sistema ha una potenza di picco di 95 kW e per i mesi più freddi vengono forniti 20 MWh_t al mese (corrispondenti a una media di soli 28 kW_t, che implica, ad esempio, fino a 8 ore di funzionamento al giorno). Se il fattore stagionale di prestazioni del sistema (SPF_H) è di 3,5, il 71 % di calore viene fornito dalla terra (vale a dire 68 kW_t di carico di picco e 14,3 MWh_t di quello mensile per il mese più freddo), e il restante 29 % dalla rete elettrica.

Tabella 4.3: Esempio di un profilo di carico per l'ipotetico edificio trattato nel paragrafo 4.8

Mese	carico mensile MWh _t	carico di picco kW _t	durata ore
Gennaio	20,0	95	8
Febbraio	20,0	95	5
Marzo	15,0	65	4
Aprile	14,0	65	3
Maggio	5,0	20	3
Giugno	0,5	0	0
Luglio	0,4	0	0
Agosto	0,2	0	0
Settembre	3,0	15	3
Ottobre	16,0	65	3
Novembre	18,0	70	5
Dicembre	20,0	95	8

Usando il carico di picco e ipotizzando un suolo normale saturo di resa termica 60 W m⁻¹, si fa una prima valutazione:

$$\frac{95\,000}{60} \approx 1\,500 \text{ m di sonde geotermiche verticali}$$

Quindi si rendono necessari come minimo 15 sonde geotermiche di 100 m ciascuna.

Ulteriori dati assegnati al programma sono:

- il terreno ha una conducibilità termica di 2,9 W (m K)⁻¹ e calore specifico volumetrico di 2,0 MJ m⁻³ K⁻¹;
- le sonde hanno un diametro di 133 mm e l'impianto di perforazione può raggiungere una profondità massima di 100 m;
- il tubo a U in HDPE ha un diametro di 32 mm, spessore di 3 mm e spaziatura di 58 mm;
- il preforo è riempito con una malta termica di conducibilità 1,8 W m⁻¹ K⁻¹;
- il fluido vettore è formato per il 25 % di glicole etilenico, con una portata di 0,000 34 m³ s⁻¹ per sonda geotermica;
- la temperatura media dell'aria esterna è di 9°C, con un flusso di calore geotermico di 65 mW m⁻² (questo permette di calcolare la temperatura media iniziale del terreno).

Il programma calcola la resistenza termica della sonda in $0,119 \text{ m K W}^{-1}$ e la temperatura iniziale del terreno $T_{in} = 10,12^\circ\text{C}$ (per i primi 100 m di profondità). Se si assume che i 15 pozzi sono disposti in una griglia di 3×5 , con un interasse di 10 m, il risultato finale prodotto dal software è l'andamento delle temperature del fluido termovettore per un tempo di 25 anni mostrato in figura 4.13. Si possono vedere due curve sinusoidali: quella superiore più spessa, mostra l'evoluzione della temperatura del fluido sotto il carico mensile base, quella inferiore, più sottile, rappresenta la temperatura minima di ogni mese, in condizioni di picco.

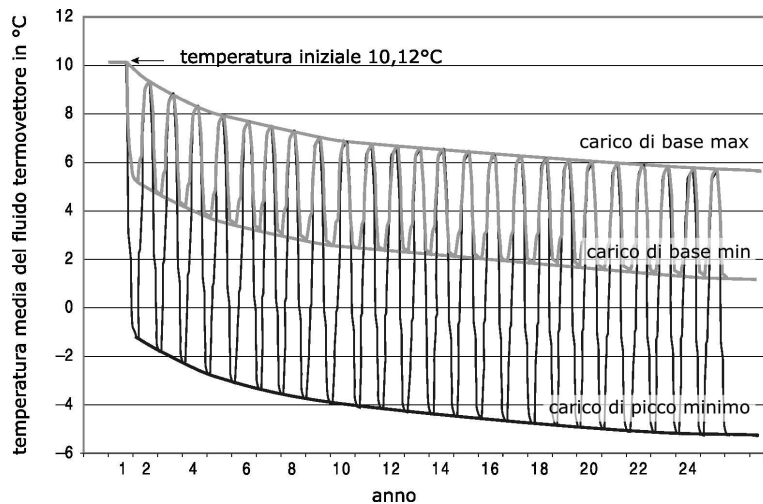


Figura 4.13: Evoluzione temporale delle temperature del fluido termovettore per una campo di 15 sonde geotermiche con un fabbisogno termico di picco di 95 kW

Gli involucri del carico di base minimo e massimo rappresentano la curva di carico di base, mentre quella di picco minimo, esprime il limite inferiore delle temperature, sotto il carico di picco nei mesi più freddi. Naturalmente la temperatura reale del fluido avrà delle fluttuazioni diurne che rappresentano l'accensione e lo spegnimento quotidiano della pompa di calore.

I valori sono però una media tra la temperatura di andata e ritorno del fluido: la temperatura di andata può essere anche di $2 \div 2,5^\circ\text{C}$ più fredda. Tuttavia, sembra che il sistema dell'esempio abbia un comportamento accettabile: la temperatura di picco è ben al di sopra del punto di congelamento dell'anticongelante. La temperatura del carico di base non scende sotto i 0°C .

Si potrebbero anche risparmiare i costi delle perforazioni, diminuendone il numero o riducendone la profondità. A questo scopo EED ha un'opzione di modellizzazione inversa, che permette di determinare il numero e i metri di perforazione a partire dalla temperatura minima del fluido termovettore.

4.8.1 Interasse e disposizione delle sonde

Nel precedente esempio si è immaginato di disporre i 15 pozzi in una griglia 3×5 , con un interasse di 10 m. Si può anche impostare un diverso interasse, per esempio di 15, 7 o 5 m. I risultati elaborati da EED sono riassunti in figura 4.14 nella pagina successiva. Dal grafico delle temperature si nota come portando l'interasse a 7 m, si evidenzia un calo generale delle temperature del fluido di circa $1,5^\circ\text{C}$, in modo del tutto analogo anche a 5 m si ha una diminuzione simile. Al contrario, aumentando la distanza a 15 m si registra un aumento delle temperature del fluido di $1,5^\circ\text{C}$.

Così, scegliendo una spaziatura di 10 o 5 metri si manifesta un impatto significativo sull'efficienza del sistema, per un totale di 3°C nella temperatura del fluido termovettore. Se

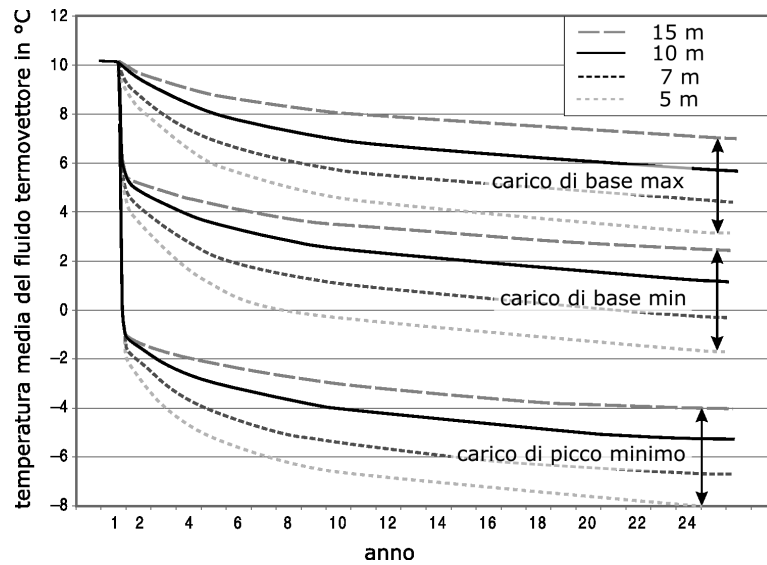


Figura 4.14: Influenza dell’interasse del campo sonde 3x15 sull’andamento temporale delle temperature del fluido termovettore, per un impianto con un fabbisogno termico di picco di 95 kW

si dispone di uno spazio sufficiente, è consigliabile massimizzare la distanza tra i pozzi a circuito chiuso. Purtroppo nelle aree urbane questo non è sempre possibile e si è costretti a dover operare su uno spazio limitato.

Allora si può provare a cambiare la disposizione del campo sonde. In figura 4.15 si mostrano i risultati per 3 diversi layout: quello di partenza rettangolare 3x5, quello su una singola linea 1x15 e quello a forma aperta ad "U". In tutti i casi l’interasse è mantenuto a 10 m, ma si nota a colpo d’occhio che gli schemi aperti, in particolare quello a linea singola, forniscono dei risultati significativamente migliori rispetto allo schema chiuso.

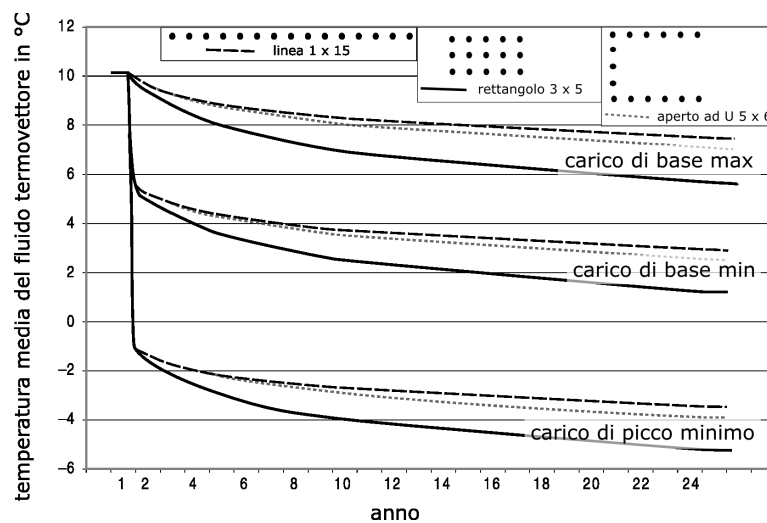


Figura 4.15: Influenza della disposizione di 15 sonde sull’andamento temporale delle temperature del fluido termovettore, per un impianto con un fabbisogno termico di picco di 95 kW

4.8.2 Simulazione di carichi in raffreddamento

Per simulare i carichi di raffreddamento, si può semplicemente inserire una resa termica q cambiata di segno nelle equazioni (4.4.1), (4.4.2) e (4.4.3). In questo caso, naturalmente, la temperatura del terreno e del fluido vettore aumenta con il tempo. Alla fine ci si augura di raggiungere uno stato di equilibrio, in cui la perdita di calore viene bilanciata da un flusso di calore dal suolo verso la superficie. L'obiettivo è quello di progettare un campo sonde che permetta al flusso di calore di essere scaricato, senza aumentare eccessivamente la temperatura nel terreno o nel fluido vettore.

Nel caso del riscaldamento ci sono gli evidenti limiti imposti dalla volontà di non congelare il terreno o il fluido termovettore. In modalità raffreddamento i limiti sono imposti in minima parte dal riscaldamento eccessivo del terreno, che può essere soggetto a una trascurabile dilatazione termica, ma in larga misura è determinato dai fattori di efficienza della PdC. In ultima analisi valgono ancora le osservazioni poste dalle VDI: la temperatura di ritorno del fluido termovettore in condizioni di carico base (media settimanale) non deve discostarsi al più di 11 °C rispetto alla temperatura indisturbata del terreno e in condizioni di picco non deve superare i 17 °C.

4.8.3 Simulazione del tempo

Dagli esempi proposti si può notare come le variazioni di temperatura maggiori si verifichino nei primi 5 anni (o anche meno) di funzionamento dell'impianto. Tuttavia si è anche visto che ci possono volere anche più di 30 anni per raggiungere una condizione di stato stazionario. I codici di calcolo analitico, come EED, offrono la possibilità di specificare il periodo di tempo che si vuole indagare. La vita media degli edifici è stimabile in decenni (e, si spera anche più), mentre una pompa di calore può avere una vita utile di almeno 20 ÷ 25 anni. Sembra ragionevole quindi eseguire le simulazioni per un periodo di almeno 25 ÷ 30 anni, a quel punto si potrebbe sperare di aver raggiunto una qualche forma di condizione di stato stazionario.

4.9 Sistemi UTES in equilibrio termico

In molti sistemi si può avere una domanda di raffreddamento in estate e una domanda di riscaldamento in inverno, allora si consegna il calore scartato dall'impianto al suolo in estate e lo si estrae nell'inverno successivo. Il calore quindi non lo si considera come un rifiuto, ma un bene che viene immagazzinato nell'ambiente geologico per poterlo estrarre nuovamente, magari in un inverno più rigido o viceversa in un estate più calda.

Naturalmente se si cede più caldo in estate di quanto se ne estrarrà in inverno, le temperature del suolo cresceranno costantemente con il tempo. Se, tuttavia, si considera una "climatizzazione annuale equilibrata", dove la quantità di calore iniettata bilanci grossomodo quella estratta in un ciclo annuale, si raggiungerà anche in questo caso uno stato stazionario: una fonte di riscaldamento e di raffrescamento geotermica sostenibile che utilizza i sistemi UTES (Underground thermal energy storage, o stoccaggio termico del sottosuolo).

Se la domanda in riscaldamento e in raffreddamento stagionale di un edificio dovesse essere divergente, può essere vantaggioso integrare nell'impianto una fonte di riscaldamento (gas ad esempio) o di raffrescamento (torri di raffreddamento) tradizionale. In questo modo gli eccessi di carico in riscaldamento o in raffreddamento verrebbero riequilibrati.

4.9.1 Ipotesi progettuali

Riepilogando quanto visto in questo capitolo, si può asserire che nei sistemi a regime stagionale:

- Le temperature si evolvono nel corso di decenni, fino a stabilire un regime quasi stazionario, dovuto allo scambio termico attraverso la superficie del terreno.
- L'interferenza termica tra le sonde diventa importante se la distanza dei fori è critica (si consiglia un interasse di almeno 10 m).
- Un layout lineare o "open array" si comporta meglio di uno chiuso, in quanto favorisce uno scambio di calore con un volume di terreno più ampio.
- La presenza delle acque sotterranee sarà utile, perché tenderà a ricostituire il calore perso o a rimuoverlo se reiniettato, attraverso l'avvezione.

Se invece si desidera garantire una climatizzazione annuale, vale a dire immagazzinare il calore nel terreno, per iniezione in estate e estrazione in inverno, molte di queste considerazioni non si possono più applicare. Le VDI [2001b] sottolineano che:

- Le temperature raggiungono uno stato stazionario dinamico in tempi relativamente brevi, anche se possono variare nel corso di un ciclo annuale.
- L'interferenza termica tra i fori è di minore importanza e una più stretta distanza tra le sonde è ammissibile.
- Per evitare perdite di calore al di fuori del campo sonde, una forma chiusa è preferibile a una aperta o lineare. Infatti per ridurre al minimo l'area della superficie complessiva in rapporto al volume, una matrice equidimensionale cilindrica o esagonale può essere la scelta ottimale.
- Se si vuole ridurre al minimo la perdita di calore dal "serbatoio sottosuolo", si deve evitare la presenza di falde sotterranee, così pure la conducibilità idraulica del terreno dovrebbe essere modesta o al limite ci dovrebbe essere una falda a basso gradiente idraulico.
- Le temperature di picco estreme possono essere accettabili, anzi auspicabili.

Parlando delle temperature massime e minime raggiunte nel terreno, le EGE [2009] riportano 90°C e 5°C. Le temperature massime sono così alte da richiedere un attento esame dei materiali impiegati nella trivellazione: il polietilene non può essere impiegato a temperature maggiori di 60 ÷ 70°C e si dovranno considerare delle alternative come l'acciaio o il polipropene.

Anche gli strumenti di simulazione e i modelli dovrebbero essere attentamente rivisti per tenere conto delle proprietà termiche dei materiali in funzione della temperatura e oltre alla conduzione, il movimento di vapore e la convezione dei fluidi possono diventare significativi.

Infine per raggiungere temperature così elevate, il calore di scarto prodotto dalle pompe di calore in estate non è sufficiente e se si ha una forte domanda di riscaldamento in inverno da soddisfare, diventa conveniente aggiungere sorgenti di calore supplementari, come:

- pannelli solari termici per raccogliere il calore estivo;
- circuiti installati sotto superfici nere, come strade o parcheggi.

Valutazione geotecnica e ambientale

Si è discusso dell'impiantistica e delle soluzioni progettuali che attualmente vengono considerate per i sistemi geotermici, trattando in dettaglio i due sistemi più importanti: open loop da falda e closed loop da sonde geotermiche verticali. È quindi emerso che il design e le prestazioni dell'elemento terra (pozzi, sonde e collettori nel sottosuolo) sono fattori dominanti nei costi operativi del sistema che possono portare al collasso di tutto l'impianto e a impatti ambientali se mal dimensionati.

Si cercherà allora di riassumere alcuni degli approcci esistenti di progettazione sotto il punto di vista geotecnico, citando lo studio di Preene e Powrie [2009], che ne individua i modi di potenziale fallimento (a breve e a lungo termine) e i principali impatti che i regolatori e gli sviluppatori cercano di mitigare.

A breve termine gli insuccessi possono derivare da carenze nella capacità delle infrastrutture che costituiscono l'elemento terra e/o da connessioni tra le infrastrutture e il terreno. *A lungo termine* il collasso può derivare da una valutazione inadeguata dei fabbisogni di climatizzazione e/o dei parametri del suolo. Certamente un interessamento maggiore della comunità geotecnica e l'individuazione di parametri specifici per la progettazione, aiuterebbero a migliorare le performance di questi sistemi energetici.

Si individueranno poi i principali impatti che i regolatori e gli sviluppatori cercano di risolvere, in particolare:

- riduzione della contaminazione delle acque sotterranee e dell'impatto idrogeologico prodotto dai sistemi geotermici;
- possibili modificazioni della temperatura del sottosuolo dovute all'estrazione o all'iniezione di calore, ovvero *l'impatto termogeologico*.
- ottimizzazione dell'efficienza termica degli edifici e delle prestazioni dei sistemi a pompa di calore;

5.1 Analisi geotecnica

Allo stato attuale i sistemi geotermici vengono progettati utilizzando un piccolo contributo specialistico del terreno: l'apporto di ingegneri geotecnici o idrogeologi viene considerato esclusivamente per impianti complessi ed in molti casi viene preso solo genericamente, con i valori dei parametri chiave come temperatura del suolo iniziale, conducibilità termica e calore specifico ricavati dalla letteratura, piuttosto che in sito o da misurazioni di laboratorio.

Analizzando le linee guida tedesche VDI [2001a] e testi di più ampio respiro, come Banks [2008] e Basta e Minchio [2007], si nota che non c'è l'accettazione generale o la promozione dei coefficienti di sicurezza, comunemente utilizzati nella progettazione geotecnica per consentire l'incertezza dei carichi e la variabilità dei parametri del materiale suolo. Nello stesso tempo però, si riconosce che una sottovalutazione dei parametri termici specifici del sito, può

comportare considerevoli costi per la realizzazione dell'impianto e per la sua successiva gestione nel tempo.

Restando nell'ambito geotecnico, si possono evidenziare delle analogie con la progettazione delle fondazioni superficiali per le piccole abitazioni, che in genere non sono soggette ad un progetto dettagliato, ma vengono dimensionate sulla base delle informazioni generiche sui probabili carichi e sulle condizioni del terreno. Tuttavia va riconosciuto che il modello di successo per queste opere è spesso basato su un'esperienza e conoscenza molto ampia da parte dei progettisti, imprenditori ed enti locali.

Per i sistemi di grandi dimensioni, le guide alla progettazione raccomandano di determinare i parametri termici del sito (per esempio tramite un test di risposta termica), che poi verranno utilizzati direttamente nei calcoli successivi. Questo va in contrasto con i metodi standard geotecnici, dove la necessità di opportuni fattori di sicurezza viene specificata e regolamentata nei codici di progettazione.

5.1.1 Gli approcci attuali

Preene e Powrie [2009] criticano i metodi di progettazione normalmente utilizzati, evidenziando che:

- a. Una parte significativa del calore estratto o reiniettato nel terreno sarà conservata nelle immediate vicinanze degli elementi del sistema e difficilmente si allontanerà da essi.
- b. Incoraggiano l'uso di valori standard per le proprietà termiche nelle soluzioni analitiche per dimensionare il sistema lato terreno. Il presupposto implicito in molti manuali di progettazione è che le proprietà termiche del terreno variano poco da un sito all'altro o all'interno di un volume di terra multi strato e non sono un fattore dominante per il successo del sistema, anche se purtroppo non ci sono sufficienti esempi in letteratura per confermare o smentire questa tesi.
- c. I fattori di sicurezza (globali e parziali) non compaiono nella progettazione del sistema.
- d. Alcuni metodi utilizzano fogli di calcolo, o possono essere risolti manualmente, introducendo alcune importanti semplificazioni per i dati di input, in particolare i carichi termici associati all'edificio. Di solito i fabbisogni di riscaldamento e raffreddamento per un edificio varieranno nel corso di un ciclo annuale approssimativamente, rispecchiando la temperatura dell'aria esterna, richiedendo quindi un'analisi appropriata di timestepping per modellarli in modo realistico. Per evitare la necessità di procedere a tale analisi complessa, si è visto che i metodi tradizionali possono convertire il carico termico transitorio, applicato al sistema geotermico, in una serie di carichi più semplici, o semplificare i carichi giornalieri e orari in carichi mensili o settimanali equivalenti.

Tabella 5.1: Caratteristiche riepilogative dei sistemi geotermici open e closed loop [Preene e Powrie, 2009]

Caratteristiche	Sistemi open loop	Sistemi closed loop
Requisiti per l'estrazione delle acque sotterranee e il reinserimento	Tutti i sistemi open loop comportano estrazione di acque sotterranee. Per molti di essi ciò non è fattibile o è insostenibile scaricare l'acqua in fognatura o in recipienti superficiali: in queste circostanze l'acqua deve essere reiniettata nella falda acquifera.	Non è richiesta alcuna estrazione d'acqua.
Dipendenza da favorevoli condizioni idrogeologiche	Sono praticabili solo quando sono presenti adeguati acquiferi sotto il piano campagna.	Sistemi a circuito chiuso non richiedono la presenza di una falda acquifera e si possono realizzare in una vasta gamma di configurazioni geologiche.
Numero e capacità dei pozzi e delle sonde	In buone condizioni idrogeologiche, con portate significative, un numero ridotto di pozzi è in grado di fornire grandi picchi di fabbisogno. Ad esempio, una portata di $25 \ell s^{-1}$ potrebbe fornire una potenza termica di picco di 500 kW.	Il picco della capacità termica di una sonda è in genere molto inferiore a quello di un pozzo. I sistemi a circuito chiuso in genere richiedono un numero molto maggiore di pozzi rispetto a quelli aperti. Una sonda tipica di 100 m di profondità può avere un picco di rendimento termico di $4 \div 7$ kW.
Requisiti per il sistema di trasferimento di calore	A seconda della temperatura dell'acqua richiesta dall'edificio, questi sistemi possono operare utilizzando semplicemente uno scambiatore di calore, senza la necessità di una PdC.	Richiedono quasi sempre l'uso di pompe di calore per il trasferimento di calore.
Capacità di gestire annualmente i carichi termici non equilibrati	Se si scarica in superficie allora si può lavorare efficacemente con carichi termici molto squilibrati, in cui la domanda di riscaldamento o di raffreddamento domina nel corso del ciclo annuale. Se al contrario lo scarico avviene nella stessa falda, i sistemi a circuito aperto lavorano meglio quando il bilancio di carico annuale è equilibrato. Se il carico termico è sbilanciato vi è il rischio che l'acqua più calda o più fredda in uscita dai pozzi di iniezione ritorni a quelli di estrazione (fenomeno chiamato "feedback idraulico" 3.8.3 nella pagina 70), che ridurrà l'efficienza del sistema.	I sistemi a circuito chiuso danno i migliori risultati quando il bilancio totale annuo di riscaldamento e di raffreddamento è grossomodo equilibrato. Se il carico termico è sbilanciato vi è il rischio che la temperatura del suolo vari sul lungo termine influenzando l'efficienza del sistema.
Potenziali impatti termici lontano dal sito	Se scaricano in superficie, esiste la possibilità che l'acqua più calda o più fredda abbia un impatto ambientale. Nei casi in cui la reintroduzione avviene in falda, l'avvezione di caldo o freddo nelle acque sotterranee per lunghi periodi (in genere diversi anni) può potenzialmente causare dei bulbi di temperatura che si spostano dal sito.	Per molti sistemi il flusso di calore nel terreno avviene prevalentemente per conduzione e quindi le variazioni di temperatura si spostano lentamente, riducendo il rischio di impatti significativi da migrazione termica.
Vincoli sulla disposizione dei pozzi e delle sonde	Anche se in genere richiedono un numero relativamente modesto di pozzi, è preferibile che vengano distribuiti nel modo più ampio possibile, per ridurre al minimo le interferenze tra loro. Questo nel caso in cui la reiniezione avvenga nella stessa falda e la distanza tra estrazione e scarico abbia una diretta influenza sul rischio di feedback idraulico.	A causa del gran numero di sonde tipicamente richiesto, vi è la necessità di organizzare una disposizione ottimale fra di esse, quindi possono essere necessarie vaste superfici per ospitare il campo sonde.

5.1.2 Sviluppi recenti

La crescente popolarità dei sistemi geotermici ha esteso l'interesse ad un gruppo sempre più ampio di analisti e progettisti. Come risultato, nuove linee guida stanno cominciando a diventare disponibili ed alcuni ricercatori stanno mettendo in discussione la validità delle ipotesi di progetto esistenti.

Inoltre per gli edifici più grandi e complessi, si adottano sempre più *i sistemi ibridi o bivalenti*, in cui l'elemento geotermico fornisce un fabbisogno inferiore al 100% del carico di picco termico dell'edificio, ed il resto viene prodotto dai sistemi di climatizzazione tradizionali. Si è visto infatti che i picchi di domanda coinvolgono l'edificio per una frazione di tempo di poche ore all'anno e quindi risulta inutile e oneroso progettare il sistema geotermico per tali carichi. Ciò infatti richiede l'installazione di elementi a terra con capacità superiore (pozzi, sonde geotermiche, ecc.), consentendo in questo modo notevoli aggravii dei costi energetici e delle emissioni di biossido di carbonio e soprattutto aumentando i costi di perforazione e posa in opera.

Nonostante ciò, permangono notevoli differenze tra i metodi di analisi impiegati per i sistemi geotermici e la progettazione geotecnica, regolamentata nell'Eurocodice 7 e nel recente NTC 2008. Si cercherà allora di evidenziarle e di prendere in considerazione come un approccio geotecnico potrebbe essere meglio integrato nella progettazione di tali sistemi energetici.

5.2 Possibile caratterizzazione geotecnica

Un sistema geotermico può essere suddiviso in tre elementi chiave:

- la sorgente o più semplicemente il terreno (comprende pozzi, circuiti nel sottosuolo, sonde geotermiche);
- il carico (l'edificio, i suoi controlli, gli utenti e il carico termico che ne deriva, per i sistemi ibridi qualsiasi sistema di riscaldamento o raffrescamento sono pertinenti);
- il trasferimento di calore (PdC, scambiatori di calore e sistemi di controllo associati).

Da una prospettiva geotecnica è interessante notare, quando si confrontano i sistemi geotermici con quelli di climatizzazione tradizionali, che i maggiori costi di realizzazione (e il maggiore potenziale di riduzione dei costi operativi) sono associati con il lato sorgente, cioè gli elementi del terreno. Così la progettazione geotecnica del lato sorgente è fondamentale per un sistema economicamente sostenibile e di successo.

La progettazione del lato sorgente di un sistema geotermico è convenzionalmente basata su soluzioni analitiche di conduzione di calore come quelle presentate da Claesson e Eskilson [1987]. La matematica che approssima il flusso assialsimmetrico del calore a una linea verticale o a un pozzo cilindrico in risposta ad un gradiente di temperatura è analoga a quella per il flusso delle acque sotterranee soggetta a pompaggio da un pozzo verticale.

Nel flusso transitorio con una rimozione costante delle acque sotterranee o di calore, la distanza di influenza dell'estrazione (o dell'iniezione) dal pozzo aumenterà gradualmente nel corso del tempo, ma (a causa della geometria assialsimmetrica) ad una velocità decrescente. In pratica, uno stato di equilibrio sarà raggiunto quando il tasso di calore o di estrazione delle acque sotterranee verrà bilanciato dal flusso attraverso la superficie del terreno, che però non viene considerato in nessuna analisi tradizionale.

Anche se il ruolo di apporto di calore dalla superficie del terreno è incluso nell'analisi, non può essere riconosciuto che, persino dopo molti anni di funzionamento, a meno che il tasso di estrazione o iniezione di calore sia relativamente modesto, gran parte dell'energia

termica dal sistema deriverà dall'accumulo termico nel terreno localizzato vicino al foro, piuttosto che da sorgenti o pozzi "lontani".

Il punto di partenza essenziale per un'analisi significativa dell'elemento della sorgente di un sistema geotermico è probabilmente quello di effettuare almeno un equilibrio concettuale del flusso di calore, per un volume adeguato di controllo, analogo a un bilancio idrico in idrogeologia e ai problemi di flusso delle acque sotterranee, come illustrato schematicamente nel paragrafo 1.9 nella pagina 19.

L'importanza del flusso di calore dovuto al movimento delle acque sotterranee aumenterà con l'aumentare della conduttività idraulica del suolo e del gradiente idraulico da una parte all'altra del sito e può essere praticamente trascurabile in terreni a bassa permeabilità. Il disinteresse per l'analisi di un sistema geotermico è probabilmente cautelativo. L'interazione tra i sistemi geotermici limitrofi può essere presa in considerazione con il principio di sovrapposizione degli effetti e l'esame di tutti i componenti nel bilancio del flusso di calore. Si potrà così considerare l'impatto di un sistema geotermico con la valutazione degli effetti, per esempio, un aumento della temperatura della terra o di quella media dell'atmosfera a causa dei cambiamenti climatici.

Idealmente, il contributo netto di calore dovrebbe essere pari al netto del calore estratto su un ciclo annuale. In un determinato periodo di tempo, l'eventuale differenza tra l'ingresso di calore e il calore estratto dal volume di controllo si tradurrà in un cambiamento della temperatura del suolo, che dipenderà anche dalle capacità specifiche di calore del terreno e del fluido nei pori. Ciò potrebbe portare il sistema a diventare progressivamente meno efficiente per un periodo di diversi anni, fino a raggiungere uno stato limite di servizio in cui esso non può più assolvere la funzione per la quale è stato progettato.

Poiché i sistemi geotermici diventano sempre più popolari, sarà necessario, soprattutto nelle aree urbane congestionate, prendere in considerazione l'interazione tra i sistemi geotermici adiacenti o situati nelle vicinanze, per verificare che la capacità del terreno a ricevere o ad abbandonare il calore non sia compromessa. Un approccio basato sulla valutazione rigorosa termodinamica di un volume adeguato di controllo potrebbe chiarire e facilitare questo, in un modo che il ricorso a formule standard non potrebbe mai garantire. Naturalmente un esame approfondito dei tassi di trasferimento di calore locali per la componente terreno sarà ancora una parte necessaria e fondamentale del processo di progettazione.

5.2.1 Analogie con altre opere geotecniche

Il design moderno geotecnico è basato sull'individuazione degli stati limite. I due più comuni sono *lo stato limite ultimo*, generalmente associato al collasso totale, e *lo stato limite di servizio* in cui, anche se non si verifica il collasso, un criterio di prestazione non viene soddisfatto: per esempio quando le deformazioni sono eccessive.

Gli Stati Limite vengono evitati nei calcoli di progettazione con l'applicazione di fattori di sicurezza ai carichi previsti, o a una proprietà fondamentale del materiale come la resistenza, o ad entrambi. Nelle strutture geotecniche come le fondazioni, i carichi sono indipendenti dal terreno e sono evidenti, mentre nei pendii e nei muri di sostegno la maggior parte del carico è determinato dal terreno e nel caso di un muro di contenimento non può essere facile da definire.

Un fattore di sicurezza può essere applicato al carico per consentire l'incertezza nella sua quantificazione, e anche forse per un cambiamento d'uso o degli utenti della struttura, con un conseguente e imprevedibile aumento nel futuro. Un fattore di sicurezza può essere applicato ad una proprietà del materiale, come la resistenza o la capacità portante, per consentire un grado di variabilità, anche se le NTC affermano nel contesto del suolo, che la resistenza usata nei calcoli dovrebbe essere una prudente valutazione in funzione dello stato limite considerato.

Fattori di sicurezza possono essere applicati a uno o a entrambi (carico e proprietà dei materiali) come un modo empirico per salvaguardarsi dal raggiungimento di uno stato limite di servizio: questo è sempre stato l'approccio dell'analisi dell'equilibrio limite per le strutture geotecniche quali pendii, fondazioni e muri. Nella moderna progettazione geotecnica invece, gli stati limite ultimi (SLU) si possono presentare in conseguenza alle diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3). Nelle verifiche di sicurezza rispetto agli stati limite ultimi può essere utilizzato l'Approccio 1 oppure l'Approccio 2. Gli stati limite di esercizio (SLE), si possono presentare esplicitando sia le prescrizioni relative agli spostamenti/cedimenti compatibili con le prestazioni attese per l'opera, sia per il metodo utilizzato per il calcolo degli stessi. Nei casi in cui la natura del terreno lo richieda, il calcolo dei cedimenti dovrà tenere conto della non linearità del comportamento del terreno stesso e del decorso dei cedimenti nel tempo.

Al contrario un sistema geotermico deve essere progettato per accogliere un certo carico termico, che è la parte della domanda termica necessaria per riscaldare o raffreddare l'edificio e che deve essere garantita principalmente dal sottosuolo. In linea di principio sia questo carico, oppure i parametri che disciplinano il trasferimento di calore e le proprietà di conservazione del suolo, o entrambi, potrebbero essere presi in considerazione per dare un certo grado di capacità supplementare al sistema, per far fronte all'aumento dei carichi termici o alla diminuzione delle prestazioni termiche attese.

Tuttavia questo potrebbe portare ad un progetto antieconomico, risultando più vantaggioso al cliente puntare sulla scelta di un riscaldamento e raffrescamento convenzionale, per risparmiare sui costi di realizzazione. In ogni caso un sistema di scarso rendimento nella maggior parte delle applicazioni non sarà potenzialmente pericoloso come una fondazione o un muro di contenimento sottodimensionato. Un sistema geotermico non potrà di norma causare il collasso o il fallimento del terreno: ma semplicemente assicurare le prestazioni necessarie per riscaldare o raffreddare l'edificio. Così i guasti di un sistema geotermico in genere rappresentano uno stato limite di esercizio piuttosto che ultimo.

Ciononostante le conseguenze del "fallimento" del sistema geotermico non devono essere banalizzate. Su progetti commerciali il committente dovrà chiarire al progettista i carichi termici da soddisfare e il coefficiente di prestazione *COP* da raggiungere. Nel caso in cui non vengano soddisfatti, se l'edificio non dispone di un sistema ibrido di riscaldamento e raffreddamento, basandosi interamente sul sistema geotermico, si evidenzierà un disagio termico, potenzialmente negativo sull'utilizzazione dell'edificio. Se però l'edificio dispone di un sistema ibrido, il comfort termico per gli occupanti sarà garantito, ma il maggiore utilizzo dei sistemi tradizionali aumenterà i costi energetici dell'edificio e le emissioni di anidride carbonica superiori a quelli attesi dal cliente.

Per quanto riguarda la natura e l'impatto dei fallimenti un sistema geotermico è più simile a un'opera di drenaggio utilizzata per accelerare il consolidamento di una fondazione o di un muro di contenimento. Con una differenza significativa: il drenaggio di solito può essere valutato per un periodo di tempo relativamente breve e quindi essere migliorato e riparato se il suo rendimento non è soddisfacente. Nell'ambito geotermico ciò non sarà praticabile, soprattutto a causa dei tempi più lunghi prima che si arrivi al fallimento o si evidenzii lo scarso rendimento. Anche se esistono strumenti per il monitoraggio in continuo, agevolando così la valutazione delle cause di tali disservizi, l'eventuale riparazione può non essere così agevole ed economica.

La discussione precedente suggerisce che l'applicazione dei fattori di sicurezza in senso convenzionale ai carichi termici o ai parametri del materiale serve a ben poco e che un approccio probabilistico, con i carichi termici e dei parametri selezionati per dare un certo grado di sicurezza al sistema, può essere una filosofia di progettazione più adeguata.

5.2.2 Stati limite per un sistema geotermico

Mentre sembra improbabile che l'elemento terra di un sistema geotermico possa comportare un crollo definitivo o uno stato limite ultimo, ci sono diversi modi in cui uno stato limite di servizio può essere raggiunto. A riprova del fatto che i sistemi geotermici ricevono un carico dinamico termico per un lungo periodo di tempo questi possono essere raggruppati come segue.

Fallimento a breve termine (entro un ciclo annuale) In genere si verifica all'interno di un ciclo annuale e si manifesta nel momento in cui il sistema non è più in grado di fornire il carico di picco di riscaldamento o di raffreddamento: il sistema non riesce quindi a soddisfare il carico termico applicato. Una forma alternativa di breve termine di fallimento può verificarsi in prevalenza nei sistemi di riscaldamento, che estraggono calore netto dal suolo. Le temperature del sottosuolo possono scendere e, in casi estremi, può verificarsi il congelamento del terreno. Se il congelamento avviene nei pressi delle strutture può provocare il sollevamento della piastra di calcestruzzo, o delle deformazioni laterali (e crepe) nei muri [Brandl, 2006]. Ulteriori movimenti di terreno si possono verificare durante lo scongelamento.

Fallimento a lungo termine (nella vita utile dell'edificio) Il sistema è in grado di soddisfare il requisito di carico termico dell'edificio, ma il flusso di calore non è sufficientemente ben equilibrato in un ciclo annuale, con conseguente graduale aumento o diminuzione della temperatura del suolo e una graduale riduzione di efficienza del sistema e alla fine della sua capacità. Termicamente il terreno è soggetto a uno sforzo eccessivo (in casi estremi di carichi di riscaldamento dominante può verificarsi il congelamento del suolo, con conseguenti movimenti di terra). In genere il sistema funzionerà, ma meno efficacemente, con conseguente aumento dei costi energetici e di emissioni di biossido di carbonio. Non raggiungerà la performance termica, economica ed ambientale desiderata.

Mancato rispetto delle norme Alcune forme di sistema geotermico sono soggette a regolamentazione formale che governa il modo di operare (ad esempio licenze di estrazione nei sistemi a circuito aperto). I sistemi che sono carenti negli aspetti di design o di funzionamento potrebbero violare i requisiti di legge, sia a breve sia a lungo termine.

Il fallimento a breve termine deriva principalmente da carenze nella capacità delle infrastrutture, che costituiscono l'elemento terreno, o dalla scarsa connessione tra le infrastrutture e il terreno. Quello a lungo termine principalmente è imputabile a sottovalutazione dei carichi o dei parametri del terreno, compresa l'incapacità di effettuare una analisi termodinamica sul volume di controllo. Esempi di possibili modalità di fallimento dei sistemi geotermici sono riportati nella tabella 5.2 nella pagina successiva.

Tabella 5.2: Possibili modalità di fallimento dei sistemi geotermici [Preene e Powrie, 2009]

Fallimento	Possibili cause	Possibili soluzioni progettuali
A breve termine (infrastrutture)	Numero insufficiente di pozzi/inadeguata progettazione/portata emunta insufficiente a garantire il carico di punta.	Assicurarsi che i carichi di picco siano accuratamente definiti, basarsi su dati specifici del sito e idealmente eseguire delle prove di pompaggio; adattare i test di un pozzo pilota al campo per valutare l'interferenza tra i pozzi e la capacità media; usare sistemi ibridi nei momenti di picco della domanda termica.
	Numero insufficiente di sonde/lunghezza del circuito di terra insoddisfacente per sopportare il carico di picco stagionale, senza superare le temperature ammissibili del fluido termovettore (con carichi di riscaldamento dominante vi è il rischio di congelamento della terra con relativi movimenti associati).	Assicurarsi che i carichi di picco siano accuratamente definiti, basarsi su dati specifici del sito e idealmente eseguire un test di risposta termica su una sonda pilota; adattare i test della sonda pilota al campo per valutare l'interferenza tra le sonde e la capacità media; usare sistemi ibridi nei momenti di picco della domanda termica.
A breve termine (connessioni)	Inappropriata progettazione e/o installazione di un open loop o closed loop, nel senso che un pozzo o un foro non sono in grado di fornire a breve termine il picco d'acqua o il rendimento termico assunto nel progetto.	Assicurarsi che i carichi di picco siano accuratamente definiti, basarsi su dati specifici del sito e idealmente eseguire un test di collaudo; adattare i risultati del test al campo per valutare l'interferenza e la capacità media; usare sistemi ibridi nei momenti di picco della domanda termica.
	Progettazione e/o installazione inadeguata del sistema di condutture che collega il terreno all'edificio, ciò significa che le uscite termiche e d'acqua disponibili non possono essere consegnate al sistema di trasferimento di calore (ad esempio, ci sono perdite di carico eccessive nelle tubature).	Garantire che i carichi di picco siano accuratamente definiti; verificare che le tubazioni sviluppino un moto turbolento quando trasferiscono il calore e un moto laminare altrove; stimare accuratamente le perdite per attrito e dimensionare le pompe di circolazione, verificare l'isolamento delle tubazioni.
	Insufficiente valutazione delle interferenze tra le sonde all'interno di un campo, con il risultato di avere sottostimato l'uscita media della sonda.	Contemplare nella modellazione gli effetti cumulativi dovuti alle interferenze tra le sonde; adattare i risultati del test al campo per valutare l'interferenza e la capacità media; usare sistemi ibridi nei momenti di picco della domanda termica.
A lungo termine (carichi)	Carichi annuali sbilanciati (ossia il netto termico input/output al suolo) e superiori a quelli utilizzati nella progettazione (dovute a ipotesi di progetto irrealistiche, o al funzionamento inadeguato dell'edificio da parte dell'utenza).	Garantire che i carichi annuali per il riscaldamento e per il raffreddamento siano accuratamente definiti e che siano sufficientemente equilibrati da impedire una variazione a lungo termine della temperatura del terreno; stabilire dei protocolli per il corretto funzionamento del sistema in modo che l'utenza non possa inavvertitamente sbilanciare le richieste termiche, usare sistemi ibridi per coprire parte del carico annuale sbilanciato.
	La vita utile dell'edificio viene estesa oltre a quella assunta dal progettista e l'effetto cumulativo dei carichi squilibrati provoca dei malfunzionamenti al sistema.	Assumere nell'analisi una vita di progettazione adeguata; garantire che i carichi annuali per il riscaldamento e il raffreddamento vengano applicati al sistema in modo sufficientemente equilibrato e che gli ingressi e le uscite del calore impediscano cambiamenti a lungo termine della temperatura del terreno, usare sistemi ibridi per coprire parte del carico annuale sbilanciato.

Continua ...

... Possibili modalità di fallimento dei sistemi geotermici [Preene e Powrie, 2009]

Fallimento	Possibili cause	Possibili soluzioni progettuali
A lungo termine (caratteristiche del terreno)	La capacità del terreno di archiviare e stoccare a breve termine i picchi di carico termico è inferiore a quella ipotizzata nel progetto.	Usare dei parametri basati sui dati specifici del sito e idealmente un test in loco; usare sistemi ibridi nei momenti di picco della domanda termica.
	La quantità di energia da carichi annuali sbilanciati, che si sposta dal (o migra al) sito attraverso il flusso delle acque sotterranee (e altri meccanismi), è minore di quanto ipotizzato nel design.	Considerare nella modellazione il trasferimento di calore dovuto all'effetto delle acque sotterranee (e di altri meccanismi); usare dei parametri basati sui dati specifici del sito e idealmente un test in loco.
	Feedback termico tra il pozzo di presa e quello di scarico.	Considerare nella modellazione il rischio di svolta termica; usare dei parametri basati sui dati specifici del sito e idealmente un test in loco; ottimizzare la disposizione dei pozzi per ridurre al minimo il picco e gradienti idraulici medi modesti tra i pozzi.
	L'estrazione netta delle acque sotterranee causa un eccessivo depauperamento dei livelli di falda e/o delle risorse idriche.	Valutare l'abbassamento indotto, l'impatto sulle risorse idriche e sulla opere di presa limitrofe; minimizzare l'estrazione netta delle acque sotterranee (ad esempio con la reiniezione di acqua nella stessa falda).
	La qualità dell'acqua è peggiore rispetto alle previsioni, quindi provoca intasamento/problemi di corrosione.	Disporre dei parametri di qualità delle acque basati sui dati specifici del sito; progettare considerando l'effetto potenziale dovuto alla scarsa qualità dell'acqua (ad esempio mediante l'uso di materiali resistenti alla corrosione o mediante l'inserimento del trattamento delle acque).
Violazione delle norme	Le portate emunte e/o scaricate superano i limiti imposti, perché il carico cumulativo applicato al sistema geotermico è superiore a quello usato per ottenere il permesso di prelievo e/o scarico.	Garantire che i carichi annuali per il riscaldamento e il raffreddamento siano accuratamente definiti e che i corrispondenti volumi di acqua annuali siano stimati in modo adeguato; impostare protocolli di controllo del sistema così che l'utenza non possa inavvertitamente estrarre dei volumi maggiori ai limiti imposti; usare sistemi ibridi per gestire i carichi annuali che superano tali volumi consentiti.
	Riduzione inaccettabile delle risorse idriche disponibili in siti vicini, a seguito di estrazione da un sistema a ciclo aperto.	Accertare le caratteristiche legate all'acquifero (come i pozzi di estrazione esistenti) in siti limitrofi; valutare in fase di progetto l'abbassamento indotto, l'impatto sulle risorse idriche e sulle estrazioni confinanti; ridurre al minimo l'estrazione netta delle acque sotterranee (ad esempio con pozzi di reiniezione).
	Non accettabile impatto termico (cambiamento nel terreno, nelle acque sotterranee o nella temperatura dell'acqua superficiale) sui siti vicini o nei luoghi indicati nelle autorizzazioni regolamentari.	Identificare i vincoli ambientali e gli altri luoghi sensibili nelle vicinanze (ad esempio sistemi geotermici esistenti sui siti vicini); valutare con opportuni meccanismi la quantità di calore che esce dal sito (e attraverso il sito), la migrazione di calore (ad esempio avvezione, conduzione), usare dei parametri basati su dati specifici del sito e preferibilmente delle prove di pompaggio.
	Rischio inaccettabile di migrazione delle acque sotterranee contaminate lungo vie di potenziale infiltrazione create dall'elemento terra (pozzi, circuito, ecc.).	Progettare i pozzi tenendo conto delle eventuali contaminazioni superficiali, profonde e delle zone di scarsa qualità dell'acqua; includere nella cementazione della perforazione miscele adatte a sigillare ogni possibile via preferenziale d'infiltrazione.

5.3 Il contributo geotecnico

L'interesse verso i sistemi geotermici e il numero degli impianti installati cresce di anno in anno, così come i prezzi dell'energia derivata da fonti fossili continuano a salire. La progettazione del circuito, che collega il terreno all'impianto, ha un enorme impatto sul costo capitale, sulle spese di funzionamento e sull'efficienza, molto più che nei sistemi di climatizzazione tradizionali. La progettazione geotecnica sembra quindi essenziale per l'efficienza e l'efficacia economica di questi sistemi.

Il contributo geotecnico diventerà sempre più essenziale per la progettazione del sistema geotermico, come anche un esame completo del bilancio energetico globale per i flussi di calore che entrano ed escono dal terreno. Questo servirà anche a studiare più efficacemente gli impatti climatici dovuti alla presenza e alla possibile interazione di molteplici sistemi e a sviluppare soluzioni basate sull'accoppiamento calore-gradiente idraulico, per offrire un'indagine più dettagliata e reale del fenomeno termogeologico. Saranno anche da migliorare la raccolta dei dati sulle proprietà termiche del suolo e le procedure di verifica. Potrebbe poi essere opportuno un approccio probabilistico per la progettazione dei parametri e dei carichi termici. Gli specialisti geotecnici infine dovranno essere in grado di analizzare, comprendere e documentare i guasti (descritti in tabella 5.2 nella pagina 116), in modo che si possa avere una migliore comprensione del complesso di fattori che disciplinano le prestazioni dei sistemi geotermici e quindi migliorare i metodi di progettazione.

Una comprensione approfondita di tali ambiti rimarrà appannaggio di ricercatori e di specialisti, con il risultato però di produrre programmi user-friendly e guide per l'uso di tutti i giorni. D'altronde la comunità geotecnica ha già vissuto esperienze simili, per esempio con i metodi agli elementi finiti (come un nuovo approccio analitico) e con i geosintetici (come un nuovo campo di applicazione). Anche se sono tuttora campi relativamente specialistici, il numero di ingegneri geotecnici coinvolti in ciascuna area è cresciuto enormemente negli ultimi vent'anni.

5.4 Analisi ambientale

Nel testo si è più volte accennato ai potenziali problemi ambientali che i sistemi geotermici possono comportare, soprattutto se la progettazione, l'installazione e la gestione nel tempo, non viene eseguita a regola d'arte. Si tratta ora di approfondire ed individuare quali sono i principali aspetti burocratici e normativi che caratterizzano questa tecnologia, preoccupano gli enti di controllo ambientale e i "vuoti normativi" che in alcuni casi non disciplinano l'uso e l'abuso della risorsa calore del sottosuolo. Per fare questo si sono analizzati gli studi e le analisi presenti in Banks [2008], Rybach [2003] e Sanner [2008].

5.4.1 Impatto idrogeologico

Gran parte delle norme ambientali sono interessate al potenziale impatto idrogeologico delle perforazioni e della tecnologia legata ai sistemi geotermici sugli acquiferi.

Per quanto riguarda i sistemi open loop, la regolamentazione è varia e può farli rientrare in diversi campi specifici: risorse idriche, controllo dell'inquinamento, estrazione mineraria o anche delle legislazioni scritte ad hoc per le risorse geotermiche (quasi sempre ad alta entalpia). All'interno dell'Unione europea ed in molti altri paesi, la sostanziale estrazione, o lo scarico in corpi idrici sotterranei e superficiali, richiede sempre una qualche forma di licenza o autorizzazione. Il regolatore ambientale di solito cerca di limitare gli effetti negativi sulle falde acquifere e di tutelare gli interessi dell'ambiente e degli altri utenti. In particolare cerca di:

- evitare di sprecare le riserve sotterranee, ponendo limiti sulle portate nette ammissibili (o insistere sulla totale reiniezione dell'acqua utilizzata, nella falda originale);
- evitare alterazioni negative della temperatura o della qualità chimica delle acque superficiali che ricevono gli scarichi provenienti da sistemi open loop;
- prevenire o limitare la diffusione (o talvolta addirittura la localizzazione) delle variazioni dei livelli di falde acquifere a causa di estrazione o di reiniezione;
- evitare modifiche su larga scala delle temperature della falda acquifera oltre alla immediata localizzazione della sorgente del terreno di riscaldamento o di raffreddamento, limitando:
 - a. l'importo netto di calore che può essere estratto o reiniettato;
 - b. la temperatura massima o minima accettabile delle acque reflue.

Per i sistemi closed loop, non essendo prevista la presa e lo scarico di acque sotterranee, o qualsiasi iniezione di sostanza inquinante (l'unica possibilità è costituita di una perdita di anticongelante), le norme si concentrano principalmente sulla perforazione. In particolare si valuta la presenza di eventuali contaminanti nel sito e l'esperienza e la certificazione delle ditte di trivellazione incaricate. La finalità di tutto questo è evitare l'inquinamento delle falde acquifere profonde per la migrazione dei contaminanti superficiali, dovute all'imperizia nella realizzazione e cementazione dei fori, che comporta tra l'altro la connessione di acquiferi ubicati a differenti profondità. Non viene però sottovalutato il potenziale inquinamento prodotto dall'ingresso nel terreno dei fluidi refrigeranti (e anche delle soluzioni antigelo). In alcuni Paesi i sistemi a circuito chiuso rientrano in leggi specifiche che regolamentano l'energia geotermica (anche se sono state scritte per sistemi ad alta entalpia). Altrove i sistemi a circuito chiuso vengono considerati come "pozzi" e sono disciplinati e regolamentati alla stregua delle opere di perforazione. In Germania il fatto che i sistemi a circuito chiuso incidano sulla temperatura delle acque sotterranee li fa rientrare sulle norme a tutela delle acque.

5.4.2 Impatto termogeologico

Chiaramente l'estrazione o l'immissione di calore mediante i sistemi a circuito chiuso può apportare dei cambiamenti alla temperatura del terreno, che possono comportare:

- congelamento del terreno e criosollevamento (per eccessiva estrazione di calore), con danni alle strutture, ai sottoservizi interrati o alle radici delle piante;
- il riscaldamento del suolo (per eccessiva immissione di calore) provoca dilatazione termica con essiccamento dei suoli a causa dei vapori di migrazione;
- interferenza termica tra i sistemi limitrofi, diminuendo l'efficienza per la rispettiva utenza.

In molti (ma non in tutti i Paesi), il concetto di calore nel terreno come una risorsa è così innovativo che non esistono ancora strumenti giuridici per regolamentare l'impatto termogeologico degli impianti closed loop.

5.4.3 Il calore come inquinante

Si è avuto a che fare con il calore del sottosuolo come una risorsa, ma è ampiamente riconosciuto che il calore può anche essere un inquinante. Ad esempio, la direttiva quadro sulle acque 2000/60/CE (riportata fedelmente nell'articolo 74 del D.Lgs. 152/2006) definisce "inquinamento" come

l'introduzione diretta o indiretta, a seguito di attività umana, di sostanze o di calore nell'aria, nell'acqua o nel terreno che possono nuocere alla salute umana o alla qualità degli ecosistemi acquatici e degli ecosistemi terrestri che dipendono direttamente da ecosistemi acquatici, perturbando, deturpando o deteriorando i valori ricreativi o altri legittimi usi dell'ambiente

È interessante notare che questa definizione non considera il raffreddamento di un ambiente acquatico (attraverso l'estrazione di calore) come un inquinamento, anche se queste attività potrebbero danneggiare gli ecosistemi, danneggiare i beni materiali (attraverso il criosollevamento) o ridurre l'utilità dell'ambiente.

Pur considerando il calore come un inquinante, la direttiva quadro sulle acque, figlia della direttiva sulle acque sotterranee e sulle sue incarnazioni nelle legislazioni nazionali, non tende a considerare il calore come una "sostanza". In genere le normative sono interessate al controllo degli scarichi delle sostanze chimiche presenti nell'acqua e al monitoraggio dello "stato chimico" dei corpi idrici. Pertanto, anche se il calore è riconosciuto come una causa di potenziale inquinamento, non vengono forniti agli organismi competenti i poteri e gli strumenti per trattarlo come una "sostanza inquinante". Così, in molti casi, la gestione e il regolamento che le autorità ambientali possono esercitare sui sistemi geotermici possono essere limitati a:

- regolamentare le estrazioni e gli scarichi delle acque sotterranee, con vincoli sulla temperatura (o altro) associati al rilascio dell'autorizzazione per l'estrazione delle acque sotterranee o lo scarico delle stesse in recipienti superficiali ed in falda acquifera;
- pianificare lo sviluppo della risorse nel territorio, così i sistemi geotermici inappropriati possono essere individuati e disciplinati attraverso il consenso alla programmazione.

Ovviamente all'interno dell'Unione Europea vi è una notevole variazione a riguardo di come la sorgente di calore del terreno viene regolamentata [Rybach, 2003], per diverse ragioni:

- diversi Stati membri dell'UE possono interpretare la direttiva quadro sulle acque in modo diverso;
- possono anche avere una specifica normativa nazionale, oltre ai requisiti della direttiva, consentendo loro di regolamentare l'uso del calore del sottosuolo in modo più dettagliato;
- possono avere leggi sulle miniere o sulle risorse geotermiche ad alta entalpia, sotto la cui giurisdizione cadono anche i sistemi geotermici.

Attualmente sembra esserci una sorta di vuoto normativo all'interno dell'Unione europea intorno ad alcuni tipi di sistemi geotermici (in particolare i sistemi a circuito chiuso). Nei prossimi anni il legislatore dovrà decidere se sia necessario un regolamento più severo, se lo farà potrebbe soffocare sul nascere una nuova tecnologia verde.

Secondo Banks [2008] in via ufficiosa molti regolatori sono dell'opinione che i piccoli sistemi closed loop dovrebbero avere una prescrizione semplificata (anche se l'autoregolamentazione da parte degli organismi professionali va molto incoraggiata), mentre i grandi

sistemi dovrebbero essere inseriti in un armonico processo di pianificazione territoriale. Agli enti preme comunque limitare l'impatto idrogeologico e l'inquinamento termico dei grandi sistemi open loop, argomenti che vengono trattati nelle già esistenti norme sulle risorse idriche e sul controllo dell'inquinamento.

5.4.4 Condizioni termogeologiche preesistenti

Potrà sembrare scontato, ma per individuare gli effetti dell'inquinamento di origine antropica e l'impatto ambientale, è necessario conoscere prima la situazione esistente. Per esempio, se si rileva un'alta concentrazione di arsenico in una falda acquifera, si può attribuire la sua presenza all'uso di fertilizzanti in agricoltura o alla presenza di centrali termoelettriche nella zona. Tuttavia l'arsenico potrebbe essere già presente nelle acque sotterranee, annullando le ipotesi di responsabilità fatte in precedenza.

Lo stesso discorso vale per l'inquinamento termico. Se si scopre una zona urbana con elevate temperature delle acque sotterranee, non si deve dare per scontato che sia prodotto da un sistema open loop in modalità raffreddamento. In primo luogo si dovrà identificare la distribuzione naturale delle temperature nella falda acquifera sotto la città (si tratta di una distribuzione tridimensionale). Inoltre bisognerà conoscere quali sono le tendenze temporali nella temperatura della terra o delle acque sotterranee, anche se quest'ultime sono generalmente stabili, non sono stazionarie e riflettono il cambiamento del clima globale e locale. Le temperature della terra sono anche un po' colpite dai recenti cambiamenti climatici globali: da essi di conseguenza ci si aspetta un costante aumento legato alla temperatura media dell'aria. Infine non vanno trascurate le altre fonti d'inquinamento termico presenti, oltre a quelle localizzate prodotte dai sistemi geotermici.

Nelle città per esempio si parla di una vera e propria *isola di calore urbana*, caratterizzata da una maggiore temperatura media dell'aria esterna rispetto alle aree rurali confinanti. Questo fenomeno è dovuto alle modifiche dell'albedo, delle proprietà radioattive e dello stoccaggio del contesto urbano e può quindi tradursi in un aumento della temperatura del terreno. Tra l'altro il sottosuolo urbano può risentire del calore conduttivo perso dai locali interrati degli edifici, dai sottoservizi e anche dalle perdite di calore delle reti fognarie.

Uno studio sull'inquinamento termico urbano è stato pubblicato da Ferguson e Woodbury [2004] per la città di Winnipeg, in Canada. Mappando le temperature delle locali acque sotterranee hanno evidenziato un aumento di 5°C rispetto alle aree rurali esterne, non imputabile al riscaldamento globale o locale atmosferico risultato di 1°C. Hanno inoltre valutato se l'aumento della temperatura della falda acquifera potesse essere imputabile al bulbo di calore prodotto dagli impianti geotermici in raffreddamento attivo (in cui le acque di scarico più calde vengono reiniettate in falda). Ma pur riscontrando importanti variazioni localizzate in prossimità degli impianti, non potevano spiegare l'anomalia termica globale sotto l'intera area della città.

Sono arrivati a concludere che l'effetto è stato in gran parte prodotto dalla perdita di calore conduttivo dei piani interrati degli edifici. Ferguson e Woodbury [2004] hanno dimostrato, riportando le temperature misurate dalle sonde geotermiche, che sotto il vecchio edificato della città, il gradiente geotermico si è invertito (cioè la temperatura diminuisce con la profondità) fino a una profondità di 100 m.

In un certo senso ciò costituisce inquinamento termico, in quanto si tratta di una significativa perturbazione di origine antropica delle condizioni naturali. Da un altro punto di vista può risultare anche benefico, perché la maggiore temperatura del terreno permette agli impianti geotermici in riscaldamento di essere più efficienti. Il rovescio della medaglia naturalmente è che in regime di raffrescamento risultano meno efficienti.

5.5 Impatto per i sistemi open loop

Nei sistemi open loop da falda sotterranea si estrae fisicamente acqua da un acquifero e la si scarica ad un altro recipiente o nello stesso acquifero. Negli Stati membri dell'UE (e di molte altre nazioni) queste attività richiedono un permesso o una licenza, almeno se coinvolgono quantità di acqua superiore a un certo valore di soglia, legato al minimo deflusso vitale del bacino idrico di appartenenza o sono situate in zone di rispetto.

Il permesso per poter realizzare il pozzo di presa viene rilasciato dopo aver presentato la domanda all'ufficio competente e dopo aver acconsentito ad alcune condizioni, quali:

- condurre un'indagine sull'impatto verso gli altri pozzi vicini e verso le caratteristiche ambientali (sorgenti, zone umide) che si basano sulla falda acquifera in oggetto;
- eseguire un programma di test di pompaggio;
- monitorare le caratteristiche qualitative nel corso della prova di pompaggio.

L'ottenimento della licenza per la captazione dell'acqua dipenderà dai risultati della prova di pompaggio e dall'impatto verso gli altri utenti o l'ambiente. Negli acquiferi intensamente utilizzati, tutte le risorse disponibili (come definito nei piani regolatori di bacino) possono essere già destinate. In questo caso, verrà negato il permesso per l'estrazione delle acque sotterranee. Tuttavia, se si propone uno schema doublette, dove le acque termicamente esaurite tornano alla falda acquifera originale, l'organismo di regolamentazione potrebbe essere più incline a dare il consenso all'estrazione. Può anche capitare che a causa della dismissione di diversi impianti di captazione della zona ed il conseguente innalzamento dei livelli delle falde, l'ente di controllo sia propenso ad autorizzare la presa, ma al tempo stesso a negare lo scarico nello stesso acquifero e preferire altre destinazioni (la Provincia di Milano ne è un esempio concreto).

5.5.1 Inquinamento termico delle acque sotterranee

Lo scarico dell'acqua può avvenire in un estuario, in un corpo idrico superficiale (fiume, torrente o lago), in un collettore fognario o addirittura in un'altra falda acquifera. Se si scarica l'acqua in fognatura si dovrà chiedere autorizzazione all'ente che la gestisce (spesso società a totale capitale pubblico) e in genere è necessario pagare una tassa. Se si manda l'acqua su un corpo idrico superficiale o sotterraneo, ci sarà spesso bisogno di un permesso (un "autorizzazione allo scarico") rispettivamente dall'ente di bacino o dalla Provincia di appartenenza. In tutti i casi la temperatura alla quale si può scaricare l'acqua sarà di solito controllata. Inoltre per ottenere tale permesso bisognerà dimostrare che l'acqua immessa non:

- provochi l'inquinamento termico delle acque di superficie, cioè la differenza con la temperatura del corpo idrico non deve essere tale da avere ripercussioni negative sull'ambiente, sugli ecosistemi o sugli utilizzatori a valle di tale immissione;
- causi un cambiamento chimico inaccettabile nelle acque riceventi; si ricorda che le acque sotterranee, anche se incontaminate, possono avere una chimica molto diversa dalle acque di superficie (possono contenere più sali, quantitativi di ossigeno disciolto inferiori o addirittura contenere sostanze naturali come ad esempio l'idrogeno solforato che è tossico);
- contengano sostanze chimiche il cui scarico nell'ambiente è vietato;
- causino cambiamenti inaccettabili di portata nei recipienti, con il rischio di accentuare le onde di piena.

In un sistema doublette l'acqua, dopo aver scambiato il calore con l'impianto, ritorna nella falda acquifera di provenienza tramite un pozzo di scarico posto ad una certa distanza da quello di presa. In questo caso quindi la qualità chimica delle acque restituite dovrebbe essere la stessa di quella estratte. Tuttavia, rimane la questione delle migrazioni di calore (inquinamento termico).

Vi è sia un rischio interno sia esterno di inquinamento termico. Il rischio interno (feedback idraulico), che consiste nel ritorno al pozzo di estrazione del calore o del freddo reiniettato, è stato ampiamente trattato (sottoparagrafo 3.8.3 nella pagina 70). Si tratta essenzialmente di un rischio per il proprietario del sistema, piuttosto che per il regolatore ambientale. Se infatti è eccessivo, il sistema perderà efficienza e diventerà inutilizzabile. Si è anche visto che, a meno che l'iniezione non si trovi lungo la pendenza delle acque sotterranee, ci sarà una limitata perdita di calore. Questo formerà un bulbo termico di acqua calda o fredda che migra lungo la direzione del flusso sotterraneo.

Vi è però il rischio che il bulbo vada ad interessare un altro utente che si approvvigiona dalla stessa falda (potrebbe subire un aumento di temperatura che andrebbe a minare l'efficienza del suo sistema) o un destinatario ambientale (una zona umida, dalla quale dipendono ecosistemi che potrebbero essere sensibili alla temperatura). Il compito del regolatore ambientale dovrebbe essere quello di valutare se questi potenziali rischi a valle del sistema doublette esistano e se l'eventuale impatto termico su di essi sia accettabile o meno.

Ferguson e Woodbury [2004] hanno dimostrato che alcuni sistemi doublette in modalità solo raffrescamento a Winnipeg in Canada, sono stati esposti al rischio interno del feedback idraulico, diventando insostenibili a lungo termine. Gli stessi autori hanno anche preso in esame altri quattro sistemi di raffreddamento osservando come i bulbi termici relativi siano stati sovrapposti tra loro per creare un'area con le acque sotterranee a temperatura maggiore. In altre parole, i quattro sistemi sono stati termicamente e idraulicamente fatti interferire l'uno con l'altro. Hanno concluso che vi è un limite al numero di impianti doublette in solo raffreddamento che un acquifero specifico è in grado di sopportare. Chiaramente questo dipenderà dalla proprietà dell'acquifero e dai fabbisogni termici di ogni sistema, ma nel caso di Winnipeg, Ferguson e Woodbury [2004] raccomandano che i sistemi devono essere distanziati non meno di 500 m gli uni dagli altri (cioè quattro sistemi per chilometro quadrato).

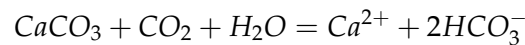
Al momento di decidere se autorizzare un sistema doublette, un regolatore può scegliere di limitare la differenza di temperatura ammissibile tra quella dell'acquifero naturale e l'acqua iniettata. In Manitoba, Canada, le autorità di regolamentazione delle acque sotterranee limitano i sistemi di raffreddamento ad una differenza di 5 °C [Ferguson e Woodbury, 2004]. In Inghilterra al momento non esiste un limite formale, ma le autorità di regolamentazione londinesi stanno iniziando a considerare accettabile un differenziale minore di 10 °C [Banks, 2008].

In Olanda le temperature di iniezione variano da provincia a provincia, ma sono in genere non più fredde di 5 °C e non più calde di 25 °C. La logica alla base di questi vincoli è difficile da capire e può essere correlata a limiti sulla quantità massima di calore estraibile, piuttosto che sulla temperatura.

Infine, tenuto conto dei limiti inerenti alla sostenibilità dei carichi sbilanciati annuali, alcune autorità di regolamentazione stanno iniziando a esprimere una forte preferenza per un equilibrio approssimativo tra il calore estratto e quello reintrodotta nelle falde dai sistemi doublette. In altre parole, stanno promuovendo i sistemi ATES piuttosto che i semplici regimi unidirezionali di riscaldamento o di raffreddamento.

5.5.2 Impatto sulla permeabilità e porosità dell'acquifero

Si deve anche ricordare che il sottosuolo è un ambiente in cui le acque sotterranee reagiscono con i minerali, e che queste reazioni possono essere dipendenti dalla temperatura. Younger [2006] ha ipotizzato che i sistemi geotermici che danno luogo a raffreddamento in una falda acquifera calcarea, possono ragionevolmente portare ad un aumento dei tassi di dissoluzione del calcare, perché la solubilità di biossido di carbonio (l'agente di dissoluzione o l'acido) aumenta man mano che diminuisce la temperatura:



Al contrario per i sistemi in cui l'acqua calda viene scaricata al sottosuolo, si potrebbero manifestare intasamenti della falda acquifera porosa per la maggiore presenza di bolle di gas (molti gas diventano meno solubili quando si riscaldano), o con la precipitazione dei minerali. Il calore in eccesso può anche stimolare la crescita batterica, causando la formazione accelerata di biofilm sugli schermi drenanti o all'interno della stessa falda acquifera. Molto di quanto detto sopra è puramente teorico, tuttavia è necessario approfondire la ricerca empirica in relazione agli impatti dei sistemi geotermici in riscaldamento e in raffreddamento sulla struttura dei materiali che compongono la falda acquifera.

5.6 Impatto per i sistemi closed loop

In molti Paesi non vengono regolamentati, anche quando sono utilizzati in aree di riqualificazione di siti industriali dismessi. Comunque per impianti complessi rientrano nella domanda di licenza edilizia e possono quindi essere soggetti a una forma di controllo da parte della autorità ambientale. Spesso però anche i sistemi di piccole dimensioni possono essere regolamentati.

Vi è il timore che le trivellazioni siano realizzate da ditte poco specializzate e che gli installatori non siano necessariamente e pienamente consapevoli delle varie ricerche che devono essere effettuate prima di iniziare la perforazione di un foro profondo (riassunte nella scheda 5.3 a fronte). Inoltre essi potrebbero non essere a conoscenza dei diversi rischi idrogeologici che possono essere incontrati durante una perforazione grossolana.

5.6.1 Rischi idrogeologici

I principali rischi idrogeologici legati alla perforazione che possono preoccupare le autorità ambientali sono in genere di tre tipi:

- I. *Perforazione in un sito contaminato*, che può connettere l'inquinamento superficiale con l'acquifero durante o dopo la foratura (figura 5.1a nella pagina 127). Al fine di ridurre al minimo questo rischio si dovrebbe:
 - sviluppare un piano di perforazione in accordo con l'autorità ambientale.
 - installare sempre un casing superficiale in acciaio (un involucro intorno al foro), almeno di pochi metri di lunghezza, preferibilmente ben cementato e comprendente tutta la zona di possibile contaminazione superficiale.
 - se la sigillatura superficiale è stata eseguita a regola d'arte, non c'è bisogno di intervenire su tutta la lunghezza della perforazione. Comunque il riempimento con una miscela a bassa permeabilità e ad alta conduttività termica e sigillante fornisce un ulteriore elemento di protezione contro il trasporto di contaminanti e può essere richiesto da alcune normative nazionali o locali.

Scheda 5.3: Prima di iniziare la perforazione [Banks, 2008]

Si devono prendere diverse precauzioni prima di perforare un foro, alcune possono essere prescritte dalla legislazione nazionale, altre sono semplicemente buone pratiche dettate dal buon senso. La seguente lista non è esaustiva, ma aiuta a comprendere i problemi logistici e gli eventuali grattacapi che possono insorgere quando il lavoro di trivellazione non è stato ben pianificato.

- Ottenere il permesso del proprietario o da chi occupa il sito.
- Verificare che l'impianto di perforazione abbia accesso al sito (ad esempio, la capacità portante della strada di accesso).
- Valutare tutti i possibili rischi derivanti dalla perforazione, soprattutto legati alle fondazioni degli edifici limitrofi.
- Stabilire la presenza di contaminanti nel sito e di conseguenza sviluppare un piano specifico in collegamento con le autorità locali ed ambientali.
- Controllare se ci sono limitazioni all'orario lavorativo, dovute al rumore e/o alle vibrazioni.
- Dotarsi di un piano di sicurezza.
- Dotarsi di un permesso rilasciato dal regolatore ambientale, se necessario. Anche se non lo fosse è spesso consigliabile rivolgersi alle autorità ambientali in modo informale, per far sapere la propria intenzione e per ottenere consigli.
- Conoscere l'esistenza e l'esatta ubicazione dei sottoservizi: tubi del gas, linee elettriche, telefoniche o linee di comunicazione, rete idrica, fognature, gallerie di servizio o di trasporto, locali interrati.
- Valutare la presenza e le distanze minime dei tralicci elettrici presenti. Controllare la messa a terra dell'impianto.
- Stabilire se ci sono pozzi o sistemi geotermici nelle vicinanze, che potrebbero essere influenzati dalla trivellazione o dal sistema geotermico.
- Valutare se ci si trova in aree vincolate per la presenza di un pozzo di captazione ad uso idropotabile (in cui le attività e le installazioni sono di norma vietate).
- Considerare come smaltire i residui di perforazione (soprattutto se contaminati).
- Conoscere l'idrogeologia al di sotto del sito, sapere quali strati si potrebbero incontrare e se ci sono più acquiferi indipendenti.
- Stabilire se esiste la possibilità di raggiungere falde in pressione o artesiane e di conseguenza dotarsi di un piano di emergenza.
- Comunicare preventivamente l'inizio dell'indagine e successivamente la fine indagine (o sospensione) mediante compilazione dei "Moduli legge 464-84" da inviare all'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) Servizio Geologico d'Italia Dipartimento Difesa del Suolo. Sono obbligatori per tutte quelle perforazioni, sondaggi meccanici, prove penetrometriche e log geofisici che superano i 30 m di profondità e sono un ottimo mezzo per la conoscenza del territorio andando a tutto vantaggio della collettività.

I consigli esposti si adattano perfettamente ai pozzi per i sistemi open loop ed in parte agli scavi per i sistemi closed loop orizzontali, in particolare quelli riguardanti i terreni contaminati e i sottoservizi.

- II. *Connessione di due falde indipendenti*, che può consentire il flusso delle acque sotterranee da un orizzonte all'altro (figura 5.1b nella pagina 127). Questo può pregiudicare la qualità delle acque e sollevare questioni di compatibilità geochimiche (ad esempio, se un acquifero salino giunge in uno d'acqua dolce). L'interconnessione di falde acquifere rientra nel caso di estrazione illegale (da una falda acquifera) e scarico (ad un'altra) e viene strettamente regolata dalle leggi quadro sulle acque. Il messaggio è chiaro: bisogna conoscere la geologia prima di iniziare la perforazione. Se ci sono più falde acquifere sotto il sito, è preferibile ottenere una consulenza da parte dell'autorità competente per la gestione delle acque sotterranee e sviluppare un piano di perforazione al fine di garantire che:

- l'orizzonte superiore dell'acquifero sia isolato ermeticamente dal casing (che può essere temporaneo, se il foro viene poi stabilizzato);
- una malta a bassa permeabilità o un sigillo di bentonite venga piazzato nel foro tra gli strati confinanti dell'acquifero.

III. *Perforazione di una falda artesianiana*, se non è stato installato un casing adeguato, può essere problematico cercare di controllare la portata d'acqua in uscita (figura 5.1c nella pagina successiva). Una fuoriuscita incontrollata può ridurre significativamente le risorse idriche sotterranee e può essere considerata come un'estrazione illegale ai sensi della legislazione sulle risorse idriche. Se vi è il rischio di incontrare falde in pressione, assicurarsi che il perforatore abbia un piano di emergenza: si deve garantire che un involucro sia saldamente cementato nello strato impermeabile confinante e penetri dentro la falda artesianiana. Anche se questo viene fatto, si deve sempre considerare attentamente come intervenire in caso di guasti (la figura 5.2 a fronte mostra la pressione dell'acqua in uscita da un pozzo artesianiano).

5.6.2 Rischi termogeologici

Quando si estrae calore da una sonda geotermica, si riduce la temperatura della zona attorno al foro. Il raggio di influenza di solito non raggiunge più di 20 m e la maggior parte della variazione sul lungo termine si verifica entro 10 m dal foro. È possibile però che si verifichi una situazione in cui due sistemi closed loop distinti e posti in prossimità tra loro entrino in interferenza termica. Questa eventualità non si è ancora verificata, ma potrebbe essere problematico stabilire la priorità di utilizzo del calore del terreno, anche perché si è visto che il concetto di "risorsa sotterranea di calore" non è definito a livello giuridico.

Alcuni sistemi a sonde geotermiche possono operare a temperature sotto lo zero, creando così zone di terreno ghiacciato attorno al circuito. Questo può avere effetti benefici in termini di maggiore conducibilità termica del terreno, ma può anche avere un impatto geotecnico sulle strutture o sulle proprietà del suolo, specie se è costituito da terreno coesivo. Se il circuito chiuso è situato a ridosso di strutture sensibili, si dovrà progettare e gestire il sistema in modo da evitare il congelamento della terra. Inoltre, le VDI [2001a] consigliano che le parti più fredde di tali sistemi siano distanziate di almeno 70 cm da ogni tubo di rifornimento d'acqua o collettore fognario. Secondo Skarphagen [2006], un criosollevamento di $12 \div 17$ mm è stato misurato attorno al 1980 in un UTES a Luleå in Svezia, che operava ad una temperatura poco superiore ai 60°C.

In modalità raffreddamento si dovrà considerare il rischio potenziale dovuto alla migrazione del vapore e all'essiccazione progressiva (e anche riduzione) dei suoli. Il riscaldamento eccessivo del terreno può anche portare al consolidamento e al creep in terreni argillosi e non consolidati.

Per quanto riguarda l'impatto sulla vegetazione gli effetti sono trascurabili per i sistemi progettati responsabilmente e operanti a basse temperature. Un sistema chiuso orizzontale correttamente dimensionato in una trincea non dovrebbe ritardare il disgelo invernale e la stagione di crescita di un prato di non più di 2 settimane. Tuttavia Skarphagen [2006] raccomanda inoltre di evitare la costruzione di sistemi a circuito chiuso all'interno del raggio della chioma di un albero (che spesso corrispondono a circa il raggio delle radici). Non è chiaro però se questa raccomandazione sia per evitare danni alle radici durante lo scavo o perforazione, o per evitare danni alla pianta, dovuti alle variazioni di temperatura durante il funzionamento. Per i sistemi UTES, le VDI [2001b] suggeriscono che si possono manifestare cambiamenti nelle comunità microbiologiche dei suoli e che si devono identificare i rischi per la macroflora. Invece a temperature superiori ai 60°C si verifica la sterilizzazione del suolo.

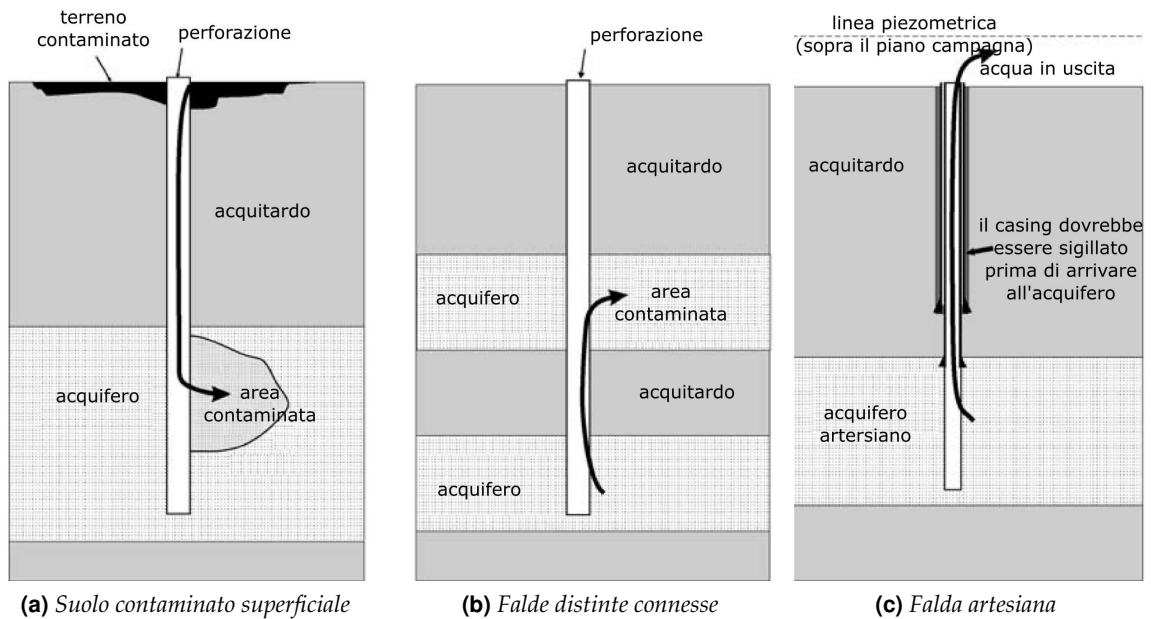


Figura 5.1: Tre esempi di impatto idrogeologico dovuti alla perforazione di una sonda geotermica: (a) perforazione in terreni contaminati che mettono in comunicazione l'inquinante con l'acquifero; (b) perforazione che mette in comunicazione due falde acquifere idraulicamente indipendenti (a meno che il foro sia ingabbiato in un opportuno tubo forma nella falda acquifera superiore, o con una opportuna cementazione/sigillatura nella sezione dove è presente l'acquitardo); (c) penetrazione accidentale di una falda artersiana. Se il tubo forma è stato ben cementato nel terreno impermeabile sovrastante prima della perforazione, qualsiasi flusso d'acqua può essere controllato [Banks, 2008]



Figura 5.2: Flusso incontrollato da un pozzo artersiano a Grado in provincia di Gorizia [foto da graisani.blogspot.com]

5.6.3 Rischi chimici

Si sono già menzionati i rischi nella perforazione dei terreni contaminati, ma va pure ricordato che, nei sistemi a circuito chiuso, vengono fatti circolare nel sottosuolo sostanze chimiche potenzialmente inquinanti. Se la circolazione è diretta (espansione diretta), il fluido frigorifero della PdC circola nel sistema lato terreno. Se è a base di idrocarburi fluorurati, rientra nella categoria degli idrocarburi alogenati, che è tra le sostanze più pericolose che non dovrebbero finire in nessun caso nelle acque sotterranee. Si può sostenere che, fino a quando il circuito chiuso è intatto, non vi siano perdite e nessun reato venga commesso, ma ciò renderà l'iter autorizzativo piuttosto problematico.

Per questo motivo gran parte dei regolatori preferiscono i sistemi a circuito chiuso indiretto, che si è visto usano soluzioni antigelo, a base di sali, glicoli o alcoli, come fluido termovettore. Queste miscele al 20% di antigelo sono facilmente biodegradabili nell'ambiente in caso di perdite e non presentano restrizioni da parte degli enti di controllo ambientale. Il glicole etilenico è spesso usato nei sistemi europei a circuito chiuso: è migliore per proprietà fisiche, ma un po' tossico. Non a caso l'IGSHPA preferisce l'acqua potabile, l'acetato di potassio o le soluzioni di glicole propilenico a causa della loro bassa tossicità, anche se ci possono essere maggiori rischi in termini di corrosività o viscosità. La tossicità dell'antigelo dovrà essere considerata negli impianti situati in ambienti acquatici sensibili, quali: laghi, acque di superficie e falde acquifere.

5.7 Disattivazione dei pozzi e delle sonde

Un foro nel terreno rappresenta una via potenziale per l'ingresso dei contaminanti superficiali che potrebbero compromettere le acque sotterranee profonde. Così, quando sono sovrabbondanti o dismessi, si devono smantellare e non semplicemente abbandonare. Se la trivellazione o il pozzo è aperto vale probabilmente la pena di chiedersi se può interessare alla agenzia regionale, responsabile della gestione delle acque sotterranee, per monitorare la qualità e i livelli della falda. In caso contrario, si dovrà procedere a ricoprirlo, nel rispetto del DPR 236/88 "Norme tecniche per lo scavo, la perforazione, la manutenzione e la chiusura di pozzi d'acqua".

Gli obiettivi principali della disattivazione sono i seguenti:

- eliminare ogni pericolo connesso ad un buco aperto nel terreno;
- rimuovere qualsiasi fluido termovettore dalla sonda;
- rimuovere eventuali installazioni e pompe;
- evitare che l'inquinamento entri direttamente nel sottosuolo;
- impedire che la trivellazione faciliti il flusso delle acque sotterranee, o permetta ai gas come il metano o il biossido di carbonio (entrambi possono costituire un pericolo per la salute), di salire in superficie;
- riportare il terreno ad una condizione vicina al suo stato naturale.

Per raggiungerli si deve limitare l'accesso al sito fino alla sua completa chiusura con la rimozione delle eventuali opere accessorie. Poi, dopo aver ottenuto una copia del modulo originale di perforazione e costruzione, si dovrà chiamare uno specialista per ricoprirlo. Il pozzo può essere riempito nella sua lunghezza da materiali non inquinanti, a bassa permeabilità, come malta o bentonite non restringente. In alternativa, se si conosce la geologia, si può tentare di ricostruire la successione stratigrafica, disponendo materiale pulito e permeabile (sabbia

o ghiaia) lungo l'acquifero, e materiale impermeabile (bentonite o malta) lungo l'acquitardo. Questo preserva l'integrità della struttura idrostratigrafica della falda acquifera e impedisce al pozzo di agire come un canale per il flusso delle acque sotterranee tra gli orizzonti della falda.

La sezione superiore del pozzo, per una profondità maggiore di 2 m, deve sempre essere riempita con calcestruzzo a bassa permeabilità, cemento o malta a medio contenuto di bentonite. In superficie invece si deve disporre di un tappo di cemento con un'estensione maggiore di 0,5 m rispetto al raggio del pozzo (figura 5.3).

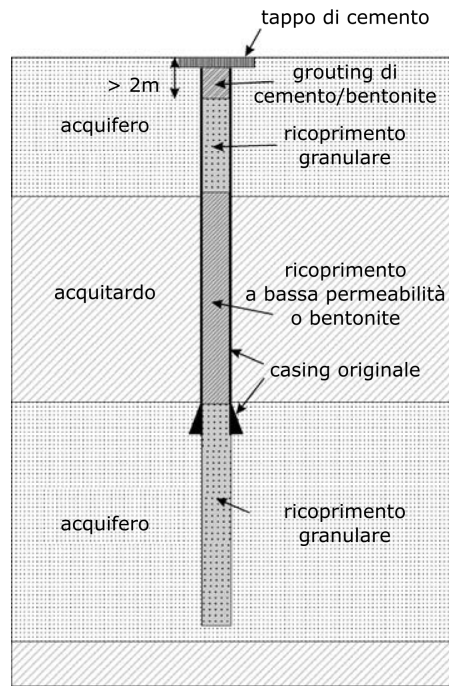


Figura 5.3: Schema semplificato di riempimento di un foro dismesso. Il tipo di materiale impiegato rispecchia la idrostratigrafia del sito (alta permeabilità nelle sezioni dell'acquifero, boiaccia a bassa permeabilità nelle sezioni dell'acquitardo). In alternativa si può ricoprire tutto il foro con una boiaccia a bassa permeabilità, non restringente [Banks, 2008]

La dismissione di una sonda geotermica verticale è un po' più complicata. Se il foro è aperto e pieno d'acqua i tubi ad U vengono rimossi e la trivellazione riempita come descritto per il pozzo. Se le sonde sono state cementate nel foro l'unica soluzione possibile è quella di rimuovere qualsiasi fluido termovettore presente e riempire il tubo ad U con un mix di boiaccia a bassa viscosità, iniettata sotto pressione.

5.8 Vincoli sugli standard costruttivi

Non tutte le normative sono di carattere geotecnico ed ambientale, ma a seguito di trattati internazionali (come il protocollo di Kyoto), molte nazioni stanno cercando di migliorare l'efficienza energetica e di limitare le emissioni di CO₂ per soddisfare gli obiettivi temporali prefissati. Ad esempio la Comunità Europea con la direttiva 2002/91/CE mira a migliorare il rendimento termico degli edifici e la loro efficienza energetica (ovvero la famigerata riduzione di anidride carbonica). La direttiva sottolinea l'importanza della coibentazione invernale e del miglioramento delle prestazioni termiche in estate (come il cooling passivo rispetto a quello attivo).

Questa direttiva europea è stata recepita in Italia con l'emanazione delle *linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici* (decreto del 26 giugno 2009), che quasi tutte le regioni hanno provveduto a rettificare con propri regolamenti attuativi.

Oltre a soddisfare le disposizioni legislative e regolamentari con la certificazione energetica, i Comuni entro il primo gennaio 2011 dovranno inserire nei propri regolamenti edilizi l'obbligo di dotare le unità abitative e gli edifici industriali di nuova costruzione di impianti di energia da fonti rinnovabili in grado di garantire una produzione di almeno 1 kW. Questo limite era stato fissato per il 2009, poi 2010 ed allo stato attuale, con il ddl di conversione del DL 194/2009 "Milleproroghe" approvato dal Senato, lo si è spostato di un ulteriore anno.

Nonostante queste proroghe su un campione di 557 comuni, 406 si sono dotati di un Regolamento Edilizio che prevede l'obbligo, la promozione e/o gli incentivi per quanto riguarda l'uso di energie rinnovabili. I dati sono stati pubblicati nel rapporto "L'innovazione energetica nei regolamenti edilizi comunali" curato da Legambiente e Cresme in collaborazione con Saie Energia. Questo gioca a favore della fonte di climatizzazione geotermica e può essere visto come una delle ragioni principali per la recente stimolazione del mercato geotermico in Italia.

Normative, regolamenti, delibere

Gli impianti geotermici rappresentano una delle tecnologie più efficienti in assoluto per la produzione di energia termica e frigorifera. Nonostante l'importante potenziale, la diffusione e lo sviluppo del mercato trovano notevoli difficoltà e barriere. La principale problematica è rappresentata dall'aspetto burocratico, con un quadro autorizzativo che si sta lentamente delineando, ma risulta ancora confuso e poco chiaro; diverso molto spesso da provincia a provincia, con un atteggiamento verso questa soluzione tecnologica alle volte troppo rigido. Anche l'attuale struttura delle tariffe elettriche, in vigore dal 1 gennaio 2009, penalizza le utenze che superano i 2 641 kWh di consumo annuale (in particolare oltre i 4 000 kWh) e costringono i consumatori che adottano una pompa di calore per la loro abitazione a ricorrere al doppio contatore (ai sensi della Del. AEEG 348/07).

Si partirà dal quadro normativo europeo con le iniziative per l'incentivazione e la standardizzazione dei sistemi geotermici nella Comunità, trattando per sommi capi il caso della Germania e della Svizzera, due Paesi dove il mercato è ben consolidato.

Successivamente si tratterà la situazione legislativa italiana, elencando e descrivendo i principali riferimenti per i sistemi open loop e closed loop, passando in rassegna il caso della Regione Veneto, dove entrambi sono di competenza delle Province.

6.1 Quadro normativo nella Comunità Europea

Attualmente a livello europeo non esiste una normativa tecnica sulle modalità di progettazione dei sistemi geotermici, ma esistono standard e direttive sull'impiantistica interna e sull'installazione delle pompe di calore, che sono i seguenti:

- ▶ ISO 13256-1/2 (2001): Water source heat pumps – testing and rating for performance
- ▶ CEN 15450 (2007): Heating systems in building: design of heat pump heating systems
- ▶ CEN 791 (2001): Drill rigs safety

Alcuni stati, dove i sistemi geotermici si sono affermati da più tempo, hanno emanato proprie normative a riguardo, in particolare la Germania e la Svizzera.

6.1.1 Germania

In Germania le risorse geotermiche rientrano sia nella legislazione mineraria sia in quella delle risorse idriche. L'energia termica in genere non appartiene ad un soggetto privato, ma allo Stato Federale, ed il suo uso deve essere autorizzato dalle autorità per le risorse minerarie, a meno che non sia utilizzata interamente nel luogo in cui essa viene estratta. Esiste anche

una deroga geotermica per le perforazioni con profondità inferiore ai 100 m, non a caso la quasi totalità delle sonde geotermiche installate raggiunge i 99 m [Rybach, 2003].

Ciononostante tutti gli impianti sono soggetti alla legge quadro sulle risorse idriche a livello statale. L'estrazione da falda per i sistemi open loop richiede una licenza, così pure i sistemi closed loop, se provocano cambiamenti di temperatura nelle acque sotterranee che attraversano.

Le principali normative sono:

- ▶ DIN 8901 (2002): Refrigerating systems and heat pumps – Protection of soil, ground and surface water
- ▶ VDI 4640 Blatt 1 ÷ 4 (2000 ÷ 2004): Thermal use of the underground

6.1.2 Svizzera

I sistemi a circuito aperto e chiuso sono in gran parte regolamentati a livello cantonale tramite le leggi sulla tutela delle acque e sulla protezione ambientale. Come ampiamente descritto nel precedente capitolo, il regolatore teme infatti che la trivellazione possa portare sia alla contaminazione delle acque sotterranee, sia agli effetti idraulici dovuti alla interconnessione delle falde. Da rilevare che nelle zone di rispetto, in presenza di pozzi di captazione o di falde di pregio, viene vietata qualsiasi perforazione (tabella 6.1 a fronte). In pratica si regola la geotermia in base al principio di sostenibilità ambientale, attraverso una carta della fattibilità territoriale che suddivide le porzioni di territorio nelle quali si possono realizzare o meno le varie tipologie di impianto, che sono così riassunte:

- zone üB non c'è una falda o non c'è un interesse per un utilizzo delle acque sotterranee per motivi qualitativi o quantitativi. Si tratta del territorio al di fuori del fondovalle e lontano dalle captazioni esistenti. In queste zone è possibile l'installazione di impianti geotermici senza particolari problemi.
- zone A_u e Z_u indicano la presenza di una falda di qualità, qui le possibilità sono limitate e si deve ottenere una licenza.
- zone S1, S2 e S3 sono le aree di rispetto per le captazioni d'acqua ad uso potabile, mentre per le Péri è previsto un futuro emungimento. In queste zone non è possibile l'installazione di impianti geotermici.

Per quanto riguarda i sistemi geotermici le principali normative sono:

- ▶ AWP T1 (2007): Heating system with heat pumps
- ▶ SIA D 0190 (2005): Use of heat through foundation piles
- ▶ SIA 384/6 (2009): Borehole heat exchangers for heating and cooling

Tabella 6.1: Tabella di riferimento per la gestione del calore dal suolo e dal sottosuolo in Svizzera [Eugster, 2009]

Tipo di impianto	zone di protezione						
	üB	A _u	Z _u	Péri	S3	S2	S1
Sonde geotermiche verticali	+ ³	+ ^b	1	–	–	–	–
Circuiti interrati	+ ³	– ⁴	1	– ²⁴	– ^{b 5 4 7}	–	–
Pali energetici ed altri elementi termoattivi	+ ³	+ ^b	1	– ²⁴	– ^b	–	–
Pozzi doublette	+ ³	+ ^b	1	–	–	–	–
Pozzi coassiali	– ⁶	– ⁶	1	–	–	–	–

Legenda:

- +³ Nessun problema idrogeologico, non richiede la licenza ai sensi dell'art. 32 OEaux¹; il rispetto degli altri requisiti di legge rimane però invariato ed è raccomandabile che tutti i Cantoni richiedano una qualche forma di autorizzazione.
- +^b Consentito a discrezione dell'autorità competente, richiede la licenza ai sensi dell'art. 32 OEaux.
- Vietato.
- ^b Vietato, l'autorità competente può concedere una deroga dopo avere esaminato il caso specifico e la documentazione allegata.
- 1 I Cantoni prescrivono le misure da adottare per le aree Z_u, dove si applicano le disposizioni e le limitazioni relative alle zone di tutela e protezione delle acque, in particolar modo per evitare i rischi di connessione idraulica. Se la zona è carsica e in prospettiva può diventare un'area S3, si applicano le disposizioni di quest'ultima, ad eccezione di quelle riguardanti l'estrazione di minerali e lo sfruttamento del calore dal sottosuolo.
- ² In via eccezionale, l'autorità competente può autorizzare la costruzione di un edificio o struttura su un terreno corrispondente ad una futura zona S3 se gli studi idrogeologici hanno già fissato i limiti alle future aree di protezione delle acque sotterranee. Opere o impianti autorizzati eccezionalmente possono essere oggetto di restrizioni previste nella apposita legge di tutela delle acque.
- ⁴ Gli impianti devono essere installati ad almeno 2 m sopra il livello massimo piezometrico della falda.
- ⁵ Non sono ammesse pompe di calore ad espansione diretta, inoltre l'eventuale perdita di fluidi anticongelanti deve essere facilmente rilevabile.
- ⁶ I sistemi a pozzi coassiali (semi-aperti) sono molto pericolosi per le acque sotterranee. Mettono in pericolo lo sfruttamento delle falde acquifere e formano nuove vie di fuga verticali per le quali non è possibile controllare le perdite lungo i pozzi. Le prove geofisiche e idrologiche devono assicurare che non vi sia alcun trasferimento d'acqua tra il suolo e il foro, e viceversa. In caso contrario, non sono ammessi.
- ⁷ In zona S3, dove gli impianti geotermici orizzontali sono superficiali, l'autorizzazione può essere concessa in linea di principio.

6.1.3 Standardizzazione ed incentivazione

L'Unione Europea, con la Direttiva 2009/28/EC, riconosce alle pompe di calore geotermiche il potenziale di energia rinnovabile, in quantità dipendente dall'ammontare di energia ambientale gratuita recepita.

¹Art. 32 OEaux (facente parte dell'Ordinanza per la protezione delle acque del 1998) impone una licenza per tutti quegli impianti situati in zone di particolare interesse e che possono costituire un pericolo per le acque. Con particolare riguardo ai pozzi situati in zone di pregio, l'art. 32 OEaux richiede esplicitamente il rispetto dei requisiti per la protezione delle acque. L'autorità cantonale pone obblighi e condizioni e stabilisce inoltre i requisiti per lo smantellamento degli impianti. Può respingere la richiesta, se non viene garantita una protezione adeguata.

In seguito a ciò, si stanno diffondendo numerosi sistemi di riconoscimento ed incentivazione dell'energia geotermica superficiale. Tra questi si ricordano la formazione del Geothermal Panel a Bruxelles e numerosi progetti europei sul settore.

In particolare il consorzio "Geo-Education for a sustainable geothermal heating and cooling market", meglio noto come *Geotrainet*, in cooperazione con Università e centri di ricerca europei si prefigge lo scopo di formare i professionisti che si occupano della progettazione e dell'installazione degli impianti geotermici. Il progetto prevede anche la creazione di un sistema di certificazione a scala europea sia per progettisti sia per installatori di GSHP [Sanner *et al.*, 2009].

6.2 Quadro normativo italiano

In ambito nazionale è in corso di definizione una normativa standard di riferimento per l'esecuzione delle perforazioni e la progettazione dei sistemi geotermici, ma al momento attuale i riferimenti legislativi che trattano l'argomento più o meno direttamente sono i seguenti:

- ▶ DPR 236/88: Norme tecniche per lo scavo, la perforazione, la manutenzione e la chiusura di pozzi d'acqua
- ▶ D.Lgs. 152/2006: Norme in materia ambientale
- ▶ Legge 99/2009: Disposizioni sullo sviluppo e l'internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia
- ▶ UNI EN 15450 (2008): Progettazione degli impianti di riscaldamento a pompa di calore (visto per sommi capi nel capitolo 2)
- ▶ Legge 464/84: Norme per agevolare l'acquisizione da parte del Servizio Geologico della direzione generale delle miniere del Ministero dell'industria, del commercio e dell'artigianato, di elementi di conoscenza relativi alla struttura geologica e geofisica del sottosuolo nazionale (citata nella scheda 5.3 nella pagina 125)

6.2.1 Open loop

I sistemi che sfruttano direttamente la risorsa idrica per fini termici non sono normati in maniera specifica. Trattandosi però di un flusso d'acqua nello scambiatore della PdC, che avviene attraverso un emungimento ed una restituzione, le norme che si applicano fanno riferimento al DPR 236/88 per la realizzazione del pozzo e a due filoni che in comune hanno poco:

- lo sfruttamento delle acque pubbliche;
- la disciplina degli scarichi.

Se il pozzo avrà una profondità maggiore di 30 m sarà soggetto anche alla legge 464/84, mentre per quanto riguarda le competenze, il T.U. n. 1775/3 e il DPR 616/77 prevedono che sia di competenza regionale la disciplina relativa all'utilizzazione della risorsa idrica per derivazioni con portata fino a $100 \ell s^{-1}$, mentre per derivazioni di portata superiore la competenza fa a capo al Ministero dei Lavori Pubblici.

La legge "Galli" (36/94), il D.Lgs. 112/98 e la legge 183/89 hanno introdotto radicali cambiamenti nell'approccio alla normativa in questione e di fatto hanno moltiplicato gli enti di riferimento con i quali bisogna interfacciarsi. Il trasferimento di molteplici competenze, da

Stato a Regioni, a Province, ad Autorità d'Ambito, ad Autorità di Bacino di rilievo nazionale, regionale ed interregionale, Servizi idrici integrati, ha creato una situazione fortemente disomogenea sul territorio nazionale. Con il risultato che in alcune situazioni territoriali l'utilizzo di sistemi a circuito aperto è incentivato da alcuni anni (come in Provincia di Milano, per sopperire all'innalzamento della falda freatica causato dalla progressiva chiusura delle industrie tessili locali), mentre in altre i tempi di concessione delle autorizzazioni possono richiedere tempi biblici.

Per la gestione dell'acqua a valle della PdC, il riferimento normativo è il D.Lgs. 152/2006 che nell'art. 104 "Scarichi nel sottosuolo e nelle acque sotterranee" afferma:

- c.1 È vietato lo scarico diretto nelle acque sotterranee e nel sottosuolo*
- c.2 In deroga a quanto previsto al comma 1, l'autorità competente, dopo indagine preventiva, può autorizzare gli scarichi nella stessa falda delle acque utilizzate per scopi geotermici, delle acque di infiltrazione di miniere o cave o delle acque pompate nel corso di determinati lavori di ingegneria civile, ivi comprese quelle degli impianti di scambio termico*

Inoltre l'art.98 "Risparmio idrico", seppur non riferendosi direttamente agli impianti geotermici, cita una buona norma per l'uso sostenibile delle risorse idriche:

- c.1 Coloro che gestiscono o utilizzano la risorsa idrica adottano le misure necessarie all'eliminazione degli sprechi ed alla riduzione dei consumi e ad incrementare il riciclo ed il riutilizzo, anche mediante l'utilizzazione delle migliori tecniche disponibili.*

6.2.2 Closed loop

La legislazione nazionale in tema di impianti geotermici a circuito chiuso accoppiati a pompa di calore è attualmente molto poco sviluppata e di fatto discende dalla normativa sulla realizzazione di pozzi e sulle perforazioni. L'11 febbraio 2010 è stato approvato il D.Lgs. 22/2010 "Riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche, a norma dell'articolo 27, comma 28, della legge 23 luglio 2009, n. 99". Con questo decreto (pubblicato in GU n. 45 del 24/02/2010) che è entrato in vigore l'11/03/2010 il governo ha introdotto un primo elemento di chiarezza sull'applicazione della geotermia a bassa temperatura nel Paese:

Tutti gli impianti di potenza inferiore a 2 MW_t – sia a circuito aperto sia chiuso – vengono definiti piccole utilizzazioni locali e sono di competenza delle Regioni (o degli Enti da esse delegate) con funzioni amministrative, comprese quelle di vigilanza.

La legge 99/2009, oltre al precedente decreto (comma 28 dell'art.27), prevede l'uscita di un altro al comma 39 del medesimo articolo che recita:

Entro sei mesi dalla data di entrata in vigore della presente legge, il Ministro dello sviluppo economico, di concerto con il Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e con il Ministro delle infrastrutture e dei trasporti, di intesa con la Conferenza unificata [...], emana un decreto volto a definire le prescrizioni relative alla posa in opera degli impianti di produzione di calore da risorsa geotermica, ovvero sonde geotermiche, destinati al riscaldamento e alla climatizzazione di edifici, per cui è necessaria la sola dichiarazione di inizio attività.

I sei mesi dall'entrata in vigore della legge 99/2009 sono però trascorsi, ma di questo decreto ancora non vi è traccia. È evidente comunque la volontà del governo di semplificare l'iter autorizzativo in modo da favorire la diffusione di tali impianti, tanto da proporre la sola D.I.A.

e disciplinare finalmente il settore in modo chiaro ed omogeneo. Ciò va però in contrasto con i propositi ma soprattutto con le competenze delle Regioni in materia di difesa del suolo e tutela delle acque e quindi attorno a questo nodo è probabile che si sviluppi una profonda discussione.

In teoria anche prima di questo decreto la regolamentazione degli impianti geotermici a pompa di calore veniva derogata alle Regioni in materia di difesa del suolo e tutela delle acque (D.Lgs. N. 112 del 31 marzo 1998), anche se non ne viene fatta menzione specifica nelle leggi nazionali in materia di acque e difesa del suolo né nel Testo Unico Ambientale (D.Lgs. 152/2006). Di fatto però solo alcune Regioni o Province Autonome hanno definito procedure in merito.

6.3 D.Lgs. 22/2010

Il recente decreto ha il merito di abrogare in toto la preesistente Legge 896/1986 sulla "Disciplina della ricerca e della coltivazione delle risorse geotermiche". Vengono anche semplificate in minima parte le procedure per l'installazione dei piccoli impianti con sonde geotermiche, un settore fino ad oggi ignorato dal legislatore nazionale.

Classificazione e tipologie di impianti

In primo luogo vengono classificate le tre tipologie di geotermia, a seconda della temperatura dei fluidi:

1. Alta entalpia, $T > 150^{\circ}\text{C}$
2. Media entalpia, $90^{\circ}\text{C} \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$
3. Bassa entalpia, $T < 90^{\circ}\text{C}$

A seconda della temperatura del fluido, ma anche della taglia dell'impianto, viene stabilito che:

- Sono d'interesse nazionale le risorse geotermiche ad alta entalpia che possono assicurare una potenza erogabile complessiva di almeno 20 MW_t , nonché tutte quelle rinvenute in aree marine
- Sono d'interesse locale le risorse geotermiche a media e bassa entalpia di potenza inferiore a 20 MW_t

Piccole utilizzazioni locali

Nell'art. 10 vengono classificate e dotate di un iter autorizzativo distinto le due piccole utilizzazioni locali: quelle funzionanti con prelievo di acque calde e quelle che scambiano il calore con il terreno. Le Regioni (o enti da esse delegati) vengono individuate come *le autorità competenti per le funzioni amministrative, comprese le funzioni di vigilanza, riguardanti le piccole utilizzazioni locali di calore geotermico*.

Con prelievo di fluidi o acque calde

Secondo il decreto:

[...] sono piccole utilizzazioni locali di calore geotermico quelle per le quali sono soddisfatte congiuntamente le seguenti condizioni:

- consentono la realizzazione di impianti di potenza inferiore a 2 MW_t , [...]
- sono ottenute mediante l'esecuzione di pozzi di profondità fino a 400 m per ricerca, estrazione ed utilizzazione di fluidi geotermici o acque calde [...], per potenza termica complessiva non superiore a 2 MW_t , anche per eventuale produzione di energia elettrica con impianti a ciclo binario ad emissione nulla.

Queste piccole utilizzazioni locali "sono concesse dalla Regione territorialmente competente con le modalità previste dal testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e impianti elettrici, di cui al regio decreto 11 dicembre 1933, n.1775", per questo tipo di impianti, quindi, il decreto non prevede in realtà alcuna vera semplificazione, dal momento che è richiesta, così come è avvenuto fino ad oggi, la concessione di derivazione d'acqua ai sensi di una legge risalente agli anni 30.

È però esplicitamente previsto che questa tipologia di impianti, se di potenza inferiore a 1 MW_t , sia "esclusa dalle procedure di verifica di assoggettabilità ambientale".

Senza prelievo di fluidi o acque calde

Secondo il decreto:

sono altresì piccole utilizzazioni locali di calore geotermico quelle effettuate tramite l'installazione di sonde geotermiche che scambiano calore con il sottosuolo senza effettuare il prelievo e la reimmissione nel sottosuolo di acque calde o fluidi geotermici.

Questi impianti, che sono tra i più diffusi, "sono sottoposti al rispetto della specifica disciplina emanata dalla regione competente, con previsione di adozione di procedure semplificate". Al momento però quasi nessuna regione italiana ha discipline specifiche in materia. La situazione quindi appare ancora molto incerta.

Si noti che il riferimento alla "previsione di adozione di procedure semplificate" ricorda che manca all'appello ancora un decreto, perché le regioni possano deliberare nel rispetto della normativa nazionale, o adeguare le proprie regole esistenti. Inoltre anche questa tipologia di impianti viene esplicitamente "esclusa dalle procedure di verifica di assoggettabilità ambientale".

6.4 Regione Veneto

Da quanto visto gli impianti geotermici rientrano nelle competenze delle Regioni, si approfondiranno allora le ultime delibere in materia di sistemi open loop e closed loop per la Regione Veneto.

6.4.1 Open loop

Per questi sistemi geotermici si fa riferimento al Dgr n. 4105 del 29 dicembre 2009 "Disposizioni in merito alle modalità di riconoscimento di uso delle risorse geotermiche". Per quanto riguarda la concessione, la realizzazione ed il successivo prelievo di acqua di falda sono di competenza del Genio Civile (quindi della Regione), come ribadito nel suddetto decreto regionale:

L'istruttoria relativa alle concessioni di piccole utilizzazioni locali è stata attribuita con DGR n. 2306 del 22/06/1998 al Genio Civile regionale competente per territorio.

Inoltre:

Fino all'entrata in vigore della L. 23/07/2009, n. 99, di abbassamento a 15°C della temperatura convenzionale dei fluidi geotermici, il Genio civile regionale ha istruito e rilasciato le concessioni di derivazione di acqua per scambio termico per temperature inferiori a 25°C.

La realizzazione del pozzo poi deve seguire tutte le prescrizioni del DPR 236/88, mentre lo scarico invece è di competenza della Provincia, come documentato nel Piano di Tutela delle Acque, di cui all'art. 121 del D.Lgs 152/2006, approvato dalla Regione con deliberazione del Consiglio regionale n. 107 del 5/11/2009, che stabilisce all'art. 31 "Scarichi nel sottosuolo" delle Norme tecniche di attuazione:

1. *È vietato lo scarico diretto nelle acque sotterranee e nel sottosuolo.*
2. *In deroga al divieto, la Provincia, dopo indagine preventiva, può autorizzare gli scarichi nella stessa falda dalla quale sono state prelevate, delle acque utilizzate per scopi geotermici, delle acque di infiltrazione di miniere o cave e delle acque pompate nel corso di determinati lavori di ingegneria civile, ivi comprese quelle degli impianti di scambio termico, purché siano restituite in condizioni di qualità non peggiori rispetto al prelievo. La Provincia può autorizzare altresì, dopo indagine preventiva anche finalizzata alla verifica dell'assenza di sostanze estranee, gli scarichi nella stessa falda delle acque utilizzate per il lavaggio e la lavorazione degli inerti, purché i relativi fanghi siano costituiti esclusivamente da acqua e inerti naturali ed il loro scarico non comporti danneggiamento della falda acquifera. All'istanza di autorizzazione deve essere allegata una valutazione dell'impatto sulla falda, dalla quale risulti la compatibilità ambientale dello scarico nel corpo recipiente. L'autorizzazione allo scarico in falda dovrà prevedere la prescrizione dei controlli qualitativi sull'acqua prelevata e su quella restituita, specificandone frequenza e modalità. A tal fine l'ARPAV, a spese del soggetto richiedente l'autorizzazione, accerta le caratteristiche qualitative delle acque di scarico esprimendosi con parere vincolante sulla richiesta di autorizzazione allo scarico. Nel caso di scarico di acque nel sottosuolo va assicurato l'isolamento degli acquiferi non interessati dallo scarico stesso.*

Quindi per realizzare un impianto doublette che prevede la presa e lo scarico nella stessa falda ci sarà bisogno di muoversi su due fronti:

- domanda di autorizzazione alla derivazione di acque pubbliche presso il Genio;
- domanda per l'autorizzazione allo scarico presso la Provincia.

Concessione derivazione acque pubbliche

L'ufficio competente per la presentazione della concessione di derivazione di acque sotterranee è il Genio Civile che predisponde di opportuna modulistica che dovrà essere presentata (un originale in bollo e tre copie semplici) e dovrà essere accompagnata da:

- 1) relazione tecnica a firma di un professionista abilitato e controfirmato dal richiedente (un originale e tre copie) che dovrà comprendere:
 - una premessa dalla quale risulti se l'istanza è riferita a nuova realizzazione o variante di concessione esistente;
 - la descrizione della zona sito, località, comune, dati catastali in cui è prevista l'installazione;
 - la dichiarazione circa l'uso per il quale si rende necessario l'impiego dell'emungimento, con la descrizione accurata del processo tecnologico, stima dell'acqua prelevata con profilo calcolato sulle 24 ore giornaliere per 365 giorni all'anno;

- la prova documentata dell'ampia disponibilità della risorsa idrica (non si precisa in maniera numerica cosa si intenda per ampia);
- la giustificazione per cui si ricorre all'utilizzo dell'acqua di falda (questa richiesta è mutuata dall'idea dell'utilizzo industriale, non essendo ancora stato definito un uso geotermico);
- la descrizione di massima delle apparecchiature di sollevamento idrico (opere di presa, filtri, contatori, accumuli, linee di adduzione, etc.);
- autorizzazione allo scarico tramite richiesta alla Provincia di competenza.

2) uno studio idrogeologico a firma di un professionista abilitato e controfirmato dal richiedente (un originale e tre copie) che dovrà comprendere:

- descrizione geo-lito-idrogeologica della zona interessata all'emungimento;
- presunta stratigrafia delle formazioni geologiche interessate;
- verifica di eventuale interferenze con altri pozzi limitrofi o corpi idrici superficiali;
- corografia della zona interessata;
- estratti di mappa, disegni e planimetrie.

Ogni struttura del Genio Civile regionale, ai fini dell'ottenimento dell'autorizzazione all'emungimento di acque per scopi energetici, identifica con propria definizione tale utilizzo e richiede eventuali integrazioni alla documentazione esposta più sopra.

Il Genio Civile verifica la completezza della documentazione trasmessa, comunicando al richiedente eventuali integrazioni. Una volta che la domanda è corredata di tutti gli elaborati tecnici, la stessa viene inviata alla Autorità di Bacino competente per l'acquisizione del parere in ordine alla compatibilità dell'emungimento con il Piano di Tutela delle Acque regionale.

Acquisito il parere dell'Autorità di Bacino, l'ufficio del Genio Civile individua ulteriori pareri da chiedere per il completamento dell'istruttoria (province, consorzi di bonifica, soggetti privati titolari di concessione all'emungimento nella zona interessata, vigili del fuoco, etc.). In questa fase viene anche verificata l'autorizzazione allo scarico che va presentata contestualmente alla domanda di captazione.

Visto che la domanda di concessione richiede l'esame contestuale da parte di svariati interessi pubblici, il responsabile del procedimento ha facoltà di indire una conferenza dei servizi. Questo passaggio allunga ulteriormente i tempi per l'ottenimento dell'autorizzazione. Si arriva finalmente al sopralluogo da parte degli Enti interessati, che nel caso possono richiedere ulteriori approfondimenti e quindi alla concessione all'emungimento.

La concessione prevede un disciplinare con clausole e condizioni di emungimento. Il disciplinare di concessione si articola nei seguenti elementi:

- dati del concessionario;
- quantità di acqua da derivare (il Piano di Tutela delle Acque per l'uso industriale fissa la portata media su base annua non superiore ai $3 \ell s^{-1}$);
- portata massima istantanea;
- uso a cui è destinata la risorsa idrica;
- localizzazione della presa;
- descrizione delle opere di emungimento ed eventualmente di restituzione;
- termini per l'esecuzione dei lavori;
- la durata della concessione (nessun ente prevede l'uso esplicito energetico, per cui la concessione è valida per massimo 7 anni);
- modalità e termini per il rinnovo e obblighi per l'eventuale dismissione;

- importo del canone annuo (viene stabilito in funzione dell'uso dell'acqua, della quantità emunta e dell'eventuale restituzione nel medesimo corpo idrico);
- indicazioni sui contatori;
- prescrizioni generiche.

Qualora gli enti rispettassero le tempistiche previste dalla legge, il tempo necessario per l'ottenimento o il diniego alla concessione da parte del Genio Civile, non dovrebbe superare i 180 giorni (più ulteriori 60).

Autorizzazione allo scarico

Si è visto che è disciplinato all'art. 31 "Scarichi nel sottosuolo" comma 2 delle Norme tecniche di attuazione, ma non viene definito chiaramente quali sono le caratteristiche qualitative che l'acqua deve avere per poter essere restituita alla falda e soprattutto i ΔT relativi.

Comunque lo scarico in un corpo idrico viene autorizzato dalle province che predispongono di propria modulistica, nella quale vanno indicati:

- i dati anagrafici del richiedente;
- le modalità e la durata dello scarico;
- eventuali sistemi di ricircolo o di accumulo;
- modalità e sistemi di emungimento;
- planimetrie e mappe dell'area interessata;
- valutazione dell'impatto sulla falda, dalla quale risulti la compatibilità ambientale dello scarico nel corpo recipiente e le precauzioni intraprese per l'isolamento degli acquiferi non interessati dallo scarico stesso.

La richiesta di autorizzazione allo scarico viene evasa mediamente in 60 ÷ 120 giorni ed ha una validità di 4 anni.

6.4.2 Closed loop

In generale per la realizzazione del foro non è obbligatorio seguire il DPR 236/88 "Norme tecniche per lo scavo, la perforazione, la manutenzione e la chiusura di pozzi d'acqua", che può essere comunque un riferimento. L'azienda addetta alle perforazioni e all'installazione delle sonde fornisce comunque tutto il supporto necessario a livello normativo e burocratico e sarà soggetta alla Legge 464/84 se la trivellazione supererà i 30 m di profondità.

La Regione tratta il tema delle sonde geotermiche nel Piano Tutela Acque (PTA), approvato con deliberazione del Consiglio regionale n.107 del 5 novembre 2009, all'art. 31, comma 3, che stabilisce

Ai fini della protezione delle acque sotterranee, la realizzazione di sistemi di scambio termico con il sottosuolo che non prevedano movimentazione di acqua di falda è autorizzata dalla Provincia.

Appare quindi evidente che per la realizzazione di impianti con sonde geotermiche è necessario un procedimento autorizzativo e che la competenza di tale iter è della Provincia. Attualmente i vari regolamenti provinciali sono in fase di definizione e l'unico formalmente approvato è quello della Provincia di Treviso, così come appare nell'analisi di Minchio [2009].

Provincia di Treviso

Il "Regolamento per la realizzazione di impianti di scambio termico mediante l'utilizzo di sonde geotermiche a circuito chiuso" prevede la distinzione degli impianti in due categorie, impianti di tipo A (di potenza termica inferiore a 30 kW o a sonde orizzontali) e impianti di tipo B (di potenza superiore a 30 kW).

I divieti posti sono relativi a siti posizionati, in un primo caso, entro un raggio di 100 m da pozzi o sorgenti adibite a prelievo di acqua a scopo potabile e regolarmente autorizzati, oppure in un secondo caso all'interno della zona di rispetto di un'opera di approvvigionamento idrico pubblico, sia essa un pozzo che una sorgente, così come definita dall'art. 94 del Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152.

È prevista la presentazione di una domanda di autorizzazione, corredata da documentazione tecnica e relazione geologica (nei casi specificati); al termine dei lavori si dovrà produrre il certificato di regolare esecuzione a firma del Direttore Lavori e di un Geologo (quando è presentata la relazione geologica) nonché il certificato di collaudo a tenuta delle sonde geotermiche.

Le tempistiche sono chiare, definite in 45 giorni (con sospensione dei termini in caso di richiesta di chiarimenti) ed è previsto il meccanismo del *silenzio assenso*. Il regolamento prevede infine sanzioni in caso di inadempienza da 2 000 a 6 000 €, fatte salve le eventuali responsabilità civili o penali che la realizzazione delle sonde abbia eventualmente comportato.

Provincia di Vicenza

Il caso della Provincia di Vicenza è piuttosto noto ed è da tempo che vi è un'accesa discussione su questa tematica. Il tutto ha avuto origine con la pubblicazione dell'art. 34 del P.T.C.P. (Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale) che inizialmente vietava la realizzazione di sonde geotermiche che intercettassero falde ad uso potabile o fossero installate in terreni non isolati dalle falde potabili sottostanti.

Vista la peculiarità del territorio vicentino, il cui sottosuolo è particolarmente ricco d'acqua, ciò avrebbe comportato l'impossibilità di realizzare sonde geotermiche in gran parte delle zone urbanizzate della Provincia. Per questo la Provincia di Vicenza, dopo le rimostranze esplicitate dagli Ordini e dalle categorie professionali interessate, ha fatto marcia indietro e ha promosso la creazione di un regolamento provinciale per il circuito chiuso.

Attualmente è in fase di verifica e concertazione questa proposta di regolamento, ispirata alle peculiari problematiche idrogeologiche del territorio vicentino e rapportata alle problematiche ambientali della geotermia. Dalle ultime indiscrezioni si attende la realizzazione di uno studio che porti alla definizione di una zonizzazione con relativa classificazione e definizione delle zone di divieto, zone con limitazioni e relative prescrizioni tecniche. Si dovrà attendere probabilmente la primavera del 2010 per la pubblicazione del regolamento.

È auspicabile che l'eccessiva rigidità non porti alla definizione di regolamenti la cui attuazione sia poco pratica o economicamente proibitiva o ancor peggio caratterizzati dal divieto sistematico all'installazione. Le sonde geotermiche sono una soluzione tecnologica che comporta un rischio di danno ambientale molto basso ma consente al contrario un miglioramento ambientale certo e consistente.

Altre Province

La situazione nelle altre Province è in fase di definizione pertanto, chi fosse interessato a realizzare un impianto geotermico, deve contattare i competenti uffici Provinciali (alcuni, in particolare a Venezia e Padova, rilasciano dei moduli per la richiesta di autorizzazione pur in assenza di un regolamento formalmente approvato).

6.5 I sistemi di incentivazione e standardizzazione attuali

A livello nazionale, per affrontare i costi iniziali relativi alla ristrutturazione di un edificio e per renderlo efficiente dal punto di vista energetico, possono venire in aiuto gli incentivi della Legge Finanziaria 2008, che ha confermato fino al 2010 le agevolazioni fiscali della Finanziaria 2007 relative al risparmio energetico, introducendone anche di nuove. In molti casi questi incentivi superano la metà dei costi, come nel caso degli impianti geotermici, dove si prevede la detrazione del 55%; sono previsti inoltre incentivi finanziari per reti di teleriscaldamento alimentate ad energia geotermica.

- ▶ Legge 24 dicembre 2007, n. 244 (legge finanziaria 2008): Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato

Per quanto riguarda la standardizzazione si sono aperti molti tavoli di discussione, a livello regionale e professionale, come il Progetto Strige nel Veneto e il gruppo di lavoro del Comitato Termotecnico italiano.

Il *progetto Strige*, affidato dalla Regione Veneto all'ARPAV, si prefigge lo studio per la razionalizzazione degli utilizzi delle risorse geotermiche nel Veneto mediante prelievi di acqua. Prevede di completare l'analisi delle risorse geotermiche potenzialmente disponibili, realizzato dal Consorzio di Bonifica Pianura Veneta tra Livenza e Tagliamento, denominato "Indagine sulle acque sotterranee del portogruarese", nelle restanti parti del territorio veneto. Inoltre ha come obiettivi:

- il censimento degli utilizzi geotermici su data base cartografico;
- le linee guida per l'utilizzo sostenibile della risorsa;
- la definizione dei bacini geotermici del Veneto;
- lo studio di interventi regionali per la conservazione e la ricarica delle falde acquifere.

Il Comitato Termotecnico Italiano invece, con il gruppo di lavoro GL 608 *Impianti geotermici a pompa di calore* si sta occupando della scrittura di norme tecniche italiane relative a progettazione, installazione, controllo, collaudo, gestione ed impatto ambientale per questa tipologia di impianti. Tale attività sarà probabilmente un importante base e supporto per l'elaborazione del decreto a livello nazionale previsto dalla legge 99/2009.

Possibilità geotermiche del Polesine

Conoscere le proprietà naturali e fisiche del proprio territorio è un passaggio obbligato per realizzare un sistema geotermico, sia per l'orientamento alla scelta della tipologia (open o closed loop), sia per il corretto dimensionamento. Si cercherà allora di inquadrare dal punto di vista geografico, geologico e idrogeologico il territorio della Provincia di Rovigo.

Ovviamente le informazioni qui riportate hanno una valenza generale e dovranno essere poi approfondite con opportune indagini in situ e con informazioni presenti nella letteratura tecnica locale. In questa sede si analizzeranno le potenzialità e le criticità del territorio polesano, facendo riferimento al Piano di Tutela Acque della Regione Veneto, alla V.A.S. del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) e ai risultati del progetto SAMPAS dell'ARPAV regionale.

In conclusione di capitolo si riassumeranno le caratteristiche offerte dal territorio in funzione di quanto evidenziato per la realizzazione degli impianti geotermici a circuito aperto e chiuso e si forniranno alcune valutazioni per un uso corretto del sottosuolo provinciale.

7.1 Inquadramento geografico

La provincia di Rovigo copre una superficie territoriale di 1 788 km² nella parte meridionale della Regione Veneto, al confine con le Regioni Lombardia (Provincia di Mantova) ed Emilia Romagna (Provincia di Ferrara). A nord confina con le Province Venete di Verona, Padova e Venezia. È interamente pianeggiante ed attraversata da una intricata rete idrografica di fiumi (Po ed Adige in primis), canali di bonifica e nella parte orientale, la zona deltizia del Po, è occupata da circa 180 chilometri quadrati di superfici vallive e lagunari (nel loro complesso fiumi e canali costituiscono quasi il 10 % del territorio provinciale).

La temperatura media annuale che corrisponde grossomodo alla zona di omotermia, ovvero alla porzione di terreno posta ad una profondità compresa tra i 10 ÷ 15 m dal piano campagna, si attesta attorno ai 13 °C come evidenziato nel paragrafo 1.8 nella pagina 18. A maggiore profondità si possono citare i risultati dei rilievi eseguiti dall'Agip nel 1967 che evidenziano zone di isotermia a 2 000 m di profondità comprese tra i 50 e i 70 °C (figura 1.5 nella pagina 10).

Patassini *et al.* [2008] suddividono il territorio provinciale in quattro settori di vincoli paesaggistici e ambientali (figura 7.1 nella pagina seguente), ciascuno caratterizzato da una propria identificazione generale, da una caratterizzazione del tipo di paesaggio, dalle principali dinamiche di trasformazione e dagli obiettivi di qualità paesaggistica. In ogni settore esistono delle aree di interesse naturalistico, storico e culturale dove l'autorizzazione per i sistemi geotermici potrebbe essere negata, anche dopo la presentazione di una valutazione di impatto ambientale.

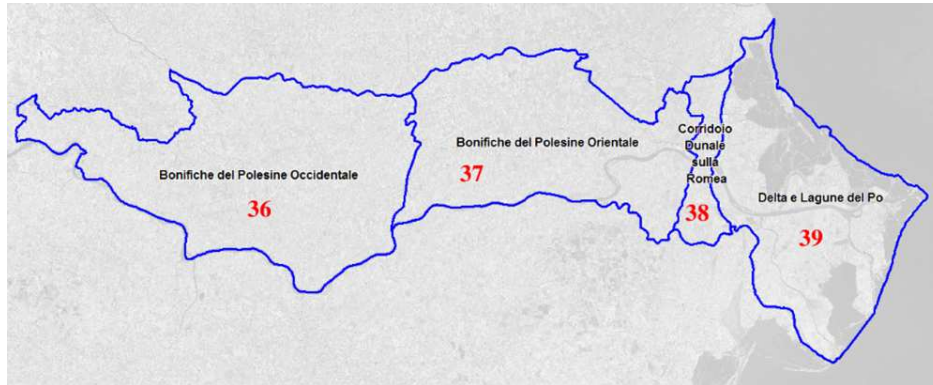


Figura 7.1: Gli Ambiti di Paesaggio individuati da Patassini *et al.* [2008] e così classificati:

- n.36 – Bonifiche del Polesine Occidentale;
- n.37 – Bonifiche del Polesine Orientale;
- n.38 – Corridoio Dunale sulla Romea;
- n.39 – Delta e Lagune del Po.

7.1.1 Considerazioni geomorfologiche

Le pianure alluvionali hanno sempre attirato l'attenzione dell'uomo, dato che costituiscono un ambiente particolarmente favorevole per gli insediamenti. Sono costituite da un complesso di unità morfologiche, tra cui si ricordano i corpi di canale, le forme di meandro, le barre fluviali, gli argini, le depressioni ed i ventagli di rota, che portano all'origine di strutture sedimentarie caratteristiche.

Il Polesine è attraversato dai due principali fiumi italiani (Po e Adige) che, oltre ad averlo formato e modellato, come testimoniano i numerosi paleoalvei presenti in superficie ed in profondità, lo hanno reso un luogo interessante per lo sviluppo antropico e lo mettono in stretto contatto con il vicino mare Adriatico.

7.2 Inquadramento geologico

La pianura veneto friulana e anche tutta l'area che comprende il mare adriatico, dalle Alpi Dinariche agli Appennini, è frutto di una formazione di depositi e sedimenti marini che nel corso delle ere geologiche, dal paleozoico–mesozoico epoche del probabile inizio della formazione (circa 400 ÷ 250 milioni di anni fa), al miocene e quaternario (circa 6,5 milioni di anni fa), è sempre più aumentata di consistenza fino a raggiungere oggi lo spessore di circa 6000 m, per questo essa viene appunto chiamata piattaforma mesozoica veneto–friulana. Questo intervallarsi di argille, ghiaie e sabbie anche fino a profondità di 2000 m e oltre, ha permesso alle falde acquifere di confinarsi in molti strati ad elevata permeabilità, racchiudendole tra argille pressoché impermeabili [Drigo, 2005].

La provincia di Rovigo rientra nel "sistema dell'Adige: pianura olocenica con apporti del Po" [Bondesan *et al.*, 2004], dove i depositi alluvionali ghiaiosi profondi si assottigliano sempre più, fino ad esaurirsi. Secondo Desio [2003] il sottosuolo del Polesine è caratterizzato da una grande eterogeneità di sedimentazione sia in direzione verticale, sia in direzione orizzontale. Si alternano cioè verticalmente e si sostituiscono lateralmente strati più o meno potenti ed estesi di sabbia, limo ed argilla, con qualche episodio conglomeratico e torboso, che rappresentano ambienti sedimentari diversi, marini, continentali e di transizione, i quali si sono succeduti nel tempo e nello spazio a partire dal Terziario sino a tutto il Quaternario. Per quanto riguarda gli strati più superficiali, Patassini *et al.* [2009] mostrano in una opportuna carta il territorio provinciale per classi litologiche, dando una descrizione macroscopica e

dell'affioramento con riferimento sia alle rocce che ai sedimenti come caratteristiche generali del territorio provinciale (figura 7.2).

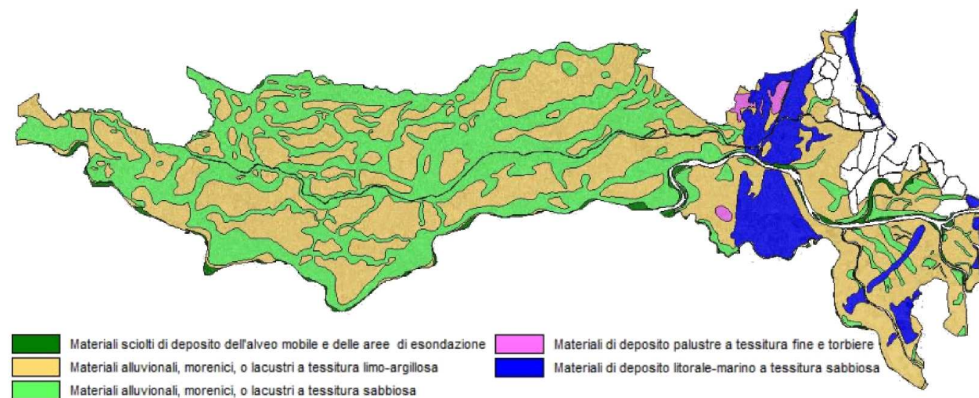


Figura 7.2: Carta litologica della Provincia di Rovigo [Patassini *et al.*, 2009]

7.3 Inquadramento idrogeologico

Le caratteristiche strutturali del materasso alluvionale, descritte precedentemente, condizionano fortemente la situazione idrogeologica del Veneto. Dai dati delle perforazioni dell'AGIP si osserva che nella zona di Media e Bassa Pianura è confinato un sistema di falde acquifere sovrapposte anche a modesta profondità, alla cui sommità esiste localmente una piccola falda libera. I materiali sciolti della Media e Bassa Pianura, che rappresentano gli acquiferi e gli acquitardi, presentano spessori ancora più rilevanti. Per esempio nel bacino orientale gli spessori sono dell'ordine di 1 500 m. Nel settore occidentale, soprattutto in direzione SE verso il mantovano, gli spessori superano i 2 500 m. Infine nella zona del Delta del Po le alternanze di acquiferi ed acquitardi raggiungono spessori di oltre 3 000 m [Boscolo e Mion, 2008].

Le profondità dei vari acquiferi (se ne contano 7 nei primi 400 m) sono indicative, in quanto la necessità di essere rappresentative di un'area così vasta penalizza la diversità intrinseca nella situazione stratigrafica delle varie aree; in ogni zona ci possono essere delle variazioni negli spessori e nel posizionamento dei singoli orizzonti acquiferi. Nella Bassa Pianura esiste una falda freatica superficiale limitata e con evidente discontinuità laterale, al di sotto della quale si rinvenivano delle falde confinate sovrapposte. In questo caso, però, sia la falda libera, sia quelle confinate sono ospitate in acquiferi a granulometria sabbiosa, più o meno fine, per lo meno fino ad una profondità di circa 300 m. Le falde in pressione di Bassa Pianura sono collegate idraulicamente agli acquiferi confinati della Media Pianura.

In relazione alle caratteristiche qualitative delle acque presenti in questi materiali sciolti è possibile evidenziare che con l'aumento della profondità compaiono entro la copertura acque salmastre e salate. In Provincia di Rovigo, il contatto acqua dolce-salata raggiunge i 100 ÷ 200 m dal piano campagna (Stanghella 1, Villadose 1 e 3, Grignano 1, Codevigo 1). Nella zona della pianura alluvionale occidentale invece l'interfaccia si posiziona attorno a 400 m [Boscolo e Mion, 2008].

Il sistema idrogeologico si basa quindi su acquiferi che appartengono alla falda freatica o superficiale e acque più sotterranee che appartengono alla categoria delle falde in pressione. Su quasi tutta la Provincia, ad eccezione delle zone rivierasche dell'Adige, le falde freatiche fanno capo al corso del fiume Po e si trovano a limitata profondità (0,5 ÷ 3 m), con bassi

gradienti idraulici e direzione principale di deflusso da ovest ad est come riportato in figura 7.3.

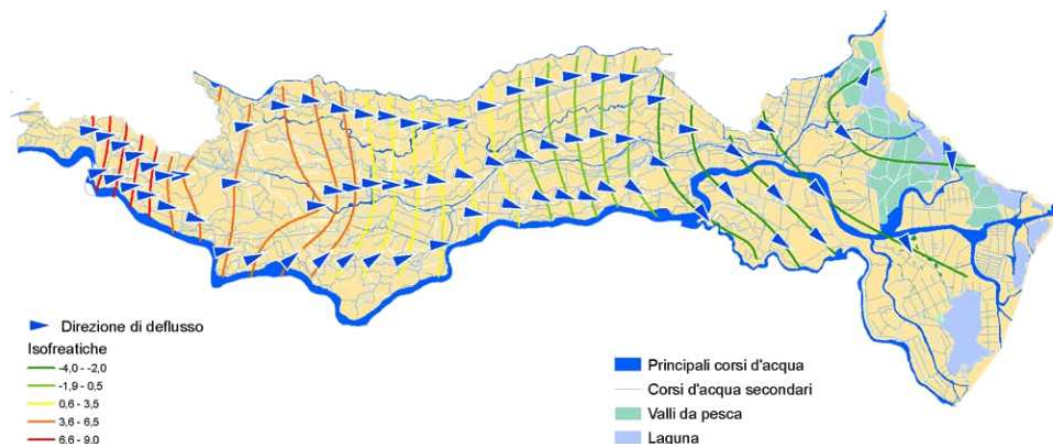


Figura 7.3: Direzione del deflusso delle acque e isofreatiche [Patassini *et al.*, 2008]

Boscolo e Mion [2008] nella valutazione e definizione dello stato delle acque sotterranee dal punto di vista quantitativo e qualitativo, hanno fatto riferimento agli indici previsti dall'ormai abrogato D. Lgs. n. 152/1999, sia perché era la normativa vigente in fase di redazione del progetto SAMPAS, sia in quanto il successivo D. Lgs. n. 152/06, che recepisce la Direttiva 2000/60/CE, prevede sì le modalità generali che disciplinano il monitoraggio e la classificazione dello stato delle acque, ma è privo delle norme tecniche necessarie per la definizione dello stato. Nel Polesine il progetto ha analizzato ed elaborato i risultati forniti da 15 pozzi freatici dal 2003 al 2006 e localizzati a: Adria, Ariano nel Polesine, Castelguglielmo, Ceneselli, Crespino, Loreo, Melara, Occhiobello, Porto Viro (2 pozzi), Rovigo, Salara, Stienta, Villadose e Villanova Marchesana.

7.3.1 Caratteristiche quantitative

Come rappresentato nella tabella 7.1 nella pagina successiva, i pozzi polesani rientrano in classe D (definizione dello stato quantitativo delle acque sotterranee secondo il D.Lgs. 152/1999), che viene così descritta:

Impatto antropico nullo o trascurabile, ma con presenza di complessi idrogeologici con intrinseche caratteristiche di scarsa potenzialità idrica.

7.3.2 Caratteristiche qualitative

Boscolo e Mion [2008] classificano i pozzi della Provincia di Rovigo in classe SCAS 0 (indice Stato Chimico Acque Sotterranee secondo il D.Lgs. 152/1999), che viene così descritta:

Impatto antropico nullo o trascurabile ma con particolari facies idrochimiche naturali in concentrazioni al di sopra del valore della classe 3.

7.4 Fattori di rischio idraulico ed idrogeologico

Le aree del basso Polesine sono interessate da un elevato rischio idraulico, legato principalmente alla bassa quota rispetto ai principali fiumi che attraversano il territorio. Gran

Tabella 7.1: Analisi quantitativa del Polesine [Boscolo e Mion, 2008]

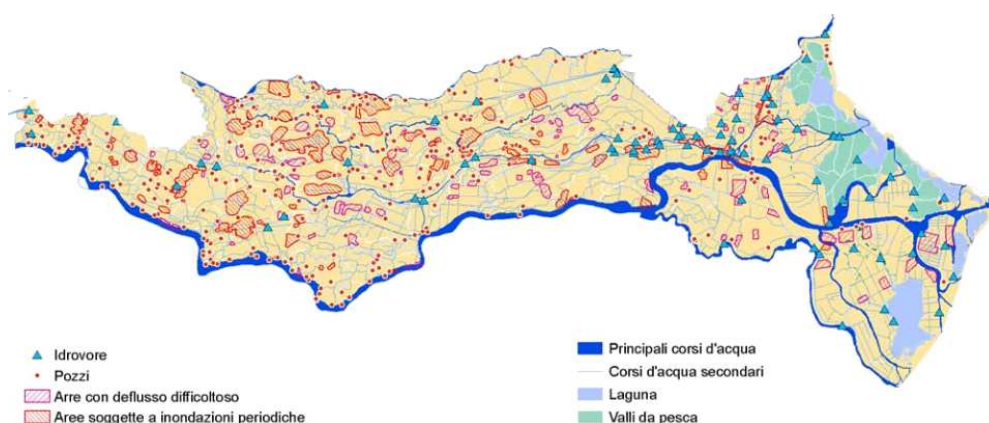
Comune	Stazione	Profondità	2003	2004	2005	2006
Adria	138	4,5	D	D	D	D
Ariano nel Polesine	134	3,35	D	D	D	D
Castelguglielmo	128	2,5	D	D	D	D
Ceneselli	141	4,4	D	D	D	D
Crespino	136	4,25	D	D	D	D
Loreo	131	2,1	D	D	D	D
Melara	139	3,14	D	D	D	D
Occhiobello	130	3,5	D	D	D	D
Porto Viro	137	3,85	D	D	D	D
Porto Viro	143	2,1	D	D	D	D
Rovigo	144	3	D	D	D	D
Salara	132	3,4	D	D	D	D
Stienta	142	5,5	D	D	D	D
Villadose	127	4,4	–	–	–	D
Villanova Marchesana	133	6,5	D	D	D	D

– valore omesso per dati insufficienti

Tabella 7.2: Classificazione chimica in base ai parametri di base (Tabella 20 dell'allegato 1 del D. Lgs. 152/99) [Boscolo e Mion, 2008]

	unità di misura	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	classe 0
Conducibilità elettrica	$\mu\text{S cm}^{-1}$ (20 °C)	≤ 400	≤ 2500	≤ 2500	> 2500	> 2500
Cloruri	mg l^{-1}	≤ 25	≤ 250	≤ 250	> 250	> 250
Manganese	$\mu\text{g l}^{-1}$	≤ 20	≤ 50	≤ 50	> 50	> 50
Ferro	$\mu\text{g l}^{-1}$	≤ 50	< 200	≤ 200	> 200	> 200
Nitrati	mg l^{-1} di NO_3	≤ 5	≤ 25	≤ 50	> 50	
Solfati	mg l^{-1} di SO_4	≤ 25	≤ 250	≤ 250	> 250	> 250
Ione ammonio	mg l^{-1} di NH_4	$\leq 0,05$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$> 0,5$	$> 0,5$

parte del Delta del Po è a scolo meccanico ed è molto articolato e complesso, in particolare la conformazione del terreno, pianeggiante, e la presenza di grandi fiumi quali l'Adige a nord e il Po a Sud, comportano vasti ambiti soggetti a possibili esondazioni (figura 7.4). Proprio per questo il governo idraulico delle reti minori, chiamate anche reti delle acque basse compete a quattro Consorzi di Bonifica.

**Figura 7.4:** Aree a rischio idraulico nella provincia di Rovigo

7.4.1 Subsidenza

Il Polesine è soggetto anche a fenomeni di subsidenza, cioè ad un movimento della superficie del terreno che può interessare aree relativamente estese, con direzione prevalentemente verticale, e generalmente lento, dovuto a cause naturali o antropiche. Le cause che lo determinano sono molteplici, come molteplici sono le scale alle quali il fenomeno si manifesta: dalla subsidenza a scala regionale legata a cause generali, si può arrivare alla subsidenza puntiforme dovuta a cause locali.

Desio [2003] analizzando le livellazioni eseguite dall'istituto Geografico Militare nel 1970 lungo allineamenti fissati nel 1950 che collegano Treviso con Venezia e questa da un lato con Chioggia, Ravenna e Rimini, passando per Portomaggiore, dall'altro con Rovigo, Ferrara e Portomaggiore, riporta che nel Polesine e precisamente ad Adria, sono stati riscontrati abbassamenti massimi di 2 m, mentre più a nord, fra l'Adige ed il Po, si sono raggiunti 60 ÷ 70 cm e più a sud, a Codigoro, 80 cm. Inoltre nei profili costruiti dall'I.G.M. è riconoscibile non soltanto un abbassamento generale, ma anche una deformazione irregolare della superficie topografica.

Pare accertato che gran parte di questi abbassamenti siano maggiori dove, dagli anni precedenti alla seconda guerra mondiale e fino al 1962 (anno in cui furono bloccate e revocate tutte le concessioni), sono stati emunti ingenti quantitativi d'acqua (in media 350 milioni di metri cubi all'anno) da profondità modeste, al solo fine di separare il poco metano che si trovava disciolto nell'acqua stessa (circa 1 m³ di metano, misurato alla normale pressione atmosferica, per ogni metro cubo d'acqua). In altre parole, nel Delta Padano, si estraeva l'acqua per ricavare metano, per cui appare dimostrato che all'estrazione dell'acqua anziché a quella del metano, sia essenzialmente da imputare la subsidenza.

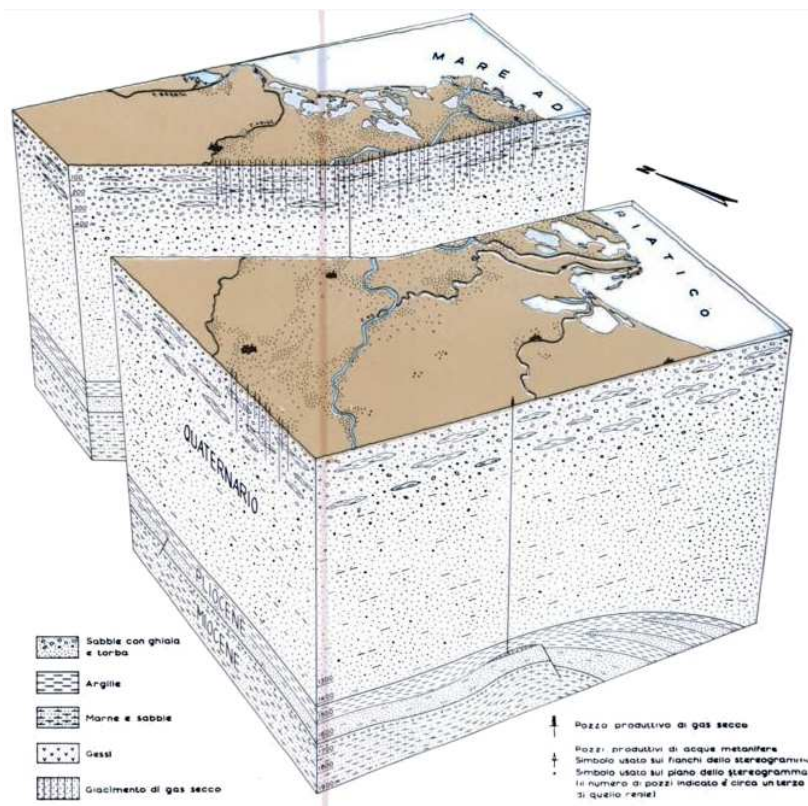


Figura 7.5: Sezione geologica attraverso il sottosuolo del Delta Padano e del Polesine [Desio, 2003], da notare il gran numero di pozzi produttivi da falda metanifera, rispetto a quello a secco presente nel ravennate

L'estrazione artigianale del metano dalle falde sotterranee era molto semplice e radicata: bastava scavare un pozzo profondo da poche decine fino a qualche centinaia di metri e sollevare l'acqua metanifera in un impianto di decantazione, la cosiddetta "campana", che separava il liquido dal gas. Un sistema di scarico poi disperdeva le acque residue nei canali di irrigazione, mentre una rete di tubi portava il metano ai capannoni, alle serre, alle abitazioni o alle bombole di stoccaggio. Questa pratica è ancora oggi illegale, ma come riportato in Scagliarini [2005] è ancora ben radicata nelle campagne del Polesine e del ferrarese, tanto è vero che gli estrattori abusivi rischiano fino a tre anni di carcere, il pagamento delle imposte evase e una multa fino a dieci volte l'ammontare delle tasse, partendo da un minimo di 7746 €.

7.5 Fattibilità geotermica nel territorio

Quanto riportato in questo capitolo vuole offrire, senza entrare nel dettaglio, qualche utile riflessione per verificare la compatibilità ambientale degli impianti geotermici. Rimane sottinteso che le proprietà idrogeologiche sono variabili da luogo a luogo e richiedono indagini approfondite o basate su dati di opere esistenti.

Le proprietà litologiche e la presenza di falde dotate di caratteristiche scadenti dal punto di vista quantitativo e qualitativo, suggeriscono che il territorio polesano possiede le proprietà adatte ad ospitare tali impianti, sia open loop sia closed loop. I suoli infatti sono di natura alluvionale e presentano strati granulari a discreta conducibilità termica, le acque poi hanno bassi gradienti di velocità e non sono pregiate, quindi non trasportano il gradiente di temperatura e non esistono situazioni che potrebbero andare a pregiudicare l'uso della risorsa a fini idropotabili.

Gli impianti da falda sotterranea in particolare richiedono lo scarico nella stesso acquifero, onde evitare il depauperamento della risorsa e l'accelerazione di fenomeni di subsidenza locali che tanti danni hanno arrecato in passato.

In tutti i casi in fase di perforazione si dovrà prestare attenzione alle falde sotterranee attraversate (soprattutto quelle in pressione), per evitarne la connessione e l'inquinamento superficiale, soprattutto nel caso delle sonde geotermiche che raggiungono profondità di infissione di 100 m o più.

Proposta per un iter autorizzativo

In questo capitolo conclusivo si cercherà di proporre una procedura di autorizzazione armonica e collegata a quanto emerso nello studio della geotermia a bassa entalpia. Non saranno quindi presi in considerazione le perforazioni geotermiche di profondità, perché esulano dallo scopo del testo e la loro autorizzazione deve essere esaminata caso per caso, mentre le sonde orizzontali e le fondazioni energetiche, pur rientrando nella categoria saranno tralasciate, perché le prime hanno un impatto ambientale trascurabile e sono già regolamentate negli scavi e ripristini per la posa di reti ed impianti e le seconde invece richiedono una progettazione termica/strutturale specialistica.

Per i sistemi a circuito aperto e chiuso si consiglieranno allora i compiti e le procedure che l'ente di controllo dovrebbe svolgere per concedere l'autorizzazione e la vigilanza degli impianti geotermici e la documentazione che la potenziale committenza dovrebbe fornire per descrivere l'impianto e per mitigare l'impatto ambientale.

Infine si riporteranno alcuni utili consigli che possono essere prescritti dall'ente di controllo e seguiti dal committente in fase di progettazione, per ridurre l'impatto ambientale da un lato e risparmiare sui costi di perforazione e gestione dall'altro.

8.1 Competenze dell'ente di controllo

Ferme restando norme e misure evidenziate nel capitolo 6 che fissano e definiscono gli enti preposti per rilasciare l'autorizzazione e tutelare le acque sotterranee, si tratta ora di prendere in considerazione i principi e le misure di vigilanza da intraprendere per la sostenibilità ambientale degli impianti geotermici. Gli enti di controllo (Regione e Provincia), dovrebbero seguire due orientamenti strettamente collegati tra loro e così riassumibili:

- pianificazione territoriale geotermica;
- disciplinare per un utilizzo congruo della risorsa.

Un sistema realizzato a regola d'arte non costituisce un pericolo ambientale, in quanto la terebrazione di pozzi e la trivellazione sono opere ampiamente definite e normate. Si è visto però che il calore trasferito ed il fattore tempo giocano un ruolo fondamentale, sia nella definizione del bacino termico del terreno, sia nel dimensionamento dell'impianto. La perturbazione termica causata a breve e/o a lungo termine infatti potrebbe arrecare danno all'ambiente e alle utilizzazioni circostanti e ridurre le prestazioni della pompa di calore per l'utenza.

Alla definizione della perturbazione termica concorrono molti fattori, tra i quali: i carichi termici annuali dell'edificio, le proprietà termiche del terreno, la velocità e la direzione della falda sotterranea e la sovrapposizione di altri sistemi geotermici operanti nella zona. Fattori

che non possono essere tralasciati in fase di concessione dell'autorizzazione e che dovrebbero poi andare a costituire un database cartografico di facile consultazione.

Inoltre un uso improprio della risorsa, per la variazione dei carichi di riscaldamento o raffrescamento annuali ipotizzati in fase di progetto, può allo stesso modo causare gravi deficit all'impianto e al territorio circostante. Per questo motivo, come già viene fatto per le consuete licenze, è consigliabile rilasciare un disciplinare con clausole e condizioni d'uso della geotermia.

Nel rilascio delle concessioni infine è preferibile privilegiare sistemi geotermici che sono progettati per la climatizzazione annuale degli edifici (cioè con carichi grossomodo bilanciati tra la stagione invernale ed estiva) ed eventuali sistemi ibridi (cioè integrati con sistemi di climatizzazione tradizionali per coprire i carichi di picco). In questo modo il sottosuolo mantiene una temperatura costante nella vita utile dell'impianto e quindi l'impatto ambientale si minimizza.

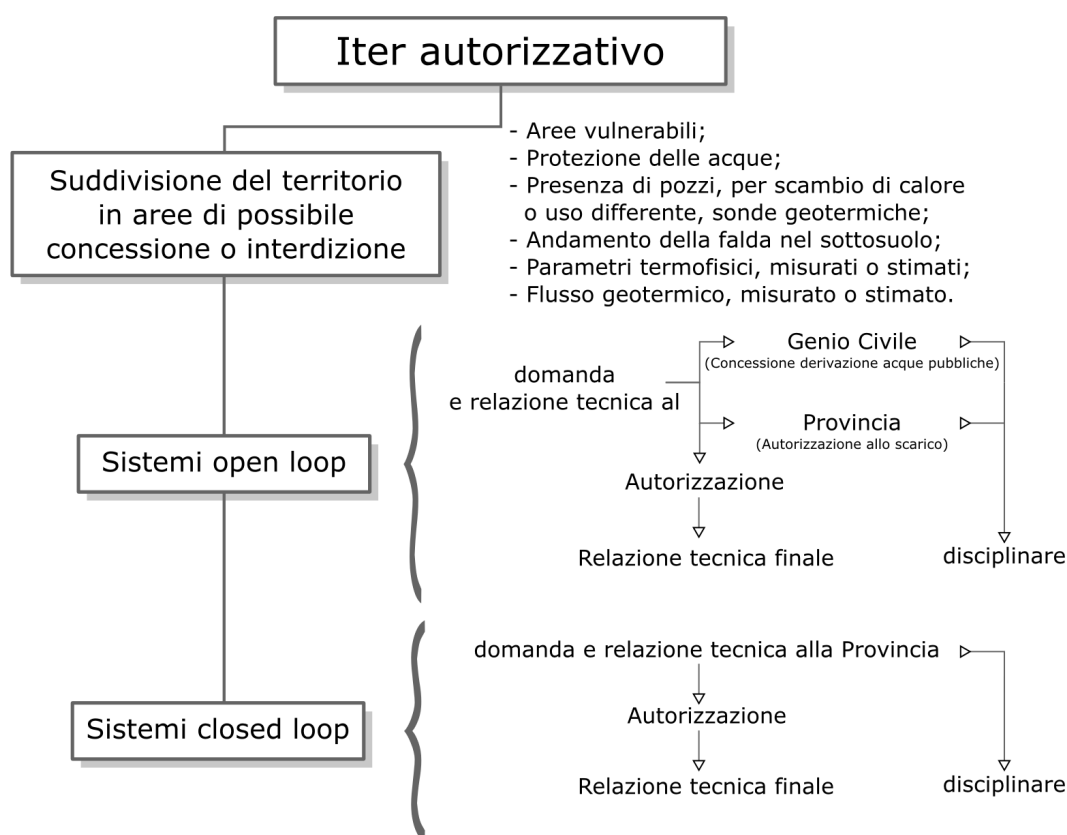


Figura 8.1: Possibile schema di un iter autorizzativo per i sistemi a circuito aperto e chiuso

8.1.1 Pianificazione territoriale

L'ente di controllo, avvalendosi di una pianificazione del territorio che tenga in considerazione non solo le aree sensibili e di ricarica delle falde, ma anche la presenza di impianti di captazione e geotermici (con la loro impronta idraulica e termica), può autorizzare e inibire l'installazione di nuovi impianti o il loro eventuale ampliamento. Allo scopo sono stati riportati ed elencati software di modellazione numerica delle falde (sottoparagrafo 3.8.4 nella pagina 73) e dei campi sonde (paragrafo 4.7.3 nella pagina 101), che possono essere

di aiuto non solo nella progettazione ma anche nella gestione dinamica e del sottosuolo su piccola e media scala.

Tutto questo lavoro di programmazione e progettazione territoriale può sembrare oneroso e superfluo, per una tecnologia che allo stato attuale è ancora sconosciuta in Italia, ma può rappresentare una soluzione obbligata per l'abbattimento dei costi per la climatizzazione degli edifici e delle emissioni di CO₂ nei prossimi anni. Una autorizzazione limitata alla sola protezione della risorsa idrica nel sottosuolo, può portare alla saturazione e alla sovrapposizione di serbatoi geotermici, se la tecnologia dovesse diventare popolare in tempi brevi e sostituire l'impiantistica tradizionale.

8.1.2 Disciplinare

Una volta concessa l'autorizzazione per l'installazione dell'impianto, l'ente di controllo, nell'usuale disciplinare che regola le clausole e le condizioni d'uso della risorsa, dovrebbe stabilire inoltre la quantità di calore da derivare (media e di picco) e la durata della concessione con modalità e termini per il rinnovo.

8.2 Competenze del committente

Realizzare un sistema geotermico è attualmente oneroso e richiede una progettazione specialistica che pochi installatori possono assicurare o certificare. Il costo iniziale poi è più elevato degli impianti tradizionali e richiede la redazione di relazioni tecniche e idrogeologiche che interessano molteplici figure professionali, sia per il dimensionamento dell'impianto, sia per ottenere la concessione.

È bene esserne consapevoli e ricorrere a questo tipo di soluzione per impianti di una certa importanza e che possano servire più utenze. In questo modo si possono ridurre i costi ottimizzando le perforazioni e la gestione del sottosuolo e si possono prevedere analisi e progettazioni più dettagliate.

Inoltre un dimensionamento ottimale dei fabbisogni termici può contribuire a ridurre gli interventi sul terreno che rappresentano la parte più significativa del costo dell'impianto. Vale la pena poi considerare nell'analisi costi/benefici, l'installazione di un sistema ibrido per coprire il carico di picco, se quest'ultimo si raggiunge per poche ore all'anno e far coprire al sistema geotermico il restante 90 % dell'energia termica richiesta.

Seguendo ed integrando quanto proposto da Rossi [2008], la committenza per ottenere l'autorizzazione alla realizzazione degli impianti geotermici, dovrà produrre una:

- domanda da presentare agli organi competenti;
- relazione idrogeologica preliminare;
- relazione idrogeologica finale.

Di seguito verranno schematizzati i contenuti base di queste domande e relazioni, suddividendole per tipo di impianto ed elencando le competenze della direzione lavori. Ovviamente gli enti di controllo richiederanno maggiori richieste, prescrizioni ed integrazioni a quanto sommariamente elencato. Qui si vuole solo fornire un quadro sintetico e generale, con evidenziate le richieste utili per richiedere ed agevolare l'autorizzazione.

8.3 Domanda e relazione tecnica preliminare

La domanda per i due sistemi comprenderà:

- dati anagrafici del richiedente;
- dati del progettista e della Direzione Lavori (se differente);
- dati indicativi della ditta e/o ditte (con eventuali certificazioni);
- dati significativi dell'impianto (perforazione e installazione);
- dati indicativi sull'ubicazione dell'impianto.

Dovranno poi essere allegati:

- relazione tecnica di progetto;
- corografia ubicativa 1:25 000 e planimetria catastale 1:2 000 ;

8.3.1 Per sistemi open loop

La relazione tecnica comprenderà:

► Dati tecnici

- potenza dell'impianto (kW_t);
- fabbisogno termico mensile, con carico medio e di picco;
- portata necessaria (m^3s^{-1});
- ΔT (K o $^{\circ}C$);
- dotazioni di sicurezza e controllo.

► Dati idrogeologici

- controllo dei vincoli esistenti nell'area di indagine;
- inquadramento geologico;
- idrogeologia del sottosuolo (caratteristiche dell'acquifero, permeabilità e direzione di flusso);
- censimento dei pozzi esistenti nell'area e di altre perforazioni;
- analisi qualitativa dell'acqua prelevata e restituita alla falda.

► Progetto

- schema di progetto per la costruzione dei pozzi, con particolare riferimento a diametri e materiali di filtri e rivestimento;
- descrizione sulle metodologie previste per eseguire a regola d'arte la cementazione del foro;
- valutazioni sulle possibili conseguenze relative al prelievo dell'acqua e sulla reimmissione, indicando il ΔT previsto a breve e a lungo termine (il massimo ammesso è di $5^{\circ}C$) e la compatibilità ambientale dello scarico nel corpo recipiente.

8.3.2 Per sistemi closed loop

La relazione tecnica comprenderà:

► Dati tecnici

- potenza dell'impianto (kW_t);
- fabbisogno termico mensile, con carico medio e di picco;
- fluidi, additivi e anticongelanti che verranno utilizzati;
- ΔT (K o °C);
- dotazioni di sicurezza e controllo.

► Dati idrogeologici

- controllo dei vincoli esistenti nell'area di indagine;
- inquadramento geologico;
- idrogeologia del sottosuolo (caratteristiche dell'acquifero o degli acquiferi attraversati, permeabilità e direzione di flusso);
- censimento dei pozzi esistenti nell'area e di altre perforazioni.

► Progetto

- schema di progetto per la costruzione della sonda o del campo sonde;
- indicazioni specifiche sulla metodologia di perforazione e sui relativi diametri;
- descrizione sulle metodologie previste per eseguire a regola d'arte la cementazione del foro.
- simulazione degli effetti con definizione del tipo, della localizzazione e della quantità della perturbazione termica, a breve e a lungo termine.

8.3.3 Compiti della direzione lavori

Dovrà verificare la corretta esecuzione della posa in opera e controllare che in fase di perforazione la stratigrafia (i cui campioni dovranno essere lasciati a disposizione delle autorità competenti), sia corrispondente a quella prevista in fase di progetto ed in caso contrario predisporre delle adeguate soluzioni tecniche per mitigare le novità emerse.

Dovrà verificare con particolare attenzione gli aspetti relativi alla cementazione, dovendone certificare poi la tenuta. Inoltre eseguirà a seconda dell'impianto realizzato:

- prova di verifica a pressione della tenuta;
- prova di portata nel pozzo di presa e di immissione in quello di scarico.

8.4 Relazione tecnica finale

8.4.1 Per sistemi open loop

Comprenderà:

- dati stratigrafici effettivi;
- schema effettivo dei pozzi realizzati;
- dati idrogeologici derivanti anche dai risultati delle prove di pompaggio eseguite;
- valutazioni sulle possibili conseguenze del prelievo e della restituzione;
- calcolo dell'area influenzata dal ΔT nel breve e lungo termine (bulbo termico).

Verrà allegata:

- la planimetria con le effettive ubicazioni dei pozzi eseguiti con evidenziato il raggio di influenza del ΔT a breve e lungo termine.

La D.L. attesterà mediante dichiarazione sottoscritta la tenuta della cementazione, dell'impianto, la non interferenza tra le falde eventualmente presenti sia tra loro che con la superficie e la compatibilità ambientale dello scarico nel corpo recipiente.

8.4.2 Per sistemi closed loop

Comprenderà:

- dati stratigrafici effettivi;
- schema effettivo dei pozzi realizzati;
- variazioni rispetto al progetto preliminare;
- dati relativi alla cementazione eseguita;
- simulazione effettiva degli effetti con definizione del tipo, della localizzazione e della quantità della perturbazione termica, a breve e a lungo termine.

Verrà allegata:

- la planimetria con le effettive ubicazioni delle sonde eseguite e la perturbazione termica, a breve e a lungo termine.

La D.L. attesterà mediante dichiarazione sottoscritta la tenuta della cementazione e dell'impianto e la non interferenza tra le falde eventualmente presenti, sia tra loro che con la superficie.

- ALLAN, M. L. e PHILIPPACOPOULOS, A. J. (1999), *Properties and performance of cement-based grouts for geothermal heat pump applications*, Office States Department of Energy, Washington, final report ed. (Citato a pagina 90)
- ARMSTEAD, H. e SCHROEDER, C. H. (1983), *Geothermal Energy*, Spon Pr, London. (Citato a pagina 5)
- BANKS, D. (2008), *An Introduction of Thermogeology Ground Source Heating and Cooling*, Blackwell Publishing. (Citato alle pagine 22, 24, 49, 65, 70, 71, 80, 86, 91, 103, 109, 118, 120, 123, 125, 127 e 129)
- BASTA, S. e MINCHIO, F. (2007), «Geotermia e pompe di calore - Guida pratica agli impianti di climatizzazione», Stampato in proprio, Verona. (Citato alle pagine 16, 44, 52, 53, 61, 73, 89, 93, 95, 97, 98 e 109)
- BEGAL, F. (1995), *Analisi tecnico-economica di impianti di climatizzazione con accumulo stagionale a terreno*, Tesi di laurea, Facoltà di Ingegneria Gestionale dell'Università di Padova. (Citato a pagina 92)
- BONDESAN, A., FONTANA, A., MOZZI, P. e MENEGHEL, M. (2004), *Geomorfologia della provincia di Venezia. Note illustrative della carta geomorfologica della provincia di Venezia*, Esedra Editrice. (Citato a pagina 144)
- BOSCOLO, C. e MION, F. (2008), «Le acque sotterranee della pianura veneta – I risultati del Progetto SAMPAS», Rap. tecn., Area Tecnico Scientifica – Servizio Acque Interne dell'ARPAV del Veneto. (Citato alle pagine 145, 146 e 147)
- BRANDL, H. (2006), «Energy foundations and other thermo-active ground structures», *Géotechnique*, vol. 56 (2). (Citato a pagina 115)
- BUSNARDO, E. (2006), *Pompe di calore con sorgente ad acque superficiali o sotterranee: aspetti tecnici, commerciali ed amministrativi*, Tesi di dottorato, Università di Padova – Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, relatore prof. R. M. Lazzarin. (Citato alle pagine 52 e 53)
- CASALE, C., COLLI, G., PENNATI, W. e PETTOROSSO, F. (2009), «Libro bianco sulle pompe di calore», PDF del Gruppo Italiano Pompe di Calore. (Citato a pagina 44)
- CESI (2001), «Applicazioni della tecnologia a pompa di calore nei principali settori industriali», Rap. tecn., SFR-A1/018331. (Citato a pagina 31)

- CLAESSON, J. e ESKILSON, P. (1987), *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*, Tesi di dottorato, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden. (Citato alle pagine 77, 84, 87, 88, 101, 102 e 112)
- DA DEPPO, L., DATEI, C., FIOROTTO, V. e SALANDIN, P. (2006), *Acquedotti*, Libreria Internazionale Cortina, Padova, terza ed. (Citato alle pagine 55, 56 e 58)
- DESIO, A. (2003), *Geologia applicata all'ingegneria*, Hoepli. (Citato alle pagine 144 e 148)
- DRIGO, V. (2005), «L'anomalia geotermica nella pianura friulana e veneta, una ricchezza da utilizzare e da conservare», Rap. tecn., Collegio degli Ingegneri di Venezia. (Citato alle pagine 10 e 144)
- EED (2009), *Earth Energy Designer*, sviluppato dalla Blocon software, con la collaborazione di G. Hellström, B. Sanner, J. Claesson, P. Eskilson, Sweden, 3.15 ed. (Citato alle pagine 102, 103, 104 e 106)
- EGEC (2009), «Geothermal Heat pumps - Ground source Heat pumps», PDF. (Citato alle pagine 28, 38, 40 e 107)
- ENEA (2003), «La pompa di calore», PDF, collana sviluppo sostenibile.
- EUGSTER, W. J. (2009), *Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol*, Office fédéral de l'environnement OFEV. (Citato a pagina 133)
- EUROOBSERV'ER (2009), «Heat pump barometer», L'Observatoire des énergies renouvelables. (Citato a pagina 27)
- FANELLI, M. e DICKSON, M. H. (2004), «Geologia e...Geotermia», CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse, Area CNR - Pisa. (Citato alle pagine 6, 7, 8, 11 e 29)
- FELDERER, G. (2006), «La geotermia nell'Altro Adige», in «Geotermia: applicazioni a bassa temperatura», Fiera di Vicenza. (Citato alle pagine 43 e 93)
- FERGUSON, G. e WOODBURY, A. (2004), «Subsurface heat flow in an urban environment», *Journal of geophysical research*, vol. 109. (Citato alle pagine 121 e 123)
- FERNÁNDEZ, A. (2009), «Geothermal Energy in Europe, today and in future», in «European Future Energy Forum 09», EGEC, PDF, Bilbao.
- FRANCHETTO, F. (2010), «Impianti geotermici, ecco il decreto di riassetto normativo», *Nextville.it – Energie rinnovabili ed efficienza energetica*.
- GUADAGNI, A. e OTHERS (2003), *Prontuario dell'Ingegnere*, Hoepli. (Citato a pagina 53)
- GVP (2006), Hosted by the Global Volcanism Program of the Smithsonian Institution in Washington – DC. (Citato a pagina 9)
- HEINONEN, E. W., TAPSCOTT, R. E., WILDIN, M. W. e BEALL, A. N. (1996), «Assessment of anti-freeze solutions for ground-source heat pump systems», Rap. tecn., New Mexico Engineering Research Institute. (Citato a pagina 93)
- HOCHSTEIN, M. P. (1990), «Classification and assessment of geothermal resources», in UNITAR, curatore, «Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization», New York. (Citato a pagina 7)
- IL METEO.IT (2009), «Clima Rovigo - Medie climatiche», . (Citato a pagina 19)

- INGERSOLL, L. R., ZOBEL, O. J. e INGERSOLL, A. C. (1948), *Heat Conduction with Engineering and Geological Application*, McGraw Hill, New York. (Citato alle pagine 25, 84 e 101)
- LIENAU, P. (1998), *Geothermal Direct Use Engineering and Design Guidebook*, Geo-Heat Center, USA, 3 ed. (Citato a pagina 11)
- LINACRE, E. e GEERTS, B. (1997), *Climates and Weather Explained*, Routledge. (Citato a pagina 18)
- LINDAL, B. (1973), «Industrial and other applications of geothermal energy», in «Geothermal Energy», UNESCO, Paris. (Citato a pagina 8)
- LUBIMOVA, E. A. (1968), «Thermal history of the Earth», in «The Earth's Crust and Upper Mantle», American Geophysical Union. (Citato a pagina 4)
- MARITAN, D. e PANIZZOLO, R. (2008), «Ground Source Heat Pumps Applications in Italy», in «Thirty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering», Stanford University, California. (Citato a pagina 29)
- MEHNERT, E. (2004), *The Environmental Effects of Ground-Source Heat Pumps – A Preliminary Overview*, Illinois State Geological Survey, Washington. (Citato a pagina 93)
- MINCHIO, F. (2009), «Veneto tra sonde geotermiche e autorizzazioni», *Energheia Magazine*. (Citato a pagina 140)
- MISSTEAR, B., BANKS, D. e CLARK, L. (2006), *Water Wells and Boreholes*, Wiley, Chichester. (Citato a pagina 49)
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (2009), «2008 Geothermal Technologies market report», Rap. tecn., U.S. Department of Energy. (Citato a pagina 1)
- NOCE, G. (2009), «Test e collaudi di impianti geotermici a pompa di calore», *Strade & Autostrade*, vol. 2. (Citato a pagina 96)
- PATASSINI, D., MUSCO, F. e PICCHIO, S. (2008), «Relazione Ambientale al Documento Preliminare del PTCP della Provincia di Rovigo», Rap. tecn., Provincia di Rovigo e Università IUAV di Venezia – Dipartimento di Pianificazione. (Citato alle pagine 143, 144 e 146)
- PATASSINI, D., MUSCO, F., PICCHIO, S., CIOLECCHIA, M., FERRO, D. e MAROTTA, L. (2009), «Valutazione Ambientale Strategica (V.A.S.) del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (P.T.C.P.): Rapporto Ambientale», Rap. tecn., Provincia di Rovigo – Area Territorio e Trasporti, Università IUAV di Venezia – Dipartimento di Pianificazione. (Citato alle pagine 144 e 145)
- POLLACK, H. N., HURTER, S. J. e JOHNSON, J. R. (1993), «Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set», *Geophys*, (31). (Citato a pagina 5)
- PREENE, M. e POWRIE, W. (2009), «Ground energy systems: from analysis to geotechnical design», *Géotechnique*, vol. 59 (3). (Citato alle pagine 109, 110, 111, 116 e 117)
- RAFFERTY, K. (2001), «Design aspects of commercial open-loop heat pump systems», Rap. tecn., Geo-Heat Center bulletin. (Citato alle pagine 46, 52, 53, 66, 68, 73, 74 e 75)
- ROSSI, C. (2008), «Linee guida per la disciplina relativa allo sfruttamento dell'energia con sonde geotermiche», in «Geotermia: progettazione e disciplina tecnica», Associazione Nazionale di Idrogeologia e Pozzi Acqua. (Citato a pagina 153)

- RYBACH, L. (2003), «Regulatory framework for geothermal in Europe – with special reference to Germany, France, Hungary, Romania, and Switzerland», in «Geothermal training programme», . (Citato alle pagine 118, 120 e 132)
- SANNER, B. (2001), «Some history of shallow geothermal energy use», in «UNESCO/IGA International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy/International Geothermal Days», Germany. (Citato alle pagine 24, 25 e 26)
- SANNER, B. (2008), «Guidelines, standars, certification and legal permits for ground source heat pumps in the european union», in «9th International IEA Heat Pump Conference», . (Citato a pagina 118)
- SANNER, B. (2009), «Development Of Geothermal Heat Pumps», in «Session VI, Geothermal Heat Pumps. A prospective direction for development in central european region», International Geothermal Days, conference & summer school, Slovakia. (Citato a pagina 1)
- SANNER, B., DUMAS, P., FERNANDEZ, I. e REGUEIRO, M. (2009), «Geotrained – A new european initiative for training and education of planners, drillers and installers of geothermal heat pumps», in «11th Effstock – Thermal Energy Storage for Energy Efficiency and Sustainability», Svezia. (Citato a pagina 134)
- SAVOCA, D. (2008), «Le prospettive di sviluppo delle pompe di calore geotermiche in Lombardia», in «Convegno, Le pompe di calore geotermiche: i vincoli e gli incentivi per lo sviluppo», Milano.
- SCAGLIARINI, R. (2005), «E nel Delta del Po fanno trivellazioni illegali», *Corriere Economia*. (Citato a pagina 149)
- SKARPHAGEN, H. (2006), «Ground source heat – heat exchange with the ground: in Norwegian», modulo di elearning sviluppato per l'Università di Oslo. (Citato a pagina 126)
- STACEY, F. D. e LOPER, D. E. (1988), «Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology», *Physisc Earth Planet International*, (53). (Citato a pagina 5)
- TINTI, F. (2009), «Introduzione alla geotermia», in «Incontro con le aziende: Standard di qualità nella progettazione e realizzazione degli impianti geotermici a sonde verticali», Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali dell'Università di Bologna, Parco scientifico tecnologico di Venezia VEGA. (Citato alle pagine 30, 35 e 43)
- UGI (2007), «La Geotermia ieri, oggi, domani», Numero Speciale del Notiziario UGI, Edizioni ETS. (Citato a pagina 9)
- UNI 10349 (1994), «Riscaldamento e raffrescamento degli Edifici - Dati Climatici», Ente Nazionale Italiano di Unificazione. (Citato a pagina 19)
- UNI EN 15450 (2008), «Progettazione degli impianti di riscaldamento a pompa di calore», Ente Nazionale Italiano di Unificazione. (Citato alle pagine 23, 34, 36, 37, 38, 52 e 78)
- UNI EN 378-1 (2008), «Impianti di refrigerazione e pompe di calore – Requisiti di sicurezza e ambientali – Parte 1: Requisiti di base, definizioni, classificazione e criteri di selezione», Ente Nazionale Italiano di Unificazione. (Citato a pagina 34)
- VDI (2000), «VDI 4640 Blatt 1, Thermal use of the underground – Fundamentals, approvals, environmental aspects», Rap. tecn., Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. (Citato alle pagine 1, 12, 14 e 90)

- VDI (2001a), «VDI 4640 Blatt 2, Thermal use of the underground – Ground source heat pump system», Rap. tecn., Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. (Citato alle pagine 23, 37, 39, 41, 42, 78, 79, 90, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 106, 109 e 126)
- VDI (2001b), «VDI 4640 Blatt 3, Utilization of the subsurface for thermal purposes: Underground thermal energy storage», Rap. tecn., Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. (Citato alle pagine 107 e 126)
- YOUNGER, P. L. (2006), «Potential pitfalls for water resources of unregulated development of ground-source heat resources», in «Annual Conference of the Chartered Institution of Water – Environmental Management», . (Citato a pagina 124)
- ZARRELLA, A. (2009a), «Le pompe di calore accoppiate al terreno: aspetti termodinamici e funzionali», in «Incontro con le aziende: Impianti geotermici a bassa entalpia e tecniche costruttive», Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Padova, Collegio degli Ingegneri della provincia di Padova. (Citato alle pagine 33 e 44)
- ZARRELLA, A. (2009b), «L'uso del terreno come sorgente termica», Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Padova. (Citato a pagina 31)

Siti Web consultati

- A.N.I.P.A, il portale della perforazione – www.anipapozzi.it
- Edilportale.com, il portale dell'edilizia – www.edilportale.com
- EGEC, European Geothermal Energy Council – www.egec.org
- Geo Heat – geoheat.oit.edu
- Geo Net srl – www.geo-net.it
- IGA, International Geothermal Association – www.geothermal-energy.org
- ScienceDirect – www.sciencedirect.com
- SpringerLink – www.springerlink.com
- Therm-tech Technological Engineering – www.therm-tech.it
- UGI, Unione Geotermica Italiana – www.unionegeotermica.it
- Wikipedia – www.wikipedia.org