

# Indice

Premessa .....	V
Indice .....	VII

## Capitolo 1

<b>Introduzione</b> .....	1
1.1 La produzione di energia elettrica .....	2
1.2 Il tele riscaldamento .....	4
1.3 Hard Dry Rock .....	4
1.4 La bassa entalpia .....	6
1.5 La climatizzazione con la geotermia .....	7
1.5.1 Il Riscaldamento .....	7
1.5.2 Il Raffrescamento .....	8
1.5.3 L'impianto geotermico .....	9
1.6 La diffusione degli impianti geotermici .....	10
1.7 La sostenibilità ambientale dei sistemi a scambio geotermico .....	12
1.8 L'influenza della sonda sul sottosuolo circostante .....	14
1.9 Vantaggi e limiti dei sistemi geotermici .....	15

## Capitolo 2

<b>Climatizzazione</b> .....	21
2.1 Trasmissione del calore .....	22
2.1.1 Conduzione .....	22
2.1.2 Convezione .....	25
2.1.3 Irraggiamento .....	26
2.1.4 Adduttanza .....	27
2.1.5 Trasmittanza .....	28
2.2 Condizioni di benessere termoigrometrico .....	32
2.3 Aria umida .....	32
2.4 Scambio di calore del corpo umano .....	35
2.5 La purezza dell'aria .....	37
2.6 Fabbisogno termico e legislazione .....	38
2.7 Pannelli radianti .....	42

2.8 Termoregolazione .....	47
2.9 Deumidificazione .....	50
2.10 Impianti ad aria e a fan coil .....	51
2.11 Acqua calda sanitaria .....	54
2.11.1 Soluzione con scambiatore a piastre .....	55
2.11.2 Soluzione con scambiatore a serpentino .....	56
2.11.3 Accumulo acqua calda sanitaria .....	57
2.11.4 Metodo della pompa di calore indipendente .....	58
2.12 Accumulo inerziale .....	58

### **Capitolo 3**

<b>Pompe di calore</b> .....	61
3.1 Diffusione nel mondo ed in Europa .....	64
3.2 Classificazione delle pompe di calore .....	66
3.3 Pompe di calore elettriche a compressione .....	67
3.4 Il compressore .....	71
3.4.1 Compressore alternativo .....	72
3.4.2 Compressore scroll .....	73
3.4.3 Compressore a vite .....	75
3.4.4 Compressore a palette .....	75
3.4.5 Compressore centrifugo .....	76
3.5 Evaporatore e condensatore .....	76
3.6 Valvola di espansione .....	78
3.7 Le prestazioni energetiche di una pompa di calore elettrica .....	78
3.8 Tipologie costruttive di pompe di calore elettriche .....	84
3.9 Approfondimento tecnico: innovazioni per le pompe di calore elettriche .....	85
3.10 Prospettive di sviluppo di pompe di calore a refrigeranti naturali .....	87
3.11 Pompe di calore a motore endotermico .....	91
3.12 Configurazioni del sistema a motore .....	94
3.13 Pompe di calore ad assorbimento .....	96
3.14 Ciclo teorico .....	97
3.15 Approfondimento tecnico: innovazioni per le pompe di calore ad assorbimento .....	102
3.16 Pompe di calore elettriche o ad assorbimento? .....	107
3.17 Limiti dell'aria esterna come sorgente termica .....	109
3.18 Sorgenti termiche alternative all'aria .....	109

### **Capitolo 4**

<b>Sottosuolo e perforazioni</b> .....	113
4.1 La classificazione dei sottosuoli .....	113
4.2 Rocce eruttive/igneo .....	114
4.3 Rocce sedimentarie .....	116

4.4 Rocce metamorfiche .....	121
4.5 Metodi di perforazione .....	121
4.6 Perforazione rotativa a circolazione diretta .....	123
4.7 Gli scalpelli .....	125
4.8 Perforazione ad aria .....	126
4.9 Le punte .....	127
4.10 Installazione del cantiere di perforazione .....	127

## Capitolo 5

<b>Proprietà termiche del sottosuolo</b> .....	129
5.1 Grandezze caratteristiche .....	129
5.2 Porosità cinematica .....	130
5.3 Proprietà che influenzano il comportamento termico del sistema sottosuolo-sonda .....	131
5.4 La stabilità termica .....	131
5.5 Il profilo di temperatura del terreno .....	135
5.6 La trasmissione del calore nel suolo .....	136
5.7 La conduzione del calore .....	136
5.8 La conduttività termica .....	139
5.9 Il calore specifico .....	142
5.10 La diffusività termica .....	142
5.11 Misurazione delle proprietà termiche del sottosuolo .....	143
5.12 Il Ground Response Test .....	144
5.13 La prova termica .....	145
5.14 La durata del test .....	147
5.15 Elaborazione dei dati .....	147
5.16 Le linee guida dell'IEA per il GRT .....	149
5.17 Determinazione inversa delle proprietà termiche del suolo .....	151
5.18 L'influenza del flusso dell'acqua di falda .....	152
5.19 Il congelamento del terreno .....	155

## Capitolo 6

<b>Sonde geotermiche verticali</b> .....	157
6.1 Le sonde geotermiche verticali .....	157
6.2 I materiali .....	159
6.3 Diametri e spessori .....	161
6.4 Il piede di sonda .....	161
6.5 La cementazione del perforo .....	163
6.6 I materiali di cementazione .....	166
6.7 Il fluido termovettore .....	169
6.8 I principali fluidi .....	169
6.9 Le caratteristiche fisiche e termiche .....	170

6.10	Analisi comparata dei diversi fluidi utilizzabili .....	171
6.11	Il funzionamento di un impianto geotermico a sonde verticali .....	174
6.12	Allestimento del cantiere .....	176
6.13	Inserimento delle sonde .....	177
6.14	Lay out e interferenza fra sonde geotermiche .....	179
6.15	La disposizione in cantiere .....	180
6.16	I collegamenti orizzontali .....	181
6.17	Collettori distributori .....	182
6.18	Il ritorno inverso .....	183
6.19	Le perdite di carico .....	184
6.20	Calcolo delle perdite di carico nelle sonde .....	192
6.21	Costi di installazione di sonde geotermiche verticali .....	198

## Capitolo 7

<b>Dimensionamento sonde geotermiche</b> .....	199
7.1 Parametri da considerare e considerazioni generali .....	199
7.2 Approcci progettuali .....	205
7.3 La resistenza termica equivalente del pozzo .....	210
7.4 Metodi semplificati .....	211
7.4.1 Metodi semplificati tabellari .....	211
7.4.2 Metodi semplificati analitici: <i>Ingersoll</i> .....	217
7.5 Metodi analitici .....	218
7.5.1 Modello di <i>Ingersoll</i> .....	219
7.5.2 Modello di <i>Hart e Couvillion</i> .....	221
7.5.3 Modello <i>IGSHPA</i> .....	222
7.5.4 Modello di <i>Kavanaugh e Rafferty: metodo ASHRAE</i> .....	225
7.6 Modelli e metodi numerici e ibridi .....	235
7.6.1 Il modello di <i>Eskilson: le long time step g-functions</i> .....	235
7.6.2 L'estensione del modello di <i>Eskilson: short time-step g-functions</i> .....	238
7.6.3 Il modello di <i>Hellstrom</i> .....	239
7.7 Altri modelli .....	241

## Capitolo 8

<b>Scambiatori alternativi</b> .....	243
8.1 Sonde geotermiche orizzontali .....	243
8.2 Dimensionamento semplificato di sonde geotermiche orizzontali .....	247
8.3 Dimensionamento analitico di sonde geotermiche orizzontali .....	249
8.4 La geometria <i>SLINKY</i> .....	252
8.5 Sonde coassiali .....	255
8.6 Recenti sviluppi negli scambiatori coassiali .....	258
8.7 Sistemi ad espansione diretta .....	263
8.8 Sistema <i>GRD: Geothermal Radial Drilling</i> .....	266

8.9 Fondazioni fredde .....	268
8.10 Micropali energetici .....	270
8.11 Utilizzo in Italia di fondazioni fredde e micropali energetici .....	270
8.12 Gallerie ferroviarie .....	271
8.13 Sfruttamento termico delle fognature .....	272
8.14 Il “GeoBag” .....	274
8.15 Scambiatori elicoidali .....	275
8.16 Scambiatore IVT .....	276
8.17 Pozzi canadesi e canali sotterranei ad aria .....	276
8.18 Ventilgeo .....	277
8.19 Canalizzazioni geotermiche orizzontali .....	279
8.20 Bacini idrici .....	281
8.21 Caratteristiche termiche dei bacini idrici superficiali .....	285
8.22 Dimensionamento di sistemi a circuito chiuso .....	286

## Capitolo 9

<b>Sistemi open loop</b> .....	<b>291</b>
9.1 Sistemi ad acque sotterranee .....	293
9.2 Caratteristiche dell’acqua .....	295
9.3 Caratteristiche dei pozzi .....	296
9.4 Dimensionamento .....	297
9.5 Calcolo delle perdite di carico .....	301
9.6 Tipologie di pompe .....	302
9.7 Costruzione del pozzo .....	305
9.8 Numero e posizionamento dei pozzi .....	305
9.9 Scambiatori di calore .....	309
9.10 Sistemi ad acqua superficiale .....	309

## Capitolo 10

<b>Normativa</b> .....	<b>313</b>
10.1 Normativa generale sonde geotermiche .....	314
10.2 Regione Toscana .....	314
10.3 Regione Lombardia .....	315
10.4 Provincia di Bergamo .....	316
10.5 Provincia di Bolzano .....	317
10.6 Provincia di Bologna .....	318
10.7 Provincia di Pavia .....	318
10.8 Provincia di Vicenza .....	319
10.9 Normativa sistemi open loop .....	319
10.10 Normativa nazionale .....	320
10.11 Concessione derivazione acque pubbliche .....	321
10.12 Autorizzazione allo scarico .....	323

## Capitolo 11

<b>Schemi di impianto</b> .....	325
1 Schema termoidraulico di produzione acqua calda con pompa di calore geotermica .....	327
2 Schema termoidraulico di produzione acs boiler con serpentina e resistenza elettrica .....	328
3 Schema termoidraulico di produzione acs serpentino pompa di calore e serpetino pannelli solari .....	329
4 Schema termoidraulico di produzione acs serpentino come secondario dell'acs e serpetino pannelli solari .....	330
5 Schema termoidraulico utilizzatori pannelli a pavimento .....	331
6 Schema termoidraulico utilizzatori fancoils .....	332
7 Schema termoidraulico utilizzatori pannelli e fancoils .....	333
8 Principio di funzionamento impianto pompa di calore geotermica con produzione di acs .....	
estate - fase di produzione di acqua refrigerata senza produzione di acs .....	334
9 Principio di funzionamento impianto pompa di calore geotermica con produzione di acs	
estate - fase di produzione di acqua refrigerata e produzione di acs .....	335
10 Principio di funzionamento impianto pompa di calore geotermica con produzione di acs	
inverno - fase di produzione di acqua refrigerata senza produzione di acs .....	336
11 Principio di funzionamento impianto pompa di calore geotermica con produzione di acs	
inverno - fase di produzione di acqua refrigerata e produzione di acs .....	337
12 Schema termoidraulico collegamento sonde geotermiche - distribuzione con collettori .....	338
13 Schema termoidraulico collegamento sonde geotermiche - distribuzione a due tubi con diametri variabili e ritorno inverso .....	339
 Bibliografia .....	 341