

Índice

Prólogo	V
Índice	VII
Capítulo 1	
Introducción	1
1.1 Generación de energía eléctrica	2
1.2 Climatización centralizada	4
1.3 Hard Dry Rock	4
1.4 Baja entalpía	6
1.5 Climatizar con geotermia	7
1.5.1 Calefacción	7
1.5.2 Refrescamiento	8
1.5.3 Instalación geotérmica	9
1.6 La difusión de las instalaciones geotérmicas	10
1.7 El equilibrio térmico del subsuelo	12
1.8 La sostenibilidad ambiental de los sistemas de intercambio geotérmico	14
1.9 La influencia de la sonda en el subsuelo circundante	15
1.10 Ventajas y límites de los sistemas geotérmicos	16
Capítulo 2	
Climatización	23
2.1 Transmisión del calor	24
2.1.1 Conducción	24
2.1.2 Convección	27
2.1.3 Radiación	28
2.1.4 Inducción	29
2.1.5 Transmisión	30
2.2 Condiciones de confort termo higrométrico	34
2.3 Aire húmedo	34
2.4 Intercambio de calor del cuerpo humano	36
2.5 Pureza del aire	39
2.6 Necesidades térmicas y legislación	40
2.7 Paneles radiantes	44
2.8 Termoregulación	49
2.9 Deshumidificación	52
2.10 Sistemas de aire y fan coils	53
2.11 Agua caliente sanitaria	55
2.11.1 Solución con intercambiador de placas	57
2.12.1 Solución con intercambiador de serpentín	58
2.13.1 Acumulación de agua caliente sanitaria	59
2.14.1 Método de la bomba de calor independiente	60
2.15.1 Acumulación por estratificación con bomba de calor de CO ₂	60
2.12 Acumulación por inercia	63

Capítulo 3	
Bombas de calor	65
3.1 Difusión en el mundo y en Europa	68
3.2 Clasificación de las bombas de calor	70
3.3 Bombas de calor eléctricas a compresión	71
3.4 El compresor	75
3.4.1 Compresor Alternativo	76
3.4.2 Compresor Scroll	77
3.4.3 Compresor de tornillo	79
3.4.4 Compresor de palas	79
3.4.5 Compresor centrífugo	80
3.5 Evaporador y condensador	81
3.6 Válvula de expansión	82
3.7 Prestaciones energéticas de una bomba de calor eléctrica	82
3.8 Tipología constructiva de las bombas de calor eléctricas	89
3.9 Análisis técnico: innovaciones para las bombas de calor eléctricas	90
3.10 Perspectivas de desarrollo de bombas de calor con refrigerantes naturales	92
3.11 Bombas de calor con CO ₂	95
3.12 Bombas de calor con motor endotérmico	98
3.13 Configuración del sistema con motor	101
3.14 Bombas de calor por absorción	103
3.15 Ciclo teórico	104
3.16 Innovaciones para las bombas de calor por absorción	109
3.17 ¿Bombas de calor eléctricas o por absorción?	114
3.18 Límites del aire exterior como suministrador térmico	116
3.19 Suministradores térmicos alternativos al aire	116
3.20 Descuentos fiscales e incentivos	118
3.21 Acoplamiento geotérmico fotovoltaico	125
Capítulo 4	
Subsuelo y perforación	127
4.1 Clasificación del subsuelo	127
4.2 Estructura de la Tierra	128
4.3 Rocas ígneas	130
4.4 Rocas sedimentarias	134
4.5 Rocas metamórficas	137
4.6 Clasificación de los procesos geológicos	138
4.7 Procesos geológicos exógenos	139
4.7.1 Alteración	139
4.7.2 Transporte	139
4.7.3 Sedimentación	140
4.7.4 Litificación	140
4.8 Procesos geológicos endógenos	141
4.9 Depósitos continentales	141
4.10 Clasificación granulométrica	142
4.11 Características geotécnicas de los terrenos	144
4.12 El ciclo del agua	145
4.13 Los acuíferos	146
4.14 La permeabilidad	149
4.15 Las aguas subterráneas	149

4.16	Emergencia hídrica, fuentes, resurgencia	152
4.17	Pozos y piezometría	153
4.18	Medios de prospección geognóstica	156
4.19	Estudio geológico y geomorfológico	157
4.20	Sondeos mecánicos	157
4.21	Pruebas de penetración	158
4.22	Métodos eléctricos	159
4.23	Potenciales espontáneos	160
4.24	Métodos sísmicos por refracción y reflexión	162
4.25	Métodos sísmicos pasivos	163
4.26	Métodos de perforación	168
4.27	Perforación rotatoria con circulación directa	169
4.28	Los cinceles	171
4.29	Perforación con aire	172
4.30	Las puntas	173
4.31	Preparación de la zona de perforación	173
Capítulo 5		
Propiedades térmicas del subsuelo		175
5.1	Variables características	175
5.2	Porosidad cinemática	176
5.3	Propiedades que influyen en el comportamiento térmico del sistema formado por el subsuelo y la sonda	177
5.4	La estabilidad térmica	177
5.5	El perfil de temperatura del terreno	181
5.6	La transmisión del calor en el suelo	182
5.7	La conducción del calor	182
5.8	La conductividad térmica	185
5.9	El calor específico	188
5.10	La difusión térmica	188
5.11	Medición de las propiedades térmicas del subsuelo	189
5.12	El Ground Response Test	190
5.13	La prueba térmica	191
5.14	La duración del test	193
5.15	Elaboración de los datos	193
5.16	La línea guía del IEA por el GRT	195
5.17	Determinación inversa de la propiedad térmica del suelo	197
5.18	La influencia de la circulación del agua subterránea	198
5.19	El congelamiento del terreno	201
Capítulo 6		
Sondas geotérmicas verticales		203
6.1	Sondas geotérmicas verticales	203
6.2	Materiales	205
6.3	Diámetros y espesores	207
6.4	Pies de sondas	207
6.5	Cimentación de la perforación	209
6.6	Material de la cimentación	212
6.7	Fluido calo portador	215

6.8 Los principales fluidos	215
6.9 Características físicas y térmicas	216
6.10 Análisis comparativo de los diferentes fluidos utilizados	217
6.11 Funcionamiento de una instalación geotérmica con sonda vertical	220
6.12 Preparación de la zona de la instalación	222
6.13 Introducción de las sondas	223
6.14 Diseño e interferencias entre sondas geotérmicas	225
6.15 Planificación de la obra	226
6.16 Colectores horizontales	227
6.17 Colectores de distribución	228
6.18 Retorno invertido	229
6.19 Pérdidas de carga	230
6.20 Cálculo de la pérdida de carga en el interior de las sondas	238
6.21 Costes de instalación de sondas geotérmicas verticales	244
Capítulo 7	
Dimensionamiento de las sondas geotérmicas	245
7.1 Parámetros a considerar y consideraciones generales	245
7.2 Aproximaciones al proyecto	245
7.3 Resistencia térmica equivalente del pozo	256
7.4 Métodos simplificados	257
7.4.1 Métodos simplificados tabulados	257
7.4.2 Métodos simplificados analíticos: Ingersoll	263
7.5 Métodos analíticos	264
7.5.1 Modelo de Ingersoll	265
7.5.2 Modelo de Hart y Couvillion	267
7.5.3 Modelo IGSHPA	269
7.5.4 Modelo de Kavanaugh y Rafferty: método ASHRAE	271
7.6 Modelos y métodos numéricos e híbridos	282
7.6.1 Modelo de Eskilson: long time step g-functions	282
7.6.2 Ampliación del modelo de Eskilson: short time-step g-functions	285
7.6.3 Modelo de Hellstrom	286
7.7 Otros modelos	288
Capítulo 8	
Intercambiadores alternativos	291
8.1 Sondas geotérmicas horizontales	291
8.2 Dimensionamiento de las sondas geotérmicas horizontales	303
8.3 Modelo de simulación para sondas geotérmicas horizontales	308
8.4 Sondas coaxiales	317
8.5 Recientes desarrollos en intercambiadores coaxiales	320
8.6 Sistemas de expansión directa	325
8.7 Sistema GRD: Geothermal Radial Drilling	328
8.8 Estructuras frías	330
8.9 Micro pilotes energéticos	332
8.10 Utilización en España y Sur América de estructuras frías y micro pilotes	332
8.11 Túneles	333
8.12 Aprovechamiento térmico de las canalizaciones de saneamiento	334
8.13 El “Geobag”	336

8.14 Intercambiadores helicoidales	337
8.15 Intercambiadores IVT	338
8.16 Pozos canadienses e intercambiadores subterráneos de aire	338
8.17 Ventilgeo o ventilación geotérmica	339
8.18 Canalizaciones geotérmicas horizontales	341
8.19 Cuencas hídricas	343
8.20 Características térmicas de las cuencas hídricas superficiales	346
8.21 Dimensionamiento de sistemas con circuito cerrado	348
Capítulo 9	
Sistemas open loop	353
9.1 Sistemas de agua subterránea	355
9.2 Características del agua	357
9.3 Características de los pozos	358
9.4 Dimensionamiento	359
9.5 Cálculo de las pérdidas de carga	363
9.6 Tipología de las bombas	364
9.7 Construcción del pozo	367
9.8 Número y distribución estratégica de los pozos	367
9.9 Intercambiadores de calor	371
9.10 Sistema con agua superficial	371
Capítulo 10	
Certificación energética	375
10.1 El sector de la edificación español y sur americano	376
10.2 Proyectar de forma integral	377
10.3 Directiva europea y sur americana sobre eficiencia energética	380
10.4 La certificación energética en España y Sur América	381
10.5 Los indicadores de eficiencia energética en Europa y Sur América	383
10.6 El procedimiento de certificación energética	391
10.7 La certificación energética de un edificio con instalación geotérmica	394
Capítulo 11	
Normativa	399
11.1 Normativa general de sondas geotérmicas	400
11.2 España	400
11.3 Portugal	401
11.4 México	402
11.5 Brasil	403
11.6 América del Norte	404
11.7 América Central	404
11.8 América del Sur	405
11.9 Normativa general de los sistemas open loop	405
11.10 Normativa general	406
11.11 Concesión y derivaciones de aguas públicas	407
11.12 Autorizaciones y otras Normativas generales	409

Capítulo 12	
Esquemas de instalaciones	411
12.1 Esquema termo hidráulico de producción de agua caliente con bomba de calor geotérmica	413
12.2 Esquema termo hidráulico de producción de ACS con boiler, serpentín y resistencia eléctrica	414
12.3 Esquema termo hidráulico de producción de ACS con serpentín, bomba de calor y serpentín con paneles solares	415
12.4 Esquema termo hidráulico de producción de ACS serpentín como secundario del ACS y serpentín con paneles solares	416
12.5 Esquema termo hidráulico para utilizar suelo radiante	417
12.6 Esquema termo hidráulico para utilizar fan coils	418
12.7 Esquema termo hidráulico para utilizar suelo radiante y fan coils	419
12.8 Principio de funcionamiento de una instalación de bomba de calor geotérmica con producción de ACS	420
verano - fase de producción de agua refrigerada sin producción de ACS	421
12.9 Principio de funcionamiento de una instalación de bomba de calor geotérmica con producción de ACS	
verano - fase de producción de agua refrigerada y producción de ACS	422
12.10 Principio de funcionamiento de una instalación de bomba de calor geotérmica con producción de ACS	
invierno - fase de producción de agua refrigerada sin producción de ACS	423
12.11 Principio de funcionamiento de una instalación de bomba de calor geotérmica con producción de ACS	
invierno - fase de producción de agua refrigerada y producción de ACS	424
12.12 Esquema termo hidráulico de conexión y enlace de sondas geotérmicas - distribución con colectores	425
12.13 Esquema termo hidráulico de conexión y enlace de sondas geotérmicas - distribución a 2 tubos con diámetros variables y retorno invertido	426
Capítulo 13	
Software de cálculo de intercambiadores de calor geotérmico	428
13.1 Metodología del cálculo asistido por ordenador	459
13.2 Uso correcto del cálculo asistido por ordenador	508
13.3 Interpretación de resultados	537
Bibliografía	588