



Universidad
Zaragoza



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Estado del arte de sistemas de bombas de calor acopladas al terreno

Ingeniería Técnica Industrial
Especialidad Mecánica

Diciembre 2012

Alumno: Alejandro Sesma Baquedano.

Directoras: Belén Zalba Nonay ; Ana Lázaro Fernández.

RESUMEN

La bomba de calor acoplada al terreno o bomba de calor geotérmica es simplemente una bomba de calor que intercambia energía térmica en forma de calor con el terreno. A pesar de ser una tecnología ampliamente difundida en la mayoría de países del Norte de Europa y América, en España todavía es algo emergente.

El presente proyecto fin de carrera se ha realizado por petición de una asociación de dos empresas de Zaragoza, Geoscan y Dolmen Ingeniería, que están tratando de implementar en su campo de trabajo las instalaciones de bombas de calor acopladas al terreno. La principal preocupación que surge es la disminución o aumento de la temperatura del terreno con el paso del tiempo debido a que no se extrae/inyecta la misma cantidad de energía térmica que se inyecta/extrae, y las consecuencias que esto conlleva. Aparte de estudiar este fenómeno, como proyecto fin de carrera se han propuesto otros objetivos: analizar la incertidumbre de los test de respuesta térmica, la metodología de diseño de los intercambiadores de calor acoplados al terreno y la idoneidad de sus parámetros, el software actual identificando fortalezas y debilidades, los métodos de aproximación del rendimiento medio estacional y el valor mínimo para cumplir la normativa europea y la situación en Zaragoza, ciudad pionera en España en bombas de calor acopladas al terreno mediante captación hídrica del acuífero urbano.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría dar las gracias a las directoras de este proyecto, Ana Lázaro Fernández y Belén Zalba Nonay, por ofrecerme la posibilidad de realizarlo y permitirme tener un primer contacto con una empresa de ingeniería. También por su ayuda, implicación y consejos.

A las empresas GEOSCAN y DOLMEN INGENIERÍA, en especial a Alberto Hernández, por resolverme dudas y facilitarme información.

A mis padres y mi hermana por estar siempre a mi lado.

A Mary Paz por su paciencia, comprensión y apoyo siempre que lo he necesitado.

Finalmente a mis compañeros y amigos de la universidad por hacerme más fácil y agradable el transcurso de estos años.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de funcionamiento de la bomba de calor acoplada al terreno	1
Figura 2	Ciclo esquemático de un sistema GSHP en modo refrigeración y en modo calefacción	2
Figura 3	Desarrollo del mercado de las bombas de calor geotérmicas en Europa.	3
Figura 4	Esquema de los diferentes tipos de GSHP	7
Figura 5	Intercambiador de calor abierto	8
Figura 6	Disposición horizontal del intercambiador de calor enterrado	9
Figura 7	Disposición vertical del intercambiador de calor enterrado	9
Figura 8	Configuración simple y configuración doble en GHE horizontal	10
Figura 9	Configuración en serie para GHE horizontal	10
Figura 10	Configuración en paralelo para GHE horizontal	10
Figura 11	Configuración slinky	11
Figura 12	Configuración vertical en simple U y configuración coaxial	12
Figura 13	Tubos en U-simple	12
Figura 14	Tubos en U-doble	12
Figura 15	Configuración en serie para GHE vertical	13
Figura 16	Configuración en paralelo para GHE vertical	13
Figura 17	Variación mensual de la temperatura en distintos medios	20
Figura 18	Evolución anual de la temperatura a distintas profundidades	20
Figura 19	Ejemplo de temperatura ambiente para climas secos	22
Figura 20	Evolución de la temperatura del terreno con la profundidad, curva de embudo	23
Figura 21	Configuración de un TRT	25
Figura 22	Modelo de conducción de calor alrededor de una línea infinita	27
Figura 23	Errores en los TRT, Excel	35
Figura 24	Disposición de los pozos para un TRT en la misma instalación	38
Figura 25	Esquema global de refrigeración	49
Figura 26	Balance en el intercambiador enterrado	50
Figura 27	Esquema global de calefacción	52
Figura 28	Balance en el intercambiador enterrado	53
Figura 29	Configuración de los pozos empleada en la simulación de M.Zamora	56
Figura 30	Configuración de los pozos en la simulación de M.Zamora	58
Figura 31	Configuración de los pozos empleada en la simulación de M.Zamora	59
Figura 32	Efecto de la radiación solar en verano	60

Figura 33	Energía renovable en régimen de calefacción	62
Figura 34	Modelo en 3D de la simulación de Yan Shang	72
Figura 35	Esquema del sistema GCHP-colectores solares con almacenamiento térmico solar estacionario	82
Figura 36	Vivienda unifamiliar con colectores solares y GCHP	85
Figura 37	Esquema de un sistema híbrido GCHP – torre de refrigeración	86
Figura 38	Esquema sistema GCHP – almacenamiento térmico	87
Figura 39	Logo Dolmen Ingeniería	97
Figura 40	Logo Geoscan	97
Figura 41	Logo Soluciones Geotérmicas	98
Figura 42	Propiedades térmicas del terreno a introducir, EED	101
Figura 43	Base de datos EED, entrada propiedades del suelo	102
Figura 44	Ejemplo de configuración en doble L, EED	102
Figura 45	Datos a introducir del pozo e intercambiador de calor, EED	103
Figura 46	Material de relleno a introducir, EED	104
Figura 47	Carga base a introducir, EED	105
Figura 48	Cargas pico a introducir, EED	106
Figura 49	Período de simulación a introducir, EED	106
Figura 50	Datos de costes a introducir, EED	107
Figura 51	Resultados EED evolución temperaturas del último año de simulación	107
Figura 52	Resultados EED temperatura máxima/mínima del fluido caloportador anualmente	108
Figura 53	Ejemplo de bomba de calor seleccionada por GEO ²	109
Figura 54	Configuraciones de los intercambiadores en GEO ²	110
Figura 55	Ejemplo de soluciones mostradas por GEO ²	111
Figura 56	Resultados en GEO ²	112
Figura 57	Errores en los resultados de GEO ²	113
Figura 58	Configuración vertical en GLD	114
Figura 59	Creador de configuraciones en GLD	115
Figura 60	Tubo en U vertical en GLD	116
Figura 61	Configuraciones horizontales en GLD	117
Figura 62	Cargas térmicas zonales en GLD	118
Figura 63	Características de una bomba de calor en GLD	119
Figura 64	Consumo final bruto de energía en 2010	128
Figura 65	Aprovechamientos geotérmicos con bomba de calor en Zaragoza	130
Figura 66	Pozos que aprovechan el acuífero urbano de Zaragoza	131

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Países con más unidades de bombas de calor geotérmicas y más potencia instalada en Europa	4
Tabla 2	Objetivos del proyecto fin de carrera	5
Tabla 3	Comparativa entre tubos en U simple y en U doble	13
Tabla 4	Conductividad y capacidad térmica de algunos tipos de roca	18
Tabla 5	Conductividad y difusividad térmica para distintos tipos de suelo	19
Tabla 6	Errores típicos en distintos tipos de caudalímetros	29
Tabla 7	Errores típicos en sondas termométricas PT100	30
Tabla 8	Máximo error en las propiedades del fluido para MPG (35%) y MEG (35%)	30
Tabla 9	Resultados del TRT para distintos pozos en una misma instalación	39
Tabla 10	Simulación en GEO ² para analizar la profundidad de los pozos con el cambio de la conductividad térmica	40
Tabla 11	Empresas españolas que realizan TRT	43
Tabla 12	Propiedades físicas de los fluidos caloportadores	46
Tabla 13	Materiales de relleno	55
Tabla 14	Resumen de la sensibilidad del COP variando los parámetros de diseño	60
Tabla 15	Rendimiento medio estacional mínimo para cumplir la directiva europea	65
Tabla 16	Datos del estudio realizado por Yong Wang	70
Tabla 17	Tiempo de recuperación a 45 metros para distintos terrenos	74
Tabla 18	Tiempo de recuperación a 45 metros para distintas porosidades	76
Tabla 19	Tiempo de recuperación a 45 metros para distintas difusividades térmicas	77
Tabla 20	Tiempo de recuperación a 45 metros para distintas velocidades del viento	77
Tabla 21	Tiempo de recuperación a 45 metros para distinta radiación solar	78
Tabla 22	Tiempo de recuperación a 45 metros para distinta temperatura exterior	79
Tabla 23	Parámetros de gran influencia en la respuesta del terreno	80
Tabla 24	Parámetros de leve influencia en la respuesta del terreno	80
Tabla 25	Idoneidad de los sistemas híbridos	88
Tabla 26	Empresas en el ámbito de la geotermia en España	90-96
Tabla 27	Comparación de software	120
Tabla 28	Desarrollo histórico del modelo del foco lineal	124
Tabla 29	Indicadores de eficiencia del proyecto GAIA-D	127
Tabla 30	Objetivos del PER en el sector de la calefacción y refrigeración	128

Tabla 31	Captación y vertido de los pozos que aprovechan el acuífero urbano de Zaragoza	132-133
Tabla 32	Climatización y temperaturas de de los pozos que aprovechan el acuífero urbano de Zaragoza	134-135

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1	Evolución de las temperaturas a la entrada y salida del pozo en un TRT	25
Gráfica 2	Análisis de datos secuencial	38
Gráfica 3	Variación de la longitud de perforación total en GHE vertical debido al cambio de λ	41
Gráfica 4	Variación del coste de perforación total en GHE vertical debido al cambio de λ	41
Gráfica 5	Evolución del COP con la distancia entre pozos	57
Gráfica 6	Evolución del EER con la distancia entre pozos	57
Gráfica 7	COP para distintas configuraciones de los pozos	58
Gráfica 8	EER para distintas configuraciones de los pozos	58
Gráfica 9	Evolución del COP con la profundidad del pozo	59
Gráfica 10	Evolución del EER con la profundidad del pozo	59
Gráfica 11	Evolución de η en los últimos años	64
Gráfica 12	Evolución del SPF mínimo en los últimos años	64
Gráfica 13	Evolución del HSPF y CSPF cuando hay desequilibrio en el balance térmico del terreno	69
Gráfica 14	Incremento de la temperatura semanal del terreno en diferentes modos de operación	71
Gráfica 15	Incremento de la temperatura anual del terreno en diferentes modos de operación	72
Gráfica 16	Tiempo de recuperación vs profundidad para distintos terrenos	74
Gráfica 17	Tiempo de recuperación vs profundidad para distintas porosidades	75
Gráfica 18	Tiempo de recuperación vs profundidad para distintos rellenos	76
Gráfica 19	Tiempo de recuperación vs profundidad para distintas velocidades del viento	77
Gráfica 20	Tiempo de recuperación vs profundidad para distinta radiación solar	78
Gráfica 21	Tiempo de recuperación vs profundidad para distinta temperatura exterior	79

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1	Pilote termoactivo	14
Fotografía 2	Pantalla termoactiva	15
Fotografía 3	Toma de agua del TRT	26
Fotografía 4	Generador y equipo de recogida de datos del TRT	26
Fotografía 5	Sonda geotérmica del TRT	27

LISTA DE ACRÓNIMOS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers
BCG	Bomba de Calor Geotérmica
COP	Coefficient of Performance
CSPF	Cooling Seasonal Performance Factor
EED	Earth Energy Designer
EER	Energy Efficiency Ratio
GCHP	Ground Coupled Heat Pump
GHE	Ground Heat Exchanger
GLD	Ground Loop Design
GSHP	Ground Source Heat Pump
GWHP	Ground Water Heat Pump
HSPF	Heating Seasonal Performance Factor
IGSHPA	International Ground Source Heat Pump Association
SPF	Seasonal Performance Factor
SWHP	Surface Water Heat Pump
TRT	Test de Respuesta Térmica
UTES	Underground Thermal Energy Storage

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos del proyecto.....	4
2. Clasificación de los intercambiadores de calor.....	6
2.1. Clasificación según la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).....	6
2.2. Intercambiadores de calor abiertos.....	7
2.3. Intercambiadores de calor cerrados.....	8
2.3.1. Intercambiadores de calor horizontales.....	9
2.3.2. Intercambiadores de calor verticales.....	11
2.4. Cimentación termoactiva.....	13
2.5. Conste de instalación de un Ground Heat Exchanger.....	15
2.5.1. Ejemplo del coste de una instalación de GHE.....	16
2.6. Resumen de los intercambiadores de calor acoplados al terreno.....	16
3. Propiedades térmicas del terreno.....	17
3.1. Evolución de la temperatura con la profundidad.....	19
3.1.1. Métodos para calcular la evolución de la temperatura del terreno.....	21
4. Test de respuesta térmica.....	24
4.1. Funcionamiento del test.....	24
4.2. Evaluación del TRT.....	27
4.3. Errores en los TRT.....	28
4.3.1. Errores de medida.....	29
4.3.2. Errores de parámetro.....	30
4.3.3. Errores de propagación o combinación.....	31
4.3.4. Errores de modelo.....	36
4.4. Contenidos de un informe de un test de respuesta térmica.....	42

4.5. Empresas en España que realizan Test de Respuesta Térmica.	43
5. Diseño del intercambiador de calor enterrado.	45
5.1. Elección de la bomba de calor.	45
5.2. Elección del fluido circulante.	45
5.3. Elección de la configuración a emplear.	46
5.4. Elección de los tubos.	46
5.4.1. Elección de los materiales.	47
5.4.2. Elección del diámetro.	47
5.5. Cálculo de la longitud del intercambiador de calor enterrado.	48
5.5.1. Determinación de la temperatura máxima y mínima de la tierra.	48
5.5.2. Determinación de las temperaturas máximas y mínimas de entrada del fluido a la bomba de calor.	49
5.5.3. Dimensionado en régimen de refrigeración.	49
5.5.4. Dimensionado en régimen de calefacción.	52
5.6. Elección del material de relleno.	54
6. Sensibilidad del COP variando los parámetros de diseño.	56
6.1. Influencia de la distancia entre pozos.	56
6.2. Influencia de la configuración de los pozos.	57
6.3. Influencia de la longitud de los pozos.	59
6.4. Resumen.	60
7. Energía renovable aportada por la bomba de calor.	61
7.1. Estimación del rendimiento medio estacional en bombas de calor acopladas al terreno.	66
7.1.1. Aproximación al SPF a partir del rendimiento de diseño calculado según el método IGSHPA.	66
7.1.2. Corrección por funcionamiento a carga parcial.	66
7.1.3. Corrección por consumos de las bombas de circulación de agua.	67
8. Aumento/disminución de la temperatura del terreno a largo plazo.	69
8.1. Influencia del régimen intermitente.	70

8.2. Tiempo de recuperación del terreno.....	73
8.2.1. Conclusiones	79
9. Sistemas híbridos.....	81
9.1. Sistema híbrido GCHP – colectores solares.....	81
9.2. Sistema híbrido GCHP – torre de refrigeración.....	85
9.3. Sistema híbrido GCHP – almacenamiento térmico.....	86
9.4. Idoneidad de los sistemas híbridos.....	88
10. Empresas del sector.....	89
10.1. Dolmen Ingeniería, Geoscan y Soluciones Geotérmicas.....	97
11. Software.....	100
11.1. GLHEPRO.....	100
11.2. Earth Energy Designer (EED).....	101
11.3. GEO ²	108
11.4. Ground Loop Design (GLD).....	113
11.5. Conclusiones.....	120
12. Modelos matemáticos.....	123
12.1. Foco lineal de Kelvin.....	123
12.2. Modelo de Eskilson.....	125
13. Algunas instalaciones en España.....	127
13.1. Plan de Energías Renovables 2011-2020.....	127
14. Aprovechamiento del acuífero en Zaragoza.....	130
14.1. Criterios técnicos e hidrogeológicos para la explotación sostenible del acuífero.....	137
15. Conclusiones.....	140
15.1. Trabajo futuro.....	143
16. Referencias.....	144

1. Introducción.

Por su principio de funcionamiento, la bomba de calor acoplada al terreno es simplemente una bomba de calor que intercambia energía térmica en forma de calor con el terreno. Esto posibilita una menor demanda de energía primaria por parte del compresor debido a que en muchos momentos el suelo posee condiciones de temperatura más favorables que el aire. Por otro lado implica una gestión energética más compleja que en el caso del aire, puesto que el terreno posee características térmicas más complejas y, con frecuencia, poco conocidas. Según la **guía técnica del IDAE sobre bombas de calor geotérmicas**, este intercambio de energía térmica con el terreno es posible gracias a la estabilidad de temperaturas del terreno a partir de los 10-15 metros de profundidad como se verá más adelante. La bomba de calor acoplada al terreno también se denomina bomba de calor geotérmica de muy baja temperatura, aprovechando terrenos cuya temperatura es inferior a 25°C.

La figura 1 muestra el esquema básico de funcionamiento de la bomba de calor acoplada al terreno. Un fluido caloportador (agua o agua con anticongelante normalmente) circula por el intercambiador de calor enterrado, GHE (del inglés, Ground Heat Exchanger), y se encarga de la transferencia de calor entre el terreno y el fluido circulante por la bomba de calor. En verano, se cede calor al terreno, mientras que en invierno se extrae calor del mismo.

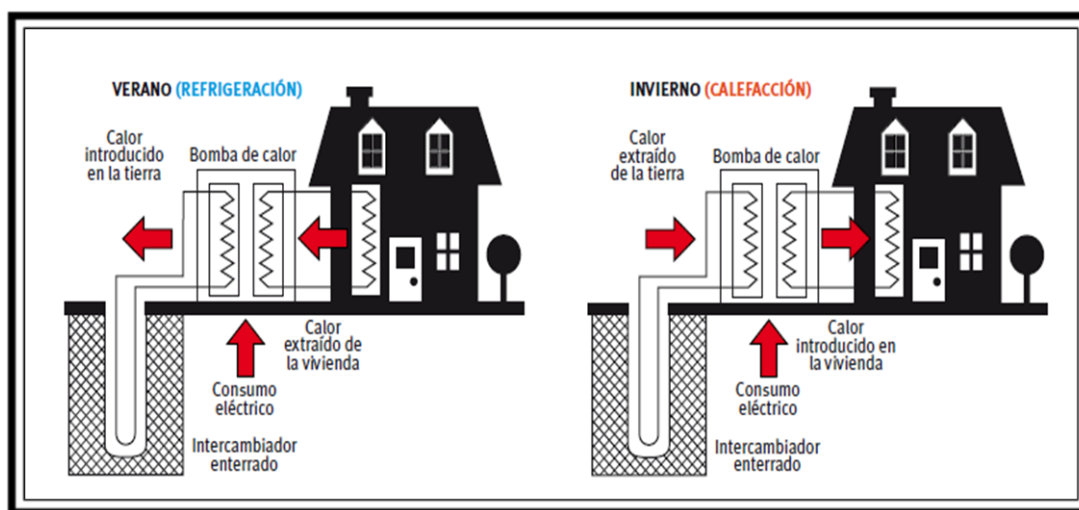


Figura 1: Esquema de funcionamiento de la bomba de calor acoplada al terreno.

Fuente: Guía técnica del IDAE sobre bombas de calor geotérmicas.

Los sistemas de bomba de calor acoplada al terreno consisten en tres bucles o ciclos, tal y como se muestra en la figura 2 (Andrew D. Chiasson, 1999).

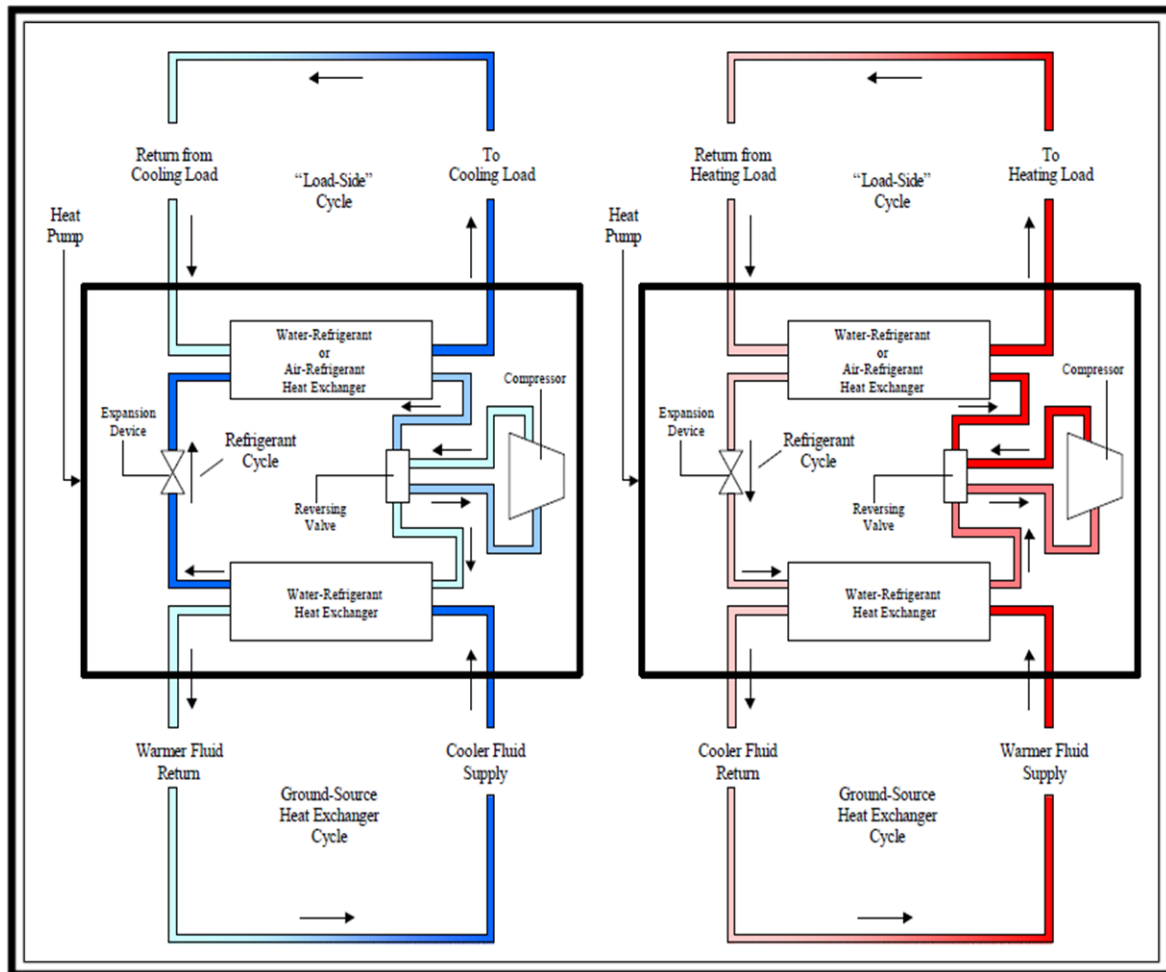


Figura 2: Ciclo esquemático de un sistema GSHP en modo refrigeración (izqda) y en modo calefacción (dcha)
Fuente: Andrew D. Chiasson 1999.

El primer bucle (inferior) es el que realiza el fluido entrante en el intercambiador de calor acoplado al terreno. Después, este fluido circulante va a intercambiar calor con el segundo bucle (centro), que corresponde a la bomba de calor, por la cual circula un fluido refrigerante. Este intercambio de calor se lleva a cabo mediante el condensador si es verano y el evaporador si es invierno. El tercer bucle es el encargado de compensar las cargas térmicas del espacio a climatizar. El refrigerante intercambiará calor con aire o agua mediante el evaporador si es verano y el condensador si es invierno. Con la misma bomba de calor podemos realizar la calefacción y la refrigeración gracias a la válvula de cuatro vías, que permite invertir el ciclo. Tal y como se muestra en la figura 2, este proyecto está basado en ciclos de refrigeración por compresión, dejando a un lado de los ciclos de refrigeración por absorción.

A pesar de ser una tecnología ampliamente difundida en la mayoría de países del Norte de Europa y América (**B. Sanner et al 2003**), las instalaciones de bomba de calor geotérmica son de reciente aplicación en las zonas mediterráneas, donde la demanda de refrigeración prima sobre la de calefacción. Sin embargo, el potencial de desarrollo en los próximos años de estos sistemas es muy elevado. En el año 2010 se estimaba que la potencia instalada en España era de 60 a 100 MWt (**GEOPLAT 2010**), de los cuales más de 30 MWt son aportados por Zaragoza, ciudad pionera en España de los sistemas abiertos de bombas de calor acopladas al terreno, como se verá posteriormente.

Respecto al resto de Europa, en el siguiente mapa se puede observar la situación del desarrollo de las bombas de calor geotérmicas. Mientras que en la zona sur del continente es un mercado emergente, en centro Europa y por el norte ya es algo reciente pero fuerte. Por otro lado los países más consolidados en esta tecnología son Suecia, Alemania, Austria y Francia.

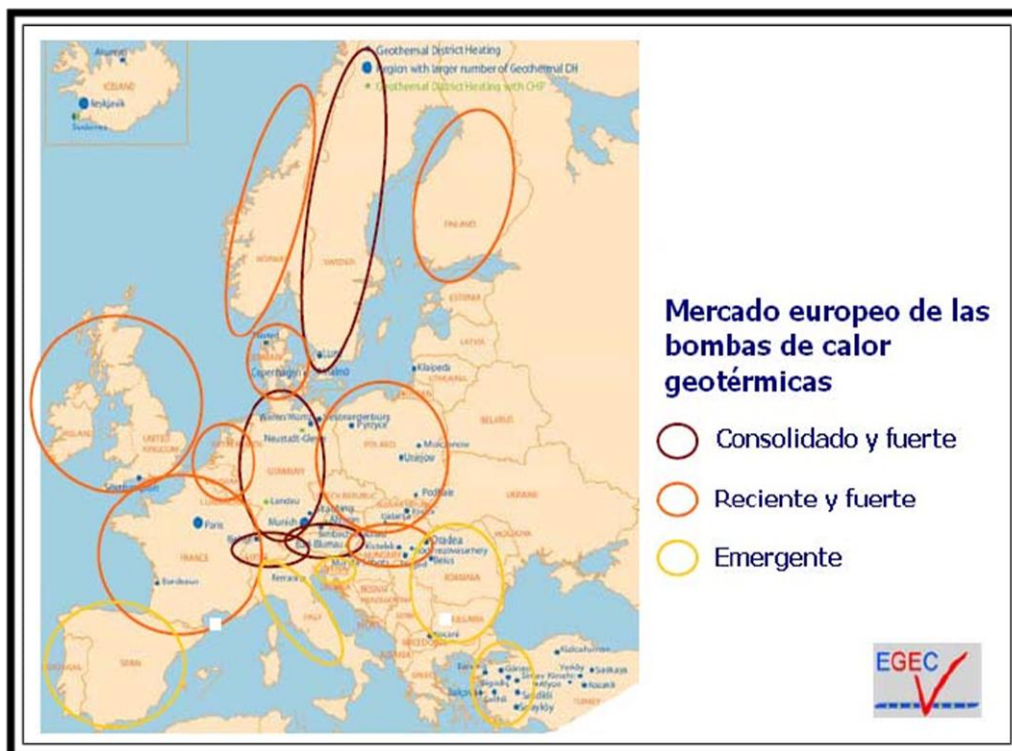


Figura 3: Desarrollo del mercado de las bombas de calor geotérmicas en Europa.
Fuente: EGECE.

La tabla 1 muestra las unidades de bombas de calor acopladas al terreno y la potencia instalada en los países más avanzados en el año 2008. Se observa que España no aparece en dicha tabla. Con mucha diferencia Suecia es el primer país tanto en unidades (320.687) como en potencia instalada (2.909 MWt), seguida de lejos por Alemania y Francia. Aunque Finlandia tiene menos unidades que Austria, su potencia instalada es mayor. Holanda también tiene bastante potencia instalada (508 MWt) respecto al resto de países que están menos avanzados.

País	Unidades	Potencia instalada (MWt)
Suecia	320687	2909,0
Alemania	150263	1652,9
Francia	121886	1340,7
Finlandia	46412	857,9
Austria	48641	544,8
Holanda	19310	508,0
Polonia	11000	180,0
Irlanda	9673	157,0
Italia	7500	150,0
República Checa	9168	147,0
Reino Unido	10350	134,6
Dinamarca	11250	123,8
Bélgica	9500	114,0
Estonia	4874	63,0
Hungría	350	15,0
Eslovenia	1125	12,2

Tabla 1: Países con más unidades de bombas de calor geotérmicas y más potencia instalada en Europa.
Fuente: Egec.

1.1. Objetivos del proyecto.

El presente proyecto fin de carrera se ha realizado por petición de una asociación de dos empresas de Zaragoza, Geoscan y Dolmen Ingeniería, que están tratando de implementar en su campo de trabajo las instalaciones de bombas de calor acopladas al terreno. La principal preocupación que surge es la disminución o aumento de la temperatura del terreno con el paso del tiempo debido a que no se extrae/inyecta la misma cantidad de energía térmica que se inyecta/extrae, y las consecuencias que esto trae como se verá más adelante. Aparte de estudiar este fenómeno, como proyecto fin de

carrera se han propuesto otros objetivos, los cuales se muestran en la siguiente tabla junto al capítulo en el que se trata.

OBJETIVO	CAPÍTULO
Analizar la incertidumbre en los test de respuesta térmica	4
Estudiar la metodología de diseño de los intercambiadores de calor acoplados al terreno	5, 11
Idoneidad de los parámetros de un intercambiador de calor enterrado para obtener un mayor COP/EER	6
Métodos de aproximación al valor del rendimiento medio estacional y cálculo del valor mínimo para cumplir la directiva europea	7
Estudio de la disminución del rendimiento por calentamiento/enfriamiento del terreno a medio/largo plazo	8,9
Analizar el software actual sobre dimensionado de intercambiadores de calor acoplados al terreno (fortalezas y debilidades)	11
COP y EER de las instalaciones verticales en España	13
Situación en Zaragoza	14

Tabla 2: Objetivos del proyecto fin de carrera.

2. Clasificación de los intercambiadores de calor.

En una GSHP nos podemos encontrar varios tipos de intercambiadores de calor acoplados al terreno, entre los que se selecciona en función de diferentes parámetros: espacio superficial disponible, necesidades de calefacción/refrigeración en el edificio, costes de instalación, condiciones climáticas, nivel de agua superficial, tipo de suelo. En primer lugar se va a describir una clasificación a groso modo según la **ASHRAE**, y después una clasificación más extensa según la **guía técnica sobre bombas de calor geotérmicas**.

2.1. Clasificación según la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).

La ASHRAE, denomina a los sistemas de bombas de calor acopladas al terreno GSHP (del inglés Ground Source Heat Pump). En español también se encuentra la denominación BCG (Bomba de Calor Geotérmica). Dichos sistemas se clasifican en:

1. Ground Water Heat Pump (GWHP). La bomba de calor aprovecha el flujo de las aguas subterráneas.
2. Surface Water Heat Pump (SWHP). Se trata de un intercambiador cerrado que intercambia calor con aguas superficiales (acuíferos).
3. Ground Coupled Heat Pump (GCHP). El intercambio de calor con el terreno se lleva a cabo con un intercambiador de calor enterrado y cerrado acoplado al terreno.

En un sistema SWHP, la extracción e inyección de energía térmica en forma de calor se lleva a cabo a través de un fluido circulante mediante tuberías de alta densidad de polietileno posicionadas a una adecuada profundidad en un lago, estanque o embalse (acuífero). La convección natural es el principal causante de la transferencia de calor en los sistemas SWHP. La mayor desventaja de estos sistemas es que la temperatura del agua se ve más afectada por las condiciones climáticas, sobre todo en invierno (**H.Yang et al, 2010**).

En la siguiente figura se observa el esquema de cada uno de estos tipos.

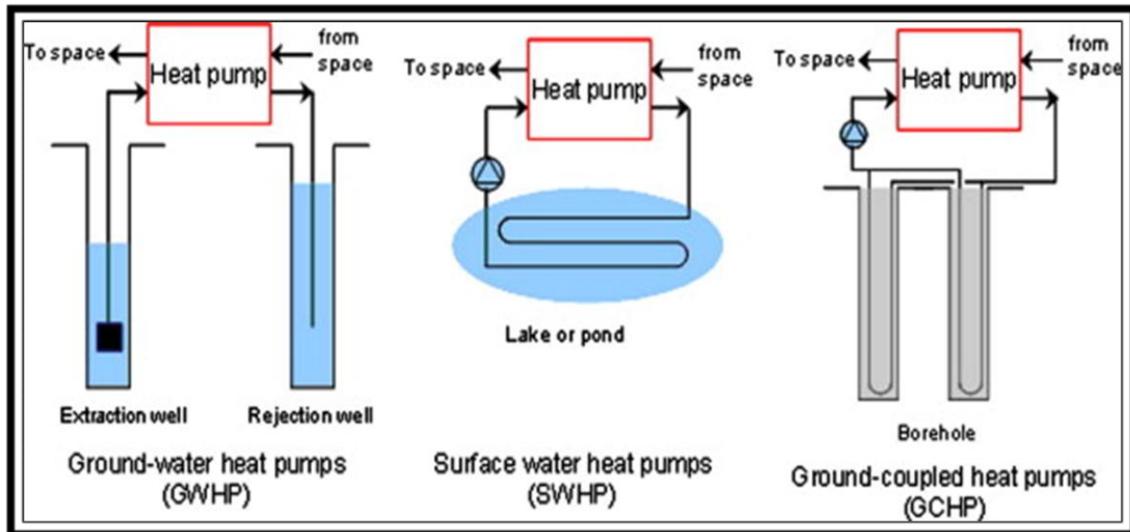


Figura 4: Esquema de los diferentes tipos de GSHP.
Fuente: H. Yang et al 2010.

A continuación se pasa a la descripción según la guía técnica sobre bombas de calor geotérmicas.

2.2. Intercambiadores de calor abiertos.

Se realiza la captación de un recurso hídrico (acuífero, lago, río...) para intercambiar calor devolviéndose posteriormente a su origen, correspondiéndose con el sistema Ground Water Heat Pump visto en el apartado anterior. Hay varios factores importantes a considerar en un sistema abierto. En primer lugar la calidad del agua, lo que puede dar lugar a ensuciamiento, corrosión u obstrucción en el intercambiador de calor primario (con el refrigerante). En segundo lugar la disponibilidad adecuada de agua, porque es necesaria una gran cantidad y puede afectar a la regulación del recurso hídrico. Y en tercer lugar, es qué hacer con el agua de descarga. El agua se necesita re-inyectar en un pozo separado al de extracción a un río o lago. Los códigos locales y regulaciones también pueden afectar la factibilidad de estos sistemas. Debe realizarse un estudio y asegurar que el balance global de energía térmica aportada al acuífero sea nulo, es decir, se debe garantizar que no se modifican las temperaturas del acuífero con el paso del tiempo (*Guía técnica IDAE sobre bombas de calor geotérmicas*).



Figura 5: Intercambiador de calor abierto.
Fuente: Geoprodesign.

Una buena configuración de un sistema abierto, puede suministrar los más altos requerimientos de cargas de calefacción/refrigeración. Con el sistema abierto se consigue un COP más alto, porque la conductividad térmica del agua freática puede ser mayor que la de la tierra, para mismos niveles de temperatura, debido al coeficiente de advección y a que la temperatura se mantiene más constante.

2.3. Intercambiadores de calor cerrados.

En los circuitos cerrados es un fluido caloportador dentro de una tubería el que realiza el intercambio, generalmente con el suelo aunque también se puede realizar con una masa de agua (sistemas SWHP). Dentro de los intercambiadores de calor cerrados se clasifican según la orientación en horizontal y vertical.

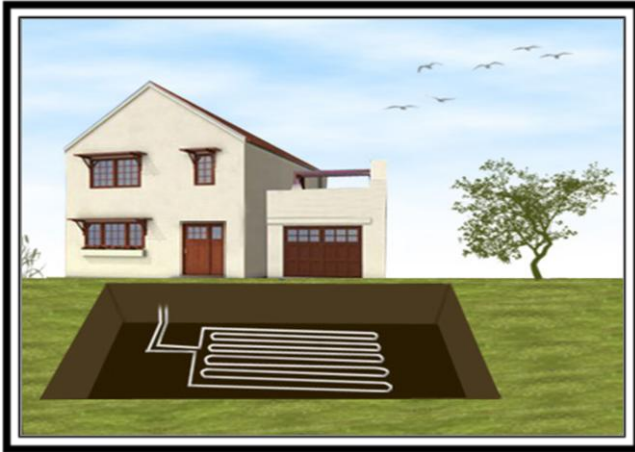


Figura 6: Disposición horizontal del intercambiador de calor enterrado.
Fuente: Geoprodesign.

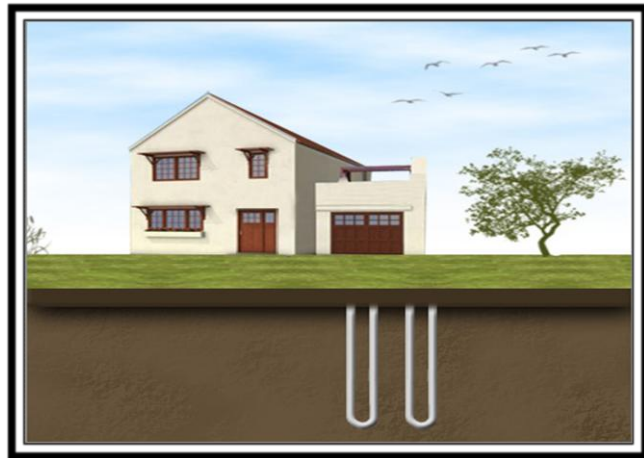


Figura 7: Disposición vertical del intercambiador de calor enterrado.
Fuente: Geoprodesign.

La configuración en horizontal presenta las siguientes diferencias frente a la vertical: tiene mayor dificultad para determinar las condiciones del terreno, tiene mayor influencia de las condiciones climatológicas, más incertidumbre en el diseño, requiere mayor margen de seguridad y es más barato. La configuración horizontal puede emplearse cuando los requerimientos de las cargas de calefacción/refrigeración sean menores (*Göran Hellström 2005*).

2.3.1. Intercambiadores de calor horizontales.

Se trata de la configuración más barata cuando se dispone de un espacio suficientemente extenso para hacer la instalación. El fluido circula a través de las tuberías en el sistema cerrado. El intercambiador horizontal es el sistema más fácil de instalar mientras el edificio se está construyendo. Sin embargo los nuevos sistemas de excavación

hacen posible que también se puedan instalar estos intercambiadores en edificios que ya existen con la mínima perturbación de la capa superior del suelo. A continuación se muestran diversos esquemas de los intercambiadores horizontales:

1. Según el número de tubos, puede ser simple, doble, triple, etc.

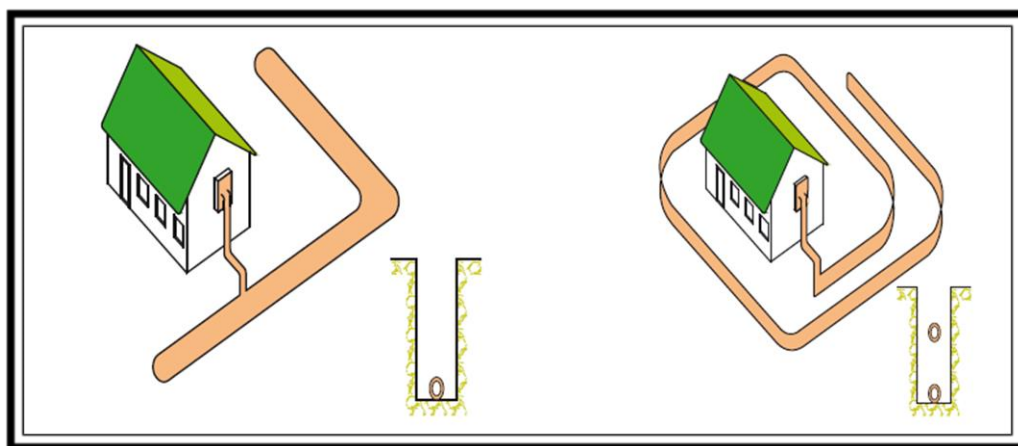


Figura 8: Configuración simple (izquierda) y configuración doble (derecha) en GHE horizontal.
Fuente: Guía técnica del IDAE sobre bombas de calor geotérmicas.

2. Según la trayectoria del fluido, la configuración del intercambiador puede ser en serie o en paralelo.

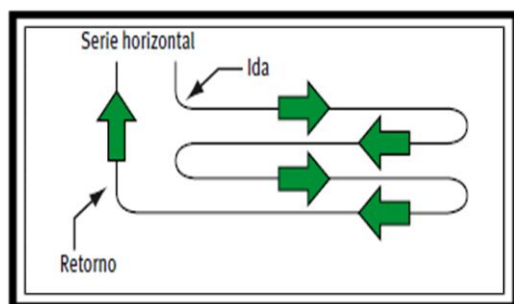


Figura 9: Configuración en serie para GHE horizontal.
Fuente: Guía técnica del IDAE sobre bombas de calor geotérmicas.

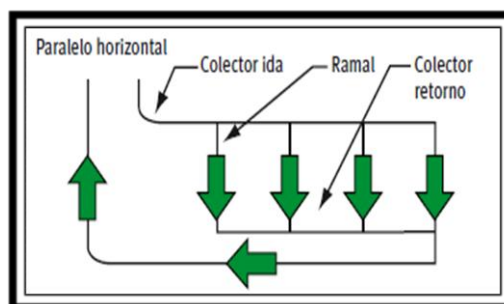


Figura 10: Configuración en paralelo para GHE horizontal.
Fuente: Guía técnica del IDAE sobre bombas de calor geotérmicas.

3. La configuración rizada (o slinky, en inglés) es una variante de la horizontal, consistente en disponer la tubería formando bucles o espiras, que se emplea para instalar la mayor longitud de intercambiador con la menor excavación posible. Se puede hacer uso de esta tipología tanto en zanjas horizontales como en zanjas verticales.

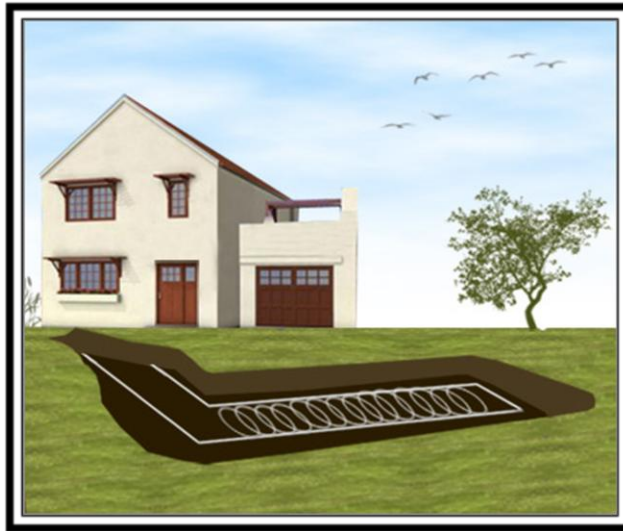


Figura 11: Configuración slinky.
Fuente: Geoprodesign.

2.3.2. Intercambiadores de calor verticales.

Son ampliamente utilizados cuando se dispone de poca superficie y es necesaria una cantidad de energía considerable, además de cuando se desea una interrupción mínima del paisaje. La profundidad que alcanzan estos intercambiadores es de 50-150 metros, de modo que aprovecha la propiedad del terreno de que a cierta profundidad la temperatura se mantiene constante durante todo el año. En función de la litología y el nivel freático se elige un tipo de relleno que garantice la conductividad y altere mínimamente las condiciones del terreno. Generalmente es caro de instalar, aunque se necesita menos tubería que en el intercambiador horizontal. A continuación se muestran diversos esquemas de los intercambiadores verticales:

1. Dependiendo del tipo de tubería instalada distinguimos entre: simple U, doble U y coaxial. La configuración coaxial es más fácil de instalar y es posible su uso en pozos de mayor profundidad, mientras que la configuración en U requiere separadores de los tubos para evitar la transferencia de calor con el tubo de

entrada, el fluido no entra en contacto con la roca y tiene un bajo coste (**Göran Hellström 2005**).

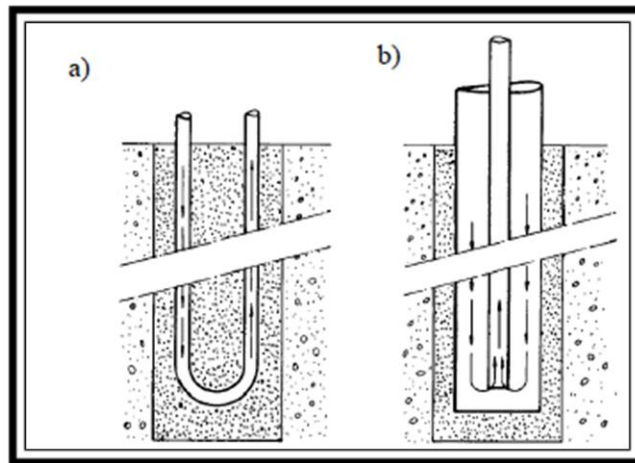


Figura 12: Configuración vertical en simple U (a), y configuración coaxial (b).
Fuente: Göran Hellström 2005.

Cuando la configuración es en simple U está formada por dos tubos, mientras que si es en doble U está formada por 4.



Figura 13: Tubos en U-simple.
Fuente: Juan Franqueza 2008.



Figura 14: Tubos en U-doble.
Fuente: Juan Franqueza 2008.

Kim Reese (2008), estableció una comparativa entre ambos tubos.

Simple U	Doble U
Más barato que doble U	Más caro
Más fácil de instalar	Más pesado y difícil de instalar
Extrae/inyecta menos energía	Mayor extracción/inyección de energía

Tabla 2: Comparativa entre tubos en U simple y en U doble.
Fuente: Kim Reese 2008.

- Al igual que en la configuración horizontal, según la trayectoria del fluido, la configuración del intercambiador puede ser en serie o en paralelo.

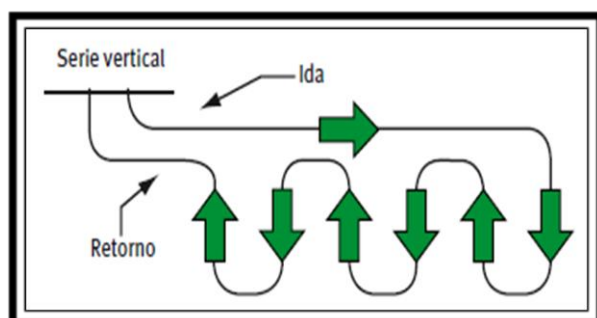


Figura 15: Configuración en serie para GHE vertical.
Fuente: Guía técnica del IDAE sobre bombas de calor geotérmicas

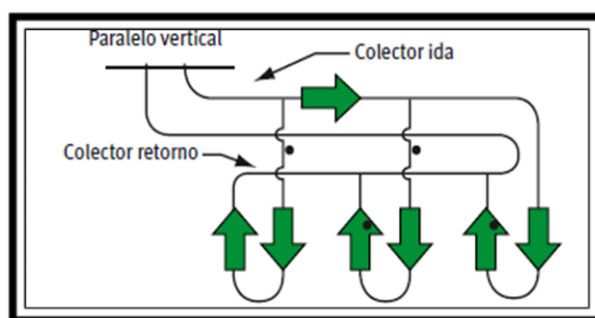


Figura 16: Configuración en paralelo para GHE vertical.
Fuente: Guía técnica del IDAE sobre bombas de calor geotérmicas.

2.4. Cimentación termoactiva.

La cimentación termoactiva es una tecnología aplicable a los elementos de las estructuras de hormigón armado de las cimentaciones especiales, "pilotes" y "pantallas", para la obtención de energía térmica para climatización de edificios a partir del subsuelo.

El intercambio geotérmico se puede realizar por medio de un circuito cerrado instalado en las armaduras de la cimentación (*Alberto Mazariegos et al, 2009*).

Dentro de las cimentaciones termoactivas, se han desarrollado dos líneas de actuación, clasificadas por el procedimiento constructivo, en los siguientes tipos:

- Pilotes termoactivos:
 - Pilote termoactivo hormigonado in situ.
 - Pilote termoactivo prefabricado.
- Pantallas termoactivas:
 - Pantalla continua termoactiva.

Los pilotes termoactivos se definen como una cimentación profunda (función resistente) con la capacidad de llevar a cabo intercambio de calor geotérmico (función térmica) con el subsuelo y el agua subterránea.

Las pantallas termoactivas se definen como un elemento de contención de tierras para realizar excavaciones verticales (función resistente) con la capacidad de llevar a cabo intercambio de calor geotérmico (función térmica) con el subsuelo y el agua subterránea.



Fotografía 1: Pilote termoactivo.
Fuente: Alberto Mazariegos, 2008.



Fotografía 2: Pantalla termoactiva.

Fuente: Ingeopres.

2.5. Conste de instalación de un Ground Heat Exchanger.

En la *Guía Técnica de Sondeos Geotérmicos Superficiales (2009)* podemos encontrar costes orientativos de una instalación geotérmica.

A fecha de 2009, se podían considerar los siguientes costes unitarios de perforación:

- Terrenos consolidados → 40-60 €/m.
- Terrenos poco consolidados con inyección de lodos → 50-70 €/m.

Asociado a la perforación, nos encontramos el coste de traslado y establecimiento del equipo en obra, que dependerá de la distancia a la que se encuentre la misma. Los costes orientativos son los siguientes:

- Si la distancia de traslado es menor de 150 kilómetros → 1500 €.
- Si la distancia de traslado es mayor de 150 kilómetros y menor de 300 kilómetros → 3000 €.
- Si la distancia de traslado es mayor de 300 kilómetros → 6500 €.

Aunque los precios de los intercambiadores de calor o sondas geotérmicas dependerán del tipo elegido y del fabricante, los costes más comunes son los siguientes:

- 900 a 1300 €/ 100 m.

Para el interconexionado entre perforaciones se requieren otros materiales cuyos costes se pueden cifrar en:

- 4 a 7 €/m.

Respecto al material de relleno, para los diámetros más comunes, el coste puede oscilar entre:

- 3,5 a 5 €/m.

El fluido caloportador que rellena las sondas, en concentraciones de anticongelante del orden del 25% tiene un coste de:

- 5 a 7 €/m.

En el caso de la existencia de residuos o lodos, se pueden utilizar contenedores para su retirada, con un coste de:

- 100 a 200 €/m³.

Si además se requiere de una planta móvil para el filtrado de lodos el coste oscilará entre:

- 1500 a 1800 €/día.

2.5.1. Ejemplo del coste de una instalación de GHE.

A continuación se va a calcular el coste de una instalación a modo de ejemplo, para observar a qué cifras puede llegar en total instalar un GHE. Vamos a considerar un sistema GHE, con 8 pozos de 100 metros de profundidad cada uno, sin existencia ni necesidad de lodos en la perforación. Dentro de los intervalos de costes descritos anteriormente, escogeremos siempre el caso más desfavorable, es decir, el más caro.

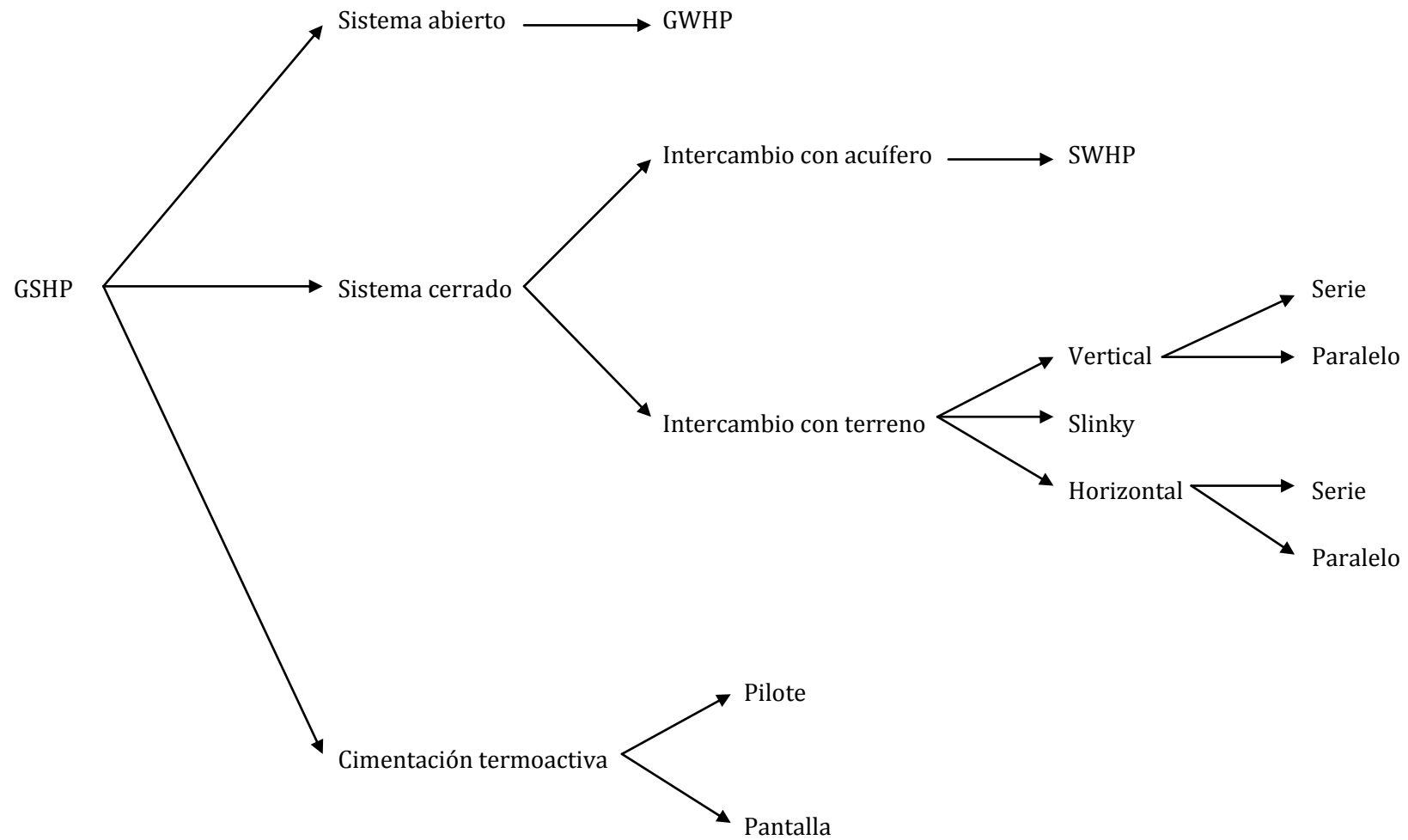
- $\text{Coste}_{\text{perforación}} = 60 \text{ €/m} * 100 \text{ m/pozo} * 8 \text{ pozos} = 48000 \text{ €}.$
- $\text{Coste}_{\text{desplazamiento}} = 6500 \text{ €}.$
- $\text{Coste}_{\text{intercambiador}} = 1300 \text{ €/100 m} * 200 \text{ m/pozo} * 8 \text{ pozos} = 20800 \text{ €}.$
Debemos tener en cuenta que aunque la perforación sea de 100 metros, la longitud del intercambiador debe ser el doble (ida y vuelta).
- $\text{Coste}_{\text{interconexión}} = 7 \text{ €/m} * 10 \text{ m/pozo} * 8 \text{ pozos} = 560 \text{ €}.$ Suponiendo que por cada pozo sean necesarios unos 10 metros.

- $\text{Coste}_{\text{relleno}} = 5 \text{ €/m} \cdot 100 \text{ m/pozo} \cdot 8 \text{ pozos} = 4000 \text{ €}.$
- $\text{Coste}_{\text{fluido}} = 7 \text{ €/m} \cdot 100 \text{ m/pozo} \cdot 8 \text{ pozos} = 5600 \text{ €}.$
- **$\text{Coste}_{\text{total}} = 48000 + 6500 + 20800 + 560 + 4000 + 5600 = 85460 \text{ €}.$**

Con diferencia, el mayor coste es el de perforación, seguido del coste del intercambiador de calor enterrado. Se demuestra que el coste de perforación es el principal causante del encarecimiento de las instalaciones GCHP verticales, ya que en el caso de GCHP horizontales este valor disminuye significativamente, y más aún si se instala el sistema horizontal en el momento en el que se construye el espacio a climatizar. Respecto a los costes de desplazamiento, material de relleno y fluido caloportador, no podemos afirmar rotundamente mediante este estudio cuál es más caro, ya que son precios que no se llevan mucho y pueden variar dependiendo de varios factores: distancia del desplazamiento necesario de la maquinaria de obra, concentración de anticongelante en el fluido caloportador, distinta concentración de cemento y bentonita en el material de relleno, etc. Además, cuanto mayor sea la profundidad del pozo, mayor será el precio del material de relleno y del fluido caloportador, pero el coste de desplazamiento será el mismo. El material de interconexión de pozos va a ser lo más barato de la instalación.

2.6. Resumen de los intercambiadores de calor acoplados al terreno.

(Elaboración propia)



3. Propiedades térmicas del terreno.

Para realizar una correcta instalación GSHP vertical u horizontal es necesario conocer las propiedades térmicas del terreno, que se pueden determinar mediante el Test de Respuesta Térmica (TRT), el cual se explicará más adelante. Uno de los parámetros más importante es la conductividad térmica, con la que podremos estimar la energía térmica que vamos a poder extraer o inyectar mediante el intercambiador de calor enterrado:

$$Q_x = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

Siendo:

- λ la conductividad térmica (W/mK).
- Q_x el flujo de calor por unidad de tiempo que atraviesa el espesor (W).
- A el área de la superficie a través de la cual se produce la transferencia de calor (m^2).
- $\frac{dT}{dx}$ representa el gradiente de temperatura (K/m).

Algunos de los valores más usuales para la conductividad térmica, y también de la capacidad térmica volumétrica, se recogen en la tabla 4 de acuerdo al tipo de terreno (**Paud 2002**). Como se observa, los valores típicos de la conductividad térmica van de 0,4 a 6 W/mK. Los valores más elevados son cuarcita y sal, con 6 y 5,4 W/mK respectivamente. Debemos tener en cuenta que no es común encontrar este tipo de terrenos con conductividades tan elevadas, y que los siguientes valores superiores en la tabla están en torno a 3 W/mK.

Tipo de roca	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica
	Mín.	Valor típico	Máx.	MJ/m³K
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Grabo	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,0
Peridotita	3,8	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
Rocas metamórficas				
Gneis	1,9	2,9	4	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita		Aprox. 5,8		2,1
Micasquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
Rocas no consolidadas				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava, saturada de agua		Aprox. 1,8		Aprox. 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Arcilla/limo, saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
Otros materiales				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	Aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	Aprox. 1,8
Hielo (-10°C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		
Aire (0 - 20°, seco)		0,02		0,0012
Acero		60		3,12
Agua (+ 10°C)		0,58		4,19

Tabla 4: Conductividad y capacidad térmica de algunos tipos de roca.
Fuente: Paud, D. Geothermal energy and heat storage, 2002.

Por otro lado, la difusividad térmica se define como el ratio entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica volumétrica del terreno. Un valor alto de la difusividad térmica quiere decir que el terreno conduce el calor mucho mejor de lo que lo almacena, y un valor bajo significa que el terreno será buen almacenador respecto a cómo conduce el calor.

$$\alpha = \frac{\lambda}{c} \quad (3.2)$$

Donde:

- α es la difusividad térmica (m^2/s).
- λ la conductividad térmica (W/mK)
- C la capacidad térmica volumétrica ($\text{J}/\text{m}^3\text{K}$)

En la mayoría de los casos la determinación de las propiedades térmicas de los suelos es muy complicada. **Labs y Harrington (1982)** realizaron un análisis de los valores de difusividad térmica calculados por **Kusuda (1968)**. El rango de valores para la difusividad térmica que obtuvieron va desde $0,36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ hasta $0,8 \text{ m}^2/\text{s}$, correspondientes a suelos secos, medio y húmedo. **Givoni y Katz** seleccionaron como valores límites $\alpha = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para suelo seco y $\alpha = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para suelo húmedo. El efecto de la humedad es aumentar la conductividad térmica del suelo. Existen estudios realizados sobre la forma en que esta humedad se encuentra dentro de los suelos (en forma de vapor o en forma de agua líquida). En el caso de encontrarse como vapor, los efectos convectivos del vapor de agua entre los granos del suelo hacen que la transferencia de calor sea más eficiente que si se tratara de agua líquida. Algunos de los valores más usuales para la difusividad térmica de acuerdo al tipo de suelo se encuentran en la tabla 5.

Tipo de suelo	Húmedo	Rocoso	Húmedo y compacto	Seco y compacto	Húmedo y ligero	Seco y ligero
λ (W/mK)	2,4	2,4	1,3	0,87	0,87	0,35
α (m^2/s)	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,29 \cdot 10^{-6}$

Tabla 5: Conductividad y difusividad térmica para distintos tipos de suelo.
Fuente: Labs y Harrington 1982.

3.1. Evolución de la temperatura con la profundidad.

Las condiciones climatológicas del ambiente, van a influir en los primeros metros de la profundidad del terreno, pero a medida que aumenta la profundidad se llega a una temperatura constante durante todo el año (aproximadamente a partir de 10-15 metros).

En la siguiente figura se muestra un ejemplo a modo de comparación de la evolución mensual de la temperatura del ambiente (rojo), del agua del freático (azul) y del terreno a poca profundidad amarillo) (*CTEC, 2005*):

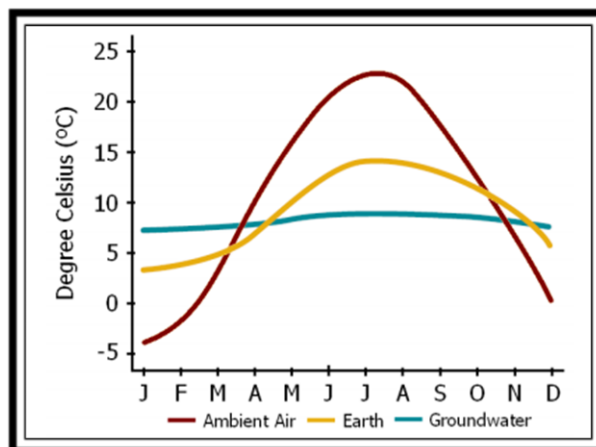


Figura 17: Variación mensual de la temperatura en distintos medios.
Fuente: CTEC 2005.

A continuación se muestra una figura que representa la evolución diaria de las temperaturas a lo largo de un año para un punto situado a diferentes profundidades bajo la superficie. Las temperaturas son típicas de Valencia (*Teresa Magraner 2010*).

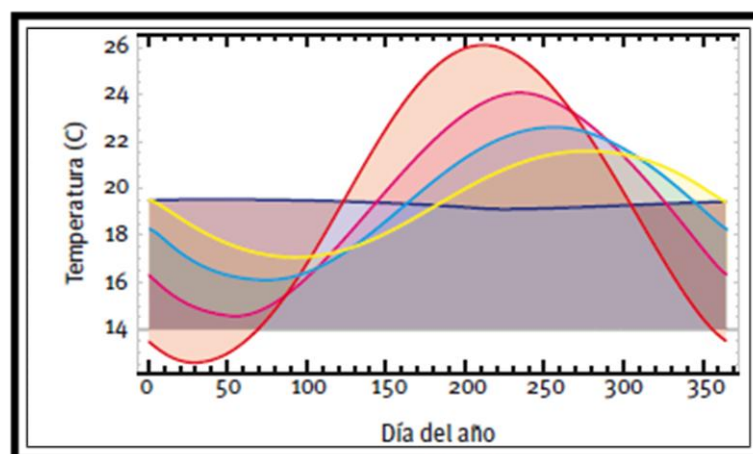


Figura 18: Evolución anual de la temperatura a distintas profundidades.
Fuente: Teresa Magraner 2010.

Se observa que, a medida que se incrementa la profundidad, la amplitud de las oscilaciones térmicas decrece y sus máximos y mínimos se van desfasando. La curva de color rojo corresponde a la oscilación inmediatamente bajo la superficie. En magenta, azul claro, amarillo y azul oscuro se representan respectivamente la temperatura a 1 m, 2 m, 3 m y 10 m.

El gradiente geotérmico es el aumento de la temperatura con la profundidad y se estima que empieza a partir de unos 100 metros de profundidad, con un aumento de la temperatura de 1,5-3 °C cada 100 metros. Por este motivo, solo se va a considerar en instalaciones geotérmicas verticales cuya profundidad supere los 100 metros.

3.1.1. Métodos para calcular la evolución de la temperatura del terreno.

Suponiendo un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes, la temperatura a cualquier profundidad z puede calcularse a partir de la siguiente expresión (*Kusuda y Achenbach, 1965*):

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365 \alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi \alpha}} \right) \right] \quad (3.2)$$

Donde:

- $T(z, t)$ es la temperatura en °C del suelo en el tiempo t a una profundidad z .
- T_m es la temperatura media anual del suelo en °C a una profundidad donde no son perceptibles las variaciones de temperatura, es decir, la temperatura que permanece constante en el terreno durante todo el año. Se asume como constante hasta profundidades de 100 metros.
- A_s la oscilación anual de la temperatura superficial. Depende de la localización, del tipo de suelo y del contenido en agua.
- t es el tiempo en días.
- t_0 es el desplazamiento de la temperatura superficial con la profundidad. Esto es el retraso en días de las temperaturas máximas y mínimas del suelo a cierta profundidad comparado con las temperaturas máximas y mínimas en la superficie.
- α es la difusividad térmica del terreno en $m^2/\text{día}$.

La ecuación anterior es válida cuando la variación de temperatura ambiente es senoidal. En climas secos esta aproximación no es válida; la temperatura ambiente se aproxima más a una parábola seguida de una exponencial decreciente que a una curva del tipo senoidal.

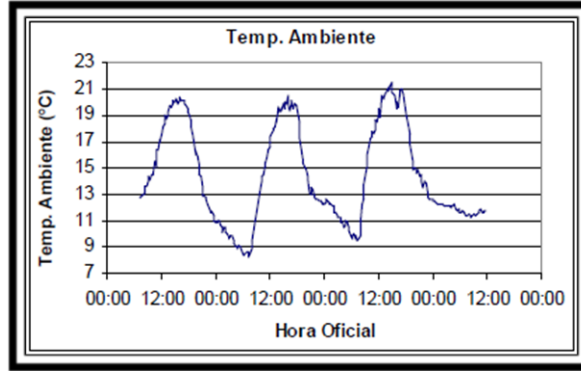


Figura 19: Ejemplo de temperatura ambiente para climas secos.
Fuente: Silvana Flores et al.

En estos casos, se realiza un desarrollo en serie de Fourier de la temperatura ambiente:

$$T_{\text{amb}}(t) = T_m - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{2n\pi}{365t} - \phi_n\right) \quad (3.3)$$

En donde A_n y ϕ_n son los coeficientes de amplitud y fase del desarrollo de Fourier de la temperatura ambiente y T_m es la temperatura ambiente media anual. Se toman cuatro términos del desarrollo en serie. Estos cuatro términos son suficientes para representar las distribuciones de temperatura ambiente y del suelo (*Erbs et al., 1983; Flores Larsen y Lesino, 1999*). A continuación, los parámetros de Fourier obtenidos (amplitud y fase) son integrados en la nueva ecuación (*Carlslaw y Jaeger, 1959*).

$$T(z,t) = T_m - \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos\left(\frac{2n\pi}{365t} - \phi_n - z\sqrt{\frac{n\pi}{365\alpha}}\right) \quad (3.4)$$

En donde α es la difusividad térmica del suelo, t el tiempo y z la profundidad. De la ecuación 3.4 se puede ver que la amplitud de oscilación de la temperatura del suelo disminuye con la profundidad, por lo que a mayor profundidad se encuentra una temperatura más estable y cercana a la media anual. Las hipótesis con las que se trabaja es que la distribución de temperatura del suelo no se ve afectada significativamente por la presencia del GHE, debido a que el intercambio de calor con la gran masa del suelo permite considerarlo como una fuente (o sumidero) de calor. Resulta llamativo que por un lado se denomina al terreno como un foco, con lo que, por su propia definición, no varía su temperatura. Por otro lado un problema en las bombas de calor geotérmicas es el aumento o la disminución de la temperatura del terreno con el paso del tiempo debido a que se extrae/inyecta más energía térmica de la que se inyecta/extrae en el terreno. Por tanto las

hipótesis anteriores son cuestionables y pierden validez cuando se trabaja con el suelo como acumulador estacional.

Otras formas para determinar las temperaturas del suelo parten del conocimiento de las condiciones de temperatura locales del suelo basadas en la experiencia o datos medidos. Existen gráficas de diseño como las de la figura 20, llamadas curvas de embudo, para determinar la temperatura máxima y mínima del suelo en función del día y de la profundidad del suelo (*Guía técnica IDAE sobre bombas de calor geotérmicas*).

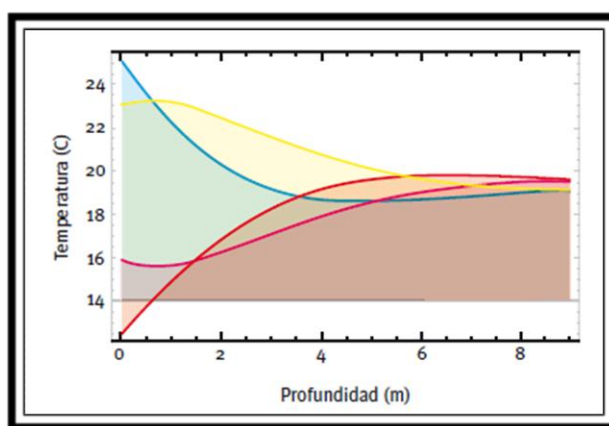


Figura 20: Evolución de la temperatura del terreno con la profundidad, curva de embudo.
Fuente: Guía técnica del IDAE sobre bombas de calor geotérmicas.

La curva roja corresponde al día 30 del año, la curva magenta al día 90, la azul clara al 180 y la amarilla al día 270.

4. Test de respuesta térmica.

Para diseñar el intercambiador de calor enterrado para el sistema GSHP o para un sistema de almacenamiento térmico subterráneo (UTES, *Underground Thermal Energy Storage*), es imprescindible conocer las propiedades térmicas del terreno. En pequeñas instalaciones basta con estimar estas propiedades, pero en instalaciones a gran escala se debe realizar una medida in situ de la conductividad térmica del terreno. Una herramienta útil para llevar a cabo esta tarea es realizar un test de respuesta térmica en un pozo piloto que después sea utilizado en la instalación. Básicamente consiste en introducir en el pozo una carga térmica y observar la variación de temperatura del fluido circulante. Desde los años 90 esta tecnología se está haciendo popular y en algunos países se lleva a cabo rutinariamente para dimensionar intercambiadores enterrados basándose en datos del terreno (**B. Sanner et al 2003**).

El parámetro más importante es la conductividad térmica del terreno, ya que es específica del lugar. El contacto térmico de las paredes del pozo y el fluido circulante, puede ser controlado mediante diversos parámetros, como son el diámetro del pozo y la tubería, el material de la tubería, el material de relleno entre pozo y tubería, o el fluido circulante.

Así pues podemos decir que el test de respuesta térmica (TRT) es un método adecuado para determinar la conductividad térmica efectiva del terreno y la resistencia térmica del pozo. Otros efectos como el transporte de calor por convección (en capas permeables con agua del freático) y otras posibles perturbaciones se incluyen en el estudio, por eso es más correcto hablar de conductividad térmica efectiva (λ_{eff}).

4.1. Funcionamiento del test.

La disposición general de un TRT se muestra en la figura 21. Para obtener buenos resultados, es crucial configurar el sistema correctamente y minimizar las influencias exteriores. Esto se hace más fácilmente con el calentamiento del terreno (mediante resistencias eléctricas) que con la refrigeración del terreno (mediante la bomba de calor). Sin embargo, y también con las resistencias eléctricas, puede haber fluctuaciones en la

tensión del generador, lo que puede llevar a fluctuaciones de la potencia térmica inyectada en el terreno (**B. Sanner et al 2003**).

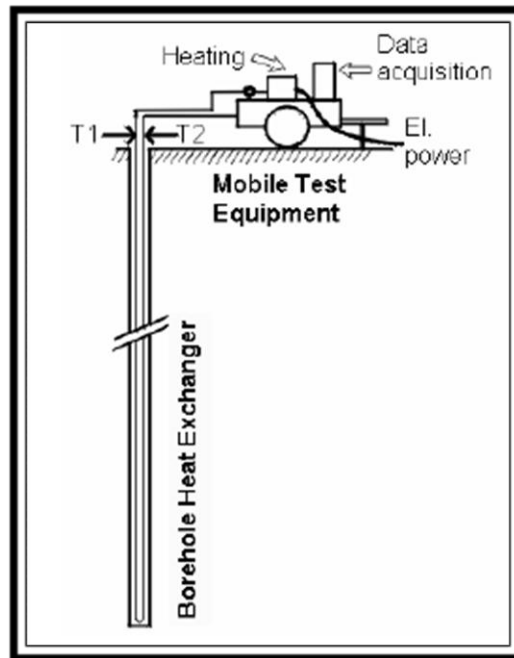
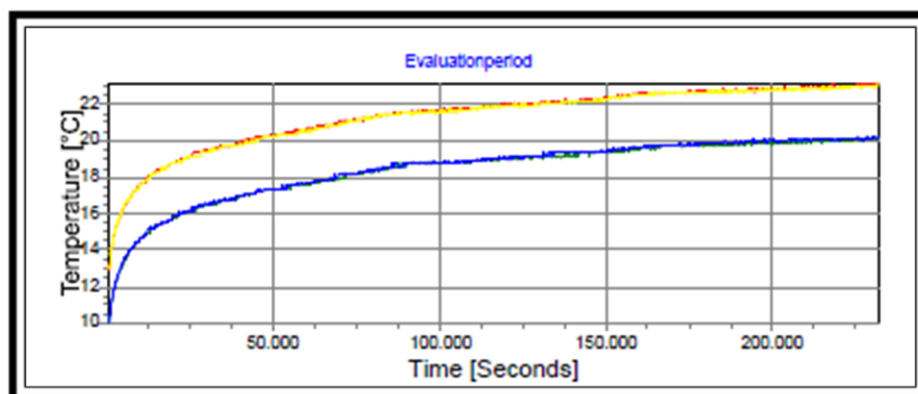


Figura 21: Configuración de un TRT.
Fuente: B. Sanner et al 2003.

Un equipo de recogida de datos irá evaluando el aumento de las temperaturas de entrada y salida del fluido circulando por el pozo, llevando a cabo una gráfica de la evolución de la temperatura frente al tiempo, como la que se muestra en la gráfica 1. En este caso la línea amarilla se corresponde a la temperatura del fluido caloportador a la salida y la línea azul a la temperatura de entrada.



Gráfica 1: Evolución de las temperaturas a la entrada y salida del pozo en un TRT.
Fuente: B. Sanner et al, 2007.

Las siguientes fotografías corresponden a un test de respuesta térmica donde se puede apreciar el conjunto en sí de los equipos. En la fotografía 3 se muestra la toma de agua que viene de la boca de incendios y va acoplada al resto del equipo, en la fotografía 4

el generador y el equipo de recogida de datos y en la fotografía 5 la sonda geotérmica con los tubos de ida y retorno.



Fotografía 3: Toma de agua del TRT.
Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 4: Generador y equipo de recogida de datos del TRT.
Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 5: Sonda geotérmica del TRT.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Evaluación del TRT.

La manera más fácil de evaluar los resultados del TRT es utilizar el modelo matemático de la teoría del foco lineal desarrollada por Kelvin en 1861, aplicada al acoplamiento en el terreno por **Ingersoll y Plass en 1948**. El modelo del foco lineal se basa en la aproximación de que el intercambiador vertical es una fuente lineal infinita, considerando el suelo como un medio homogéneo a una temperatura inicial constante T_s .

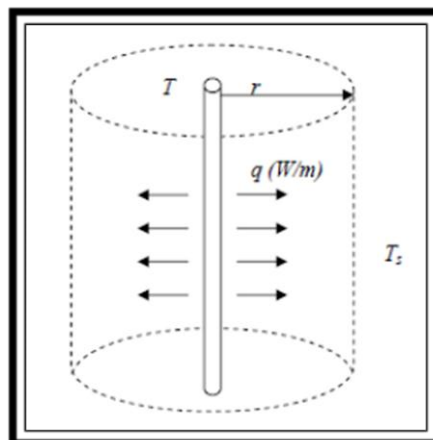


Figura 22: Modelo de conducción de calor alrededor de una línea infinita.
Fuente: Samuel Iglesias 2010.

Posteriormente, Eklöf y Gehlin, aproximaron una fórmula a partir de este modelo, que es la empleada para hallar la conductividad térmica del terreno:

$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi Hk} \quad (4.1)$$

Siendo:

- k el valor del coeficiente de regresión obtenido de la gráfica de la temperatura frente al tiempo en escala logarítmica (K/ln(s)).
- Q la potencia térmica inyectada/extraída (W). Los test comunes inyectan en el terreno una potencia mayor de 50 W/m (**Henk J. L. Witte, 2012**).
- H la profundidad del intercambiador enterrado (m).
- λ_{eff} la conductividad efectiva del terreno, incluyendo el posible flujo de las aguas subterráneas (W/mK).

Una vez calculada la conductividad, podemos calcular la resistencia del pozo con la siguiente expresión (**Bruno 2011**):

$$R_b = \frac{H}{Q} (m - T_g) - \left[\frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\lambda}{r_0^2} \right) - \gamma \right] \right] \quad (4.2)$$

Siendo:

- m el valor de la intersección del coeficiente de regresión de la temperatura con el logaritmo neperiano del tiempo (K).
- T_g la temperatura media del terreno (K).
- r_0 el valor del radio del pozo (m).
- γ la constante de Euler: 0,577215.
- c la capacidad calorífica específica del fluido (J/kg·K).

4.3. Errores en los TRT.

Henk J. L. Witte (2012), ha expuesto recientemente un análisis de errores en los TRT, clasificándolos en errores de medida, errores de parámetro, errores de propagación o combinación y errores de modelo. A continuación se explican cada uno de ellos.

4.3.1. Errores de medida.

Estos errores son los asociados a la precisión de los sensores usados en el equipo y las variaciones en medidas llevadas a cabo repetidamente durante el experimento. Los errores de medida durante un test son un resultado de los errores de precisión y perturbación y se deben a tres motivos:

1. La calibración del aparato de medida.
2. Precisión debido a que el aparato debe medir repetidamente bajo condiciones perfectamente constantes. Aquí entra en juego la forma en la que se ha instalado el sistema.
3. Perturbación del valor actual del parámetro medido. Por ejemplo, la temperatura del fluido caloportador está variando constantemente mientras realiza una medida.

Dentro de los errores de medida se encuentran el caudal, las temperaturas de ida y retorno del fluido caloportador en el GHE, la medida de la potencia inyectada y el tiempo.

Caudal. Existen distintos tipos de caudalímetros, aunque en general la medida en un TRT se lleva a cabo por un caudalímetro electromagnético. Los errores relativos y absolutos de algunos caudalímetros dados por fabricantes se muestran en la siguiente tabla. El error absoluto se ha calculado con un caudal de referencia de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ y 20°C , que suele ser las condiciones para las que se da el máximo error en un TRT.

Caudalímetro	Error relativo (%)	Error absoluto
Electromagnético instalado en tubería de diámetro nominal 50 mm. ($0\text{-}1,5 \text{ m}^3/\text{h}$).	$\pm 0,33$	$\pm 0,005 \text{ m}^3/\text{h}$
Coriolis (masa)	$\pm 0,15$	$\pm 3,36 \text{ kg/h}$
Coriolis (volumen)	$\pm 0,25$	$\pm 0,0004 \text{ m}^3/\text{h}$
Ultrasónico	$\pm 0,5$	$\pm 0,0075 \text{ m}^3/\text{h}$

Tabla 6: Errores típicos en distintos tipos de caudalímetros.

Fuente: Henk J.L. Witte, 2012.

Temperatura de ida y retorno del fluido. Debido a su robustez, estabilidad de medida en poco tiempo y facilidad de instalación, normalmente se utilizan sondas PT100. Estas se encuentran disponibles en diferentes clases, la tolerancia de la clase A es $0,15 + 0,002 \cdot |T|$; la tolerancia de la clase B es $0,3 + 0,005 \cdot |T|$. El intervalo de error a la hora de calcular la diferencia entre la temperatura de ida y retorno del GHE, puede ir de $0,21$ a $0,35 \text{ K}$.

Sonda termométrica	Error relativo (%)	Error absoluto (K)
PT100 (a 0,5 °C)	± 30,0	± 0,15
PT100 (a 50 °C)	± 0,5	± 0,25
PT100 (ΔT 5°C)	± 5,4	± 0,27
PT100 (a 0,5 °C)	± 1,2	± 0,06 K

Tabla 7: Errores típicos en sondas termométricas PT100.
Fuente: Henk J.L. Witte, 2012.

Medidor de potencia. Mide la potencia inyectada en el terreno. El error relativo de esta medida es menor del 2 %.

Medida del tiempo. En un test de 100 horas el error de tiempo puede ir de $8,6 \cdot 10^{-4}$ a $1,6 \cdot 10^{-3}$ segundos. No es un error relevante y se ignora.

4.3.2. Errores de parámetro.

Errores en los parámetros que se miden una vez y por separado (por ejemplo, la longitud del pozo o la densidad del fluido caloportador) o que se estiman o son obtenidas de otra fuentes (tales como la capacidad calorífica del terreno o el fluido).

Densidad y capacidad calorífica media del fluido. Estos valores se necesitan para calcular la potencia inyectada. Varían con el tipo de fluido, el ratio de mezcla y la temperatura. Debido a su dependencia con la temperatura, varían durante todo el experimento. Normalmente la mezcla es agua con anticongelante glicol monopropileno (MPG) o monoetileno (MEG). A partir de las propiedades de los fluidos puros, podremos calcular las propiedades del fluido mezclado. Considerando un 35 % de anticongelante en la mezcla, los errores máximos en las propiedades se consideran los de la tabla 8.

Fluido	Propiedad	Error relativo (%)	Error absoluto
MPG	Densidad	1,5	16,2 kg/m ³
MPG	Ratio de mezcla	2,9	1%
MPG	Capacidad calorífica	2	90 J/kgK
MEG	Densidad	1,5	13,8 kg/m ³
MEG	Ratio de mezcla	2,8	0,98%
MEG	Capacidad calorífica	2	90 J/kgK

Tabla 8: Máximo error en las propiedades del fluido para MPG (35%) y MEG (35%).
Fuente: Henk J.L. Witte, 2012.

Capacidad calorífica volumétrica del terreno. Se suele estimar a partir del perfil geológico del terreno. No es fácil de definir, pero en un rango de capacidad calorífica de 2,0 - 3,4 MJ/m³K un error absoluto de $\pm 0,2 - 0,51$ MJ/m³K (error relativo de 10-15%) puede ser razonablemente conservador.

Longitud activa del GHE. Antes de introducirse el tubo en el pozo debería ser medido, sin olvidarnos de la calibración de la cinta métrica y su precisión (si mide en centímetros, milímetros, etc). Cuando un pozo no está correctamente relleno, el tubo puede hundirse, cambiando de esta manera la longitud activa del pozo y por tanto la tasa de inyección de calor.

Radio del pozo. Debemos tener en cuenta que el radio del pozo debería ser constante a lo largo de su profundidad, pero esto no siempre es así. Witte, considera un error absoluto de $\pm 0,02$ m para un valor de referencia de 0,1 m.

Coefficientes k y m (ecuaciones 4.1 y 4.2). Sugiere calcular su error a partir de sus desviaciones estándar. Se puede calcular el error absoluto con un intervalo de confianza del 95% con la expresión $\pm 1,96 \cdot$ desviación estándar (k).

4.3.3. Errores de propagación o combinación.

Son los errores causados por la combinación de los parámetros y medidas explicadas anteriormente, ya que a partir de ellas será necesario hallar otros parámetros mediante fórmulas. A continuación se van a exponer las fórmulas que nos van a determinar el error de los parámetros necesarios para calcular la conductividad y resistencia térmica, basadas en estadística básica.

Diferencia de temperatura de ida y retorno.

$$\delta\Delta T = \sqrt{(\delta T_{\text{ret}})^2 + (\delta T_{\text{in}})^2} \quad (4.3)$$

Donde:

- δT_{ret} es el error absoluto de la temperatura de retorno del fluido caloportador (incertidumbre de la sonda PT100).
- δT_{in} es el error absoluto de la temperatura de ida del fluido caloportador (incertidumbre de la sonda PT100).
- $\delta\Delta T$ es el error absoluto de la diferencia entre ambas temperaturas.

Temperatura del terreno.

$$\delta T_g = \frac{\sqrt{\sum_{d=1}^n (\delta T_g(d))^2}}{n} \quad (4.4)$$

Donde:

- δT_g es el error absoluto de la temperatura del terreno.
- $\delta T_g(d)$ es el error absoluto de cada medida que tomamos del terreno. Por ejemplo, si en un pozo de 100 metros colocamos una sonda termométrica cada 5 metros, $\delta T_g(d)$ sería el resultado de cada una de las 20 sondas.

Temperatura media. El error de la temperatura media va a depender si realizamos una media aritmética o logarítmica.

- Aritmética.

$$\delta T_f = \frac{\sqrt{(\delta T_{ret})^2 + (\delta T_{in})^2}}{2} \quad (4.5)$$

Donde:

- δT_{ret} es el error absoluto de la temperatura de retorno del fluido caloportador (incertidumbre de la sonda PT100).
- δT_{in} es el error absoluto de la temperatura de ida del fluido caloportador (incertidumbre de la sonda PT100).
- δT_f es el error absoluto de la temperatura media del fluido caloportador.

- Logarítmica.

$$\delta T_f = \sqrt{\left(\frac{\Delta T_f}{\Delta T_g} \delta T_g\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta T_{in}} \delta T_{in}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta T_{ret}} \delta T_{ret}\right)^2} \quad (4.6)$$

Donde:

- ΔT_f es el incremento de la diferencia entre la temperatura de ida y retorno del fluido caloportador, respecto a las variables por las que está dividida en cada término dentro del radical.

Potencia inyectada. El generador que utilizemos para inyectar la potencia en el terreno vendrá con su potencia nominal. No obstante se puede calcular con la siguiente expresión:

$$Q = q_v \rho c \Delta T_f \quad (4.7)$$

Donde:

- Q es la potencia en W.
- q_v es el caudal en m³/s.
- ρ es la densidad del fluido caloportador en kg/m³.
- c es la capacidad calorífica del fluido caloportador en J/kg·K.
- ΔT_f es el incremento de la diferencia entre la temperatura de ida y retorno del fluido caloportador en K.

La expresión que determina el error absoluto de la potencia inyectada es la siguiente:

$$\frac{\delta Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\delta q_v}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\delta c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T_f}{\Delta T_f}\right)^2} \quad (4.8)$$

Donde:

- δQ es el error absoluto de la potencia inyectada.
- δq_v es el error absoluto del caudal.
- δc es el error absoluto del calor específico.
- $\delta \Delta T_f$ es el error absoluto del incremento de temperaturas.

Conductividad térmica.

$$\frac{\delta \lambda_{TRT}}{\lambda_{TRT}} = \sqrt{\left(\frac{\delta q_v}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\delta c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k}\right)^2} \quad (7.9)$$

Donde:

- $\delta\lambda_{TRT}$ es el error absoluto de la conductividad térmica del terreno obtenida por el TRT.
- δH es el error absoluto de la profundidad del pozo.
- δk es el error absoluto del coeficiente de regresión.

Resistencia térmica del pozo.

$$\delta R_b = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_b}{\Delta H} \delta H\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_b}{\Delta Q} \delta Q\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_b}{\Delta m} \delta m\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_b}{\Delta T_g} \delta T_g\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_b}{\Delta \lambda} \delta \lambda\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_b}{\Delta C} \delta C\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_b}{\Delta r_0} \delta r_0\right)^2}$$

(4.10)

Donde:

- ΔR_b es el incremento de la resistencia térmica del pozo, respecto a las variables por las que está dividida en cada término dentro del radical.
- δm es el error absoluto del el valor de la intersección del coeficiente de regresión de la temperatura con el logaritmo del tiempo.
- δr_0 es el error absoluto del radio del pozo.

Los resultados del estudio realizado por Witte, muestran un ranking de las magnitudes de diferentes errores individuales en los análisis de TRT. Se encuentran grandes errores relativos en el radio del pozo, capacidad calorífica del terreno y diferencia de temperaturas de ida y retorno. La mayor contribución al error total en la conductividad térmica corresponde al error cometido en el cálculo de la diferencia de temperaturas (70%), seguido del error de la capacidad calorífica del fluido (15,5%) y el error de k (6,9%). Respecto a la resistencia térmica, el mayor responsable de su error absoluto es la conductividad térmica (93%), seguido del radio del pozo (5,8%) y el valor de m (0,66%).

En las referencias, se puede encontrar una dirección web, *Excel (Witte, 2012)*, en la cual se halla una aplicación con todas las fórmulas mostradas implementadas en una hoja Excel. En la siguiente figura se muestra la apariencia de dicha hoja.

PARAMETER		Value	Uncertainty	Relative (%)
Volume flow (m ³ /hr)	Q	1,5	0,005	0,33
Medium density (kg/m ³)	p	1000	10	1,00
Medium heat capacity (J/(kgK))	hc	4000	80	2,00
Injection temperature (oC)	T _{in}	25	0,15	0,60
Return temperature (oC)	T _{out}	20	0,15	0,75
BHE (loop) length (m)	H	100	1	1,00
Borehole radius (m)	r _o	0,1	0,02	20,00
Volumetric heat capacity ground (MJ/(m ³ K))	C	2,4	0,5	20,83
Slope coefficient regression (K/ln(Ts))	k	0,75	0,01	1,33
Intercept regression (K)	m	19,5	0,1	0,51
Average ground temperature	T _g	17	0,034	0,20
CALCULATED VALUES				
Temperature difference (K)	DT	5	0,212	4,24
Average fluid temperature (oC) - ARITH. MEAN	T _f	22,5	0,106	0,47
Average fluid temperature (oC) - LOG MEAN	T _f	22,10	0,122	0,55
PLIN constant	p	-0,9		
Average fluid temperature (oC) - PLIN MEAN	T _f	21,75	0,142	0,65
Thermal power (MJ)	Q	30	1,44	4,81
Thermal conductivity (W/mK)	I	2,5	0,127	5,09
Borehole resistance (K/(W/m))	R _b	0,12	0,020	16,71
fill in the blank cells				

Figura 23: Errores en los TRT, Excel.
Fuente: Henk J.L. Witte, 2012.

Solamente se pueden cambiar las casillas en blanco. En la columna "value" deberemos poner el valor medido para cada variable. En la columna "uncertainty" el error absoluto dependiendo del aparato que utilicemos para medir cada una de las variables. Automáticamente se calcula el error relativo y absoluto de las variables que nos interesan, es decir, la conductividad térmica del terreno y la resistencia térmica del pozo. Se observa que las casillas "value" de conductividad y resistencia son blancas, y que somos nosotros quienes deberemos introducir su valor dependiendo del método de evaluación de TRT que usemos. Conocidos los errores absolutos de conductividad y resistencia, podremos dimensionar para los casos más desfavorables: mínima conductividad térmica (valor nominal menos error absoluto) ; máxima resistencia térmica (valor nominal más error absoluto). De esta forma, se tendrá más seguridad a la hora de dimensionar y que la instalación cumpla con los requisitos correctamente.

4.3.4. Errores de modelo.

El TRT se basa en un modelo, como el modelo del foco lineal, que asume ciertas hipótesis muy específicas. Si alguna de estas hipótesis no es cierta, el procedimiento de medida no se debería usar para obtener los parámetros de interés (conductividad térmica efectiva y resistencia térmica del pozo). Aunque los valores medidos sean los correctos, el resultado final es solo una aproximación del valor real. Algunas de las hipótesis que se asumen en la realización de un TRT son:

1. La transferencia de calor en el terreno es solo por conducción.
2. La conductividad térmica en el volumen de terreno probado es isotrópica y constante en el tiempo y espacio.
3. No hay transferencia de calor en la dirección axial.
4. No hay efecto de la capacidad calorífica del pozo.
5. El GHE se aproxima a un foco lineal.
6. Después de un estado transitorio inicial, hay un estado estacionario de la resistencia térmica del pozo.
7. La potencia inyectada es constante.

Algunos procesos que invalidan las hipótesis se exponen a continuación, mostrando entre paréntesis el número de hipótesis que incumpliría:

Flujo de aguas subterráneas (1,2).

Variaciones en la geología y conductividad térmica asociada de los materiales compuestos, por ejemplo inclusiones de grava o arena (2).

Variación de las aguas del freático (2,3,6).

Cambio grande de la temperatura superficial o gradiente geotérmico (3).

Pozos con diámetro muy elevado o mucho material de relleno (4).

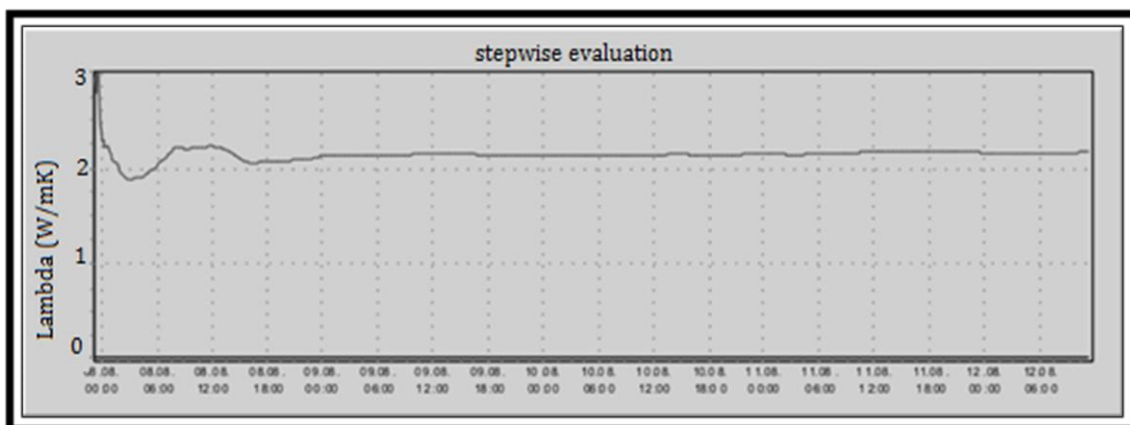
Pozos poco profundos (5).

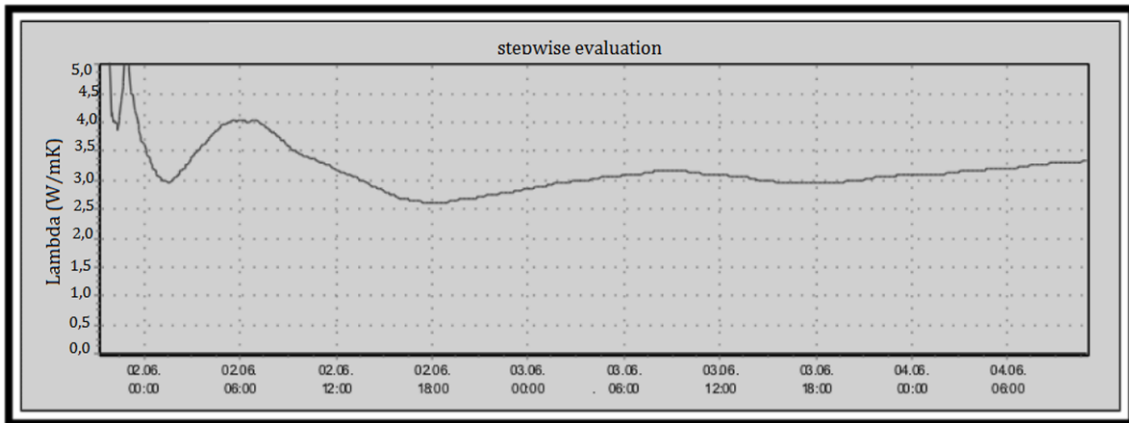
Fluctuaciones en la potencia inyectada (7).

Por su parte, **Marc Sauer (2012)**, en base a su experiencia, ha desarrollado algunos procedimientos de rutina obligatorios a realizar antes del comienzo del TRT, con el fin de ayudar a evitar incidentes:

- Comprobar la fuente de alimentación. Una mala graduación puede dar lugar a un sobrecalentamiento del dispositivo y a una combustión lenta de la instalación del TRT. Una fuente de alimentación inestable puede conducir al desarrollo desigual de temperaturas, haciendo difícil o imposible llevar a cabo el TRT.
- Comprobar que en el fluido no existen burbujas o inclusiones, ya que podría bloquear el desarrollo del TRT.
- Aislar la instalación y las conexiones. La influencia del ambiente debe mantenerse tan baja como sea posible, ya que no puede ser controlada y afecta fuertemente al TRT de manera similar a como lo puede hacer las fluctuaciones de tensión de la fuente de alimentación.

Con el método de análisis secuencial de los datos, se muestra directamente en un gráfico la conductividad térmica del terreno frente al tiempo. Estas gráficas nos van a servir para detectar algún efecto anómalo. Por ejemplo en el caso de la gráfica superior, la evaluación del TRT sería perfecta, pues en un tiempo prolongado el valor de la conductividad se mantiene constante, mientras que en la gráfica inferior el valor de la conductividad no se estabiliza debido a las fluctuaciones de la potencia suministrada en el TRT.





Gráfica 2: Análisis de datos secuencial.
Fuente: Marc Sauer, 2012.

Otro error que se comete en los test de respuesta térmica es que solo se realiza el ensayo en un pozo, y tener resultados de un solo pozo no es un resultado representativo de todas las perforaciones. **Petr Hemza et al (2012)** ha tenido la ocasión de realizar una serie de TRT en varios pozos de una misma instalación en República Checa. Dichos pozos estaban en condiciones geológicas prácticamente idénticas. La disposición de los mismos se observa en la siguiente figura:

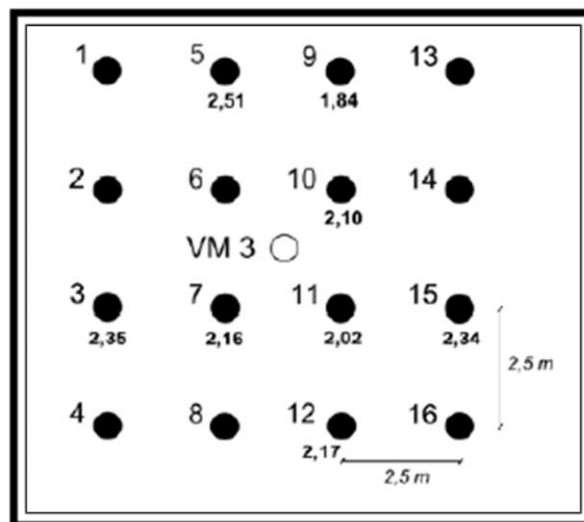


Figura 24: Disposición de los pozos para un TRT en la misma instalación.
Fuente: Petr Hemza et al, 2012.

La distancia entre cada pozo es 2,5 metros. A continuación se detallan los valores de conductividad térmica y resistencia térmica obtenidos.

Pozo	3	5	7	9	10	11	12	15
λ	2,35	2,51	2,16	1,84	2,1	2,02	2,17	2,34
R_b	0,077	0,081	0,06	0,093	0,081	0,092	0,065	0,076

Tabla 9: Resultados del TRT para distintos pozos en una misma instalación.
Fuente: Petr Hemza et al, 2012.

Se observa que la diferencia entre la conductividad más alta (pozo 5) y la más baja (pozo 9) es 0,67 W/mK, lo cual es bastante elevado. El valor medio de todas las conductividades térmicas es 2,19 W/mK.

A partir del experimento realizado por Petr Hemza, he llevado a cabo una simulación mediante el software GEO², el cual se verá posteriormente, para determinar cuanta diferencia en la profundidad de las perforaciones habría debido a las distintas conductividades térmicas del terreno.

La simulación consta de 3 casos: la mayor conductividad térmica (2,51 W/mK), la media (2,19 W/mK) y la menor (1,84 W/mK). En la siguiente tabla se pueden observar los datos de la simulación. En la parte superior y en color anaranjado se encuentran los datos comunes a las tres simulaciones. Al igual que en el estudio de Miguel Zamora del apartado 6.1, se tiene un edificio de oficinas en Madrid cuya potencia de calefacción máxima es 30 kW y su potencia de refrigeración máxima es de 25 kW.

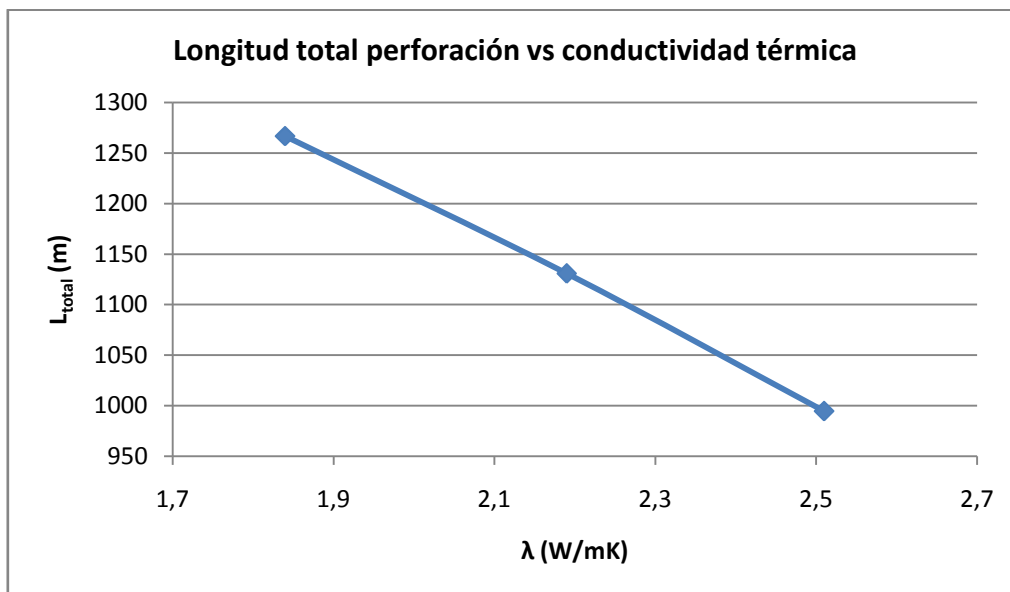
Por colector se entiende las tuberías que conectan la bomba de calor con el intercambiador acoplado al terreno. Como terreno he seleccionado piedra arcillosa, ya que cambiando su humedad se puede conseguir las conductividades térmicas descritas anteriormente en el software GEO². Por otra parte, en cada caso he tenido que variar la configuración de los pozos para encontrar un compromiso correcto entre la presión que soporta el GHE y la velocidad del fluido circulante. Las temperatura de aplicación para calefacción es 30°C y para refrigeración 5°C.

Edificio de oficinas en Madrid			
Potencia calorífica máxima 30 kW ; Potencia de refrigeración máxima 25 kW			
Bomba de calor seleccionada: Potencia de calefacción 31,3 kW; Consumo de calefacción 5,5 kW; Potencia refrigeración 25,9 kW ; Consumo de refrigeración 5,5 kW			
Colector: Material polietileno; Presión nominal 6 bar; Diámetro nominal 50 mm; Espesor 4,9 mm; Longitud 20 metros.			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Terreno piedra arcillosa	$\lambda=2,51$ $C_p=2,34 \text{ MJ/K}\cdot\text{m}^3$	$\lambda=2,19$ $C_p=2,3 \text{ MJ/K}\cdot\text{m}^3$	$\lambda=1,84$ $C_p=2,246 \text{ MJ/K}\cdot\text{m}^3$
GHE vertical	Material polietileno Presión nominal 10 bar Diámetro nominal 16 mm Espesor 2,5 mm Fluido térmico agua Tubería doble U 16 pozos (4x4 separados 1 metro)	Material polietileno Presión nominal 10 bar Diámetro nominal 16 mm Espesor 2,5 mm Fluido térmico agua Tubería doble U 18 pozos (6x3 separados 1 metro)	Material polibutileno Presión nominal 10 bar Diámetro nominal 12 mm Espesor 1,3 mm Fluido térmico agua Tubería doble U 22 pozos (11x2 separados 1 metro)
Resultados	Longitud pozo 62,16 metros $E_{\text{res,mín}} = 83,82\%$ $\text{COP}_{\text{mín}} = 6,18$; $\text{EER}_{\text{mín}} = 5,2$	Longitud pozo 62,82 metros $E_{\text{res,mín}} = 83,82\%$ $\text{COP}_{\text{mín}} = 6,18$; $\text{EER}_{\text{mín}} = 5,2$	Longitud pozo 57,58 metros $E_{\text{res,mín}} = 83,82\%$ $\text{COP}_{\text{mín}} = 6,18$; $\text{EER}_{\text{mín}} = 5,2$
	Longitud total 994,56 metros Precio perforación 49.728 €	Longitud total 1130,76 metros Precio perforación 56.538 €	Longitud total 1266,76 metros Precio perforación 63.338 €

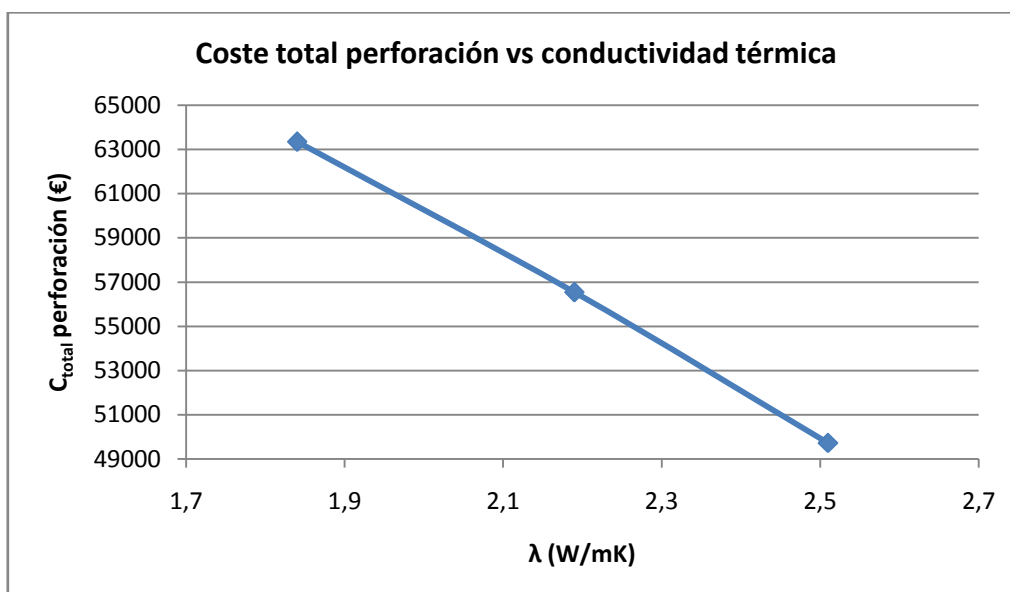
Tabla 10: Simulación en GEO² para analizar la profundidad de los pozos con el cambio de la conductividad térmica.

Fuente: Elaboración propia.

Los COP_{\min} , EER_{\min} y $E_{res,\min}$ son los mismos valores en los 3 casos. Esto se debe a que la bomba de calor seleccionada es la misma en todos ellos, la demanda del edificio de oficinas es la misma y dichos parámetros se calculan a partir del método IGSHA, el cual se verá posteriormente. Las siguientes gráficas muestran la variación de la perforación total y el coste de la perforación con el cambio de la conductividad térmica, considerando un valor de 50 €/m, aceptable según la *guía técnica de sondeos geotérmicos superficiales*, visto en el capítulo 2.



Gráfica 3: Variación de la longitud de perforación total en GHE vertical debido al cambio de λ .
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4: Variación del coste de perforación total en GHE vertical debido al cambio de λ .
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la instalación de la simulación pasa de necesitar 994,56 a 1266,76 metros cuando la conductividad térmica varía de 2,51 a 1,84 W/m·K. En cuanto el precio total de la perforación aumenta de 49.728 a 63.338 euros, un valor bastante considerable. Queda patente que tomar el valor de conductividad térmica de un solo pozo como representativo de todo el terreno puede acarrear graves consecuencias: que la bomba de calor no sea capaz de suministrar las cargas térmicas requeridas o que por el contrario se tenga sobredimensionada la instalación habiendo asumido un gasto económico mucho mayor del necesario.

4.4. Contenidos de un informe de un test de respuesta térmica.

Debido a que durante la elaboración de este proyecto he tenido ocasión de acceder a informes reales de test de respuesta térmica, se va a describir brevemente los apartados que aparecen en tales informes.

- Introducción que pone de manifiesto los objetivos del trabajo, describiendo también los equipos que se van a utilizar, y la localización.
- Descripción de los trabajos realizados, fecha, datos sobre la instalación de la sonda geotérmica, duración del ensayo, período de estabilización y si ha habido alguna incidencia.
- Encuadre geológico y geotérmico, en el que se describe desde el punto geológico el emplazamiento, así como su estratigrafía, aspectos estructurales, anomalías geotérmicas (térmicas o gradientes por ejemplo) y la hidrogeología de modo que quede plasmada la situación del nivel freático.
- Evaluación de los parámetros geotérmicos. Aquí nos encontramos con datos sobre el pozo (longitud, tipo de colector, diámetro) y datos del ensayo (intervalo de medición, temperaturas ambientes máximas y mínimas durante el ensayo, temperatura inicial del agua, potencia nominal inyectada, y caudal del fluido caloportador). En este apartado también aparece la determinación de la temperatura del terreno y las gráficas obtenidas para las temperaturas del fluido caloportador. Si el método utilizado es secuencial, entonces aparecerán las gráficas de la conductividad térmica con el tiempo. Será necesaria una explicación del método de evaluación del TRT para saber de dónde se han obtenido los resultados.

- Discusión de los resultados. Finalmente, se expone de manera clara y ordenada todos los datos técnicos del ensayo y el resultado final de la conductividad térmica del terreno y la resistencia térmica del pozo.

4.5. Empresas en España que realizan Test de Respuesta Térmica.

En la tabla 11 se muestran las características de algunas empresas españolas que realizan TRT. Se trata de empresas que como se puede ver no llevan mucho en activo (7 años como mucho), ni tampoco se han realizado muchas mediciones (a excepción de Ingeo) prueba de que en España la bomba de calor acoplada al terreno está emergiendo. Las características entre ellas son similares, a excepción de la empresa vasca Cidemco Tecnalía que solo realiza TRT de extracción de energía térmica del terreno y su método de evaluación es únicamente numérico. Por otra parte, es importante tener un control remoto de operación, para controlar en todo momento si el TRT se sigue ejecutando sin ningún problema y sin necesidad de tener que estar a pie de obra.

	Energesis Ingeniería	Ingeo	Sialtec Geotermia
Tipo de TRT	Inyección y extracción	Inyección	Inyección
Control remoto de operación	SI	NO	NO
Ciudad	Valencia	Ourense	Gerona
Años en activo	6	7	3
Mediciones realizadas	15 comerciales	≈ 80	4 comerciales
Longitud típica del pozo	100 m	> 280 m	50 - 150 m
Tipo de colector	Simple y doble U	Simple y doble U, cualquier relleno	Simple y doble U
Fluido caloportador	Agua	Agua	Agua
Temperaturas de trabajo	18 °C	10 - 22 °C	14 -16 °C
Área geográfica	España	Europa	Sur de Europa
Método de análisis	Numérica/Línea fuente	Numérica/ Línea fuente + parámetro de estimación con software	Línea fuente

	TECSE Ingeniería del terreno S.L.L.	Blue Energy Intelligent Services	Cidemco Tecnalia
Tipo de TRT	Inyección	Inyección	Extracción
Control remoto de operación	SI	SI	NO
Ciudad	Algemesí (Valencia)	Madrid / Cádiz	Azpeitia (Guipuzkoa)
Años en activo	3	3	3
Mediciones realizadas	3 comerciales	12 investigaciones/comerciales	2 investigaciones
Longitud típica del pozo	100 - 150 m	100 m	100 m
Tipo de colector	Simple, doble y triple U, coaxial	Simple y doble U	Simple U
Fluido caloportador	-	Agua y agua con glicol	Agua
Temperaturas de trabajo	15 - 22 °C	16 - 19 °C	15 °C
Área geográfica	España	Andalucía / Madrid	País vasco
Método de análisis	Numérica/Línea fuente	Línea Fuente	Numérica

Tabla 11: Empresas españolas que realizan TRT.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos en thermalresponsetest.org.

5. Diseño del intercambiador de calor enterrado.

El método IGSHPA de la International Ground Source Heat Pump Association desarrollado por la Universidad de Oklahoma, ha probado su validez como técnica de diseño en multitud de instalaciones por todo el mundo. A continuación se va a detallar su metodología, válida para una primera aproximación al diseño de sistemas geotérmicos (*guía técnica IDAE sobre bombas de calor geotérmicas*). Este método está basado en la teoría del foco lineal infinito desarrollado por Ingersoll y Plass.

Es un método de cálculo estacionario que asume que el sistema funciona durante un tiempo determinado a una carga constante y con el suelo a la temperatura más desfavorable, y con una temperatura de agua fija. Durante los restantes meses, la temperatura del aire será más moderada, y por lo tanto la carga calorífica o frigorífica será menor. Además el suelo no estará tan frío (en invierno) o tan caliente (en verano), lo que hará que la temperatura del agua sea más moderada y el sistema funcionará con un mayor rendimiento.

5.1. Elección de la bomba de calor.

Las especificaciones de la bomba de calor fijan varios parámetros de diseño del intercambiador de calor enterrado, ya que nos determinan el calor intercambiado con el suelo y el caudal circulante por el intercambiador de calor, además de fijar el COP del sistema.

La selección de la bomba de calor en España se realiza a partir de un cálculo de cargas térmicas de acuerdo a las exigencias de diseño y dimensionado especificadas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en la Edificación (RITE).

5.2. Elección del fluido circulante.

Por lo general el fluido circulante por el intercambiador de calor enterrado es agua o agua con anticongelante, si se prevé que el intercambiador geotérmico puede tener riesgo de congelación. Los factores a considerar principalmente son la conductividad

térmica y viscosidad, punto de congelación, requerimientos de presión y caídas de presión por rozamiento, comportamiento respecto a la corrosión, toxicidad, inflamabilidad y coste. A continuación se muestran las propiedades físicas de los fluidos más empleados.

	Agua	Etilenglicol	Propilenglicol	Metanol
Densidad a 20 °C (g/cm ³)	1	0,9259	0,8630	0,6585
Punto congelación °C (30% volumen)	0	-13	-12	-26
Punto ebullición °C	100	197	187	64
Calor Específico a 15 °C (kJ/Kg.K)	4,187	2,185	2,50371	2,47021
Viscosidad a 0 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,79	57,4	243	0,87
Viscosidad a 20 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,01	20,9	60,5	0,60
Viscosidad a 40 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	0,655	9,5	18,0	0,45
Conductividad térmica a 20 °C (kW/m.K) ·10 ⁻³	0,60	0,26	0,20	0,21

Tabla 12: Propiedades físicas de los fluidos caloportadores.
Fuente: Guía técnica IDAE sobre bombas de calor geotérmicas.

5.3. Elección de la configuración a emplear.

El siguiente paso es elegir la configuración del tipo de intercambiador de calor enterrado a emplear, eligiendo entre los descritos en el capítulo 3 (tipos de intercambiadores de calor). Esta elección va a estar condicionada principalmente por los siguientes factores: espacio disponible, dificultad de implementación del intercambiador en el terreno debido a su accesibilidad y demanda del espacio a climatizar.

5.4. Elección de los tubos.

Algunos de los términos normalizados para designar a los tubos en los catálogos son los siguientes (**Juan Franqueza 2008**):

PE: polietileno.

SDR: parámetro adimensional que expresa el cociente entre el diámetro del tubo y su espesor. Por ejemplo: 32/2,9 significaría un diámetro exterior de 32 mm y un espesor de 2,9 mm.

PE-100: El número 100 nos indica la rugosidad del interior del colector, cuanto menor sea la rugosidad menores serán las pérdidas de carga. Cuanto menor sea el número mayor será la rugosidad.

PE-X: es un polietileno más resistente pero triplica en precio al normal. Polietileno reticulado.

PN: presión nominal.

5.4.1. Elección de los materiales.

El polietileno y el polibutileno son los materiales más comunes en los intercambiadores de calor enterrados. Ambos son flexibles a la vez que resistentes y pueden unirse mediante fusión por calor para formar empalmes más fuertes que el tubo mismo. Los parámetros que van a marcar la elección de uno u otro material es la presión a la que pueden trabajar y el valor de la conductividad térmica. Dicha conductividad térmica es de 0,33 W/m·K para el polietileno de baja densidad, 0,5 W/m·K para el polietileno de alta densidad y 0,22 W/m·K para el polibutileno. Será también necesario analizar las temperaturas máximas y mínimas del fluido circulante, para comprobar que los materiales de los tubos se van a comportar correctamente.

5.4.2. Elección del diámetro.

Se debe llegar a un compromiso entre la caída de presión y el funcionamiento térmico. Por un lado debe ser lo suficientemente grande para producir una pérdida de carga pequeña y así necesitar menor potencia de bombeo. Por otro lado debe ser lo suficientemente pequeño como para garantizar un régimen turbulento, de manera que se favorezca el traspaso térmico entre el fluido que circula y la pared interior. Para asegurar turbulencia se debe cumplir:

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \vartheta \cdot D} > 2300 \quad (5.1)$$

Donde:

- Re es el número de Reynolds, que caracteriza si un flujo es turbulento o laminar.
- Q es el caudal en m³/s.
- D el diámetro del tubo en m.
- ϑ es la viscosidad cinemática (m²/s).

5.5. Cálculo de la longitud del intercambiador de calor enterrado.

A continuación se va a proceder a desarrollar el método de IGSHPA para el dimensionado de los captadores en las estaciones de invierno (calefacción) y verano (refrigeración), tal y como se puede encontrar en la bibliografía consultada (**Samuel Iglesias, 2010**).

El intercambiador de calor vendrá fijado por la diferencia de temperaturas entre el suelo y el fluido que circule por el intercambiador, por lo tanto, para dimensionar el intercambiador de calor enterrado en primer lugar se determinan estas temperaturas.

5.5.1. Determinación de la temperatura máxima y mínima de la tierra.

A partir de la ecuación de Kusuda y Achenbach,

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_o - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (3.2)$$

se calculan las temperaturas máximas (T_H) y mínimas de la tierra (T_L) que ocurren durante el ciclo anual para cualquier profundidad (X_S), cuando el coseno se hace máximo y mínimo. Las ecuaciones analíticas son las siguientes:

$$T_L(X_S) = T_m - A_s \cdot e^{\left(-X_S \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}} \right)} \quad (5.2)$$

$$T_H(X_S) = T_m + A_s \cdot e^{\left(-X_S \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}} \right)} \quad (5.3)$$

La temperatura media de la tierra T_m se puede tomar como la temperatura seca media anual del lugar. La amplitud anual de la temperatura media diaria (A_s) se puede determinar a partir de datos tabulados para localizaciones geográficas específicas, calculando el valor medio entre la temperatura media del mes más caluroso y la temperatura media del mes más frío. En los sistemas verticales se puede considerar A_s igual a 0, puesto que asumimos que a la profundidad que está instalado la temperatura es constante. Los valores de la difusividad térmica del suelo, α , dependen del tipo de suelo y del contenido de agua.

5.5.2. Determinación de las temperaturas máximas y mínimas de entrada del fluido a la bomba de calor.

El diseñador del sistema debe elegir la temperatura del fluido circulante por el intercambiador de calor enterrado. Debe encontrarse un compromiso óptimo entre las siguientes consideraciones:

- Cuanto más baja sea la temperatura en invierno (más alta en verano), mayor será la diferencia con la temperatura del suelo, y menor tendrá que ser el intercambiador enterrado para el mismo intercambio de calor, por lo que se reducen los costes de inversión.
- Cuanto más alta sea la temperatura en invierno (más baja en verano), mayor será el COP del sistema, por lo que el ahorro energético será mayor.

Así pues con estas premisas se elegirán las temperaturas máximas y mínimas de trabajo (T_{MAX} , T_{MIN}).

5.5.3. Dimensionado en régimen de refrigeración.

A continuación se muestra, en la figura 25, un esquema global del intercambio de flujos en el sistema completo intercambiador de calor – bomba de calor – local a climatizar.

$$Q_c = W + |Q_f| \quad (5.4)$$

Donde:

- Q_c es la potencia térmica a ceder en el intercambiador enterrado (W).
- W es la potencia eléctrica absorbida de la red (W).
- Q_f es la potencia térmica a extraer del local a climatizar (W).

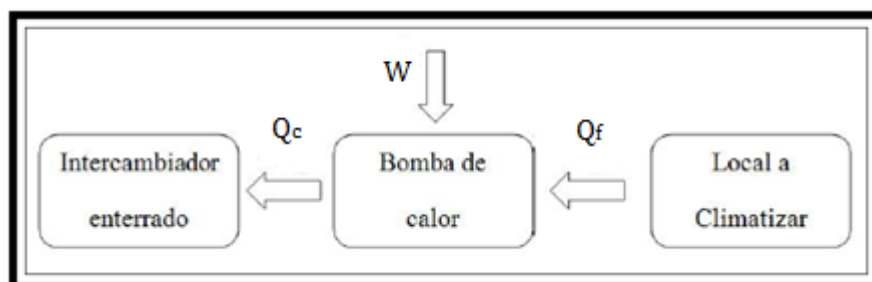


Figura 25: Esquema global de refrigeración.
Fuente: Samuel Iglesias 2010.

Si este flujo de calor se expresa por unidad de longitud de intercambiador enterrado se tiene:

$$q_c = \frac{Q_c}{L_r} \quad (5.5)$$

Donde:

- q_c es la potencia térmica a ceder en el intercambiador enterrado por unidad de longitud (W/m).
- L_r es la longitud de intercambiador enterrado (m).

Una vez determinado el flujo de calor en el sistema global se va a estudiar el intercambiador en régimen estacionario:

$$q_c = \frac{T_f - T_s}{R_T} \quad (5.6)$$

Donde:

- R_T es la resistencia térmica del conjunto (mK/W).
- T_f es la temperatura en el seno del fluido (K).
- T_s es la temperatura en la superficie del intercambiador (K).

La ecuación 5.6 se obtiene aplicando la ley de Fourier en el sistema representado en la figura 26.

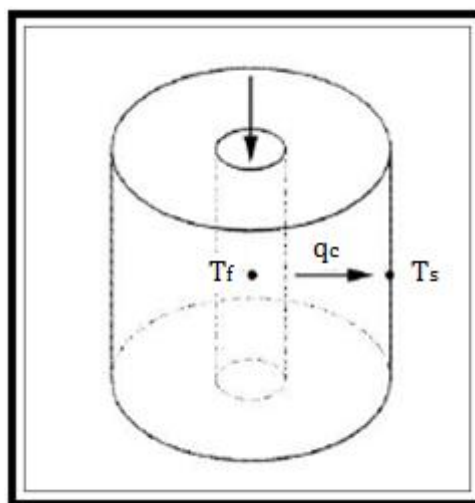


Figura 26: Balance en el intercambiador enterrado.
Fuente: Samuel Iglesias.

R_T se calcula como:

$$R_T = R_t + R_s \cdot F_{u,r} \quad (5.7)$$

Donde:

- R_t es la resistencia térmica de la tubería (mK/W).
- R_s es la resistencia térmica del suelo (mK/W).
- $F_{u,r}$ es el factor de utilización de la instalación (adimensional). Es la fracción de tiempo en el cual la bomba de calor permanece en funcionamiento.

Se ha de observar la introducción del factor de uso en la ecuación 5.7. El fenómeno de transferencia de calor que estamos analizando es en realidad transitorio, pero mediante la utilización del factor de utilización podemos hacer una aproximación para tratar el sistema como estacionario.

Por otro lado la resistencia térmica de la tubería se puede expresar como:

$$R_t = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_t} \ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right) \quad (5.8)$$

Donde:

- λ_t es la conductividad térmica de la tubería (W/mK).
- D_i es el diámetro interior de la tubería (m).
- D_e es el diámetro exterior de la tubería (m).

Si sustituimos la ecuación 5.4 en 5.5 e igualamos 5.5 y 5.6 obtenemos:

$$\frac{W + |Q_f|}{L_r} = \frac{T_f - T_s}{R_T} \quad (5.9)$$

de donde podemos despejar L_c :

$$L_r = \frac{(W + |Q_f|) \cdot R_T}{T_f - T_s} \quad (5.10)$$

y sustituyendo 5.7 en 5.10, se obtiene la longitud necesaria de intercambiador enterrado, 5.11.

$$L_r = \frac{(W + |Q_f|) \cdot (R_t + R_s \cdot F_{u,c})}{T_f - T_s} \quad (5.11)$$

Si además se toman las temperaturas máximas para obtener el caso extremo, T_{MAX} del fluido y T_H del suelo, y se expresan las potencias en función del EER de la bomba de calor, se obtienen las expresiones que describen el método IGSHPA:

$$EER = \frac{|Q_f|}{W} \quad (5.12)$$

$$W + |Q_f| = |Q_f| \cdot \frac{EER + 1}{EER} \quad (5.13)$$

Finalmente se obtiene que la longitud del intercambiador necesaria para el régimen de refrigeración es:

$$L_r = \frac{|Q_f| \cdot \frac{EER + 1}{EER} \cdot (R_t + R_s \cdot F_{u,r})}{T_H - T_{MAX}} \quad (5.14)$$

5.5.4. Dimensionado en régimen de calefacción.

Análogamente al régimen de refrigeración, se desarrollan los cálculos que siguen para obtener el intercambiador enterrado para el régimen de calefacción en invierno.

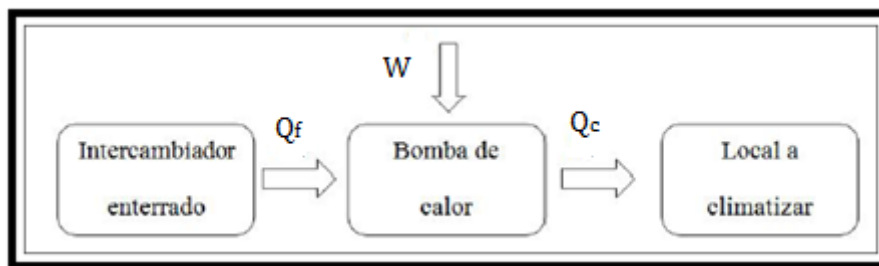


Figura 27: Esquema global de calefacción.
Fuente: Samuel Iglesias 2010.

$$|Q_f| = Q_c - W \quad (5.15)$$

Donde:

- Q_f es la potencia térmica a absorber en el intercambiador enterrado (W).
- W es la potencia eléctrica absorbida de la red (W).
- Q_c es la potencia térmica a ceder al local a climatizar (W).

Si este flujo de calor se expresa por unidad de longitud de intercambiador enterrado se tiene:

$$|q_f| = \frac{|Q_f|}{L_c} \quad (5.16)$$

Donde:

- q_f es la potencia térmica por unidad de longitud a absorber (W/m).
- L_c es la longitud de intercambiador enterrado (m).

En el intercambiador se tiene:

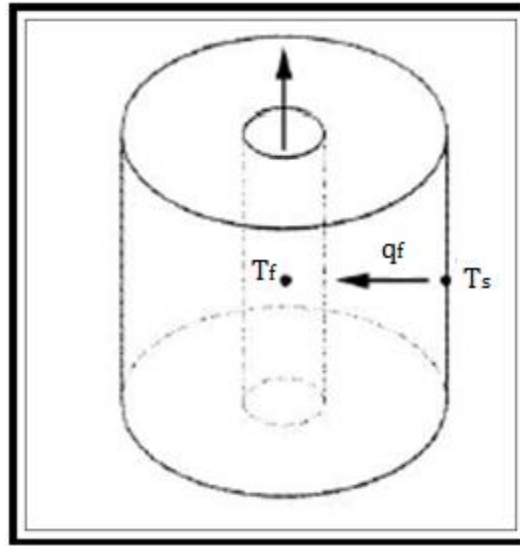


Figura 28: Balance en el intercambiador enterrado.
Fuente: Samuel Iglesias 2010.

$$|q_f| = \frac{T_s - T_f}{R_T} \quad (5.17)$$

Donde:

- R_T es la resistencia térmica del conjunto (mK/W).
- T_f es la temperatura en el seno del fluido (K).
- T_s es la temperatura en la superficie del intercambiador (K).

Conociendo el valor de R_T , que se ha explicado en el apartado anterior y sustituyendo la ecuación 5.15 en 5.16 e igualando 5.16 a 5.17 obtenemos:

$$\frac{Q_c - W}{L_c} = \frac{T_f - T_s}{R_T} \quad (5.18)$$

de donde podemos despejar L_c :

$$L_c = \frac{(Q_c + W) \cdot R_T}{T_f - T_s} \quad (5.19)$$

y sustituyendo el valor de R_T en 5.19, se obtiene la longitud necesaria de intercambiador enterrado, 5.20.

$$L_c = \frac{(Q_c + W) \cdot (R_t + R_s \cdot F_u \cdot c)}{T_s - T_f} \quad (5.20)$$

Si además se toman las temperaturas mínimas para obtener el caso extremo, T_{MIN} del fluido y T_L del suelo, y se expresan las potencias en función del COP de la bomba de calor, se obtienen las expresiones que describen el método IGSHPA:

$$COP = \frac{Q_c}{W} \quad (5.21)$$

$$Q_c - W = Q_c \cdot \frac{COP - 1}{COP} \quad (5.22)$$

Finalmente se obtiene que la longitud del intercambiador necesaria para el régimen de calefacción es:

$$L_c = \frac{Q_c \cdot \frac{COP - 1}{COP} \cdot (R_t + R_s \cdot F_u \cdot c)}{T_{MIN} - T_L} \quad (5.23)$$

La longitud que se empleará en el sistema será la mayor de las obtenidas en regímenes de refrigeración y calefacción, para cumplir así las especificaciones en las dos estaciones.

5.6. Elección del material de relleno.

El material de relleno se ubica en el espacio anular que queda entre las tuberías del intercambiador de calor y las paredes del hueco del sondeo (*Guía Técnica de Sondeos Geotérmicos Superficiales, 2009*). Debe obtener un buen contacto térmico entre el intercambiador vertical y el terreno, que asegure el transporte de calor del terreno al fluido caloportador durante la época de extracción de energía térmica y en sentido contrario durante la inyección de energía térmica al subsuelo. Además, debe cerrar el sondeo desde la superficie para evitar la entrada de contaminantes externos y sellar los

acuíferos que hayan podido ser atravesados durante la perforación. Las propiedades más importantes que debe reunir el material de relleno para sondeos geotérmicos son:

- Elevada conductividad térmica.
- Baja permeabilidad.
- Buena adhesión a la sonda y al terreno.
- Elevada resistencia a las heladas.
- No ser perjudicial para las aguas subterráneas.

La elección de un material para relleno dependerá de las condiciones geológicas del terreno atravesado por el sondeo y de las medidas que sea preciso tomar para preservar la calidad de las aguas subterráneas.

En la siguiente tabla se muestra los materiales de relleno más comunes y sus conductividades térmicas.

MATERIAL	Conductividad térmica (W/mK)	Facilidad de bombeo	Impacto producido por la helada
Arena saturada de agua	1,7 - 2,5	-	
Arena seca	0,3 - 0,6	-	
Arcilla	0,9 - 1,4	Mala	Existe
Bentonita (1,3 g/cm ³)	0,7	Buena	Alto
Bentonita con arena	1,4 - 1,8	Mala	Medio
Bentonita - cemento	0,6 - 1,0	Buena	Bajo
Lechada térmicamente mejorada	1,6 - 2,0	Buena	Bajo

Tabla 13: Materiales de relleno.
Fuente: Guía Técnica de Sondeos Geotérmicos Superficiales, 2009.

En el mercado existen materiales para el sellado en forma de pellets, cuyo componente principal es bentonita, a la que se puede añadir grafito para aumentar la conductividad térmica del producto. Los pellets de bentonita térmicamente mejorados poseen conductividad térmica e impermeabilidad elevadas y una expansión superior al 35% con lo que se consigue un sellado eficaz entre la sonda geotérmica y el terreno.

6. Sensibilidad del COP variando los parámetros de diseño.

Miguel Zamora (2008), realizó un análisis paramétrico de la sensibilidad del COP y EER de la instalación GCHP variando algunos de los parámetros de diseño mediante el software GEO², el cual se verá posteriormente. Las simulaciones que llevó a cabo se exponen a continuación.

6.1. Influencia de la distancia entre pozos.

Esta simulación trata de un edificio de oficinas situado en Madrid, cuya carga calorífica máxima es 30 kW y la carga frigorífica máxima es 25 kW. El terreno seleccionado es granito, cuyos valores de conductividad térmica van de 2,1 a 4,1 W/mK, aunque el valor típico es 3,4 W/mK (**Paud 2002**). En ninguno de los siguientes estudios el autor Miguel Zamora facilita las conductividades térmicas que ha empleado. La longitud total del GHE es 800 metros, distribuida en 4 pozos de 100 metros y en una configuración 2x2 tal y como se muestra en la figura 24.

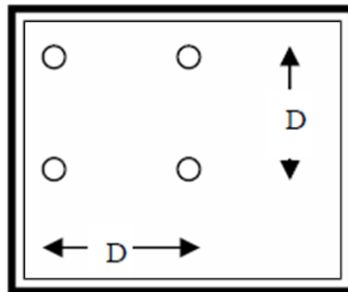
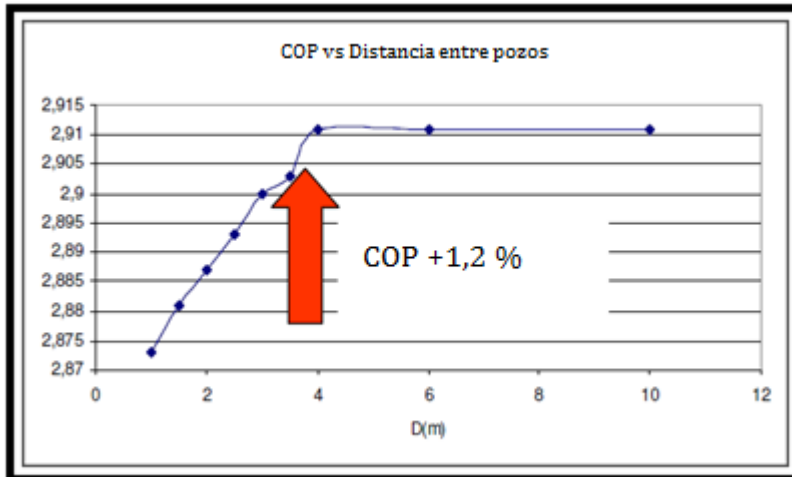
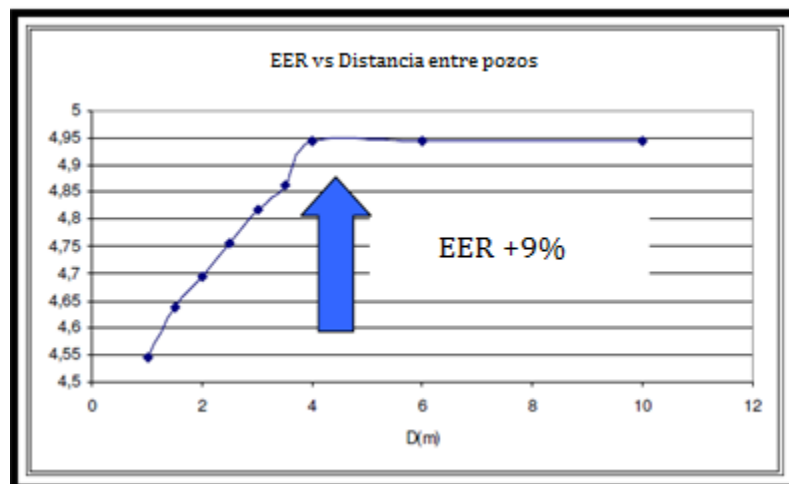


Figura 29: Configuración de los pozos empleada en la simulación de M.Zamora.
Fuente: Miguel Zamora 2008.

La distancia entre los pozos se toma como variable. Se observa que a mayor distancia entre pozos se aumenta el COP y el EER, debido a que la interferencia entre los mismos pozos va a disminuir. La mejora en el caso de calefacción es leve, pero en el caso de la refrigeración es bastante notable, aumentando el COP hasta un 9% cuando la distancia entre pozos se aumenta de 1 a 4 metros. La evolución del COP se muestra en las gráficas 5 y 6.



Gráfica 5: Evolución del COP con la distancia entre pozos.
Fuente: Miguel Zamora 2008.



Gráfica 6: Evolución del EER con la distancia entre pozos.
Fuente: Miguel Zamora 2008.

6.2. Influencia de la configuración de los pozos.

En este caso se estudia como variable la configuración de los pozos en un edificio de oficinas en Málaga, cuya carga calorífica máxima es de 20 kW y su carga frigorífica máxima es de 25 kW. Se ha supuesto que el terreno está formado de calizas en forma de margas. El valor típico de la conductividad térmica de la caliza es 2,8 W/mK, mientras que el de la marga es 2,1 W/mK (**Paud 2002**). La longitud total del GHE es de 960 metros, en 12 pozos de 40 metros y separados entre ellos siempre 1 metro. Las configuraciones a estudiar son 12x1, 6x2 y 4x3.

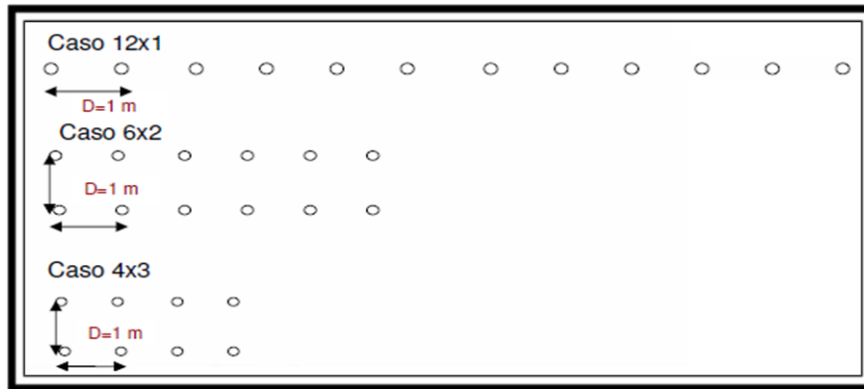
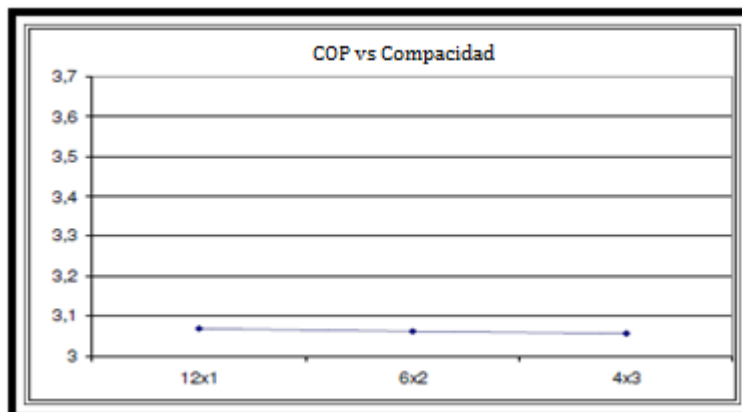
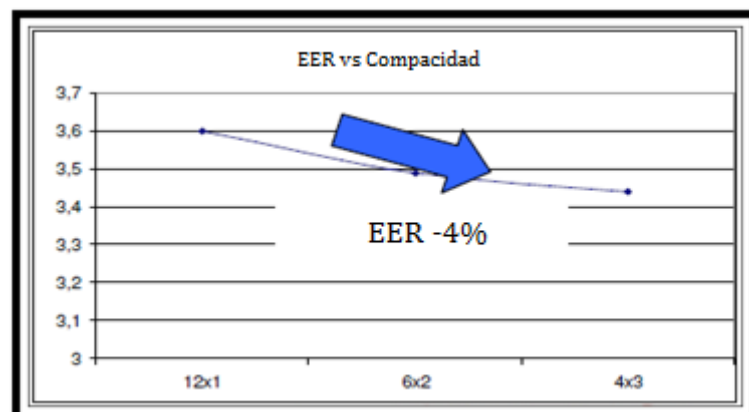


Figura 30: Configuración de los pozos en la simulación de M.Zamora.
Fuente: Miguel Zamora 2008.

Nuevamente se observa que la diferencia más notable tiene lugar en el EER, y que la mejor configuración es la de 12x1, es decir, cuanto menos compacta sea la configuración de los pozos se obtiene mejor COP y EER, puesto que los pozos interfieren menos entre ellos.



Gráfica 7: COP para distintas configuraciones de los pozos.
Fuente: Miguel Zamora 2008.



Gráfica 8: EER para distintas configuraciones de los pozos.
Fuente: Miguel Zamora 2008.

6.3. Influencia de la longitud de los pozos.

La situación a tratar en este apartado va a ser la misma que en el apartado 6.2. con la diferencia de que la configuración a emplear ahora será de 4x1 y se variará la longitud de los pozos.

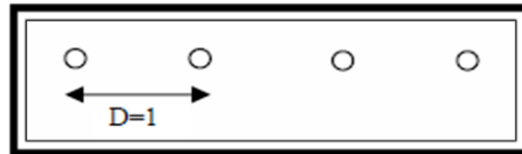
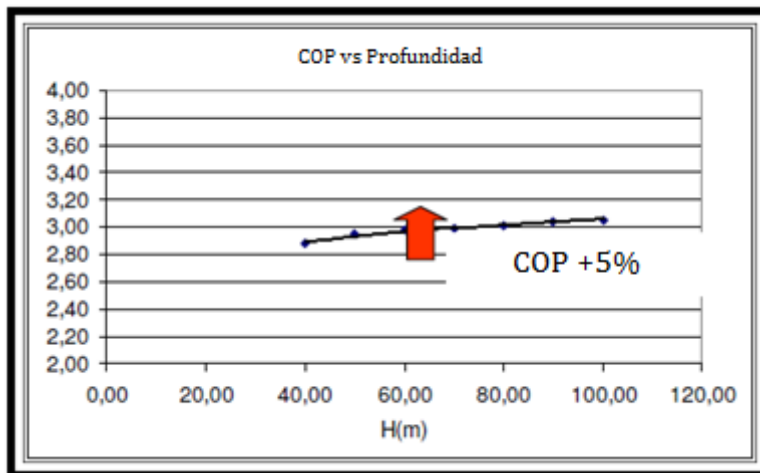
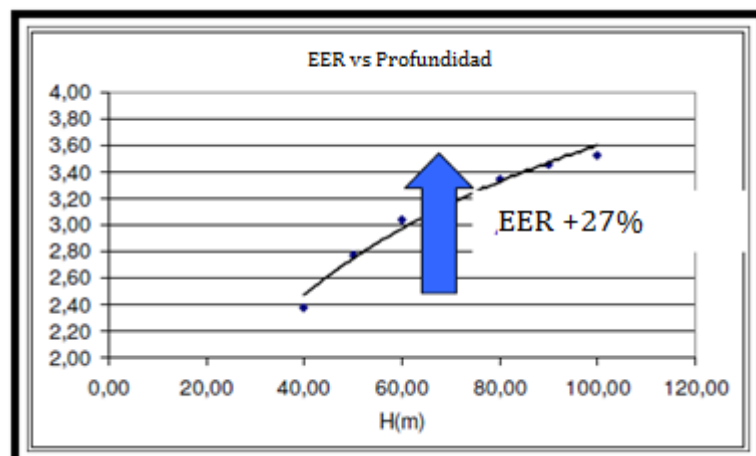


Figura 31: Configuración de los pozos empleada en la simulación de M.Zamora.
Fuente: Miguel Zamora 2008.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras y gráficas 9 y 10.



Gráfica 9: Evolución del COP con la profundidad del pozo.
Fuente: Miguel Zamora 2008.



Gráfica 10: Evolución del EER con la profundidad del pozo.
Fuente: Miguel Zamora 2008.

Queda patente que con el aumento de profundidad aumenta el COP y el EER de la instalación, obteniendo para el caso del EER una mejoría enorme (aumento del 27%) al aumentar la profundidad del pozo de 40 a 100 metros. En el caso de calefacción el COP va aproximadamente de 2,85 a 3,05 aumentando también la profundidad del pozo de 40 a 100 metros, lo que podría llevar a plantearse hasta qué punto es rentable hacer un aumento de la profundidad de los pozos.

La notable diferencia entre la mejora del EER y la del COP se debe a la radiación solar. En verano incide más que en invierno, y esto provoca un calentamiento de los primeros metros de profundidad del terreno. Por otra parte la temperatura del terreno más profundo es menor comparada con la temperatura ambiente y la temperatura de dichos primeros metros de profundidad del terreno. Este efecto produce un aumento del salto térmico del fluido circulante por el GHE y por tanto más potencia térmica cedida al terreno, lo que aumenta el EER.

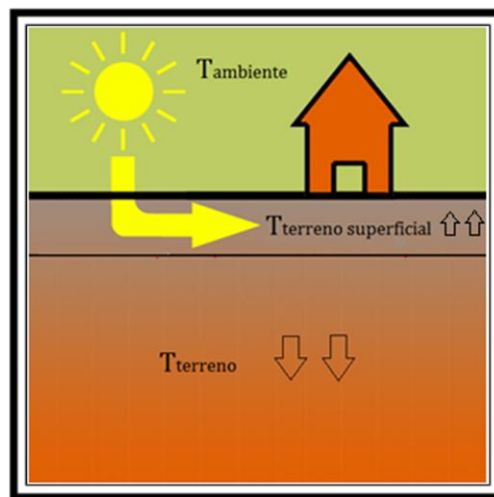


Figura 32: Efecto de la radiación solar en verano.
Fuente: Elaboración propia.

6.4. Resumen.

A continuación se expone una tabla resumen de los casos vistos en los apartados anteriores.

	COP	EER
Aumento distancia entre pozos	↑	↑
Aumento compacidad pozos	≈	↓
Aumento profundidad de los pozos	↑	↑↑

Tabla 14: Resumen de la sensibilidad del COP variando los parámetros de diseño.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Miguel Zamora (2008).

7. Energía renovable aportada por la bomba de calor.

La **Directiva 2009/28/CE** del parlamento europeo y del consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables considera que la cantidad de energía aerotérmica, geotérmica o hidrotérmica capturada por bombas de calor que debe considerarse energía procedente de fuentes renovables, E_{RES} , se calculará de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$E_{RES} = Q_{usable} * (1 - 1/SPF) \quad (7.1)$$

Siendo:

- Q_{usable} el calor útil total estimado proporcionado por bombas de calor conformes a los criterios mencionados en el artículo 5, apartado 4*, aplicada como sigue: solo se tendrán en cuenta las bombas de calor para las que:

$$SPF > \frac{1,15}{\eta} \quad (7.2)$$

- SPF el factor de rendimiento medio estacional estimativo para dichas bombas de calor, incluyendo la bomba de calor y sus equipos auxiliares y sirviendo al edificio concreto del proyecto.
- η el cociente entre la producción total bruta de electricidad y el consumo primario de energía para la producción de electricidad, y se calculará como una media de la UE basada en datos de Eurostat.

* La energía geotérmica capturada por las bombas de calor se tendrá en cuenta a efectos del apartado 1, letra b)**, siempre que la producción final de energía supere de forma significativa el consumo de energía primaria necesaria para impulsar la bomba de calor.

**El consumo final bruto de energía procedente de fuentes renovables en cada Estado miembro se calculará como la suma del consumo final bruto de energía procedente de fuentes renovables para la calefacción y la refrigeración.

La expresión 7.1 parece lógica siguiendo un sencillo razonamiento. Tal y como se muestra en la figura se tiene:

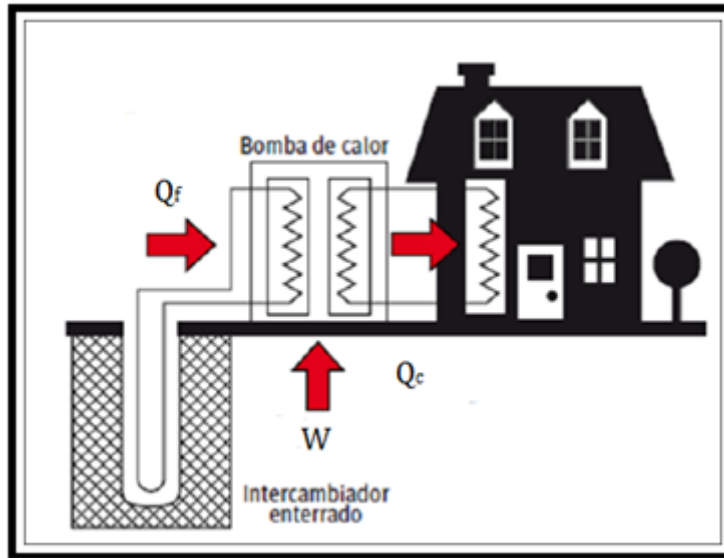


Figura 33: Energía renovable en régimen de calefacción.
Fuente: Guía técnica del IDAE sobre bombas de calor geotérmicas.

$$Q_{usable} = |Q_c| \quad (7.3)$$

$$SPF = \frac{|Q_c|}{W} \quad (7.4)$$

Sustituyendo en 7.1 queda:

$$E_{RES} = |Q_c| \cdot \left(1 - \frac{W}{|Q_c|}\right) = |Q_c| \cdot \left(\frac{|Q_c| - W}{|Q_c|}\right) = |Q_c| \cdot \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = |Q_f| \quad (7.5)$$

Se deduce que se considera energía renovable únicamente a la energía térmica que se absorbe del terreno, $|Q_f|$.

La Comisión ha dejado de plazo hasta el 1 de enero de 2013 para que los Estados miembros establezcan los valores y métodos de cálculo para Q_{usable} y para SPF. La directiva no lo indica expresamente, por lo que puede quedar la duda de si el valor del SPF debe hacer referencia al COP medio estacional de la instalación proyectada, incluyendo la bomba de calor y sus equipos auxiliares, y sirviendo al edificio concreto del proyecto, o hacer referencia a un valor estándar del equipo, calculado según una norma (*M. Zamora et al, 2012*).

Cuando hablamos del rendimiento medio estacional en régimen de calefacción, nos estamos refiriendo al HSPF (Heating Seasonal Performance Factor), mientras que si hablamos del rendimiento medio estacional en régimen de refrigeración nos estamos refiriendo al CSPF (Cooling Seasonal Performance Factor):

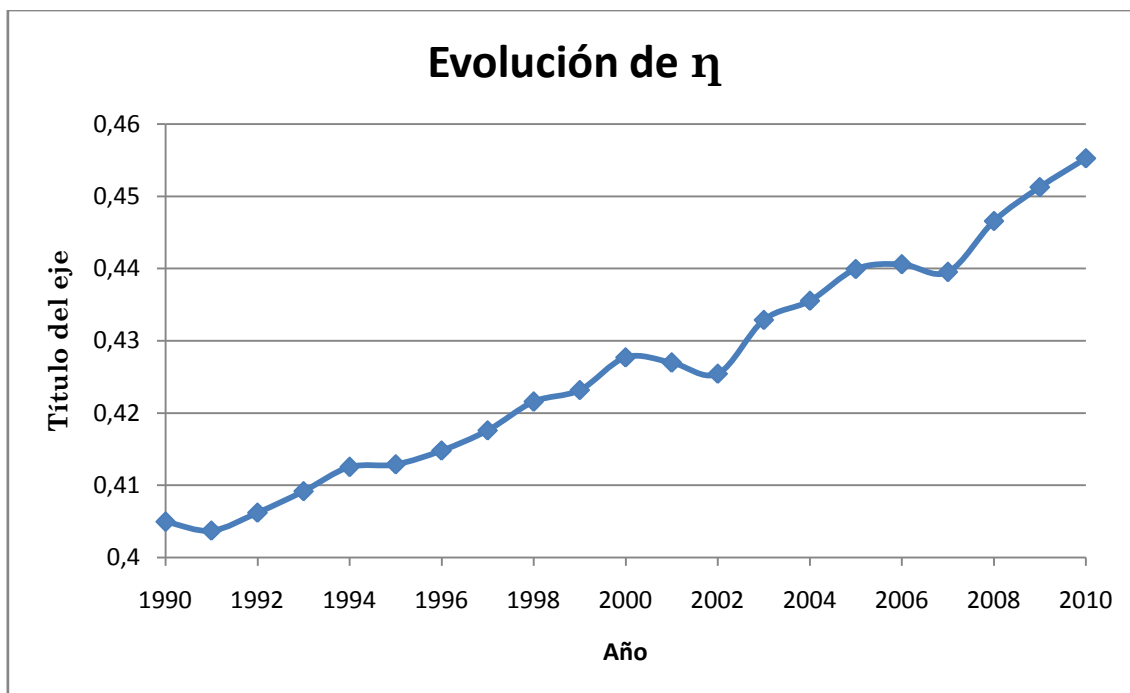
$$HSPF = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{h,i}}{\sum_{i=1}^n W_{h,i}} \quad (7.6)$$

$$CSPF = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{c,i}}{\sum_{i=1}^n W_{c,i}} \quad (7.7)$$

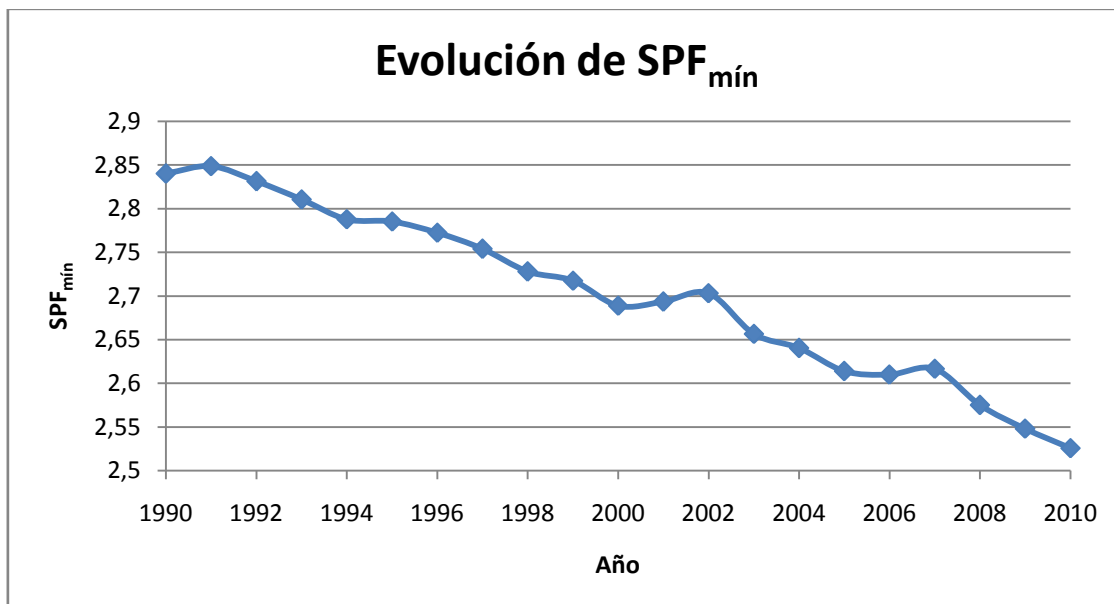
Donde Q representa la carga térmica proporcionada por el sistema en calefacción (h) o refrigeración (c) para el mes i y W es el consumo eléctrico del sistema para cada modo y mes.

Con objeto de cuantificar los órdenes de magnitud que han sido requeridos en cuanto a rendimiento medio estacional para cumplir la normativa, se ha calculado la ecuación 7.2 a partir de los datos medios europeos del **EUROSTAT** de producción bruta total de electricidad y consumo de energía primaria para la producción de electricidad. Los datos que se han encontrado en la web van del año 1990 al año 2010. En la tabla 15 se observa el valor de η , con el cual se calcula el valor mínimo del SPF para que el sistema GSHP cumpla con la ecuación 7.2 y se considere que parte de su energía es renovable.

En la gráfica 12 podemos observar la evolución que ha tenido el SPF mínimo en los últimos años. Ha habido un gran decrecimiento de este factor, debido a que ha disminuido mucho más el consumo de energía primaria para producción de electricidad de lo que ha aumentado la generación bruta total de energía eléctrica (aumento del factor η). Esto en parte se debe al aumento en Europa de la generación de electricidad por parte de energías renovables y una mayor eficiencia.



Gráfica 11: Evolución de η en los últimos años.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EUROSTAT.



Gráfica 8: Evolución del SPF_{\min} en los últimos años.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EUROSTAT.

EU-27	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Producción total bruta de electricidad (PJ)	9.244	9.402	9.336	9.350	9.504	9.767	10.121	10.172	10.392	10.492	10.788
Consumo primario de energía para la producción de electricidad (PJ)	22.829	23.288	22.984	22.852	23.039	23.656	24.400	24.359	24.651	24.794	25.223
η (eta)	0,4049	0,4037	0,4062	0,4092	0,4125	0,4129	0,4148	0,4176	0,4216	0,4232	0,4277
SPFmínimo	2,84	2,8486	2,8312	2,8105	2,7878	2,7853	2,7724	2,7539	2,728	2,7175	2,6888

EU-27	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Producción total bruta de electricidad (PJ)	11.080	11.158	11.477	11.717	11.790	11.949	12.002	12.024	11.440	11.931
Consumo primario de energía para la producción de electricidad (PJ)	25.950	26.227	26.512	26.902	26.799	27.120	27.307	26.924	25.351	26.206
η (eta)	0,427	0,4254	0,4329	0,4355	0,4399	0,4406	0,4395	0,4466	0,4513	0,4553
SPFmínimo	2,6934	2,7031	2,6566	2,6404	2,614	2,6101	2,6166	2,5751	2,5483	2,526

Tabla 15: Rendimiento medio estacional mínimo para cumplir la directiva europea.

Fuente: Eurostat tabla η .

Datos obtenidos a fecha 18/11/2012 en:

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/other_documents

7.1. Estimación del rendimiento medio estacional en bombas de calor acopladas al terreno.

Para obtener el rendimiento medio estacional real de una instalación con bomba de calor acoplada al terreno se hace necesario monitorizarla para tener en cada momento la demanda energética, el consumo energético y el factor de utilización, de modo que el cálculo será exacto. Otra posibilidad de obtener un valor más o menos preciso es mediante el uso de programas de simulación energética en edificios, como se puede hacer en los programas TRNSYS o Design Builder entre otros, aunque esta simulación no es fácil. Recientemente ***Miguel Zamora et al (2012)***, ha propuesto unas aproximaciones sencillas del lado de la seguridad para la determinación del SPF.

7.1.1. Aproximación al SPF a partir del rendimiento de diseño calculado según el método IGSHPA.

El COP instantáneo de diseño, calculado según el método IGSHPA, es un valor suficientemente conservativo para el SPF. En el método IGSHPA se calcula la longitud del intercambiador necesaria para satisfacer la demanda pico de la instalación en el momento más desfavorable, es decir, al final de la temporada de calefacción. En ese momento el COP es mínimo. A lo largo del resto de la temporada las condiciones exteriores serán mejores y el terreno no estará tan afectado térmicamente como por el propio uso de la bomba de calor, por lo que el COP instantáneo será mayor. Por lo tanto, el SPF estacional de calefacción, que es la integral del COP instantáneo, solo puede ser mayor o igual que este COP mínimo, pudiendo ser usado para calcular la contribución de energía renovable mínima según la fórmula de la directiva.

7.1.2. Corrección por funcionamiento a carga parcial.

Como se ha visto en el capítulo 5, el método IGSHPA tiene en cuenta el funcionamiento a carga parcial de la bomba de calor mediante el factor de utilización. A la hora de computar el SPF e integrar el consumo del equipo de climatización a lo largo de toda la temporada, también será necesario computar el efecto de la carga parcial en el consumo del equipo.

Está plenamente admitida por la comunidad científica la separación de variables al evaluar la dependencia del COP en equipos de climatización con las temperaturas y con el grado de carga parcial. De tal forma que el COP en un instante se puede expresar como:

$$\text{COP}(T^{\text{as}}, F_u) = \text{COP}(T^{\text{as}}) * f(F_u) \quad (7.8)$$

Donde:

- f : es la función de dependencia del COP con el grado de carga parcial o factor de utilización.

Si se dispone de una cota inferior para ese valor de $f(F_u)$ puede obtenerse un nuevo COP mínimo más conservativo que tenga en cuenta los efectos de funcionamiento a carga parcial:

$$\text{COP}(T^{\text{as}}, F_u)_{\min} = \text{COP}(T^{\text{as}})_{\min} * f(F_u)_{\min} \quad (7.9)$$

Donde:

- $\text{COP}(T^{\text{as}})_{\min}$ = COP mínimo calculado por el método IGSHPA.

Según la **norma prEN 14825** y **Teresa Magraner et al (2010)** se propone que $f(F_u)$ se calcule con la siguiente expresión:

$$f(F_u) = 1 - C_d \cdot (1 - F_u) \quad (7.10)$$

Donde:

- C_d es el coeficiente de degradación que corresponde al valor de la corrección al 20% de carga parcial. Como dato representativo para las bombas acopladas al terreno se propone $C_d=0.15$. Para obtener $f(F_u)_{\min}$ se deberá introducir un factor de utilización mínimo ($F_{u_{\min}}$) en la expresión 7.7.

7.1.3. Corrección por consumos de las bombas de circulación de agua.

La Unión Europea ha dado de plazo hasta el 1 de enero de 2013 para establecer los métodos de cálculo de SPF. Está por regular o normalizar, por ejemplo, como incluir los consumos eléctricos de las bombas de circulación de agua. Resulta más ajustado a la realidad el computar los consumos totales de las bombas. El COP mínimo calculado por el método IGSHPA puede modificarse incorporando el consumo de bombeo de la siguiente forma simplificada:

$$COP = \frac{Q_c}{Pa} = \frac{Q_c}{Pa_{comp} + Pa_{bomb}} \quad (7.11)$$

Siendo:

- Q_c la potencia térmica suministrada por la bomba de calor acoplada al terreno (W).
- W_{comp} la potencia eléctrica consumida por el compresor (W).
- W_{bomb} la potencia eléctrica consumida por las bombas de circulación (W).

Ahora bien, se puede hacer la siguiente simplificación:

$$\begin{aligned} \frac{1}{COP} &= \frac{Pa}{Q_c} = \frac{W_{comp} + W_{bomb}}{Q_c} = \frac{1}{COP_{comp}} + \frac{\alpha}{COP_{comp}} \\ COP &= COP_{comp} \cdot \frac{1}{1+\alpha} \end{aligned} \quad (7.12)$$

Siendo:

$$\alpha = \frac{W_{bomb}}{W_{comp}} \quad (7.13)$$

8. Aumento/disminución de la temperatura del terreno a largo plazo.

Uno de los principales problemas que están surgiendo en los sistemas GCHP es que no se cumple el balance térmico del terreno, lo que implica que la temperatura de este se va a ir incrementando o decreciendo con el paso del tiempo. Esto se debe a que no se inyecta la misma cantidad de energía térmica que se extrae o viceversa, pudiendo ocurrir con mayor frecuencia en instalaciones con un régimen estacional mayor que otro:

- Si un edificio tiene una mayor demanda de refrigeración que de calefacción, la temperatura del terreno va a ir aumentando a lo largo del tiempo, con lo que el rendimiento medio estacional de refrigeración (CSPF) disminuirá pero el rendimiento medio estacional de calefacción aumentará (HSPF), tal y como se puede observar en el gráfico 13.
- Al contrario, en un edificio con mayor demanda de calefacción que de refrigeración, la temperatura del terreno irá disminuyendo, y en consecuencia el HSPF disminuirá mientras que el CSPF aumentará. Se puede afirmar que este fenómeno se ha convertido en uno de los mayores inconvenientes de los sistemas GCHP.

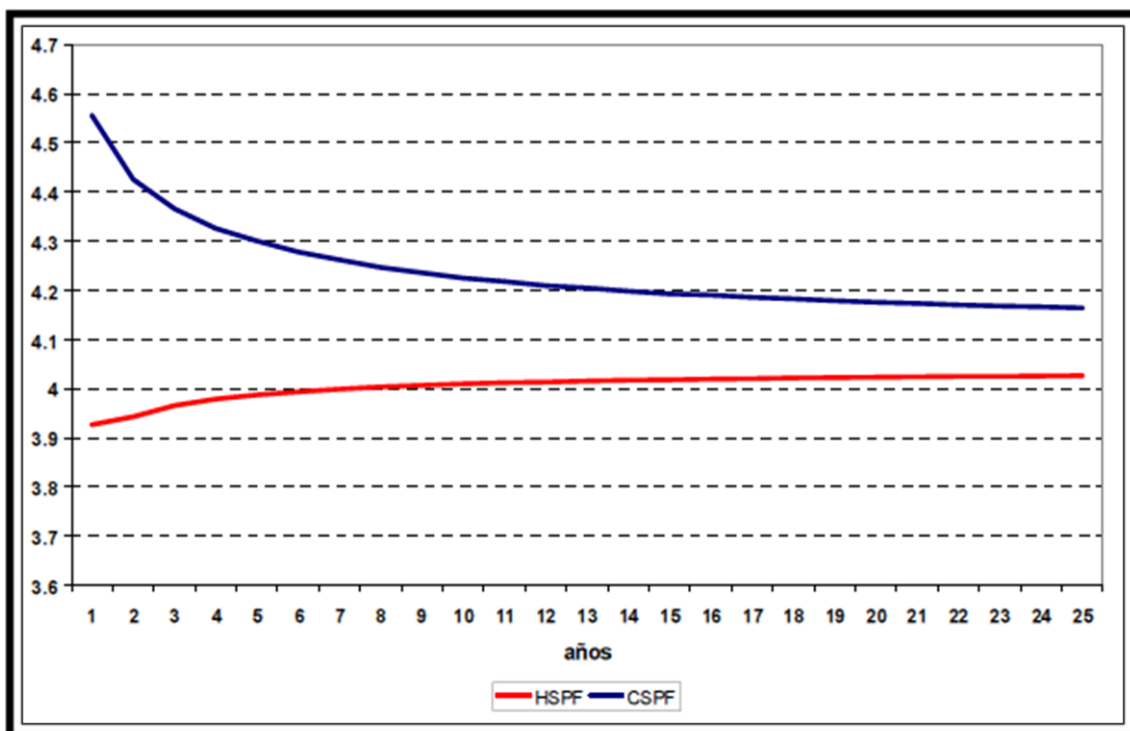


Gráfico 13: Evolución del HSPF y CSPF cuando hay desequilibrio en el balance térmico del terreno.
Fuente: Teresa Magraner 2010.

8.1. Influencia del régimen intermitente.

Con el fin de optimizar la condición de funcionamiento del sistema, se necesita algún tiempo para que el terreno se “recupere”, esto es que el terreno recupere su temperatura inicial. **Yong Wang et al (2012)** presenta un estudio sobre distintos modos de funcionamiento del sistema GCHP en régimen intermitente con el objetivo de analizar la influencia de este régimen en el balance térmico del terreno. Para ello lleva a cabo una simulación en un edificio de oficinas de cuatro plantas de 3273 m², de los cuales se climatizan 1369 m² situado en Chongqing (China) donde las temperaturas son cálidas en verano y frías en invierno. La instalación está formada por 48 pozos verticales en U simple con 80 metros de profundidad y una distancia entre pozos de 4m. Los tubos son de polietileno, con 0,032m de diámetro exterior y 0,026m de diámetro interior, y la distancia entre los tubos es 0,05m. Los parámetros físicos de los distintos materiales fueron los siguientes:

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (J/kgK)
Tubo de PE	950	0,44	1000
Terreno	2570	2,035	921,1
Material de relleno	1600	1,5	1200

Tabla 16: Datos del estudio realizado por Yong Wang.
Fuente: Yong Wang et al, 2012.

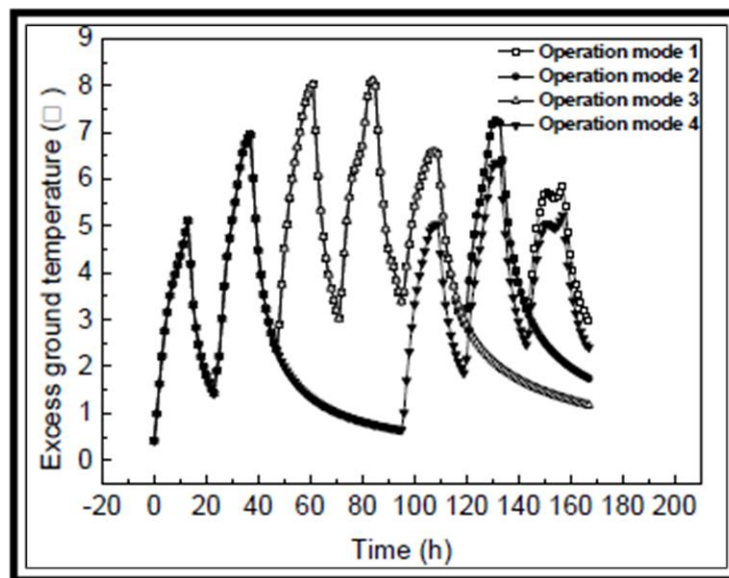
La metodología que emplea se divide en dos modelados: uno en 2D, que está basado en el modelo matemático del foco lineal y por ello hace una simulación anual; otro en 3D, introduciendo un modelo matemático distinto cuyas ecuaciones gobernantes aparecen en su artículo, con una duración semanal (del 1 al 7 de julio). Los programas utilizados son:

- DeST para establecer el modelo de cargas térmicas necesarias en el edificio y calcular las cargas horarias.
- Gambit para el modelado geométrico y el mallado computacional del pozo en el modelo de la transferencia de calor. Realiza el modelado para Fluent.
- Fluent (Software de dinámica computacional de fluidos) para la simulación numérica.

Los modos de operación semanales se describen a continuación:

- **Modo 1:** 7 días en régimen continuo.
- **Modo 2:** 6 días en régimen continuo y 1 en régimen intermitente. Factor de utilización 1.
- **Modo 3:** 5 días en régimen continuo y 2 en régimen intermitente. Factor de utilización 0.7. Operación intermitente cuando se dan las cargas pico.
- **Modo 4:** 2 días en régimen continuo, 2 en régimen intermitente y 3 en continuo. Operación intermitente cuando se dan las cargas valle.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica 14: Incremento de la temperatura semanal del terreno en diferentes modos de operación.
Fuente: Yong Wang et al (2012).

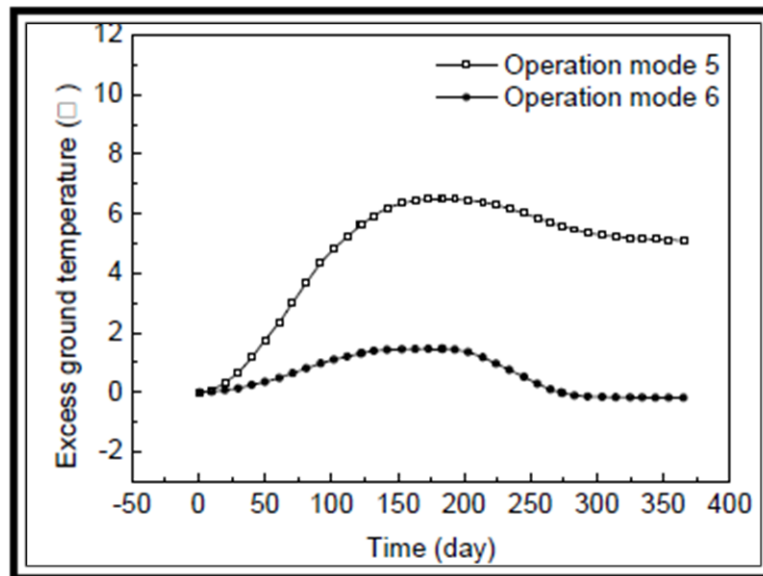
Como se puede observar, el que menor incremento de temperatura tiene finalmente es el modo 3, debido a que los dos últimos días se encuentra en régimen intermitente. Deducimos que con la operación intermitente podemos volver a reducir en pocas horas la temperatura del terreno.

En cuanto a los modos de operación anuales, se describen a continuación:

- **Modo 5:** régimen continuo en período de refrigeración de junio a septiembre, régimen intermitente durante octubre y noviembre, régimen continuo en periodo de calefacción de diciembre a febrero y régimen intermitente de marzo a mayo. Ratio del desequilibrio refrigeración/calefacción 4,2:1.

- **Modo 6:** régimen intermitente alternando con régimen continuo durante el período de refrigeración de junio a septiembre, régimen intermitente durante octubre y noviembre, régimen continuo durante el periodo de calefacción de diciembre a enero, y régimen intermitente de marzo a mayo. Ratio del desequilibrio refrigeración/calefacción 1:1.

Los resultados obtenidos se observan en la gráfica 15. Se determina que con el modo de operación 6 el balance térmico del terreno al cabo de un año es nulo. Sin embargo esto parece obvio, pues el ratio de desequilibrio refrigeración/calefacción del modo 6 es 1:1, inyectándose la misma cantidad térmica de energía que se extrae, mientras que en el modo 5 dicho ratio es de 4,2:1.



Gráfica 15: Incremento de la temperatura anual del terreno en diferentes modos de operación.
Fuente: Yong Wang et al (2012).

El régimen intermitente del sistema GSHP juega un papel importante en la mejora de la transferencia de calor del sistema y en el aumento del rendimiento del sistema, ya que es posible reducir el desequilibrio del balance térmico del terreno e incluso cumplir el propio balance. Esto se puede llevar a cabo mediante el uso de sistemas híbridos, los cuales se verán en el próximo capítulo.

8.2. Tiempo de recuperación del terreno.

A la luz de un estudio realizado por *Yang Shang et al (2010)*, se va a mostrar cuánto es el tiempo necesario para que el terreno recupere su temperatura inicial en un ejemplo, de modo que se podrá apreciar qué parámetros son los más influyentes.

Se configura un modelo 3D y se investiga mediante simulación numérica el efecto que tienen diversos parámetros en la recuperación de la temperatura del terreno: conductividad térmica, porosidad, material de relleno, temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento.

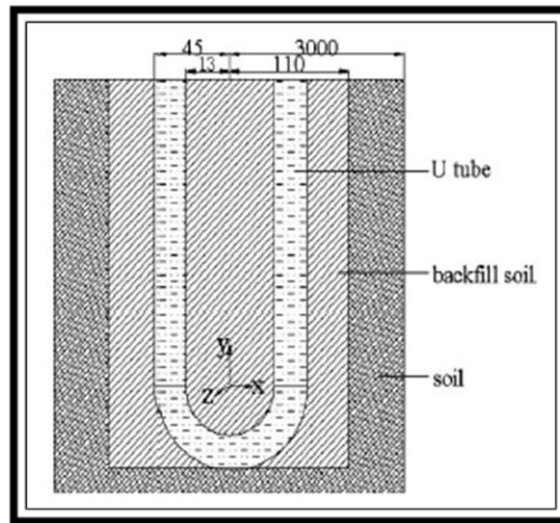


Figura 34: Modelo en 3D de la simulación de Yan Shang.
Fuente: Yang Shang 2010.

Las hipótesis que asume el modelo son:

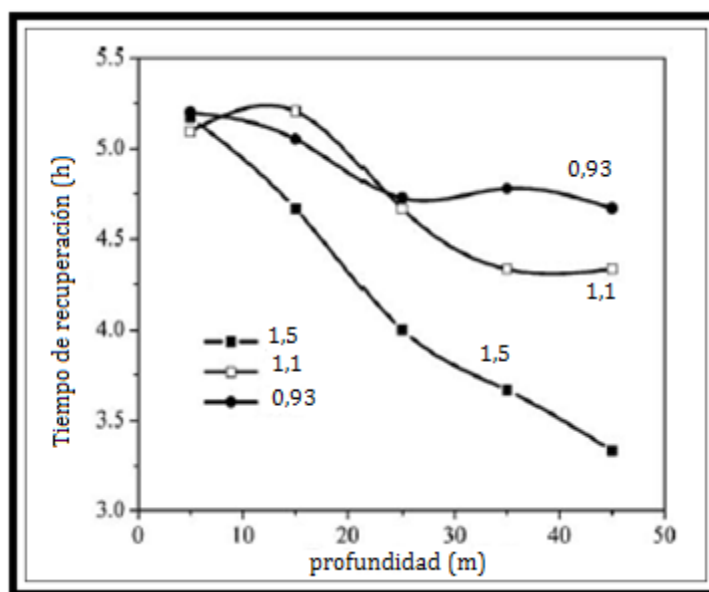
1. El suelo es considerado como un medio poroso saturado.
2. Se desprecia la influencia de la gravedad en el caudal circulante por el tubo en U.
3. Las propiedades térmicas del terreno son constantes e iguales en cualquier punto del dominio.
4. Se ignora la posibilidad de congelación / descongelación del fluido circulante.

Todos los resultados numéricos presentados son calculados con un intervalo de tiempo de 1 segundo, utilizando el programa Fluent. El mallado computacional se ha llevado a cabo mediante el software Gambit. El modelo ha sido contrastado con una instalación experimental, de modo que se ha podido validar dicho modelo.

La simulación se lleva a cabo en régimen de calefacción. Los resultados son analizados después de 12 horas de funcionamiento del sistema GCHP, hasta que la

temperatura del terreno se recupera. La temperatura inicial del terreno antes de empezar a funcionar el sistema GCHP es de 286 K. Todas las simulaciones están sometidas a las mismas condiciones de funcionamiento: (velocidad del viento=0.4 m/s, temperatura ambiente=272 K, temperatura del fluido circulante por el GHE=281 K). A continuación se muestran los resultados que Yan Shang obtuvo:

1. Conductividad térmica del terreno. En la gráfica 16 se observa el tiempo de recuperación del terreno en función de la profundidad para distintas conductividades térmicas del terreno. Los tiempos totales a una profundidad de 45 metros se muestran en la tabla 17:



Gráfica 16: Tiempo de recuperación vs profundidad para distintos terrenos.
Fuente: Yan Shang et al, 2010.

λ_{terreno} (W/mK)	Tiempo de recuperación (h)
0,93	4,89
1,1	4,73
1,5	4,13

Tabla 17: Tiempo de recuperación a 45 metros para distintos terrenos.
Fuente: Yan Shang et al, 2010.

Debe notarse que la gráfica 16 sigue un comportamiento anómalo. Dados los resultados, se deduce que a mayor conductividad térmica del terreno menor será el tiempo de recuperación del mismo. Sin embargo, hay un intervalo en la profundidad (de 7 a 23 metros aproximadamente), en el que el terreno se recupera

antes para el caso en el que la conductividad térmica es 0,93 W/m·K que el caso en el que dicha conductividad es 1,1 W/mK. Para el caso más favorable, $\lambda_{\text{terreno}} = 1,5$ W/m·K, no ocurre ninguna anomalía.

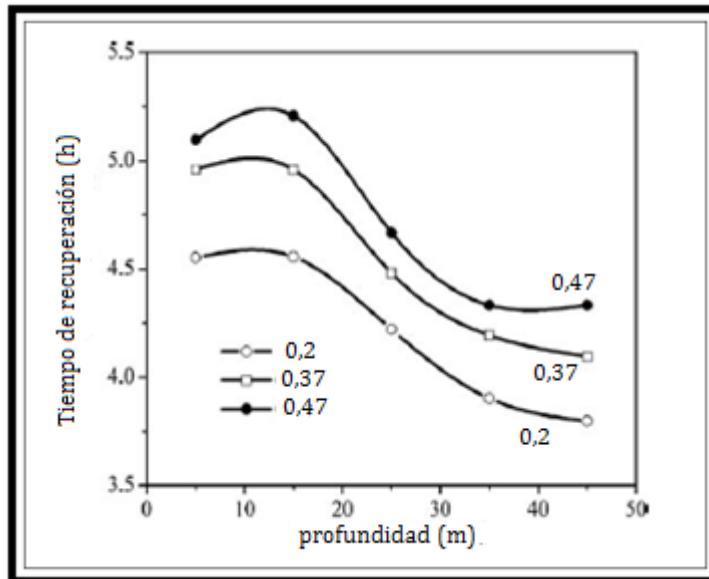
2. Porosidad. La porosidad de un suelo viene dada por el porcentaje de huecos existentes en el mismo frente al volumen total. A efectos prácticos se calcula a partir de las densidades aparente y real del suelo:

$$\text{Porosidad} = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m} \quad (8.1)$$

Donde:

- ρ_a es la densidad aparente del material (kg/m³).
- ρ_m es la densidad real del material (kg/m³).

Los resultados muestran que a menor porosidad, menor es el tiempo de recuperación.



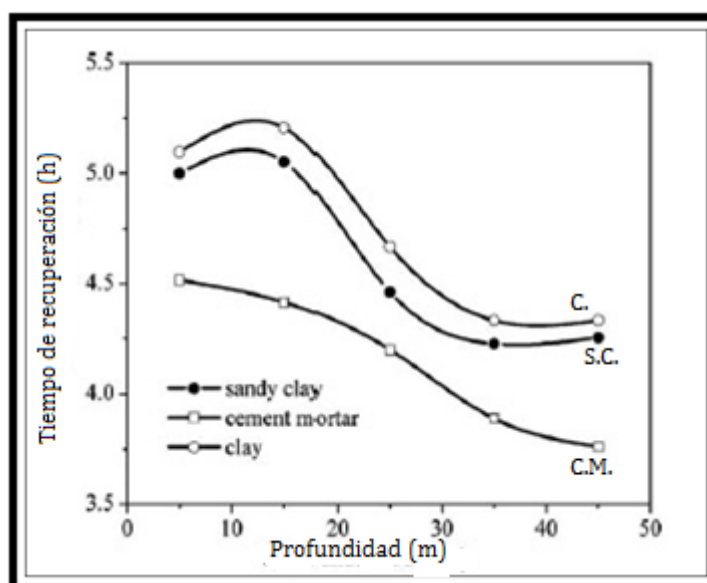
Gráfica 17: Tiempo de recuperación vs profundidad para distintas porosidades.
Fuente: Yan Shang et al, 2010.

Porosidad	Tiempo de recuperación (h)
0,2	4,21
0,37	4,54
0,47	4,73

Tabla 18: Tiempo de recuperación a 45 metros para distintas porosidades.
Fuente: Yan Shang et al, 2010.

La explicación de estos resultados parece lógica. A mayor porosidad, más aire hay incrustado en el terreno. La conductividad térmica del aire es 0,0263 W/mK a 300 K y presión atmosférica, y como se ha visto en el apartado anterior, a menor conductividad térmica mayor es el tiempo de recuperación; y por tanto, a mayor porosidad, mayor es dicho tiempo.

3. Material de relleno. En la gráfica 18 se muestra la evolución de la recuperación del terreno, y en la tabla 19 se muestran los resultados junto con la difusividad térmica de cada material de relleno.



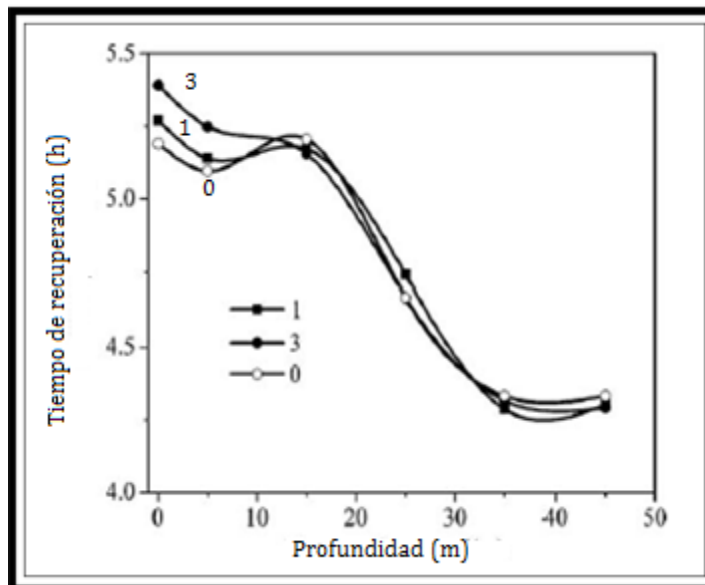
Gráfica 18: Tiempo de recuperación vs profundidad para distintos rellenos.
Fuente: Yan Shang, 2010.

El mortero de cemento (*cement mortar*) se recupera antes que la arcilla (*clay*) y la arcilla arenosa (*sandy clay*), de lo que podemos deducir que a mayor difusividad térmica, menor es el tiempo de recuperación.

Material de relleno	Difusividad térmica (m ² /s)	Tiempo de recuperación (h)
Mortero de cemento	0,0032	3,75
Arcilla arenosa	0,0025	4,37
Arcilla	0,0023	4,45

Tabla 19: Tiempo de recuperación a 45 metros para distintas difusividades térmicas.
Fuente: Yan Shang, 2010.

4. Viento. Los resultados se muestran en la gráfica 19 y la tabla 20. Se observa que la velocidad del viento solo tiene relevancia en los primeros metros, siendo más desfavorable cuanto más alta sea dicha velocidad.

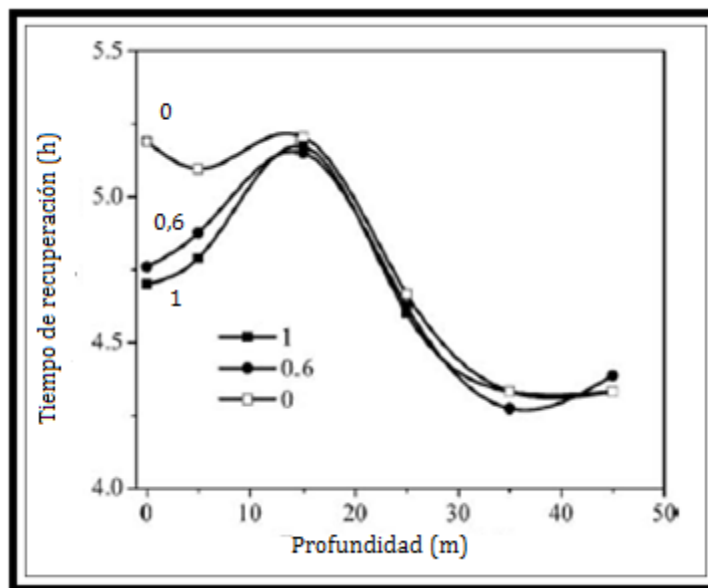


Gráfica 19: Tiempo de recuperación vs profundidad para distintas velocidades del viento.
Fuente: Yan Shang, 2010.

Velocidad del viento (m/s)	Tiempo de recuperación (h)
0	4,73
1	4,78
3	4,75

Tabla 20: Tiempo de recuperación a 45 metros para distintas velocidades del viento.
Fuente: Yan Shang, 2010.

5. Radiación solar. Este parámetro influye en los metros inmediatamente inferiores a la superficie, pero no en grandes profundidades (mayores que 10 metros). Para distintos valores de la radiación solar se obtuvieron los siguientes resultados. Debemos tener en cuenta que la simulación se ha realizado para el caso de calefacción, por tanto el terreno se recuperará cuando se vuelva a calentar. Por este motivo, cuanto mayor sea la radiación solar, menor será el tiempo de recuperación del terreno.

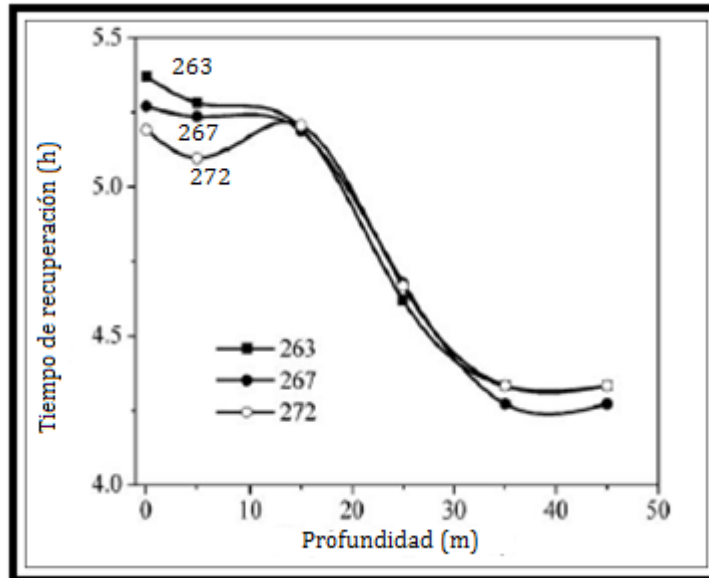


Gráfica 20: Tiempo de recuperación vs profundidad para distinta radiación solar.
Fuente: Yan Shang, 2010.

Radiación solar (kW/m ²)	Tiempo de recuperación (h)
0	5,1
0,6	4,87
1	4,78

Tabla 21: Tiempo de recuperación a 45 metros para distinta radiación solar.
Fuente: Yan Shang, 2010.

6. Temperatura ambiente. Nuevamente vemos otro parámetro exterior al terreno y que solamente tiene influencia en los primeros 10 metros aproximadamente. Como es lógico (en régimen de calefacción), cuando la temperatura exterior es baja, mayor será el tiempo de recuperación. Los resultados se muestran en la gráfica 21 y en la tabla 22.



Gráfica 21: Tiempo de recuperación vs profundidad para distinta temperatura exterior.

Fuente: Yan Shang, 2010.

Temperatura exterior (K)	Tiempo de recuperación (h)
263	5,28
267	5.24
272	5,1

Tabla 22: Tiempo de recuperación a 45 metros para distinta temperatura exterior.

Fuente: Yan Shang, 2010.

8.2.1. Conclusiones

En primer lugar se ha de notar que, por parte del autor original, no coinciden los resultados mostrados en los gráficos con los mostrados en las tablas. No obstante, sigue siendo igualmente válido para estudiar cómo afectan los distintos parámetros.

Tras 12 horas de funcionamiento de una GCHP se mide el tiempo de recuperación del terreno. La simulación se lleva a cabo en régimen de calefacción y todas las simulaciones están sometidas a las mismas condiciones de funcionamiento: velocidad del viento = 0,4 m/s; temperatura ambiente = 272K; temperatura media del fluido circulante por el GHE = 281 K. Los tiempos de recuperación mostrados numéricamente se refieren a una profundidad de 45 metros.

La conductividad térmica del terreno, la porosidad y la difusividad térmica de los materiales de relleno tienen una gran influencia en la recuperación de la temperatura del terreno. La temperatura se recupera más rápido cuando la conductividad aumenta, la porosidad disminuye y el material de relleno es mortero de cemento (mayor difusividad térmica).

Parámetro	Idoneidad	Valores estudio	Resultado (h)
Conductividad térmica	↑	0,93 ; 1,1 ; 1,5 (W/mK)	4,89 ; 4,73 ; 4,13
Porosidad	↓	0,2 ; 0,37 ; 0,47	4,21 ; 4,54 ; 4,73
Difusividad térmica	↑	0,0032 ; 0,0025 ; 0,0023 (m ² /s)	3,75 ; 4,37 ; 4,45

Tabla 23: Parámetros de gran influencia en la respuesta del terreno.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Yan Shang, 2010.

La temperatura del aire, la radiación solar y la velocidad del viento tienen un efecto menor. En régimen de calefacción, es más favorable una velocidad del viento baja y una radiación solar y temperatura ambiente altas. Para el caso de refrigeración es completamente al revés.

Parámetro	Idoneidad calefacción	Valores estudio	Resultado (h)	Idoneidad refrigeración
Velocidad del viento	↓	0 ; 1 ; 3 (m/s)	4,73 ; 4,78 ; 4,75	↑
Radiación solar	↑	0 ; 0,6 ; 1 (kW/m ²)	5,1 ; 4,87 ; 4,78	↓
Temperatura ambiente	↑	263 ; 267 ; 272 (K)	5,28 ; 5,24 ; 5,1	↓

Tabla 24: Parámetros de leve influencia en la respuesta del terreno.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Yan Shang, 2010.

9. Sistemas híbridos.

Los sistemas híbridos son combinaciones de varias tecnologías de climatización o sistemas de almacenamiento térmico, que se utilizan con el fin de obtener mejoras respecto al uso de una sola tecnología.

Algunos de los problemas que plantea un sistema de bomba de calor acoplado al terreno es el coste de la inversión inicial o el aumento/disminución de la temperatura del terreno, lo que va a llevar a que a medio o largo plazo el sistema GSHP funcione con un rendimiento inferior. Los sistemas híbridos plantean una mejora de este rendimiento al complementar el sistema GSHP, permitiéndose utilizar varias tecnologías simultáneamente o intermitentemente, de manera que se pueda llegar a cumplir el balance de energía del terreno. Además, puede reducir el coste de inversión del sistema GSHP y de todo el sistema de climatización global, ya que será necesaria una menor potencia instalada de GSHP y por tanto menores costes de perforación y longitud del intercambiador acoplado al terreno, que es principalmente lo que encarece la instalación como se ha visto anteriormente.

Según ***Teresa Magraner (2008)***, la instalación de un sistema híbrido permite:

1. Regenerar el terreno, permitiendo la recuperación de su temperatura.
2. Utilizar el foco de calor más eficiente.
3. Reducir el tamaño del intercambiador geotérmico.
4. Disminuir el tiempo de amortización de la instalación.
5. Mejorar la eficiencia de la instalación para obtener un ahorro energético considerable (20 – 40%) respecto a la instalación convencional.

A continuación se describen varios sistemas híbridos, con esquemas de funcionamiento a modo de ejemplos y datos obtenidos en diversas instalaciones reales.

9.1. Sistema híbrido GCHP – colectores solares.

Durante los últimos 25 años se han probado diferentes diseños de sistemas GCHP combinados con energía solar. En estos sistemas, los colectores solares pueden cumplir varias funciones: suministrar ACS, incrementar la temperatura del evaporador en la

bomba de calor, almacenar energía en el pozo, o una combinación de todas estas (**X.Q. Zhai et al, 2011**).

Wang X. et al (2010) llevó a cabo un estudio experimental de estos sistemas en zonas climáticas frías. Instaló en Harbin (China, temperaturas severamente frías en invierno), un sistema de colectores solares con GCHP en una vivienda unifamiliar. Parte de la energía térmica solar se almacenaba en el terreno, dependiendo del modo de funcionamiento del sistema. Las medidas experimentales se llevaron a cabo de abril de 2008 a abril de 2009. La siguiente figura muestra el esquema de funcionamiento.

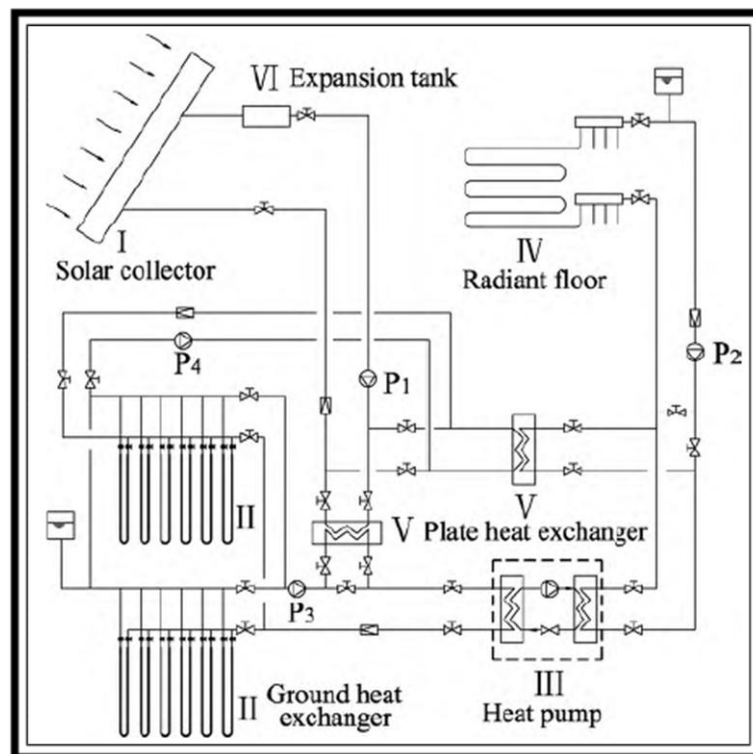


Figura 35: Esquema del sistema GCHP-colectores solares con almacenamiento térmico solar estacionario.
Fuente: Wang X. et al, 2010.

Durante el año, el sistema funciona en 3 modos distintos, que están controlados automáticamente:

- Modo 1: Almacenamiento térmico solar en el terreno. Se utilizó del 18 de abril (2008) al 14 de julio, y del 28 de agosto al 9 de octubre. Este modo se ponía en marcha cuando la temperatura de los tubos del colector solar era superior a una temperatura de consigna fijada (de 25 a 30°C), entonces las bombas P1 y P3 se ponían en funcionamiento automáticamente y se inyectaba calor en el

terreno. Cuando la temperatura de los tubos era menor que la temperatura de consigna, las bombas se cerraban.

- Modo 2: La mitad del intercambiador de calor acoplado al terreno refrigeraba directamente el edificio utilizando el suelo como almacenador, y la otra mitad funcionaba de la misma manera que el modo 1. Este modo estuvo operando del 15 de julio al 27 de agosto. El edificio estaba climatizado por suelo refrigerante. La condición de refrigeración se llevaba a cabo midiendo la temperatura interna del espacio climatizado y fijando dos temperaturas de consigna, una superior (26°C) y otra inferior (24°C). Cuando la temperatura de la vivienda era mayor que la temperatura de consigna superior, las bombas P2 y P4 se ponían en funcionamiento automáticamente. Cuando la temperatura de la vivienda era inferior a la temperatura de consigna inferior, las bombas P2 y P4 se apagaban. El almacenamiento de energía solar térmica en el terreno se llevaba a cabo igual que en el modo 1.
- Modo 3: los colectores solares y la GCHP calentaban el edificio alternativamente. Este modo funcionó del 10 de octubre al 15 de abril (2009). El arranque y parada del sistema estaba controlado por la temperatura de los tubos del colector y la temperatura del interior de la vivienda. Si la temperatura de los tubos era mayor que la de consigna, los colectores solares calentaban al edificio directamente comenzando a funcionar las bombas P1 y P2, y si la temperatura era menor dejaban de funcionar. Respecto a la GCHP, cuando la temperatura en el interior del edificio era menor que la de consigna se abrían P2 y P3, y cuando era menor dejaban de funcionar.

En el tiempo de funcionamiento del sistema se tomaron las medidas de las temperaturas del fluido (agua con anticongelante) a la entrada y salida del intercambiador de calor acoplado al terreno, del condensador, la temperatura media en el interior y exterior de la vivienda, la potencia suministrada y la potencia consumida. Como resultados relevantes, el COP medio en modo calefacción fue 6,14, mientras que en el modo refrigeración el COP medio fue 21,35 (*free cooling*, solo consumo de bomba de circulación). En el caso de la refrigeración se tiene que la carga necesaria es mucho menor que en el caso de calefacción, y como además no interviene la GCHP se ahorra una gran cantidad de energía en el consumo eléctrico, con lo cual el COP de refrigeración se dispara. Se demuestra que este tipo de instalación es válida para una vivienda unifamiliar en una zona climática fría, y que el calor suministrado directamente por los colectores solares fue del

49,7 % del total de la carga de calefacción suministrada, con lo que se ahorró consumo eléctrico y se elevó el COP del sistema. Por otro lado, el balance térmico al terreno muestra que año a año se va incrementando la temperatura del mismo, de modo que después de algunos años se alcanzará una temperatura más adecuada para el sistema, y en ese momento se deberá reducir el tiempo de operación de los colectores solares para cumplir el balance térmico.

Yuehong Bi (2004), llevó a cabo un estudio teórico y experimental en China sobre una instalación que podía alternar tres formas de cubrir las demandas térmicas del edificio: una bomba de calor que intercambiaba calor con la radiación solar, un sistema GCHP y un sistema híbrido de GCHP con colectores solares. Los resultados que obtuvo fueron los siguientes:

- Para la bomba de calor intercambiando con la radiación solar, la carga promedio de calefacción suministrada fue de 2334 W y el COP fue de 2,73.
- Para el caso del sistema GCHP, la carga promedio de calefacción suministrada fue de 2298 W y el COP 2,83.
- Para el sistema híbrido GCHP con colectores solares, la carga promedio de calefacción suministrada fue de 2316 W y el COP 2,78.

Con lo que demostró la viabilidad del sistema híbrido.

Por su parte, **Elisabeth Kjellsson (2010)** realizó un estudio en Suecia sobre la optimización del sistema híbrido que nos ocupa en una vivienda unifamiliar. Afirma que hay tres motivos para añadir colectores solares al sistema GCHP: la menor necesidad de energía eléctrica, el aumento de la temperatura de los pozos (beneficioso en climas fríos) y la menor necesidad en la cantidad neta de extracción de calor del terreno. Para utilizar menos energía eléctrica, determina que la mejor opción es producir ACS en verano y en invierno ceder la energía de los colectores al terreno.

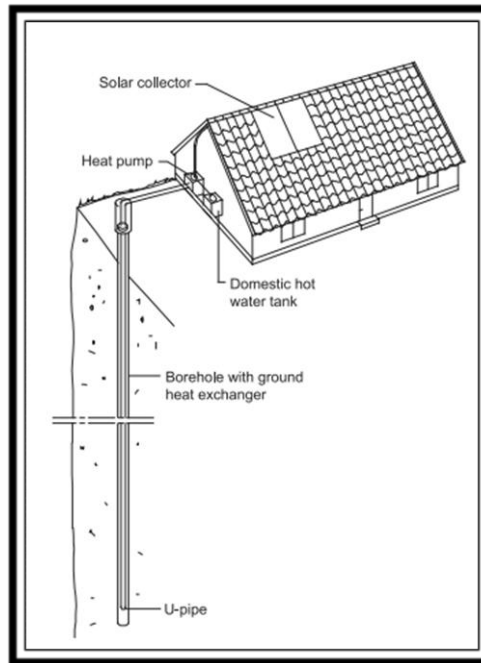


Figura 36: Vivienda unifamiliar con colectores solares y GCHP.
Fuente: Elisabeth Kjellsson (2010)

9.2. Sistema híbrido GCHP – torre de refrigeración.

La energía térmica inyectada por los sistemas GCHP en el terreno cuando operan en régimen de refrigeración, hacen que se acumule un exceso de “calor” en el terreno, llevando a la degradación del funcionamiento del sistema. Este calor acumulado se puede atenuar con una torre de refrigeración.

H. Zhang (2010) comparó en un mismo edificio, en un lugar de China cálido con grandes necesidades de refrigeración, cinco sistemas distintos para cubrir una carga de refrigeración de 1900 kW y una carga de calefacción de 1300 kW. Decidió dimensionar el intercambiador enterrado de acuerdo a las necesidades de la carga de calefacción. Los distintos sistemas fueron un sistema híbrido GCHP – torre de refrigeración, una enfriadora de agua y un quemador de gas, una bomba de calor intercambiando con el aire, un enfriador de agua con una bomba de calor intercambiando con el aire y una enfriadora por absorción de gas con bromuro de litio. Sus resultados muestran que el coste inicial del sistema GCHP – torre de refrigeración es mucho más elevado que el resto, pero los costes de operación y mantenimiento anuales son mucho menores.

Un esquema a modo de ejemplo para este sistema lo dio **Yi Man et al (2010)**, llevando a cabo una simulación en Hong Kong, eligiendo la capacidad de la torre de

refrigeración de acuerdo con la diferencia entre la carga pico y el valor promedio de las cargas de refrigeración anuales.

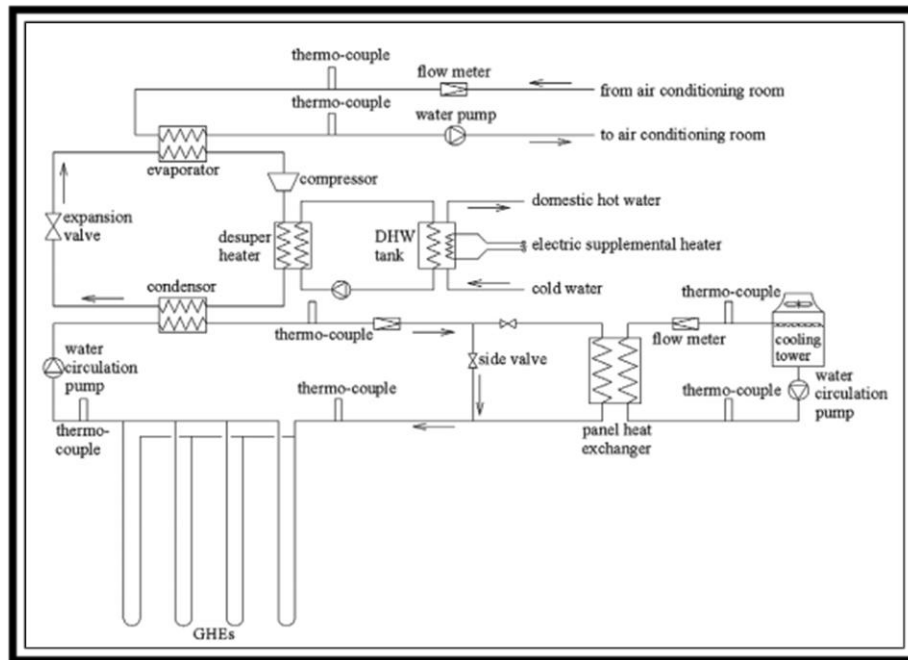


Figura 37: Esquema de un sistema híbrido GCHP – torre de refrigeración.
Fuente: Yi Man et al (2010).

El agua generada en la torre de refrigeración intercambia calor con el agua que circula por los pozos cuando sea necesario controlar el aumento de temperatura del terreno. Además este esquema cuenta con suministro de ACS, aprovechando el calor del fluido a la salida del compresor del ciclo Rankine y con una resistencia térmica suplementaria. En su estudio, Yi Man determinó que se podría ahorrar un 34% en el coste inicial, un 22% en el coste de operación en el primer año de funcionamiento y hasta un 53% del coste de 10 años en funcionamiento comparando el sistema híbrido con un sistema GCHP tradicional.

9.3. Sistema híbrido GCHP – almacenamiento térmico.

Como se ha visto en el apartado 9.1. la energía solar se puede utilizar para conseguir un almacenamiento de calor estacional en el terreno en las estaciones en las que no es necesaria la calefacción. Sin embargo también se pueden utilizar diversas tecnologías para el almacenamiento de frío.

W. Wei et al, (2007) propuso instalar un sistema GCHP combinado con un tanque de almacenamiento de hielo en el interior del terreno. El esquema de la instalación se muestra en la figura 38.

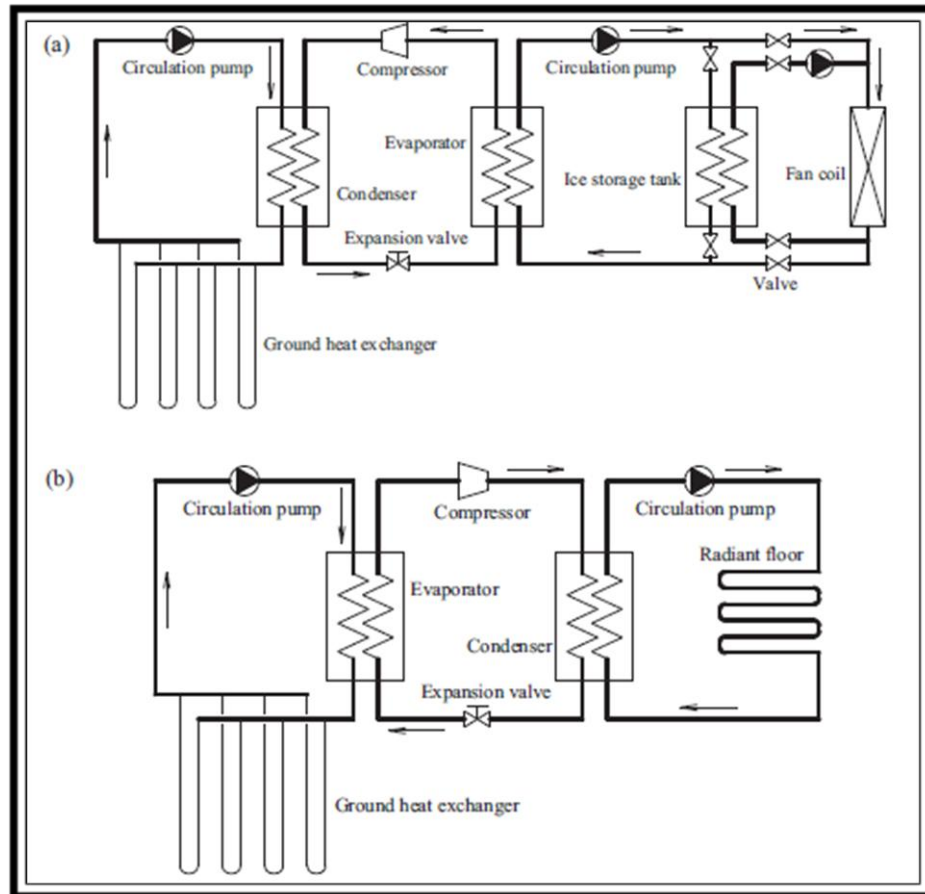


Figura 38: Esquema sistema GCHP – almacenamiento térmico. a) régimen de refrigeración y b) régimen de calefacción. Fuente: W. Wei et al, (2007).

La instalación tenía dos modos de funcionamiento para refrigeración. Cuando no había picos de demanda, el sistema intercambiaba calor con el tanque de hielo y además refrigeraba el recinto mediante fancoils, pero cuando había picos de demanda se utilizaba el tanque de hielo para refrigerar más el fluido circulante que debe pasar por el fancoil. Respecto al régimen de calefacción el esquema era un sistema GCHP que suministraba la carga necesaria mediante un suelo radiante. W. Wei comparó este sistema con una instalación convencional de calefacción y refrigeración, y afirmó que respecto al coste de operación se podía reducir de un 42,7 a un 71,4 % en verano y en un 50% en invierno.

9.4. Idoneidad de los sistemas híbridos.

Después de analizar estos tres tipos de sistemas híbridos, queda patente que el sistema GCHP – energía solar es apto para clima frío, el sistema GCHP – torre de refrigeración es apto para clima cálido y los sistemas GCHP con almacenamiento térmico para cualquier tipo de clima, pero si se trata de clima frío es preciso que el almacenamiento sea de calor y si el clima es cálido el almacenamiento debe ser de frío de modo que se puedan suplir con mayor facilidad las cargas dominantes. **Q. Zhai et al (2011)** lo expresa en la siguiente tabla:

Sistema híbrido GSHP...	Edificio con carga dominante de calefacción	Edificio con carga dominante de refrigeración
Colectores solares	SI	NO
Torre de refrigeración	NO	SI
Almacenamiento térmico	Almacenamiento calor	Almacenamiento frío

Tabla 25: Idoneidad de los sistemas híbridos.
Fuente: Q. Zhai et al, 2011.

10. Empresas del sector.

A continuación se expone una tabla en la que se citan empresas españolas que trabajan en el ámbito de la geotermia, ya sean ingenierías, fabricantes, instaladores, auditorías, consultorías, etc. En la bibliografía consultada (***fenercom***) se puede encontrar también la dirección de cada empresa, su número de teléfono y fax.

Se puede ver que, a pesar de que las bombas de calor acopladas al terreno en España es una tecnología emergente, ya existen numerosas empresas dedicadas a ello directa o indirectamente (realizando solamente sondeos por ejemplo) por todo el país.

NOMBRE	CIUDAD	PÁGINA WEB	GRUPO
AGUIDROVERT SOLAR S.L.	Zaragoza	www.aguidrovert.com	Distribuidor de materiales para instalaciones de fontanería, electricidad, energía solar térmica, fotovoltaica y biomasa. Auditorías energéticas. Apoyo gratuito a instaladores, técnicos, ingenieros y arquitectos
AITEMIN	Leganés -Madrid	www.aitemin.es	Auditorías Energéticas, Estudios de Sistemas Geotérmicos
AKITER INSTALACIONES	Toledo	www.akiter.com	Ingeniería y Empresa Instaladora
ALFA LAVAL IBERIA S.A.	Alcobendas - Madrid	www.alfalaval.com	Fabricante de bienes de equipos
ALGESÓN IBERICA S.L.	Algemesí - Valencia	www.algeson.com	Sondeos
ALJAVAL, S.L.	Córdoba	---	Ingeniería, Equipos, Instaladora, Distribuidores
ATLAS COPCO, S.A.E.	Coslada - Madrid	www.atlascopco.es	Sondeos, Equipos, Ingeniería, Instalador.
BLININER, S.L.	Madrid	www.blininer.es	Ingeniería, Instalador, Proyectos Integrales "llave en mano".
BEST BILBAO ENERGY SOLUTION TRENDS, S.L.	Sondica - Vizcaya	www.bestenergysolutions.net	Ingeniería e Instalador
CECAM GEOTERMIA	Celrà - Gerona	www.cecama.com	Especialista en instalación de sondas geotérmicas verticales
CENIT SOLAR PROYECTOS E INSTALACIONES ENERGÉTICAS	Boecillo,Valladolid	www.cenitsolar.es	Ingeniería, Instalador, en Energías Renovables
CIATESA	Montilla - Córdoba	www.ciatesa.es	Equipos
CLIVET ESPAÑA. S.A.	Villaviciosa de Odón - Madrid	www.clivet.es	Equipos
COMPAÑÍA GENERAL DE INGENIERÍA Y SONDEOS, S.A. (CGS)	Alcobendas - Madrid	www.cgsingenieria.com	Ingeniería, Perforación de Sondeos, Consultoría
CONSULTORÍA GEOTÉRMICA CATALUÑA S.L.	Mollet del Vallés - Barcelona	www.cencat.com	Proyectos geotérmicos llave en mano. Desde ingeniería hasta finalización ejecución.
CSS GEOMINERO. INGENIERÍA DE MINAS, PROYECTOS E INSTALACIONES GEOTÉRMICAS	Chiclana de la Frontera - Cádiz	www.cssgeominero.es	Estudio de Ingeniería vinculados al Sector Minero, Proyectos e Instalaciones Geotérmicas. Con zona de actuación en Andalucía y Extremadura.

ECLAREON	Madrid	www.eclareon.com	Energías renovables – solar fotovoltaica, solar termoelectrica, solar térmica, geotérmica, eólica, bioenergía y eficiencia energética
EDASU, S.L.	Pinto - Madrid	www.edasu.es	Proyectos llave en mano en perforación y diseño de instalaciones
EDITORIAL EL INSTALADOR	Alcalá de Henares – Madrid	www.elinstaladordigital.com	PRENSA TÉCNICA
ENERES TECNOLÓGICA, S. L.	Madrid	www.eneres.es	Consultoría, ingeniería instalaciones llave en mano
ENERGESIS	Valencia	www.energesis.es	Ingeniería, instalaciones llave en mano, Test de Respuesta Térmica (TRT)
ENERGÍAS RENOVABLES DE CASTILLA Y LEON S.L.	Guardo - Palencia	www.ercyl.com	Sondeos, Equipos, Ingeniería, Instalador
ENERSUB INGENIERÍA GEOTÉRMICA S.L.	Manzanares - Ciudad Real	www.enersub.com	Servicios de consultoría, geología e ingeniería en energía geotérmica. Proyectos llave en mano de instalaciones geotérmicas de baja entalpía.
ENERTRES	Redondela,Pontevedra	www.enertres.com	Equipos
ENERTUR MANCHA S.L.	Gálvez - Toledo	www.enerturmancha.com	Sondeos, Ingeniería , Instalador
ESAGAS	Mérida - Badajoz	www.esagas.com	Equipos de baja profundidad 30 m, Ingeniería, Instalador.
ESAK, S.A.	Madrid	www.esak.es	Ingeniería e Instaladora
ESTUDIO INGENIERÍA IDAFE, S.L.U	Madrid	www.idafe.	Ingeniería
FERROLI ESPAÑA, SLU	Coslada - Madrid	www.ferroli.es	Fabricantes de equipos de calefacción, climatización, energía solar térmica y bomba geotérmica. Servicios de consultoría.
FOURTEC GEO ENERGIE S.L.	Chinchilla de Montearagón - Albacete	www.grupofourtec.es	Ingeniería, Consultoría, Equipos e Instalador Autorizado.
GEALIA NOVA S.L.	Tajonar - Navarra	www.gealianova.com	Sistemas de climatización geotérmicos, Aislamientos con celulosa insuflada.Ingeniería, proyectos, instalaciones y perforaciones.
GENERXIA, SL.	Orense.	---	Instalador integral con equipo de sondeos propio e innovación
GEODEEP, S.L.	Olias del Rey - Toledo	www.geodeep.es	Ingeniería, intercambiadores geotérmicos (sondeos)
GEOLEVANTE	Alicante	www.geolevante.com	Empresa de sondeos e informes geotérmicos
GEOMAD INSTALACIONES S.L.	Alcorcón - Madrid	www-geomad.es	Diseño, calculo e instalación llave en mano de instalaciones geotérmicas.
GEOMNIA NATURAL RESOURCES SLNE	Collado Villalba - Madrid	www.geomnia.es	Investigación de recursos geotérmicos. Asesoría y consultoría geológica.
GEOTERCAN	Santander - Cantabria	www.geotercan.net	Ingeniería, Instalador, Mantenedor

Estado del arte de sistemas de bombas de calor acopladas al terreno

GEOTER – GEOTHERMAL ENERGY S.L.	San Sebastián de los Reyes - Madrid	www.geoter.es	Sondeos, Equipos, Ingeniería, Instalador, etc “Instalaciones llave en mano”
GEOTHERMAL ENERGY SOURCES S.L. – GRUPO BERKELEY RESOURCES Ltd.	Santa Marta de Tormes - Salamanca	---	Ingeniería, Proyectos, Promotor de proyectos de media y baja entalpía.
GEOTERMIA VERTICAL S.L.	Valdemoro - Madrid	www.geotermiavertical.es	Especialistas en perforaciones para la instalación de sondas geotérmicas.
GEOTHERMIC SYSTEM	Vilanant - Gerona	www.geothermicsystem.com	Fabricación sondas geotérmicas y accesorios.
GEOTICS INNOVA S.L.	Barcelona y Madrid	www.geotics.net	Distribución equipos, Sondeos, Ingeniería, Proyectos llaves en mano.
GIROD PROYECTOS S.L.	Madrid	www.giroadgeotermia.com	Red de perforadores certificados de perforación geotérmica, Estudios de respuesta térmica (TRT), Legalización de perforaciones geotérmicas, Distribuidor nacional de captadores de energía Muovitech, Distribuidor nacional de equipos Geotérmicos Thermia, Red de instaladores autorizados Thermia, Soporte técnico Thermia
GRUPO COTEC	Lorca - Murcia	www.grupocotec.com	Actividad de la empresa: Ingeniería geotérmica, instalador y proyectos integrales 'llave en mano'.
HISPATEL 2000, S.L.	Boadilla del Monte - Madrid	www.hispatel2000.es	Ingeniería, Instalador
IBÉRICA DE COMPONENTES PARA EL AHORRO ENERGÉTICO S.L.L.	Tudela - Navarra	www.ibericadecomponentes.com	Proyectos de geotermia de baja temperatura. Estructuras termoactivas y pilotes energéticos. Sondeos, instalaciones, bombas de calor y accesorios. Test de respuesta térmica del subsuelo.
IEP GEOTERMIA	Alfaro - La Rioja	www.geotermiasolar.net	Ingeniería y geología, perforaciones, instalaciones de sala técnica y todo tipo de sistemas de intercambio con la vivienda. Suelo radiante, fancoils, radiadores, etc.
IFTEC GEOENERGÍA S.L.	Madrid	www.iftec.es	Ingeniería y consultoría especializada en sistemas de intercambio de energía térmica con el subsuelo (sistemas geotérmicos)
IMMOSOLAR	Madrid, Barcelona, Málaga y País Vasco	www.immosolar.com	Fabricante de equipos geotérmicos y accesorios.
INGELCO INGENIERÍA	Madrid	www.ingelco.es	Equipos, Ingeniería, Instalador
INGENIERÍA NATURAL S.L.	Ezcaray - La Rioja	www.ingenierianatural.es	Ingeniería e instalación

INGENIERÍA SOLAR DE CASTILLA Y LEÓN S.L.	Los Ángeles de San Rafael - Segovia	www.ibergeotermia.es	Equipos, Ingeniería, Instalaciones, Distribución bombas de calor, Formación, Software Geotermia
INGENIERÍA Y PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE S.L.	Madrid	www.ipma.es	Ingeniería. Proyectos geotérmicos llave en mano.
INGEOMIN, S.L.	Palma de Mallorca	---	Ingeniería
INGEOSOLUM	Colonia Fin de Semana- Madrid	www.ingeosolum.es	Elaboración de proyectos geotérmicos. Diseño y construcción de Cimentaciones Activas. Caracterización Térmica del Terreno. Ejecución de Ensayos de Respuesta Térmica ERT.
INGETYMSA, S.L.U.	Cartagena - Murcia	www.ingetymsa.eu	Ingeniería
INSERSA INGENIERÍA DE SUELOS Y EXPLOTACIÓN DE RECURSOS S.A.	Sevilla	www.insersa.es	Sondeos de investigación minera, Sondeos geotécnicos, Sondeos geotérmicos, Sondeos hidrogeológicos, Micropilotes. Inyecciones. Recalces. Anclajes. Pernos. Jet grouting. Drenajes. Refuerzos. Pozos de agua a gran diámetro y profundidad.
IN SITU TESTING, S.L.	S. S. Reyes - Madrid	www.insitutest.com	Estudios geotécnicos, perforación de sondeos, estudios geofísicos, hidrogeología, instrumentación y ensayos "in situ".
INSTALACIONES ALEGRE	Burgos	www.instalacionesalegre.com	Instalación de geotermia
JOSÉ MANUEL BALBOA S.L.	Salamanca	www.sondeosbalboa.com	Sondeos
LABORATORIO GEOCONTROL S.L.	Colmenar Viejo - Madrid	www.laboratoriogeocontrol.com	Estudios geotécnicos, proyectos geotérmicos y legalización de pozos. Instalaciones geotérmicas llave en mano (mantenimiento y reparación), sondeos para la geotermia, sondeos para agua, micropilotes, inyecciones y laboratorio de ensayos de materiales para el control de calidad en la construcción
LENNOX REFAC, S.A.	Madrid	www.lennox europe.com	Climatización
M&M CONSULTORÍA MEDIOAMBIENTAL	Ceuta	www.mymteconoambiental.com	Empresa de geología y medio ambiente con experiencia en instalaciones de geotermia , estudio de terreno, TRT, perforaciones, Evaluación de impacto ambiental y estudios hidrogeológicos para circuitos abiertos.
MAESTRAT GLOBAL, S.L.	Castellón de la Plana	www.mglobal.es	Est. geotécnicos, sondeos, control de calidad, insp. est. metélica, acústica, micropilotaje, anclajes
MECANIZACIÓN Y MINERÍA, S.A.	Algete - Madrid	www.mymineria.com www.mymasa.eu	Sondeos, Equipos, Ingeniería, Instalador, etc

Estado del arte de sistemas de bombas de calor acopladas al terreno

MISOLTER S.L.	Illueca - Zaragoza	---	Ingeniería, Instalador, Mantenimiento Climatización total. Suelo radiante calor y frío.
MODELCO S.L. / MODELCO GROUP S.L.	Madrid	www.modelco.eu	Fabricantes de maquinaria para perforaciones geotermicas.
OCÉ-ESPAÑA S.A.	Alcobendas - Madrid	www.oce.es	Sistemas de gestión documental
ORTIZ CONSTRUCCIONES Y PROYECTOS	Madrid	www.gruportiz.com	Ingeniería, Instalador, Construcción
PERFORACIONES PRINCIPE,S.L. POZOS MALLORCA,S.L.	Sa Pobla - Islas Balears	www.grupobarraca- perforaciones.com	Sondeos, drenajes, micropilotes, geotermia.
PERFOJIMSA S.L.	Torre del Mar - Málaga	---	Sondeos y perforaciones, instalacion geotermica , proyectos llave en mano.
PERVOSA, PERFORACIONES Y VOLADURAS S.A.	Manresa - Barcelona	www.pervosa.com	Perforaciones para instalaciones geotérmicas de baja entalpía.
PILOTES Y RECALCES DEL SUR S.L., PILOSUR	Úbeda - Jaén	www.pilosur.com	Sondeos
PLAST – FOAM, S.L., P & F ENERGY	Villanueva de Gallego - Zaragoza	www.plastfoam.es	Ingeniería. Perforación. Sondas. Bombas de calor. Geotermia. Instalaciones completas.
POZOS Y SONDEOS DEL CANTÁBRICO, S.L.	Baracaldo - Vizcaya	www.sondeosdelcantabrico.com	Perforaciones para pozos de agua de uso doméstico e industrial, micropilotes y perforaciones para geotermia
PROYENER PYRYNEO, S.L.	Valcarca - Huesca	www.proyener.com	Sondeos, Equipos, Ingeniería, Instalador.
REALITEC – REALIZACIONES TÉCNICAS	Madrid	---	Ingeniería, Proyectos de sondeos
REMICA, S.A.	Madrid	www.remica.es	Instalador
ROBERT BOSCH ESPAÑA S.A. (Buderus)	Madrid	www.buderus.es	Desarrollo, fabricación y distribución de sistemas integrales de calefacción y agua caliente sanitaria: calderas de baja temperatura y condensación, sistemas solares térmicos y soluciones para geotermia y biomasa.
SERVICAL SL	Boecillo - Valladolid	---	Bombas de Calor, Sondas, Distribuidor Sistemas Sofath

Estado del arte de sistemas de bombas de calor acopladas al terreno

SIALTEC	Les Preses - Girona	www.sialtec.cat	Test de respuesta térmica (TRT) Diseño y cálculo sondas geotérmicas
SLECE	Astigarraga - Guipúzcoa	www.slece.com	Sondeos
SOFATH THERMATIS TECHNOLOGIES	Portes les Valences - FRANCIA	www.sofath.com	FABRICANTE Equipos geotermia baja entalpía.
SOFITA VIRTUS, S.A.	Gijón - Asturias	www.sofitavirtus.com	Ingeniería, Instalador eficiencia energética. Certificación Energética. Auditoria Energética.
SOLIGAS, S.L.	Las Rozas - Madrid	www.soliclima.com	Geotermia, E. Solar Térmica, E. Solar Fotovoltaica, Biomasa, Climatización de Piscinas, Eficiencia Energética: Sondeos, Equipos, Ingeniería, Instaladores
SOLUCIONES TÉCNICAS EN PERFORACIÓN, S.L.	Ciempozuelos - Madrid	www.solutecsl.com	
SOLUGEO, PROYECTOS Y CONSTRUCCIÓN DE INSTALACIONES GEOTÉRMICAS S.L.	Pamplona - Navarra	www.solugeo.es	Proyectos e instalaciones geotérmicas
SOLVER AGRO-INDUSTRIAL S.L.	Cuéllar - Segovia	www.solving.com	Equipos, Ingeniería, Instalador
SONDEOS MARTÍNEZ, S.L.	Villena - Alicante	www.sondeosmartinez.com	Sondeos, Equipos, Ingeniería, Instalador.
SONDEOS ORLA, S.L.	Tomelloso - Ciudad Real	www.sondeosorla.es	Sondeos
SONDEOS OSCOS S.L.	Santa Eulalia de Oscos - Asturias	www.sondeososcoss.com	Sondeos, Equipos, Ingeniería, Instalador.
SONDEOS SIERRA DE MADRID-POZOS Y SONDEOS CASTILLA LA MANCHA	Collado Villalba - Madrid	www.sondeossierrademadrid.es	Sondeos, perforaciones para agua, para energía geotérmica
SONDEOS TORRENTE	Quintanar de la Orden - Toledo	www.sondeos torrente.com	Sondeos, Equipos, Ingeniería, Instalador.
STRUZZI	Ávila	www.struzzi.net	Equipos de geotermia, aplicaciones, estudios de viabilidad, suelo radiante
SUMINISTROS SOLUTEC S.L.	Ontígola - Toledo	www.solutec.es	Sondeos, Equipos Perforación, Tubería y Varillaje perforación, Equipos Inyección, Sondas.

Estado del arte de sistemas de bombas de calor acopladas al terreno

SUTEVAR, S.L.	San Fernando de Henares - Madrid	www.sutevar.com	Empresa dedicada al suministro, alquiler y reparación de maquinaria y accesorios de perforación.
TECAPIMA 2010, S.L.	Madrid	www.tecapima.com	Instaladora y mantenedora de energías renovables: geotérmica, solar térmica, biomasa y sistemas tradicionales
TECOP S.A.	Cerceda - Madrid	www.tecopsa.com	Venta, alquiler, reparación de equipos de perforación para la instalación de sondas geotérmicas. Equipos TRT. Sondas."
TERMOTERRA	Madrid	www.termoterra.es	Sondeos, Ingeniería, Instalador de Proyectos "llave en mano"
TUBKAL INGENIERÍA, S.L.	Zaragoza	www.tubkal.com	Sondeos e Ingeniería
UGARRIZA	Berango - Vizcaya	www.ugarriza.com	Geotermia Alta Entalpía
UPONOR HISPANIA, S.A.	Alcorcón -Madrid	www.uponor.es	Fabricante de soluciones de Climatización Invisible
VAILLANT,S.L.U.	Alcobendas - Madrid	www.valdaguas.es	Solar térmica, fabricante de captadores, fabricante bombas de calor geotérmicas, fabricante calderas a gas, fabricantes calderas biomasa, apoyo técnico gratuito a promotores, constructoras, instaladores, ingenieros y arquitectos.
VALDAGUAS SONDEOS	Valverde del Fresno - Cáceres	www.valdaguas.es	Sondeos y equipos
VISSMANN, S.L.	Pinto - Madrid	www.viessmann.es	Fabricante
VERANO INSTALACIONES	Madrid	www.veranoinstalaciones.com/	Empresa instaladora de energía Geotermia, Aerotermia, Solar. Servicio de asistencia técnica Hautech.
VISIONA BD	Cordovilla - Navarra	www.grupovisiona.com	Diseño, cálculo, pruebas térmicas, ejecución de instalaciones eficientes con la Geotermia como fuente de Energía. Realizando proyectos llave en mano.
XEOAQUIS S.L. - GEOTERMIA E HIDROGEOLOGÍA	San Ciprian de Viñas - Orense	www.xeoquis.com	Estudios Hidrotermales: prospección, captación, legalización. Diseño y ejecución de sistemas de aprovechamiento geotérmico directos e indirectos (bombas de calor). Test de Respuesta Térmica.
ZETA ALMATEA	Zaragoza	www.amalteia.com	Ingeniería y consultoría geológica y ambiental

Tabla 26: Empresas en el ámbito de la geotermia en España.

Fuente: fenercom.

10.1. Dolmen Ingeniería, Geoscan y Soluciones Geotérmicas.

Dolmen Ingeniería (Zaragoza) es una empresa independiente de ingeniería y asesoramiento técnico que desarrolla su actividad fundamentalmente en los sectores de la edificación industrial y las instalaciones. Está formada por un equipo multidisciplinar de ingenieros industriales con una extensa experiencia en el desarrollo y gestión de proyectos de diversa índole dentro del sector industrial. La empresa ha fomentado siempre el desarrollo de una visión energética de todos sus proyectos. Desde la fase de proyección hasta la gestión posterior de obras e instalaciones se tienen en cuenta los costes energéticos involucrados y la forma de optimizarlos mediante mejoras en el diseño, equipos más eficientes o un uso más racional de los mismos. Para ello han adquirido un profundo conocimiento del sector energético actual y del emergente desarrollo de las energías renovables y, en particular, de la energía geotérmica.



Figura 39: Logo Dolmen Ingeniería.
Fuente: dolmeningenieria.com

Geoscan Consultoría (Zaragoza) se crea en 2002 por un grupo de profesionales del sector de la mecánica de suelos y del medio ambiente, que venían trabajando en distintas empresas del sector. La empresa está dedicada a la consultoría en materia de la geología aplicada y el medio ambiente, proponiendo soluciones técnicas a la interacción entre el medio natural y el constante desarrollo de la sociedad actual, en cualquiera de sus ámbitos. Desde 2.006, viene colaborando con Dolmen Ingeniería en distintos ámbitos de trabajo, y desarrollando una labor conjunta en temas de I+D+i.



Figura 40: Logo Geoscan.
Fuente: geoscan.es

Soluciones Geotérmicas nace de la unión de Dolmen Ingeniería y Geoscan Consultoría, ofreciendo los siguientes servicios:

- Estudios preliminares de aprovechamiento de energía geotérmica: Estudio energético previo evaluando la inversión, amortización y viabilidad de la instalación.
- Proyectos de climatización/calefacción mediante energía geotérmica: Diseño óptimo de captación de sondas geotérmicas, elección de la ubicación idónea de los sondeos así como su profundidad y características, diseño de bombas de calor necesarias y equipamiento auxiliar para conexión a instalación de calefacción/climatización.
- Test de Respuesta Térmica (TRT): Ensayos realizados in-situ para grandes instalaciones que permiten comprobar el rendimiento del sistema de aprovechamiento de energía.
- Gestión del sistema de energía geotérmica: Gestionan la contratación de la ejecución de la instalación completa: la ejecución de los sondeos, la bomba de calor y equipamiento exterior e incluso la instalación de calefacción/climatización interior del edificio.
- Dirección de obra: Todos los proyectos incluyen la dirección facultativa que garantiza que las obras e instalaciones se ejecutan con respecto a las directrices del proyecto asegurando un adecuado funcionamiento del sistema.



Figura 41: Logo Soluciones Geotérmicas.
Fuente: solucionesgeotermicas.es.

Soluciones geotérmicas lleva a cabo tareas de investigación y desarrollo (I+D+I) de modelos matemáticos para el diseño de sistemas geotérmicos eficientes. Los modelos matemáticos integran los distintos fenómenos físicos de relevancia tales como la transferencia de calor y el flujo subterráneo y en tubería. El objetivo es diseñar sistemas geotérmicos eficientes y específicamente adaptados a las necesidades de cada caso en particular, en función del emplazamiento geológico y de las necesidades específicas de cada edificio. Realizan modelados de fenómenos de transporte en el terreno mediante

herramientas numéricas (método de los elementos finitos y método de las diferencias finitas), utilizando el programa Comsol multiphysics. Las ventajas del modelado frente a método de cálculo simplificados son las siguientes:

- Comportamiento a largo plazo.
- Interacción entre sondas.
- Influencia de la conducción-convección.
- Interacción con la bomba de calor, sabiendo las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador del GHE.

Todo ello con el fin de obtener un dimensionamiento óptimo de la instalación, analizando la máxima capacidad de aprovechamiento del sistema sin producir su agotamiento a largo plazo.

11. Software.

Dentro del software empleado en el sector de la climatización por geotermia, distinguimos dos tipos: el primer tipo son programas dedicados a calcular las cargas térmicas necesarias para el espacio a climatizar y simular instalaciones geotérmicas; el segundo tipo son programas que se centran en el cálculo de los intercambiadores de calor enterrados.

Dentro del primer tipo existen numerosos programas, aunque los más empleados son eQuest, Energy 10, DOE2, VISUALDOE, ECOTECT, EnergyPlus, TRNSYS, COMSOL multiphysics, etc. Algunos de estos programas también permiten llevar a cabo el diseño de la instalación geotérmica.

Dentro del segundo tipo nos encontramos los programas Earth Energy Designer (EED), GEO² y Ground Loop Design (GLD). A continuación se va a proceder a realizar una descripción de cada uno de estos programas, ya que se ha podido conseguir una versión demo para el caso de EED y GLD, y la versión del programa completo de GEO². Dentro de este tipo, cabe destacar otro programa llamado GLHEPRO, cuyo uso está bastante extendido, pero no ha sido posible obtener una demo. No obstante, también se realiza una breve descripción del mismo.

11.1. GLHEPRO.

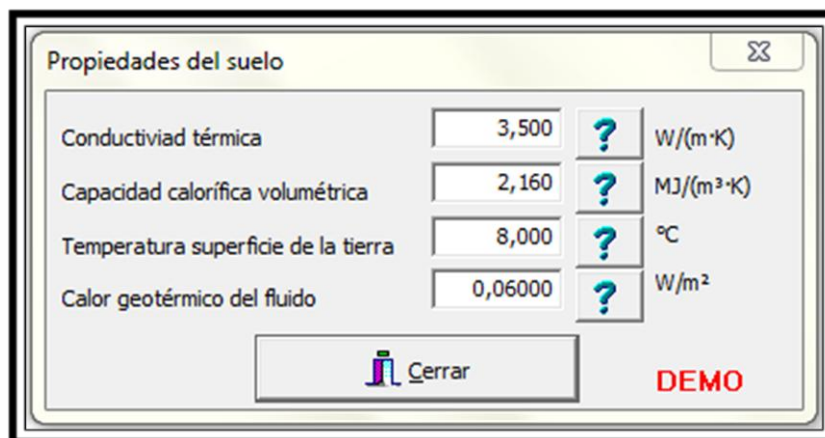
Es un programa diseñado para dimensionar intercambiadores enterrados verticales (*hvac.okstate*). Se puede utilizar tanto para instalaciones residenciales como para comercios o espacios más grandes. Determina la profundidad de los pozos, y además también trata con sistemas híbridos, calculando además del intercambiador la energía suplementaria que debe aportar el otro sistema (torre de refrigeración, colector solar, etc.). Los datos a introducir por el usuario son las cargas térmicas necesarias, las propiedades del terreno, la configuración del intercambiador enterrado y datos sobre la bomba de calor seleccionada (para estos últimos 3 casos, GLHEPRO dispone de una base de datos).

11.2. Earth Energy Designer (EED).

Se trata de un software para el diseño de intercambiadores de calor enterrados verticales. Es apto tanto para instalaciones pequeñas como para instalaciones a gran escala, llegando a diseñar instalaciones que cuentan hasta con 1200 pozos. También calcula la resistencia térmica del pozo a partir de los datos necesarios: geometría de la perforación y de las tuberías, material de las tuberías, etc. Contiene una base de datos con 798 configuraciones de modelos para la perforación del terreno. EED está basado en un modelo de resolución numérica del flujo de calor en combinación con las llamadas funciones-g, que dependen de la geometría del pozo (*buildingphysics*).

Datos de entrada:

1. Propiedades térmicas del suelo: conductividad térmica, capacidad calorífica volumétrica, temperatura de la tierra y el flujo geotérmico que se puede sacar el terreno por unidad de superficie.



Propiedad	Valor	Unidad
Conductividad térmica	3,500	W/(m·K)
Capacidad calorífica volumétrica	2,160	MJ/(m³·K)
Temperatura superficie de la tierra	8,000	°C
Calor geotérmico del fluido	0,06000	W/m²

Botones: Cerrar, DEMO

Figura 42: Propiedades térmicas del terreno a introducir, EED.

Fuente: Elaboración propia.

EED cuenta con una extensa base de datos, de modo que de cara a realizar un pre-estudio para el dimensionado de una instalación sería válido escoger dichos datos, pero para realizar el dimensionado definitivo será necesario contar con los resultados de un test de respuesta térmica e introducirlos manualmente en las casillas expuestas en la figura 42. En la siguientes figuras se muestran algunos de los datos que EED tiene en su base de datos para rellenar la tabla de propiedades del suelo.

Conductividad térmica	Temperatura superficie de la tierra																																				
<p>Valores de conversión</p> <p><input checked="" type="radio"/> No <input type="radio"/> SI => ENG <input type="radio"/> ENG => SI</p> <p>Clay, dry</p> <p>recommended 0.4</p> <p>minimum 0.40</p> <p>maximum 0.90</p> <p>Clay, moist - wet</p> <p>recommended 1.6</p> <p>minimum 0.90</p> <p>maximum 2.22</p> <p>Claystone</p> <p>recommended 2.2</p> <p>minimum 1.05</p> <p>maximum 3.02</p> <p>Coal</p> <p>recommended 0.3</p> <p>minimum 0.26</p> <p>maximum 0.63</p> <p>Concrete</p> <p>recommended 1.6</p> <p>minimum 0.92</p> <p>maximum 2.02</p>	<p>Valores de conversión</p> <p><input checked="" type="radio"/> No <input type="radio"/> SI => ENG <input type="radio"/> ENG => SI</p> <p>SPAIN</p> <table> <tr><td>Alicante</td><td>17.9</td></tr> <tr><td>Almeria</td><td>18.5</td></tr> <tr><td>Barcelona</td><td>15.3</td></tr> <tr><td>Bilbao</td><td>14.0</td></tr> <tr><td>Cordoba</td><td>17.5</td></tr> <tr><td>La Coruna</td><td>14.1</td></tr> <tr><td>Madrid</td><td>13.9</td></tr> <tr><td>Malaga</td><td>18.0</td></tr> <tr><td>Mallorca</td><td>15.8</td></tr> <tr><td>Murcia</td><td>18.0</td></tr> <tr><td>Santander</td><td>14.2</td></tr> <tr><td>Valladolid</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>Zaragoza</td><td>14.6</td></tr> </table> <p>SWEDEN</p> <table> <tr><td>Falun</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>Göteborg</td><td>7.1</td></tr> <tr><td>Jönköping</td><td>5.3</td></tr> <tr><td>Kiruna</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>Luleå</td><td>3.6</td></tr> </table>	Alicante	17.9	Almeria	18.5	Barcelona	15.3	Bilbao	14.0	Cordoba	17.5	La Coruna	14.1	Madrid	13.9	Malaga	18.0	Mallorca	15.8	Murcia	18.0	Santander	14.2	Valladolid	12.0	Zaragoza	14.6	Falun	5.5	Göteborg	7.1	Jönköping	5.3	Kiruna	2.0	Luleå	3.6
Alicante	17.9																																				
Almeria	18.5																																				
Barcelona	15.3																																				
Bilbao	14.0																																				
Cordoba	17.5																																				
La Coruna	14.1																																				
Madrid	13.9																																				
Malaga	18.0																																				
Mallorca	15.8																																				
Murcia	18.0																																				
Santander	14.2																																				
Valladolid	12.0																																				
Zaragoza	14.6																																				
Falun	5.5																																				
Göteborg	7.1																																				
Jönköping	5.3																																				
Kiruna	2.0																																				
Luleå	3.6																																				

Figura 43: Base de datos EED, entrada propiedades del suelo.
Fuente: Elaboración propia.

2. Datos sobre el pozo y el intercambiador de calor. En esta nueva ventana se introduce el tipo de intercambiador, se puede elegir entre coaxial, simple U, doble U y triple U (en la figura 45 se observa la configuración triple U). Como se ha comentado anteriormente, EED dispone de 798 configuraciones de disposiciones de los pozos a elegir, entre los que se encuentran configuraciones lineales, en forma de L, en forma de doble L (figura 44), configuración en U, en rectángulo abierto y en rectángulo cerrado.

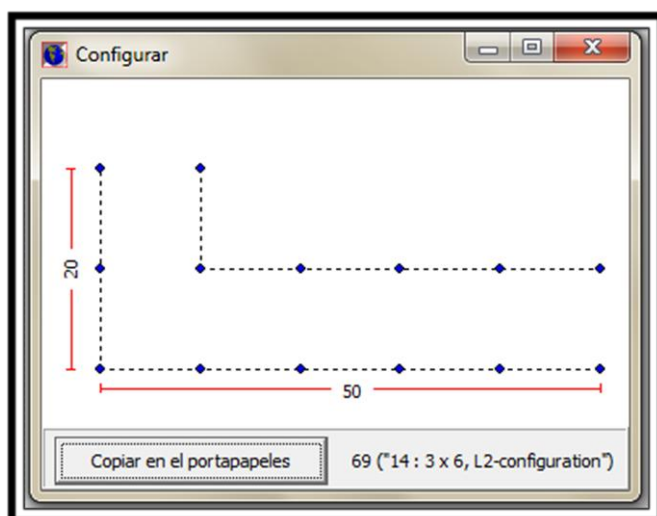


Figura 44: Ejemplo de configuración en doble L, EED.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 45: Datos a introducir del pozo e intercambiador de calor, EED.
Fuente: Elaboración propia.

Aunque EED puede hallar la profundidad de los pozos, se puede introducir manualmente para que luego calcule con esa profundidad introducida la temperatura media del fluido anualmente. En cuanto al diámetro, también cuenta con una base de datos, aunque se puede introducir manualmente. Otra opción que ofrece para afinar más el resultado es añadir la resistencia térmica de contacto que existe entre la tubería y el material de relleno. En la figura 46 se muestran diversos materiales de rellenos a elegir.

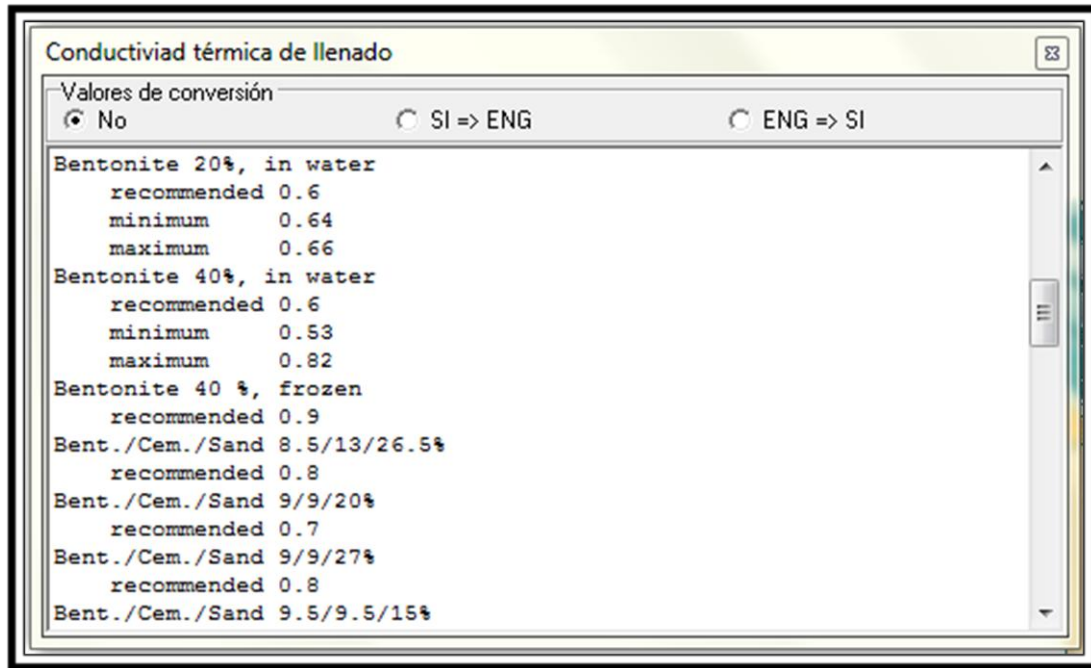


Figura 46: Material de relleno a introducir, EED.
Fuente: elaboración propia.

Tras introducir el valor del caudal que va a circular por el intercambiador de calor, se pasa a definir el tubo. Nuevamente se pueden introducir los datos manualmente, o elegir de la base de datos del programa para definir el diámetro exterior, el grosor de la pared y la conductividad térmica. Se debe introducir a mano obligatoriamente la distancia entre los tubos dentro del pozo (cuánto más distancia mejor será la transferencia de calor con el terreno y menos interferencia habrá entre los propios tubos).

3. Resistencia térmica del pozo. EED puede calcular los valores de resistencia térmica entre fluido/tierra y la resistencia interna del pozo, o bien se introduce manualmente los valores que se deseen fijando la opción de valores constantes.

4. Fluido caloportador. Desde la base de datos se puede elegir el fluido e introducir su conductividad térmica, capacidad calorífica específica, densidad, viscosidad y punto de congelación.

5. Carga base. El programa permite dos métodos de introducción de este dato. Por un lado la energía anual y perfil mensual, que requiere la carga tanto de frío como de calor anual, y un perfil porcentual de cómo se reparte esa carga en cada mes del año. Por otro lado se puede introducir las cargas mensuales que requiere directamente. Además de las cargas y el perfil según el caso, habrá que introducir el rendimiento medio (EER o COP

medio) para la bomba de calor. El programa también realiza cálculos para la generación de agua caliente sanitaria.

Carga base

Carga base (sinACD):

☒ Energía anual y perfil mensual

☐ Valores de energía mensual

[MWh]	Calor	Frio	Tierra
Anual	16.200	0.000	Actualizar
SPF	3.00	3.00	
	<input type="checkbox"/> Directo	<input type="checkbox"/> Directo	
Enero	0.155	0.000	1.952
Febrero	0.148	0.000	1.876
Marzo	0.125	0.000	1.628
Abril	0.099	0.000	1.347
Mayo	0.064	0.000	0.969
Junio	0.000	0.000	0.278
Julio	0.000	0.000	0.278
Agosto	0.000	0.000	0.278
Septiembre	0.061	0.000	0.937
Octubre	0.087	0.000	1.217
Noviembre	0.117	0.000	1.541
Diciembre	0.144	0.000	1.833
suma:	1	0	14.133

Agua caliente doméstica (ACD):

Anual: 5.000 SPF: 3.00

[MWh]	Calor de la bomba	Tierra	Edificio
Calor	$16.2 \times 1/3$ (5.4)	$+ 16.2 \times 2/3$ (10.8)	$= 16.2$
ACD	$5 \times 1/3$ (1.6667)	$+ 5 \times 2/3$ (3.3333)	$= 5$
Frio	$0 \times 1/3$ (0)	$+ 0 \times 4/3$ (0)	$= 0$
Calor	Calor de la bomba	Edificio	
	7.0667	$\Rightarrow \wedge \Rightarrow$	21.2
		Tierra	14.133
Frio	Calor de la bomba	Edificio	
	0	$\Rightarrow \vee \Rightarrow$	0
		Tierra	0
Calor extraído de la tierra: $10.8 + 3.3333 - 0 = 14.133$			

Grafico Cerrar

Figura 47: Carga base a introducir, EED.
Fuente: Elaboración propia.

6. Carga pico. Para cada mes, se insertará la carga máxima de calor y el tiempo durante el cual la bomba puede dar esa potencia. De la misma forma se actuará con las cargas de refrigeración (figura 48).



	Pico de calor		Pico de frio	
	Potencia [kW]	Duración [h]	Potencia [kW]	Duración [h]
Enero	31.550	8.000	0.000	0.000
Febrero	31.550	8.000	4.430	4.000
Marzo	14.250	8.000	8.990	4.000
Abril	7.890	8.000	11.960	6.000
Mayo	0.000	0.000	16.890	6.000
Junio	0.000	0.000	29.200	8.000
Julio	0.000	0.000	34.860	8.000
Agosto	0.000	0.000	34.860	8.000
Septiembre	0.000	0.000	28.370	6.000
Octubre	4.320	8.000	21.870	4.000
Noviembre	15.710	8.000	14.200	4.000
Diciembre	30.300	8.000	2.890	2.000

Figura 48: Cargas pico a introducir, EED.
Fuente: elaboración propia.

7. Período de simulación. Se debe elegir un horizonte temporal para observar cómo se va a comportar la instalación a largo plazo. Se determinará el mes en el que comienza la simulación y cuántos años va a durar (figura 49).

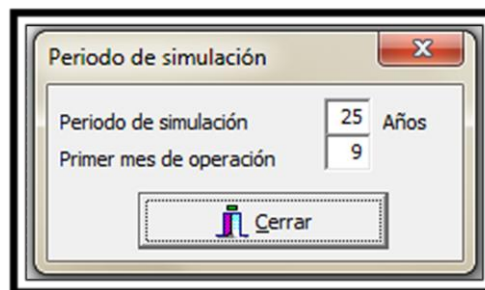


Figura 49: Período de simulación a introducir, EED.
Fuente: elaboración propia.

8. Datos de costes. Finalmente, si se desea, se introducen datos de costes para que el programa calcule el precio final.

Figura 50: Datos de costes a introducir, EED.
Fuente: Elaboración propia.

Datos de salida:

Existen dos opciones:

1. Se conoce la instalación (profundidad, diámetro del intercambiador de calor, etc.) y se quiere conocer la evolución de la temperatura media del fluido caloportador a lo largo del tiempo. EED proporcionará dos gráficas, una de todo el período de simulación que se ha seleccionado anteriormente, y otra solamente del último año. Además presenta un informe con los valores numéricos de las temperaturas.

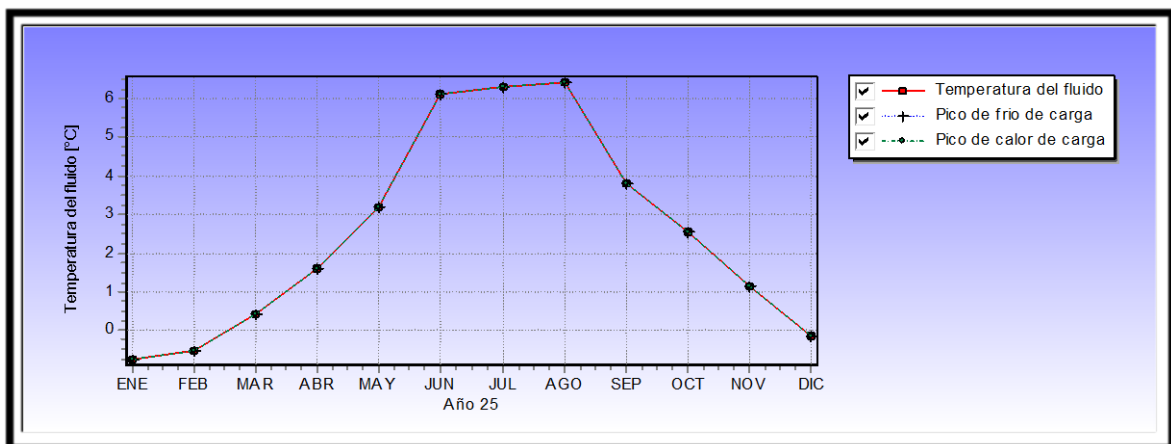


Figura 51: Resultados EED evolución temperaturas del último año de simulación.
Fuente: Elaboración propia.

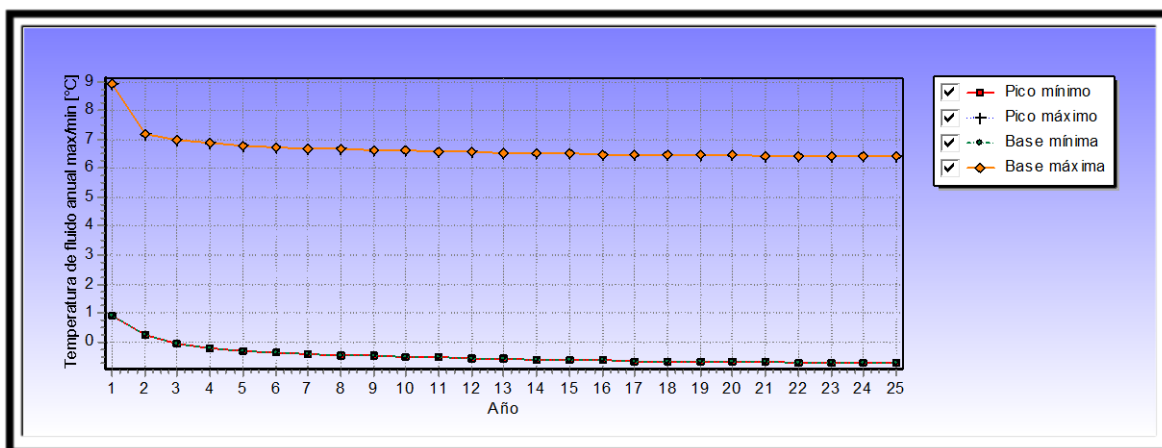


Figura 52: Resultados EED temperatura máxima/mínima del fluido caloportador anualmente.

Fuente: Elaboración propia.

2. Se impone en el programa los límites máximo y mínimo entre los que debe oscilar la temperatura del fluido caloportador, para que EED calcule la profundidad del intercambiador de calor. Junto con el informe en el que se muestra el resultado de la profundidad, se adjuntan también las gráficas de la evolución de la temperatura de fluido caloportador.

EED dispone de una opción en la cual analiza todas las configuraciones de pozos de la base de datos y ofrece una tabla que muestra las mejores configuraciones para la instalación a dimensionar.

11.3. GEO².

Este programa es producto de la colaboración entre la empresa compañía industrial de aplicaciones térmicas S.A. y el instituto de ingeniería térmica de la universidad politécnica de Valencia. Es un programa de dimensionado de intercambiadores de calor enterrados acoplados a bombas de calor CIAT. La salida principal del programa es la longitud necesaria de intercambio en función de la temperatura de salida de la bomba de calor, así como una serie de datos adicionales que pueden ayudar al diseñador a escoger la mejor opción (*Manual de usuario GEO2 v1.0*).

Datos a introducir:

1. Localidad. GEO² dispone de datos climatológicos de todas las ciudades de España. En caso de que la instalación no estuviera en una ciudad, también se puede elegir la zona climática (C1, C2...).

2. Terreno. Se puede escoger entre los terrenos registrados en la base de datos (incluido el agua como terreno), o, si se conocen, introducir los datos manualmente de conductividad térmica y capacidad calorífica. Existe la posibilidad de poner el terreno como una serie de sustratos, debiendo introducir la conductividad térmica, capacidad calorífica y profundidad de cada uno.

3. Edificio y cargas térmicas. El programa va a pedir la máxima carga térmica para calefacción y para refrigeración. Podremos elegir entre el tipo de edificio (centro comercial, oficinas, colegios, viviendas...) o definir el factor de uso de la bomba de calor tanto para invierno como para verano.

4. Bomba de calor. De acuerdo con los datos introducidos anteriormente, el programa selecciona la bomba de calor (de la marca CIAT), que más se ajusta a la demanda dentro de la base de datos. Se da la información de la potencia en calefacción y refrigeración, de los consumos y el COP.



	Refrigeración (1)	Calefacción (2)
Capacidad total (kW)	25,90	31,30
Consumo (kW)	5,50	5,50
Rendimiento (-)	4,70	5,70

Figura 53: Ejemplo de bomba de calor seleccionada por GEO².
Fuente: Elaboración propia.

5. Intercambiador geotérmico. Se dispone de configuraciones horizontales simples y dobles, y dentro de estas en serie o paralelo. En el caso de la configuración vertical surge un inconveniente, pues solo se pueden colocar los pozos formando una fila o rectángulos cerrados, quedando excluidas las posibilidades de colocarlos en L, L doble, U, rectángulo abierto... Dentro de este apartado, se puede seleccionar la opción de que el intercambiador sea en simple o doble U. En la figura 54 se muestran las distintas configuraciones y los parámetros a rellenar en el programa para definir cada una (D, P, N, P1...).

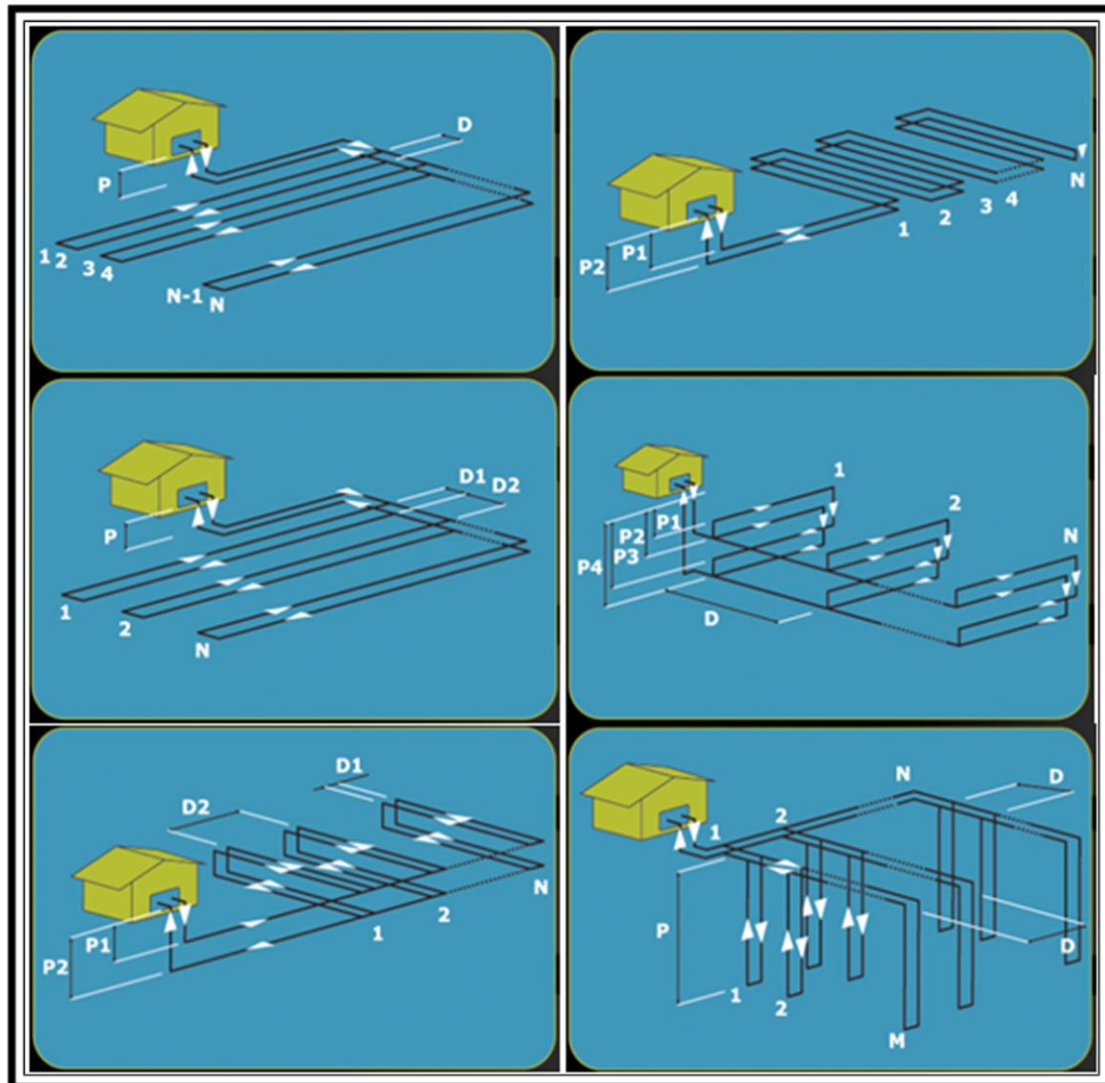


Figura 54: Configuraciones de los intercambiadores en GEO².
Fuente: Elaboración propia.

6. Tuberías y colector. GEO² distingue entre los tubos del GHE y el colector, que son los tubos entre la bomba de calor y el GHE. Los datos a introducir en este apartado son los materiales de dichos tubos y su presión nominal, en caso de querer seleccionar los materiales estándar que hay en la base de datos. Si por el contrario se prefiere definir los tubos manualmente, se debe introducir el diámetro nominal, o bien el diámetro interior y exterior. Es obligatorio poner la longitud de los tubos del colector.

7. Accesorios. Se puede calcular la pérdida de carga de todo el circuito. Existen dos posibilidades. Si se elige el cálculo detallado se deberán introducir datos como el número de codos de 90°, de 45°, número de válvulas, etc. Si solo se desea un cálculo aproximado, habrá que facilitar la longitud equivalente de cada circuito enterrado y la longitud equivalente del colector.

8. Temperaturas de aplicación. Será necesario introducir la temperatura de salida del fluido del circuito primario en calefacción (30, 35, 40, 45, 50 ó 55 °C) y en refrigeración (5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 18 ó 20 °C).

Datos de salida:

Una vez introducidos todos los datos, GEO² nos realizará unos cálculos y nos mostrará en una tabla distintas soluciones.

•Calefacción										
Nº de sondeos	Profundidad (m)	COP	Pc (kW)	Pa (kW)	T. salida (°C)	Caudal (m³/h)	Pérd. (m.c.a.)	Área (m²)	Volumen (m³)	
20	43.47	4.27	25.6	6	2	5.04	2.05	48	15.36	
20	72.19	4.72	28.8	6.1	5	5.04	2.05	48	25.51	
20	90.64	4.85	29.6	6.1	6	5.04	2.05	48	32.03	
20	121.16	5	30.5	6.1	7	5.04	2.05	48	42.82	
20	182.27	5.13	31.3	6.1	8	5.04	2.06	48	64.42	

•Refrigeración										
Nº de sondeos	Profundidad (m)	EER	Pf (kW)	Pa (kW)	T. salida (°C)	Caudal (m³/h)	Pérd. (m.c.a.)	Área (m²)	Volumen (m³)	
20	38.82	5.2	25.5	4.9	30	5.05	2.04	48	13.72	
20	26.12	4.48	24.2	5.4	35	5.05	2.04	48	9.23	
20	19.95	3.75	22.9	6.1	40	5.05	2.04	48	7.05	
20	16.18	3.16	21.5	6.8	45	5.05	2.04	48	5.72	
20	13.68	2.68	20.1	7.5	50	5.05	2.04	48	4.83	

Figura 55: Ejemplo de soluciones mostradas por GEO².

Fuente: Elaboración propia.

Para el ejemplo de la figura 55, se ha introducido una demanda térmica de 30 kW para calefacción y de 25 kW para refrigeración. Como se observa, la primera profundidad que cumple con los 30 kW de calefacción es la de 121,16 metros, mientras que en refrigeración deberíamos quedarnos con la profundidad de 38,82 metros para satisfacer la demanda térmica. De modo que para cumplir con ambos regímenes, se seleccionaría una profundidad de 121,16 metros. Como observamos en la figura 55, también tendremos calculados:

- La potencia absorbida.
- La temperatura de salida del agua de la bomba de calor al final de la estación de invierno/calefacción o verano/refrigeración.
- El caudal nominal con el que se garantizan las prestaciones de la bomba de calor.
- La pérdida de carga por fricciones (intercambiador) enterrado (longitud y accesorios), colector (longitud y accesorios) y bomba de calor).
- El área, entendiendo por esta la parte superior del suelo justo encima del intercambiador.
- El volumen, que se obtiene al multiplicar el área afectada por la profundidad máxima de los colectores en los intercambiadores horizontales, y en los verticales es el volumen excavado, lo que se calcula como el área de un pozo por la longitud total, dividido por dos, ya que en un pozo entran un tubo de subida y otro de bajada.
- Finalmente, el programa nos calculará el COP y el EER y además la contribución mínima de energía renovable en calefacción.

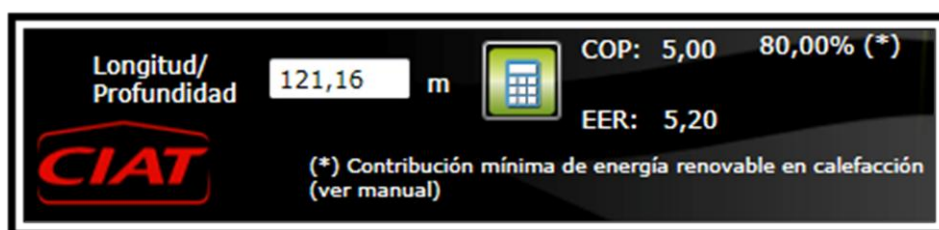


Figura 56: Resultados en GEO².
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, GEO² nos puede elaborar unos informes en Word y Excel, mostrando todos los datos introducidos y los resultados mostrados en las figuras 55 y 55.

Los propios resultados se muestran en diferentes colores a fin de expresar con la mayor claridad posible la viabilidad de la solución, así se muestra en color verde el diseño correcto, en amarillo los diseños mejorables y en rojo los diseños que no son adecuados, como se ve en la figura 57.

En el caso de estar marcado en amarillo o rojo, se muestran un cuadro inferior avisos sobre los motivos de posibles mejoras o inadecuación del diseño. Los avisos pueden ser sobre la presión (demasiado elevada, tanto en el intercambiador como en el colector), sobre la velocidad (demasiado baja o demasiado alta en los bucles del intercambiador), sobre la temperatura (demasiado alta en verano) o sobre la potencia (la bomba de calor no tiene suficiente potencia para refrigerar/calear el edificio). En el manual de usuario (*Manual de usuario GEO2 v1.0*), se definen cada uno de estos problemas, y la forma de solucionarlos.

Calefacción									
Nº de sondeos	Profundidad (m)	COP	Pc (kW)	Pa (kW)	T. salida (°C)	Caudal (m³/h)	Pérd. (m.c.a.)	Área (m²)	Volumen (m³)
12	30.4	2.85	23.9	8.4	2	5.04	10.36	150	6.45
12	49.73	3.17	26.6	8.4	5	5.04	10.17	150	10.55
12	60.67	3.21	27.3	8.5	6	5.04	10.11	150	12.86
12	77.71	3.29	28	8.5	7	5.04	10.06	150	16.48
12	107.02	3.39	28.8	8.5	8	5.04	10.01	150	22.69

Refrigeración									
Nº de sondeos	Profundidad (m)	EER	Pf (kW)	Pa (kW)	T. salida (°C)	Caudal (m³/h)	Pérd. (m.c.a.)	Área (m²)	Volumen (m³)
12	32.55	6.53	39.2	6	35	5.05	8.86	150	6.9
12	23.11	5.61	37	6.6	40	5.05	8.71	150	4.9
12	18.03	4.78	34.9	7.3	45	5.05	8.58	150	3.82
12	14.87	4.09	32.7	8	50	5.05	8.45	150	3.15
12	12.76	3.47	30.5	8.8	55	5.05	8.34	150	2.7

Figura 57: Errores en los resultados de GEO2.
Fuente: Elaboración propia.

11.4. Ground Loop Design (GLD).

GLD se ha concebido como un software de diseño para ingenieros y diseñadores profesionales de HVAC, en el área de las aplicaciones geotérmicas (*ground loop design*). Existen dos versiones, una para diseño comercial (industrial) y otra para diseño residencial. A lo largo de este epígrafe se considerará la versión industrial.

Datos de entrada

Dentro del software nos encontramos distintos bloques: diseño del intercambiador (vertical, horizontal), cargas térmicas y definición de la bomba de calor. Además de los diseños horizontal y vertical, otra posibilidad que ofrece GLD es que el GHE intercambie calor con un río, lago, estanque, océano o reservorio.

1. Diseño del intercambiador vertical. A continuación se van a describir los apartados a rellenar para el intercambiador vertical.

- Información: nombre del proyecto, proyectista, email, teléfono, fecha, datos sobre el cliente, dirección de contacto y comentarios.
- Potencia extra: potencia necesaria de las bombas de circulación, rendimiento del motor de las bombas y potencia adicional. Existe la posibilidad de introducir un sistema híbrido con una torre de refrigeración, para la cual se debe introducir la potencia requerida para bombear y para la ventilación y el rendimiento de los motores.
- Configuración: número de pozos introduciendo el número de filas, columnas y la distancia entre los pozos. También hay que elegir el número de bucles en paralelo por intercambiador, entre las opciones 1, 2 y 3 que se muestran en las figura 58.

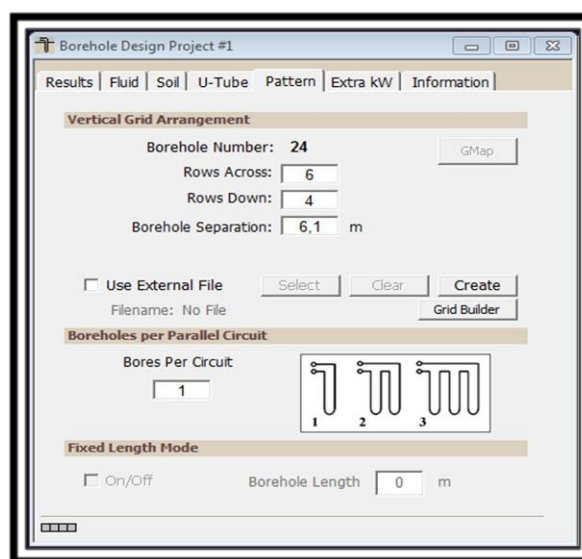


Figura 58: Configuración vertical en GLD.
Fuente: Elaboración propia.

GLD cuenta con un creador de configuraciones, que nos permite configurar la disposición de los pozos tal y como se desee mediante un sistema de coordenadas. Además facilita el trabajo si queremos crear configuraciones en U o en L.

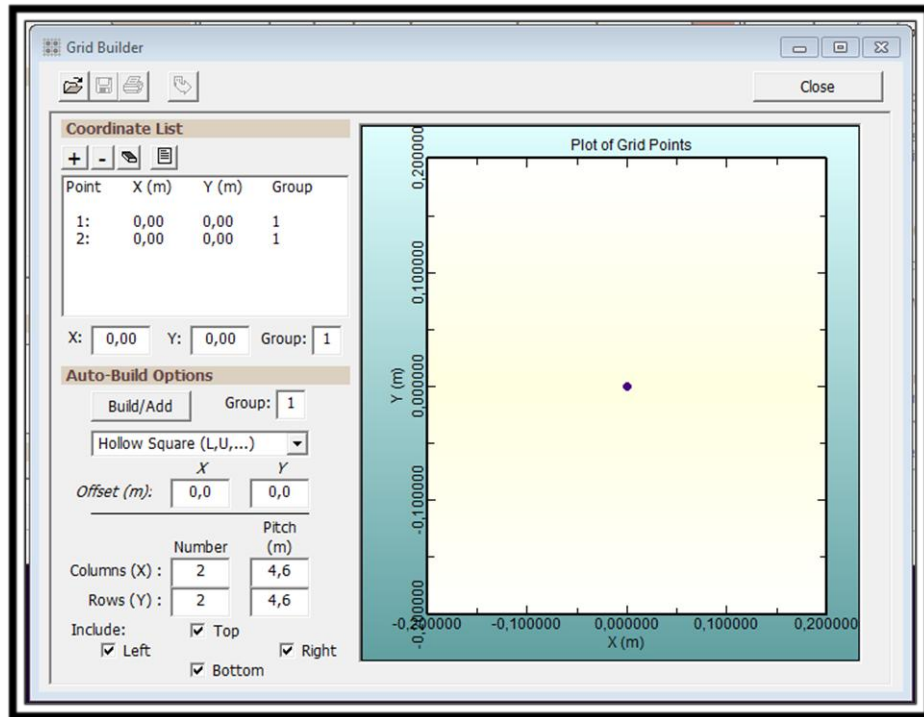


Figura 59: Creador de configuraciones en GLD.
Fuente: Elaboración propia.

- Tubo en U: resistencia térmica del pozo (obtenida del TRT), datos sobre los tubos (resistencia del tubo, diámetros interiores y exteriores, material, régimen turbulento, laminar o de transición...) que se pueden obtener en una base de datos del programa, configuración en simple o doble U, diámetro del pozo, conductividad térmica del material de relleno y distancia entre los tubos dentro del pozo (pegados entre sí, distancia media o pegados a las paredes del pozo). Figura 60.
- Terreno: temperatura inicial del terreno sin alterar (cuenta con una base de datos de temperaturas en EEUU y Canadá), conductividad y difusividad térmica. GLD cuenta con una aplicación para calcular la difusividad térmica a partir de otros valores de las propiedades térmicas del terreno (conductividad térmica, calor específico, densidad y humedad). Finalmente,

en este apartado, se encuentra la posibilidad de elegir un período de simulación.

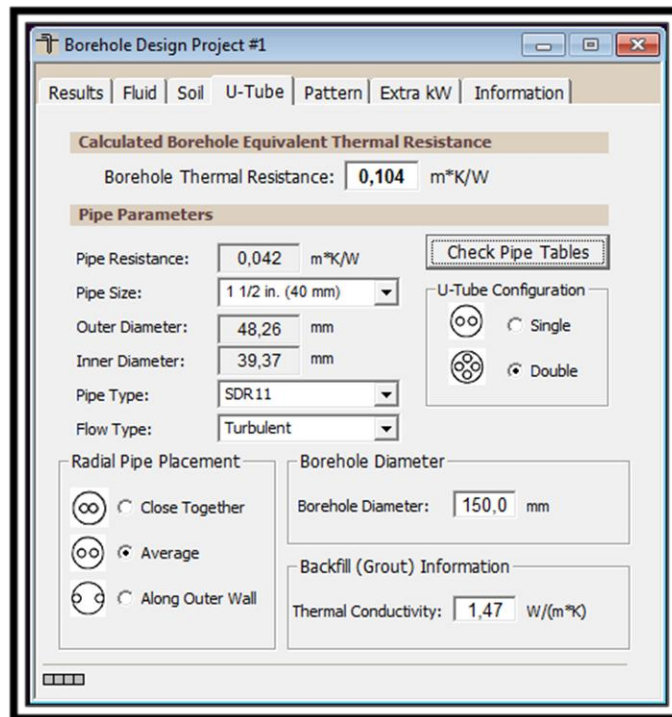


Figura 60: Tubo en U vertical en GLD.
Fuente: Elaboración propia.

- Fluido caloportador: temperaturas de entrada del fluido caloportador en la bomba de calor, caudal, y elección de fluido, para lo cual GLD dispone de una base de datos.

2. Diseño del intercambiador horizontal. Los apartados de información, potencia extra y fluido caloportador son exactamente iguales que para el caso del intercambiador vertical.

- Configuración: anchura de la zanja y longitud, de modo que se calcula el área de terreno afectada. Si hay más de una zanja deberemos ponerlo, además de la separación entre ellas, sus anchuras y profundidades. Las distintas configuraciones se pueden observar en la figura 61. Cabe destacar que se permite seleccionar configuración slinky, introduciendo los parámetros necesarios (diámetro del rizo y separación entre cada uno).

Además, para este diseño también se puede realizar un período de simulación.

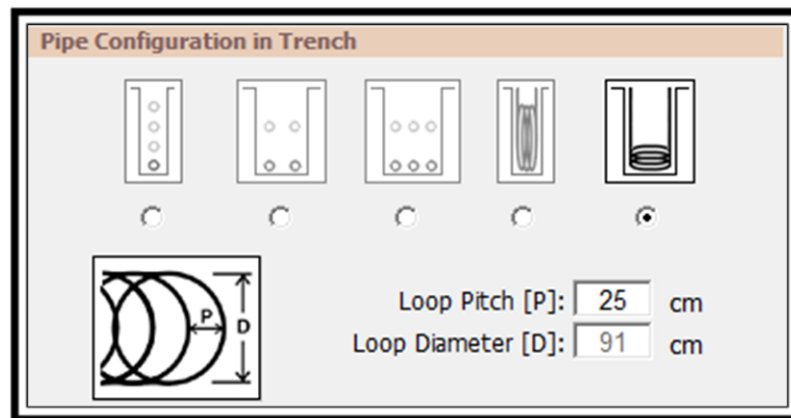


Figura 58: Configuraciones horizontales en GLD.
Fuente: Elaboración propia.

- Elección de la tubería: resistencia térmica, diámetro interior y exterior, material y régimen del flujo. Al igual que en los sistemas verticales, se dispone de una base de datos de tubos.
- Terreno: los datos a introducir son los mismos que en el caso vertical, pero aquí también será necesario introducir la temperatura exterior media de la región donde se encuentra la instalación, así como la temperatura más fría y más cálida del año.

3. Cargas térmicas.

- Cargas Zonales: Para sistemas no centralizados, a menudo es necesario dividir las cargas y diferenciar zonas que serán alimentadas por diferentes bombas de calor. Este tipo de sistemas tiene ventajas como la de suponer unas instalaciones de menor tamaño y con menores costes de mantenimiento. Para cada zona que se dimensione, se necesitarán datos relacionados con la ocupación (días por semana que se ocupa) y ganancias y pérdidas de calor en 4 periodos del día, tres en horarios laborales y uno que comprende la noche (8:00 – 12:00 ; 12:00 – 16:00 ; 16:00 – 20:00 ; 20:00 – 8:00). Con estas transferencias térmicas y ocupación, el programa podrá obtener las horas equivalentes anuales a plena carga. También se

pueden calcular a través de una herramienta que provee el programa para tal efecto. Habrá que seleccionar una bomba de calor para cada zona, bien de la base de datos del programa (esta selección podrá ser automática o manual), o bien introduciendo datos específicos del equipo (capacidad, consumo eléctrico, COP, caudal y factor de carga parcial, tanto en régimen de calefacción como de refrigeración).

- **Cargas Medias:** Para estimaciones rápidas y cálculos generales, no es necesario hacer un análisis zonal completo. En estos casos se pueden introducir parámetros aproximados de diseño, como valores medios globales de cargas térmicas.

The screenshot shows the 'Average Block Loads' window in the GLD software. The window has a title bar with standard window controls and a toolbar with icons for file operations. The main content area is divided into several sections:

- Reference Label:** A text input field.
- Design Day Loads:** A section with a '7,0 Days / Week' input, a 'Hourly Data' checkbox, and buttons for 'Transfer', 'Calculate Hours', and 'Monthly Loads'. Below this is a table for 'Design Day Loads' with columns for 'Time of Day', 'Heat Gains (kW)', and 'Heat Losses (kW)'. The table shows four time periods: '8 a.m. - Noon', 'Noon - 4 p.m.', '4 p.m. - 8 p.m.', and '8 p.m. - 8 a.m.', all with values of 0,0 for both gains and losses. At the bottom of this section is a label for 'Annual Equivalent Full-Load Hours' with a value of 0.
- Heat Pump Specifications at Design Temperature and Flow Rate:** A section with a 'Custom Pump' checkbox and a 'Pump Name' dropdown menu. Below this are buttons for 'Select', 'Details', and 'Clear'. To the right is a table for heat pump specifications with columns for 'Cooling' and 'Heating'. The table shows values for Capacity (kW), Power (kW), COP, Flow Rate (L/min), and Partial Load Factor, all with values of 0,0 or 0,00.
- Flow Rate:** A section with a 'Flow Rate' input field showing '11,4 (L/min)/3.5kW' and a 'Unit Inlet (°C):' input field showing '32,2' and '4,4'.

Figura 62: Cargas térmicas zonales en GLD.
Fuente: Elaboración propia.

4. Selección de la bomba de calor. GLD dispone de una amplia base de datos con distintas marcas de bombas de calor y modelos. Se muestran las características de cada bomba de calor: generales, de calefacción, refrigeración, etc. Figura 63.

Además de los requisitos descritos, otra de las opciones que ofrece GLD es un análisis del sistema geotérmico en cuestión, analizando su ciclo de vida en cuanto a reducción de emisiones de CO₂, ahorros energéticos, costes de la instalación, etc.

The screenshot shows the 'Edit/Add Heat Pumps' window in the GLD software. The window has a title bar with standard Windows controls. Below the title bar, there are two dropdown menus: 'Ciat' and 'ILG'. A toolbar with various icons is located below the dropdowns. On the left side, there is a list of voltage options: 120V, 150V, 200V, 240V (highlighted), and 300V. The main area of the window is divided into several tabs: 'General', 'Cooling' (selected), 'Heating', 'Load Temperatures', 'Load Flows', and 'Test'. The 'Cooling' tab displays 'Heat Pump Specifications for Cooling - SOURCE'. It contains two columns for 'FLOW RATE 1' and 'FLOW RATE 2', each with a text box for 'L/min'. Below these, there are tables for 'EWT (°C)', 'Capacity (kW)', and 'Power (kW)'. At the bottom, there are sections for 'Coefficients' (a, b, c) and 'Flow Factor' (1,00, 1,00). A 'Calculate Coefficients' button is located at the bottom center.

FLOW RATE 1		FLOW RATE 2	
250,0 L/min		0,0 L/min	
EWT (°C)	Capacity (kW)	Power (kW)	
25,0	73,6	14,40	
35,0	66,0	17,80	
45,0	57,2	22,20	

Coefficients:		Flow Factor:	
a	b	c	
87,34938	-0,40005	-0,00600	

Figura 63: Características de una bomba de calor en GLD.
Fuente: Elaboración propia.

Datos de salida.

Para sistemas verticales, los resultados que se muestran en la interfaz del programa tanto para calefacción como para refrigeración son los siguientes: longitud total de tubería, número de excavaciones, longitud de las excavaciones, variación de la temperatura del terreno, temperatura de entrada al equipo, temperatura de salida del equipo, capacidad total, carga pico, demanda pico, COP de la bomba de calor, COP del sistema completo, caudal e información sobre la torre de refrigeración en caso de existir.

Para sistemas horizontales, los resultados que se muestran en la interfaz del programa tanto para calefacción como para refrigeración son los siguientes: longitud total de zanjas, número de zanjas, longitud de una zanja, longitud total de tubería, temperatura

de entrada al equipo, temperatura de salida del equipo, capacidad total, carga pico, demanda pico, COP de la bomba de calor, COP del sistema completo, caudal e información sobre la torre de refrigeración en caso de existir.

11.5. Conclusiones.

Vista la descripción de los programas EED, GEO² y GLD, se ha procedido a crear una tabla de modo que se puedan comparar sus funcionalidades.

	EED	GEO2	GLD
Configuración horizontal	NO	SI	SI
Configuración vertical	SI	SI	SI
Intercambio con freático	NO	NO	SI
Simple-U	SI	SI	SI
Doble-U	SI	SI	SI
Triple-U	SI	NO	NO
Coaxial	SI	NO	NO
Elección de bomba de calor	NO	SI	SI
Espaciado entre tubos en el pozo	SI	NO	SI
Cálculo Energía renovable	NO	SI	NO
Período de simulación	SI (hasta 100 años)	NO	SI (-)
Perdida de carga	NO	SI	NO
Cálculo de costes	SI	NO	SI
Informe de resultados	SI	SI	NO
Localidades españolas	Algunas	No todas	NO (EEUU Y CANADÁ)
Terreno por estratos	NO	SI	SI
Cargas térmicas a introducir	Base y pico	Base	Zonal o media
Sistema híbrido	NO	NO	SI (Torre de refrigeración)

Tabla 27: Comparación de software.
Fuente: Elaboración propia.

Dependiendo de la instalación que se quiera llevar a cabo, conviene más un programa u otro, pues cada uno tiene sus ventajas y desventajas.

EED es un programa dedicado exclusivamente a pozos verticales, lo que limita bastante sus posibilidades. Aunque no tiene intercambio con el freático como tal, se puede seleccionar que el intercambio de calor del GHE sea con agua como si fuera el material del terreno. Su posibilidad de elegir tubos coaxiales es una gran ventaja, además de poder poner la distancia entre tubos dentro del pozo que exactamente queremos. Su punto fuerte es el período de simulación, mostrando todos los años la evolución de la temperatura del fluido caloportador máxima y mínima para asegurarnos del correcto funcionamiento de la instalación. Tiene una vasta base de datos de configuraciones de GHE y el programa nos propone las mejores configuraciones que cumplen con la demanda térmica. Contiene solo las ciudades más importantes de España en la base de datos, pero esto no importa si disponemos de la temperatura del terreno y calor específico del mismo de la localidad que necesitemos, ya que se puede introducir manualmente.

La gran desventaja de GEO² es que no tiene ningún período de simulación. Tiene una amplia posibilidad a la hora de definir la configuración del intercambiador si es horizontal, pero cuando es vertical solo podemos configurar el GHE como una línea o un rectángulo. Tampoco hay ningún apartado en el que se pida definir el material de relleno. Cuenta con un amplio catálogo de bombas de calor agua-agua, aunque lógicamente todas son de la marca CIAT. Sus ventajas es que tiene todas las ciudades españolas y todas las zonas climáticas según el código técnico, y según el tipo de edificio ya tiene una base de datos con los factores de utilización en régimen de calefacción y refrigeración. También es capaz de calcularnos las pérdidas de carga en el GHE y en el colector. Su punto más distintivo es que calcula el porcentaje de energía renovable que se considera renovable según la Directiva 2009/28/CE del parlamento europeo.

Respecto a GLD es un programa bastante completo, ya que cuenta con sistemas horizontales, verticales e intercambio con aguas subterráneas, considerándose éstas ríos, océanos, lagos... Además podemos implantar una torre de refrigeración a la par que el sistema geotérmico. También dispone de período de simulación, sin especificar su límite. Por otra parte, es un software americano, que no tiene ninguna ciudad española en la base de datos, ni tampoco la configuración coaxial. Aparte del cálculo de costes y ahorro energético, su punto fuerte es el configurador del GHE en el caso vertical, puesto que mediante un sistema de coordenadas nos podemos crear cualquier configuración sin ninguna restricción. De este programa cabe destacar que es bastante complejo de manejar, ya que tiene un amplio abanico de posibilidades, mientras que EED y GEO² tienen una interfaz mucho más accesible e intuitiva.

Por otro lado ninguno de los programas analizados tiene implementado un análisis de propagación de incertidumbre, como la hoja Excel de H. Witte vista anteriormente. Dicha implementación sería muy interesante, pues a partir de los datos recogidos en el test de respuesta térmica se calcularía el error absoluto de la conductividad y resistencia térmica del terreno y se podría dimensionar directamente con el valor más desfavorable.

12. Modelos matemáticos.

A la luz del capítulo anterior, se exponen los modelos matemáticos en los que se basan los programas anteriores, de modo que se pueden ver más debilidades en el software analizado anteriormente.

Para diseñar un sistema GSHP, es necesario un modelo para calcular la temperatura de retorno del fluido caloportador, que depende de la profundidad y longitud del GHE, el factor de utilización y las propiedades térmicas del terreno. El tamaño del GHE va a condicionar la temperatura de retorno, que juega un papel importante en el rendimiento de la bomba de calor. El objetivo de los modelos de simulación de los GHE es obtener esta temperatura y la distribución de temperatura del terreno circundante (**Sung Lok et al, 2010**).

12.1. Foco lineal de Kelvin.

La primera aproximación para calcular la transferencia de calor alrededor de una tubería del intercambiador de calor enterrado es la teoría del foco lineal de Kelvin. El terreno se considera como un medio infinito con una temperatura inicial uniforme, mientras que el pozo se considera como un foco lineal infinito. Las hipótesis desprecian la transferencia de calor en la dirección axial del pozo, el flujo de calor a través del terreno inmediatamente inferior a la superficie del suelo y en la zona más profunda del intercambiador donde el fluido realiza el cambio de sentido en su recorrido. El proceso de la conducción de calor en el terreno es, además, simplificado como unidimensional. De acuerdo con la teoría del foco lineal de Kelvin, la temperatura de respuesta en el terreno debido a un flujo de calor constante es dada por:

$$T(r, \tau) - t_0 = \frac{q}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4\alpha\tau}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (12.1)$$

Donde:

- T es la temperatura del terreno a una distancia r en un tiempo τ (K).
- r es la distancia desde el eje del foco lineal (m).
- τ el tiempo desde el arranque de la operación (s).

- t_0 es la temperatura inicial del terreno (K).
- q es el ratio de calor por unidad de longitud del foco lineal (W/m).
- k es la conductividad térmica (W/mK).
- α es la difusividad térmica del terreno (m^2/s).
- u es un parámetro de integración.
- r es el radio del pozo (m).

A pesar de que es una teoría caracterizada por la sencillez y un menor tiempo de cálculo, este modelo solo se puede aplicar a pequeños tubos (de poco diámetro) dentro de un rango estrecho de unas horas o meses. Se estima un error considerable de esta teoría cuando:

$$\frac{\alpha \tau}{r_b^2} < 20 \quad (12.2)$$

Esta aproximación ha sido ampliamente utilizada en algunos métodos de diseño analíticos que son utilizados actualmente para analizar la transferencia de calor de los GHEs. El desarrollo histórico de esta aproximación se muestran en la siguiente tabla.

Año	Aproximación del foco lineal
1882	Lord Kelvin. Modelo del foco lineal de Kelvin
1948	Ingersoll y Plass. Modelo del foco lineal modificado
1986	Hart y Couvillion. Modelo del foco lineal mejorado

Tabla 28: Desarrollo histórico del modelo del foco lineal.
Fuente: Sung Lok et al, 2010.

El programa GEO² se basa en la metodología de diseño IGSHPA (**Manual de usuario GEO2 v1.0**), que como se ha visto antes se apoya en la aproximación de Ingersoll y Plass. Por lo tanto, tal y como se ha comentado, se está cometiendo un error cuando $\frac{\alpha \tau}{r_b^2} < 20$, no se considera transferencia de calor en la dirección axial, se considera que el terreno tiene una temperatura inicial constante, que el GHE tiene una longitud infinita y analiza la transferencia de calor entre pozo y terreno como unidimensional, las cuales son hipótesis inciertas.

12.2. Modelo de Eskilson.

En el modelo de Eskilson (1987), el terreno se asume como homogéneo con temperatura inicial constante tanto en la superficie como a cualquier profundidad, pero teniendo en cuenta la longitud finita del pozo. La capacidad calorífica de los elementos del pozo, como las paredes de la tubería y el relleno, se desprecian. La formulación básica de la temperatura del terreno se rige por la ecuación de la conducción de calor en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\delta^2 t}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta t}{\delta r} + \frac{\delta^2 t}{\delta z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta t}{\delta \tau}$$

$$t(r, 0, \tau) = t_0$$

$$t(r, z, 0) = t_0$$

$$q_1(\tau) = \frac{1}{H} \int_D^{D+H} 2\pi r k \frac{\delta t}{\delta r} \Big|_{r=r_b} dz \quad (12.2)$$

Donde H es la longitud del pozo (en metros); D se refiere a la parte superior del pozo inactiva térmicamente (en metros), que se puede despreciar en la práctica.

En el modelo de Eskilson, se utiliza el método numérico de diferencias finitas en un sistemas de coordenadas radial-axial para obtener la distribución de temperaturas de un solo pozo con longitud finita. La expresión final de la respuesta de la temperatura en la pared del pozo debido a un pulso de calor paso es solo una función de τ / τ_s y r_b / H :

$$t_b - t_0 = -\frac{q_1}{2\pi k} g(\tau / \tau_s, r_b / H) \quad (12.3)$$

Donde $\tau_s = H^2 / 9\alpha$ es un parámetro del tiempo en estado estacionario. La función g es una respuesta de la temperatura en la pared del pozo, que se calcula numéricamente.

Otro logro importante del modelo de Eskilson es que se emplea la superposición espacial para explicar las interferencias de temperaturas de múltiples pozos. La respuesta global del GHE en la inyección/extracción de calor se puede determinar en cualquier momento por la superposición espacial y temporal.

La desventaja de esta aproximación, sin embargo, es el tiempo que consume, y difícilmente puede ser incorporado directamente en un programa de diseño y análisis

energético para aplicaciones prácticas, ya que las funciones g de los GHEs con diferentes configuraciones tienen que ser precalculadas y almacenadas en el programa como una base de datos. La función de interpolación también se necesita en el uso de la base de datos, lo que puede dar lugar a errores de computación.

Los programas EED, GLHEPRO y GLD están basados en el método de Eskilson (**H. Yang et al, 2009**) (*gld-online*). Al igual que en el modelo del foco lineal de Kelvin se está considerando una temperatura inicial del terreno, pero se considera que la longitud del pozo es finita y la transferencia de calor es bidimensional (direcciones radial y axial).

13. Algunas instalaciones en España.

En el III Congreso de Energía Geotérmica en la edificación y la industria (*geoener*), celebrado en Madrid en abril de 2012, algunos ponentes mostraron resultados técnicos, de instalaciones GCHP llevadas a cabo en España.

Gas Natural Fenosa en asociación con la empresa portuguesa Engineering y Energylab, ha realizado el proyecto GAIA-D, consistente en monitorizar 43 instalaciones en la península. Dentro de estas instalaciones hay viviendas unifamiliares, centros de salud, edificios de oficinas, edificios de viviendas, museos, escuelas y hoteles. Se encuentran tanto en clima atlántico, continental, de montaña y mediterráneo. En cuanto a las perforaciones, 42 de ellas son de pozo vertical. El rango de potencias va desde 0-25 kW (la más representativa del estudio), hasta instalaciones de más de 300 kW. **Alejandra González (2012)** expuso los siguientes resultados:

Indicadores	Sector residencial		Sector terciario	
	Calefacción	Refrigeración	Calefacción	Refrigeración
CO _{Pest} (bomba)	4		3,68	
CO _{Pest} (instalaciones)	3,55		3,35	
EER _{Rest} (bomba)		3,46		3,48
EER _{Rest} (instalaciones)		3,04		3,11

Tabla 29: Indicadores de eficiencia del proyecto GAIA-D.
Fuente: Alejandra González 2012.

Estos resultados son los valores medios medidos en las instalaciones, tanto para el sector residencial como para el terciario. Observamos que en ambos casos el COP y el EER estacionarios tanto de la bomba como de la instalación son aceptables. El COP de la instalación es menor que el de la bomba, esto se debe a que en el COP de la instalación hay que incluir la bomba hidráulica del intercambiador de calor enterrado

13.1. Plan de Energías Renovables 2011-2020.

Las perspectivas de la evolución en España en los próximos años de las energías renovables y entre ellas las instalaciones de bomba de calor geotérmica, se establecen en el **Plan de Energías Renovables**.

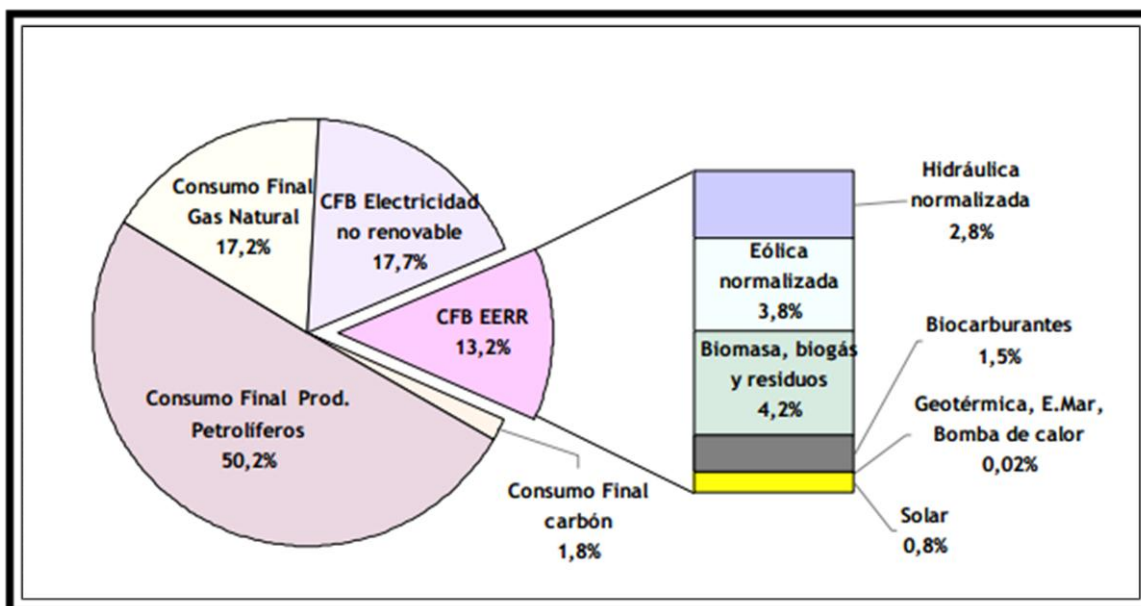


Figura 64: Consumo final bruto de energía en 2010.
Fuente: PER 2011-2020 (IDAE)

En la figura 64 se muestra que del consumo final bruto de energía en el año 2010, el 13,2 % era de energías renovables, y tan solo el 0,02 % pertenece a la bomba de calor. Se observa entonces que el uso de esta tecnología está poco extendido. El desarrollo que propone para la bomba de calor geotérmica es el siguiente:

ktep	2005	2010	2011	2012	2013	2014
Energía renovable a partir de bombas de calor	7,6	17,4	19,7	22,2	24,9	28,1
De la cual aerotérmica	4,1	5,4	5,7	6,1	6,4	6,9
De la cual geotérmica	3,5	12,0	14,0	16,1	18,5	21,2

ktep	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Energía renovable a partir de bombas de calor	30,8	33,6	37,2	41,2	45,8	50,8
De la cual aerotérmica	7,4	7,9	8,4	9,0	9,7	10,3
De la cual geotérmica	23,4	25,7	28,8	32,2	36,1	40,5

Tabla 30: Objetivos del PER en el sector de la calefacción y refrigeración.
Fuente: PER 2011 - 2020 (IDAE).

Para los próximos años se establece un crecimiento del 337 % respecto a la energía empleada desde el año 2010.

La potencia actual instalada en España se estima entre 60 y 100 MWt (**PER 2011-2020 ; GEOPLAT 2010**), sobre todo por el gran desarrollo en los últimos años de los aprovechamientos geotérmicos mediante bombas de calor. Los principales retos tecnológicos de la geotermia para usos térmicos son reducir el coste de generación térmica, mediante la reducción de los costes de ejecución del intercambio geotérmico y el incremento de los ahorros proporcionados por estos sistemas, y mediante el aumento de la eficiencia de las bombas de calor geotérmicas. El potencial geotérmico de baja y muy baja temperatura en zonas con potenciales consumidores se ha estimado en más de 50.000 MWt.

14. Aprovechamiento del acuífero en Zaragoza.

En la ciudad de Zaragoza debido a la disponibilidad de agua subterránea, el aprovechamiento se realiza mediante sistemas abiertos, por lo que se capta agua del acuífero a una determinada temperatura que es transferida a un intercambiador de calor para su aprovechamiento. El clima continental de Zaragoza hace que el aprovechamiento geotérmico sea principalmente para refrigeración y un tercio de sistemas para calefacción. El agua captada, se devuelve al acuífero por medio de un segundo pozo aguas abajo del flujo subterráneo. En verano el agua se devuelve más caliente al acuífero, mientras que en invierno se devuelve más fría.

Datos de la Plataforma Tecnológica Española de Geotermia (**GEOPLAT 2010**) revelan que, a fecha de 2010, la potencia instalada en España con bombas de calor se eleva a 60-100 MWt, de los cuales la aportación de la explotación en Zaragoza superaría los 30 MWt. Así pues, se reconoce que Zaragoza es en España una ciudad pionera y ejemplo de cómo el aprovechamiento geotérmico se ha ido introduciendo en los últimos 25 años. En la figura 65 se muestra la evolución temporal del número de aprovechamientos existentes en Zaragoza.

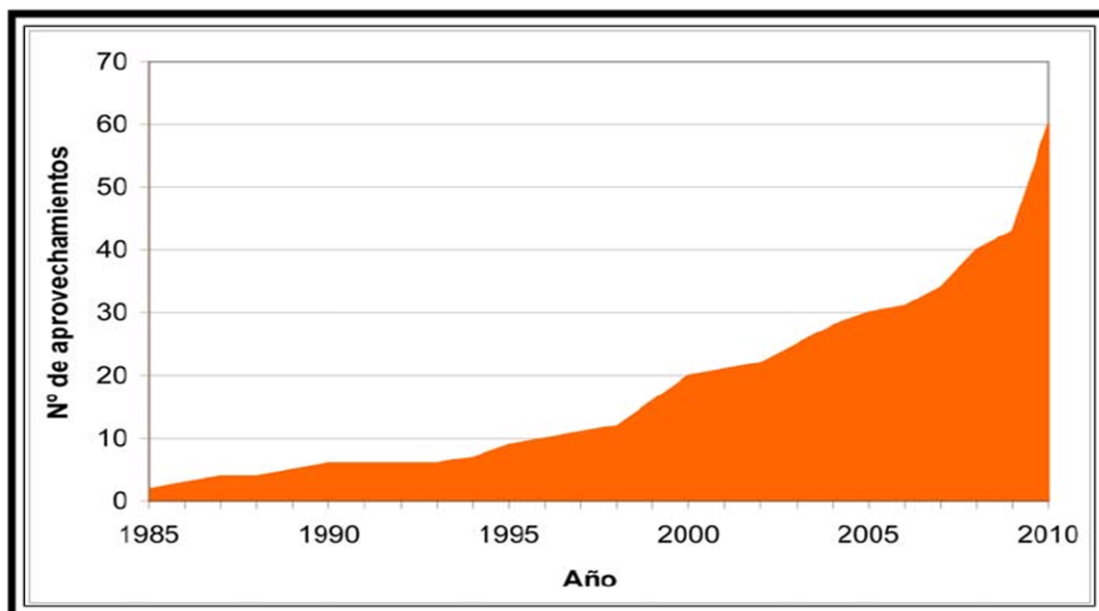


Figura 65: Aprovechamientos geotérmicos con bomba de calor en Zaragoza.
Fuente: E. Garrido et al 2010.

En 2010 se contabilizaron cerca de 60 aprovechamientos geotérmicos en la ciudad, de los que 40 están actualmente activos y se muestran en la tabla 25. Hoy en día existen más de 60 aprovechamientos, con más de 150 pozos involucrados y 50 MWt de potencia instalada (**Eduardo Garrido 2012**). En la figura 66 se muestra el mapa de Zaragoza con los pozos que utilizan el acuífero urbano.

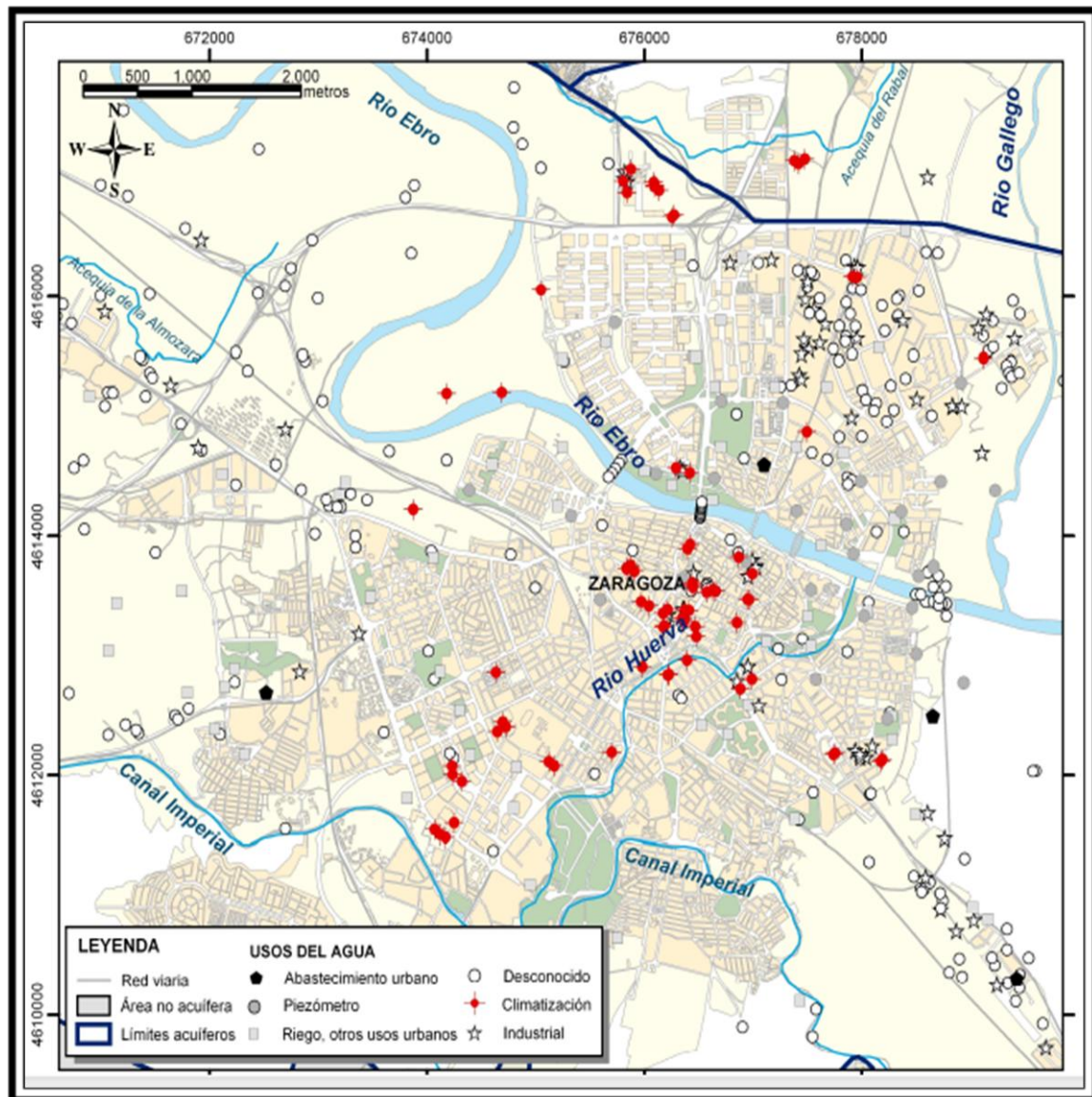


Figura 66: Pozos que aprovechan el acuífero urbano de Zaragoza.
Fuente: E. Garrido et al, 2008.

APROVECHAMIENTO	TITULAR	POZOS	CAPTACIÓN				VERTIDO			
		Nº TOTAL	Nº	PROF. MÁX (m)	Caudal (l/s)	Consumo m3/año	Nº	PROF. MÁX (m)	Caudal (l/s)	Vertido m3/año
ARAGONIA	Zaragoza Urbana, S.A.	6	4	44,00	33,60	943020	2		33,60	643020
BIBLIOTECA DE HUMANIDADES	Universidad de Zaragoza	2	1	45,00	3,97	81406	1	36,00	3,97	81406
CENTRO ARAGONÉS DEL DEPORTE	Gobierno de Aragón	1	1	21,53	10,00	315360	0	-	-	-
CENTRO CÍVICO SAN JOSÉ	Ayuntamiento de Zaragoza	1	1	23,00			0	-	-	-
CENTRO DEPORTIVO A. MAESTRO	Ayuntamiento de Zaragoza - Deportes	1	1				0	-	-	-
CENTRO DEPORTIVO PALAFOX	Ayuntamiento de Zaragoza - Deportes	3	2	30,27	6,33	115566	1	33,00	6,33	115566
CENTRO DEPORTIVO SIGLO XXI	Ayuntamiento de Zaragoza - Deportes	3	2		25,89	525000	1		25,89	525000
CINES PALAFOX LAS SALAS	Zaragoza Urbana, S.A.	3	2	50,00	4,83	133521	1	33,00	4,83	133521
DISMINUIDOS FÍSICOS DE ARAGÓN	Disminuidos Físicos de Aragón	2	1	27,50	1,30	24354	1	26,50	1,30	133521
EDIFICIO ADA BYRON	Universidad de Zaragoza	2	1	24,00	12,86	264000	1	26,00	12,86	264000
ESCUELA INGENIEROS	Universidad de Zaragoza	5	4	36,00	34,75		1		34,75	
EDIFICIO ANTIGUO SEMINARIO	Ayuntamiento de Zaragoza	3	2	65,00	29,92	549423	1	64,00	29,92	549423
EDIFICIO ESCUELA EMPRESARIALES	Universidad de Zaragoza	2	1	38,00	19,04	375255	1	35,00	16,66	375255
EDIFICIO LOS ARCOS	CIUVASA	1	1	21,75			0	-	-	-
EDIFICIO MARISTAS	Gobierno de Aragón	3	2	20,00	22,20	500949	1	23,00	22,20	500949
EDIFICIO PARANINFO	Universidad de Zaragoza	3	2		42,00	145000	1		42,00	145000
EDIFICIO PIGNATELLI	Gobierno de Aragón	3	2	40,00		511000	1	40,00		511000
EL JUSTICIA	El Justicia	1	1	29,17	0,58	18000	0	-	-	-
EL PLATA	Aramesa	2	1	36,50	7,60	129004	1	28,00	7,60	129004
ESTACIÓN DELICIAS	ADIF Patrimonio	7	3		83,30	1186500	4	28,00	83,30	1186500
HOLMES PLACE COLISEO	DUAR Desarrollo Urbano Aragonés S.L.	2	1	26,00	1,45	23000	1	24,00	1,45	23000
HOSPITAL CLÍNICO	Gobierno de Aragón Dpto de Salud	6	4	63,00	60,55	941856		61,00	60,55	941856

APROVECHAMIENTO	TITULAR	POZOS	CAPTACIÓN				VERTIDO			
		Nº TOTAL	Nº	PROF. MÁX (m)	Caudal (l/s)	Consumo m3/año	Nº	PROF. MÁX (m)	Caudal (l/s)	Vertido m3/año
HOSPITAL PROVINCIAL	Gobierno de Aragón Dpto de Salud	2	1	37,85	39,97		1	45,00	39,97	
HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS	Hospital San Juan de Dios	4	2	60,00	7,50	72463	2	47,50	7,50	
HOTEL ALFONSO I	Zaragoza Urbana, S.A.	3	2	27,00	17,62	208625	1	25,50	17,62	
HOTEL BOSTON	Inversiones Generales Boston S.A.	1	1	15,67	1,05	15000	0	-	-	-
HOTEL IBERUS	Zaragoza Urbana, S.A.	7	3	32,50	50,00		4	35,00		
HOTEL PALAFOX, CASINO Y CINE	Zaragoza Urbana, S.A.	3	2	37,00	19,16	184437	1	12,30	3,65	115217
IBERCAJA	Ibercaja	7	3	42,00	36,00	614329	4	46,00	24,80	783000
LA CASA DEL LOCO	La Casa Del Loco	1	1	14,91	1,06	9135	0	-	-	-
MERCADO CENTRAL	Ayuntamiento de Zaragoza	2	1	30,00	4,70	96000	1	30,00	4,70	96000
MUTUA ACCIDENTES ZARAGOZA	Mutua Accidentes Zaragoza	3	2	48,00	38,20	563838	1	40,00	16,60	432000
PABELLÓN PRINCIPE FELIPE	Ayuntamiento de Zaragoza - Deportes	2	2	24,60	32,00	350000	0	-	-	-
PUERTA CINEGIA	Ordisa	4	1	25,00	54,57	1752000	3	36,00	3,17	100000
RESIDENCIA REYES DE ARAGÓN	Sekilur S.A.	6	3	52,00	9,95	100665	3	58,00	13,88	180000
T.V. ARAGÓN POZO-1	Gobierno de Aragón	3	2	20,00	8,15	183384	1	20,00	8,15	257018
TRANSPORTES OCHOA	Transportes Ochoa	2	1	30,00	13,43	341548	1	30,00	17,36	400000
UTRILLAS PLAZA -ALCAMPO	Alcampo	4	1		16,00	525600	3		16,60	525600
UTRILLAS CENTRO COMERCIAL	Utrillas Plaza - Centro Comercial	6	3		85,00	1285200	3	28,40	85,00	1285200
COMPAÑÍA HIJAS DE LA CARIDAD	Compañía Hijas de la Caridad	1	1	30,00	0,16	3124	-	-	-	-

Tabla 31: Captación y vertido de los pozos que aprovechan el acuífero urbano de Zaragoza.
Fuente: E. Garrido et al, 2010.

APROVECHAMIENTO	TITULAR	CLIMATIZACIÓN				TEMPERATURAS (°C)		
		FRÍO		CALOR		CAPTACIÓN	VERTIDO	SALTO TÉRMICO
			Potencia kW		Potencia kW			
ARAGONIA	Zaragoza Urbana, S.A.	X		X		14,6	20,9	6,3
BIBLIOTECA DE HUMANIDADES	Universidad de Zaragoza	X	402	X	542	18,0	23,2	5,2
CENTRO ARAGONÉS DEL DEPORTE	Gobierno de Aragón	X		X		16,4	20,5	4,1
CENTRO CÍVICO SAN JOSÉ	Ayuntamiento de Zaragoza	X		X		17,6		
CENTRO DEPORTIVO A. MAESTRO	Ayuntamiento de Zaragoza - Deportes	-		X		18,0		
CENTRO DEPORTIVO PALAFOX	Ayuntamiento de Zaragoza - Deportes	X		X		16,9	28,0	11,1
CENTRO DEPORTIVO SIGLO XXI	Ayuntamiento de Zaragoza - Deportes	X		X		16,4	29,7	13,3
CINES PALAFOX LAS SALAS	Zaragoza Urbana, S.A.	X		X		21,0		
DISMINUIDOS FÍSICOS DE ARAGÓN	Disminuidos Físicos de Aragón	X					26,0	
EDIFICIO ADA BYRON	Universidad de Zaragoza	X	1796	X	1796	16,8	41,9	25,1
ESCUELA INGENIEROS	Universidad de Zaragoza	X	2118	X	2118			
EDIFICIO ANTIGUO SEMINARIO	Ayuntamiento de Zaragoza		2076		1683	17,0	29,3	12,3
EDIFICIO ESCUELA EMPRESARIALES	Universidad de Zaragoza	X	2000	X	2000	16,6	28,3	11,7
EDIFICIO LOS ARCOS	CIUVASA	X		X		18,1		
EDIFICIO MARISTAS	Gobierno de Aragón	X		X		22,6	30,7	8,1
EDIFICIO PARANINFO	Universidad de Zaragoza	X	2163			18,4	32,0	13,6
EDIFICIO PIGNATELLI	Gobierno de Aragón	X		X				
EL JUSTICIA	El Justicia	X		X		20,0		
EL PLATA	Aramesa	X						
ESTACIÓN DELICIAS	ADIF Patrimonio	X				18,5	22,0	3,5
HOLMES PLACE COLISEO	DUAR Desarrollo Urbano Aragonés S.L.	X						
HOSPITAL CLÍNICO	Gobierno de Aragón Dpto de Salud	X				21,3	28,5	7,2

APROVECHAMIENTO	TITULAR	CLIMATIZACIÓN				TEMPERATURAS (°C)		
		FRÍO		CALOR				
			Potencia kW		Potencia kW	CAPTACIÓN	VERTIDO	SALTO TÉRMICO
HOSPITAL PROVINCIAL	Gobierno de Aragón Dpto de Salud	X	1400			16,6	24,1	7,5
HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS	Hospital San Juan de Dios	X				17,1		
HOTEL ALFONSO I	Zaragoza Urbana, S.A.	X				16,9		
HOTEL BOSTON	Inversiones Generales Boston S.A.	X		X		18,4		
HOTEL IBERUS	Zaragoza Urbana, S.A.	X		X			29,7	
HOTEL PALAFOX, CASINO Y CINE	Zaragoza Urbana, S.A.	X				20,0	34,0	14,0
IBERCAJA	Ibercaja	X				17,5	25,0	7,5
LA CASA DEL LOCO	La Casa Del Loco	X				20,2		
MERCADO CENTRAL	Ayuntamiento de Zaragoza	X						
MUTUA ACCIDENTES ZARAGOZA	Mutua Accidentes Zaragoza	X				20,4	31,5	11,1
PABELLÓN PRINCIPE FELIPE	Ayuntamiento de Zaragoza - Deportes	X		X		17,5		
PUERTA CINEGIA	Ordisa	X		X		25,0	35,0	10,0
RESIDENCIA REYES DE ARAGÓN	Sekilur S.A.	X	735			16,9		
T.V. ARAGÓN POZO-1	Gobierno de Aragón	X				18,9	19,4	0,5
TRANSPORTES OCHOA	Transportes Ochoa	X				25,6	29,5	3,9
UTRILLAS PLAZA -ALCAMPO	Alcampo	X				24,0	30,4	6,4
UTRILLAS CENTRO COMERCIAL	Utrillas Plaza - Centro Comercial	X		X			34,6	
COMPAÑÍA HIJAS DE LA CARIDAD	Compañía Hijas de la Caridad							

Tabla 32: Climatización y temperaturas de de los pozos que aprovechan el acuífero urbano de Zaragoza.
Fuente: E. Garrido et al, 2010.

La utilización principal es la de refrigeración de edificios públicos, hospitales, centros comerciales, de ocio u hoteles, pero también para generación de frío industrial en cámaras frigoríficas y climatización de piscinas. Entre el 25-50% de las instalaciones se utilizan también para generar calor durante el invierno.

En total existen 86 captaciones geotérmicas y 58 pozos de vertido todos ellos con profundidades comprendidas entre 5 y 65 metros de profundidad. Cada aprovechamiento cuenta entre 1 y 4 pozos de explotación y otros tantos de vertido, dependiendo de la demanda de caudal.

En el 90% de los sistemas la explotación se considera no consuntiva, puesto que el vertido se realiza en el mismo acuífero mientras que en el 10% restante se canaliza a la red municipal de saneamiento.

Los aprovechamientos geotérmicos en Zaragoza tienen un notable efecto térmico, ya que al predominar su uso como refrigeración es habitual reintroducir el agua a una temperatura notablemente más elevada. En la tabla 26 puede verse que los saltos térmicos llegan a ser superiores a 10 °C. El incremento de la temperatura del agua en las zonas de mayor aprovechamiento es fruto de fenómenos tanto de auto-interferencia (el pozo de captación está afectado por su propio vertido térmico), como de interferencia entre aprovechamientos. En general el agua del acuífero tiene una temperatura entre 15-18 °C, mientras que en las zonas de explotación se superan los 22-25 °C. Debemos tener en cuenta que el incremento observado en otras ciudades es de 5°C, y un incremento superior se debe a un impacto térmico de los vertidos geotérmicos.

Como consecuencia del aumento de la temperatura del acuífero, surge el desarrollo de la actividad microbiana. Existen varios microorganismos cuyas temperaturas óptimas de crecimiento coinciden con las temperaturas de trabajo del sistema abierto. Las bacterias causantes de colmatación generan cápsulas gelatinosas, retienen partículas, obstruyen filtros y rejillas. Por otro lado nos encontramos bacterias causantes de la corrosión. En el medio subterráneo no se encuentran poblaciones desarrolladas de bacterias, pero en sistemas de circulación forzada, como son los sistemas de climatización, hay una continua renovación del agua, que con aporte de nutrientes (aguas residuales urbanas) se dispararían las tasas de crecimiento bacteriano.

Eduardo Garrido (2010) explica que los aprovechamientos geotérmicos requieren de un estudio hidrogeológico específico que permita conocer las direcciones del flujo

subterráneo y los parámetros hidrogeológicos a fin de determinar las distancias mínimas aconsejables entre pozos de captación y vertido del mismo aprovechamiento, y entre los pozos de vertido y terceras captaciones para evitar la interferencia térmica. Por otro lado las captaciones se deben dimensionar para que los saltos térmicos no superen los 10°C y las temperaturas de vertido no alcancen los 30°C, aunque estos valores parecen un tanto elevados. Los bombeos no deben superar caudales críticos que generen arrastre de arenas y colapsos de captaciones.

14.1. Criterios técnicos e hidrogeológicos para la explotación sostenible del acuífero.

En **2012, Eduardo Garrido**, ha presentado una serie de criterios técnicos e hidrogeológicos para la explotación sostenible del acuífero, ante la ausencia de normativas específicas que prevengan afecciones e impactos.

1. Criterios para la construcción de pozos.

- Estudios hidrogeológicos previos. Ubicación de sondeos conforme al flujo subterráneo.
- Especificar y justificar características técnicas (profundidad rejillas, penetración de pozos...).
- Distancias de pozos de vertido frente a otras instalaciones (> 100 metros) y otros usos (> 250 metros).
- Caudales de extracción < 50 m³/h. En Zaragoza se bombea 16,4 hm³ anuales, lo que representa el 68% de toda la explotación subterránea.

2. Criterios para la explotación sostenible de los aprovechamientos.

- Exigir uso reversible (calefacción y refrigeración) de la energía geotérmica y de los sistemas.
- Diseño que minimice la tasa de recirculación.
- Limitación de saltos térmicos a máximo de 8°C para nuevas instalaciones.
- Tª de vertido <30°C dependiendo de la litología del sustrato y calidad del agua.

- Limitación de nuevos sistemas en entornos con T^a media del agua subterránea superior a 20°C.
- Duplicar el número de pozos de vertido respecto de captaciones; Reparto de caudales de vertido.

3. Criterios para la protección de la calidad.

- Circuitos presurizados que eviten aireación y desgasificación del agua.
- Control y seguimiento del salto térmico para evitar cambios en el índice de saturación de sales.
- No favorecer la disolución de matriz sólida del acuífero ni del sustrato.
- Evitar introducción de nutrientes y controlar el desarrollo bacteriano.
- Evitar el uso de aditivos químicos y su introducción en el acuífero por los pozos.

4. Criterios para el control de sistemas geotérmicos abiertos.

- Garantizar la calidad del agua mediante el seguimiento térmico, hidráulico y químico.
- Habilitar puntos de control para toma de muestras en diferentes partes del circuito y en pozos.
- Instalar conductos para control piezométrico. Construcción de al menos un sondeo piezométrico.
- Establecer protocolo de control y vigilancia de niveles, parámetros físico-químicos, explotación, inspección visual de la instalación...

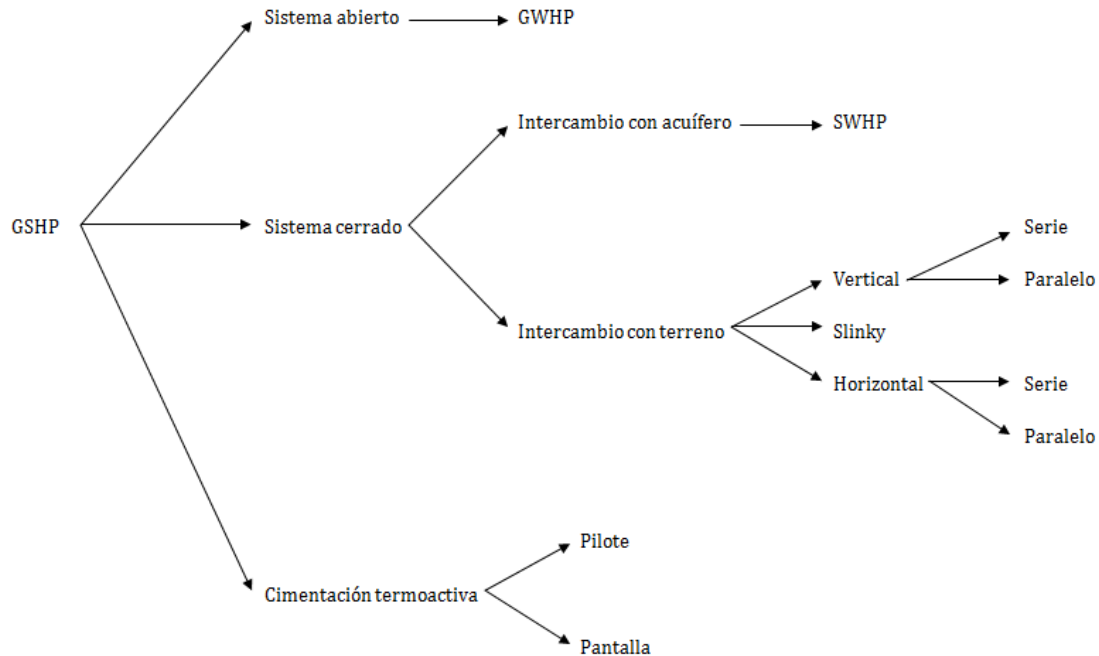
5. Criterios para la gestión y administración.

- Solicitar autorización para la explotación de aguas subterráneas y vertido al dominio público hidráulico.
- Inyección del agua en el mismo acuífero. Valoración de otras alternativas más favorables.

- Limitación de sistemas en zonas de protección máxima y moderada de pozos de abastecimiento.
- Establecer protocolos para la clausura de pozos de sistemas que ocasionen problemas graves.

15. Conclusiones.

Los tipos de GSHP se resumen en el siguiente esquema:



Las conclusiones que sacamos de cada objetivo mencionado en el capítulo 1 son las siguiente:

- La existencia de una hoja de cálculo con fórmulas de incertidumbre de propagación implementadas es útil para calcular el máximo error absoluto de la conductividad y resistencia térmica del terreno que obtenemos en el TRT. En el estudio de H. Witte los factores que más influyen en el error de la conductividad térmica son: el cálculo de la diferencia de temperaturas (70%), seguido del error de la capacidad calorífica del fluido (15,5%) y el error de coeficiente k (6,9%). Respecto a la resistencia térmica, el mayor responsable de su error absoluto es la conductividad térmica (93%), seguido del radio del pozo (5,8%) y el valor de m (0,66%).

El TRT se realiza en un solo pozo, y su valor de conductividad térmica se considera representativo de todo el terreno. He llevado a cabo una simulación mediante GEO² en la una instalación pasaba de tener una conductividad del terreno de 2,51 a 1,84 W/mK. El resultado ha sido una necesidad de tener 272 metros más de pozo y el gasto que ello conlleva (\approx 13.000 euros).

- El método IGSHA es el método de diseño más extendido y aceptado en la actualidad debido a su simplicidad. Aunque el fenómeno de intercambio de energía térmica con el terreno es transitorio, el método realiza una aproximación a estacionario mediante el uso del factor de utilización.
- Idoneidad de los parámetros de un intercambiador de calor enterrado para obtener un mayor COP/EER se muestra en la siguiente tabla:

	COP	EER
Aumento distancia entre pozos	↑	↑
Aumento compacidad pozos	≈	↓
Aumento profundidad de los pozos	↑	↑↑

- En los últimos 20 años ha habido un aumento de generación bruta de electricidad de una forma más eficiente a partir del uso de energías renovables, lo que ha llevado a que el factor η de la directiva 2009/28/CE haya aumentado progresivamente y que el SPF_{\min} haya disminuido para cumplir la dicha directiva. En el año 2010 el valor de SPF_{\min} era de 2,52.
- El régimen intermitente es una forma de solucionar el aumento/disminución del terreno por el desequilibrio de cargas térmicas de calefacción/refrigeración demandadas. El estudio de Yang Sang muestra órdenes de magnitud del tiempo de recuperación del terreno en función de distintos parámetros. Dicho estudio es una simulación en la que la GSHP trabaja 12 horas y después se mide el tiempo de recuperación. Los resultados que se muestran se corresponden a 45 metros de profundidad.

Parámetro gran influencia	Idoneidad	Valores estudio	Resultado (h)
Conductividad térmica	↑	0,93 ; 1,1 ; 1,5 (W/mK)	4,89 ; 4,73 ; 4,13
Porosidad	↓	0,2 ; 0,37 ; 0,47	4,21 ; 4,54 ; 4,73
Difusividad térmica	↑	0,0032 ; 0,0025 ; 0,0023 (m ² /s)	3,75 ; 4,37 ; 4,45

Parámetro leve influencia	Idoneidad calefacción	Valores estudio	Resultado (h)	Idoneidad refrigeración
Velocidad del viento	↓	0 ; 1 ; 3 (m/s)	4,73 ; 4,78 ; 4,75	↑
Radiación solar	↑	0 ; 0,6 ; 1 (kW/m ²)	5,1 ; 4,87 ; 4,78	↓
Temperatura ambiente	↑	263 ; 267 ; 272 (K)	5,28 ; 5,24 ; 5,1	↓

El régimen de operación intermitente se puede realizar mediante el uso de sistemas híbridos. La idoneidad de estos es la siguiente:

Sistema híbrido GSHP...	Edificio con carga dominante de calefacción	Edificio con carga dominante de refrigeración
Colectores solares	SI	NO
Torre de refrigeración	NO	SI
Almacenamiento térmico	Almacenamiento calor	Almacenamiento frío

- Se ha llevado a cabo un análisis del software actual para diseñar intercambiadores de calor acoplados al terreno, observándose las ventajas y desventajas de cada uno.
- El resultado de rendimiento de 43 instalaciones monitorizadas en la península tanto de viviendas unifamiliares, centros de salud, edificios de oficinas, edificios de viviendas, museos, escuelas y hoteles ha sido el siguiente:

Indicadores	Sector residencial		Sector terciario	
	Calefacción	Refrigeración	Calefacción	Refrigeración
CO _{Pest} (bomba)	4		3,68	
CO _{Pest} (instalaciones)	3,55		3,35	
EE _{Rest} (bomba)		3,46		3,48
EE _{Rest} (instalaciones)		3,04		3,11

- Zaragoza es una ciudad pionera en España en el uso de bombas de calor GWHP. Tiene más de 60 captaciones del acuífero aluvial urbano. El principal problema es que con tantas captaciones, los pozos se están empezando a influir entre sí y la temperatura del acuífero se está incrementando, ya que hay más demanda de refrigeración que de calefacción. Ante la ausencia de normativa, Eduardo Garrido propone unos criterios para la explotación sostenible del acuífero.

15.1. Trabajo futuro.

Algunas de las tareas que deberían realizarse en un futuro cercano son las siguientes:

- Adquirir experiencia y aprovechar las ventajas que tiene el uso de la cimentación termoactiva.
- Analizar cuál es la máxima incertidumbre aceptable en los parámetros de diseño, en la evaluación de los test de respuesta térmica y la mejora de los equipos de medición.
- Implementar en el software la incertidumbre de las propiedades térmicas del terreno para poder dimensionar con un coeficiente de seguridad.
- Nuevos modelos más realistas tanto para evaluar los test de respuesta térmica como para el diseño de intercambiadores con el software.
- Crear una normativa para controlar los sistemas abiertos, como en el caso de Zaragoza.

16. Referencias.

Capítulo 1: Introducción.

Andrew D. Chiasson. Advances in modeling of ground-source heat pump systems. Master thesis of Science. Windsor, Ontario, Canada, 1999.

Burkhard Sanner, Constantine Karytsas, Dimitrios Mendrinou, Ladislaus Rybach. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. Geothermics 32 (2003) 579–588.

Egec.info/wp-content/uploads/2011/01/EGEC-Brochure-GSHP-2009.pdf

GEOPLAT (2010). Visión a 2030. Ministerio Ciencia e Innovación. 51 p.

Guía técnica IDAE: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Madrid, 2010.

Capítulo 2: Clasificación de los intercambiadores de calor.

Alberto Mazariegos, Luis Carlos Antón, Rodrigo Valle, Javier Urchueguía, Salvador Quilis, Salvador Martínez, Teresa Magraner. Pilotes y pantallas termoactivas. Proceso constructivo y caracterización térmica.

Alberto Mazariegos. Pilotes termoactivos. Proceso constructivo y caracterización térmica. I Congreso Geoener, 2008.

Ashrae.org

Geoprodesign.com/en/Page/residential-geothermal-basics

Geoscan.es

Göran Hellström . Borehole heat exchangers. NATO Advanced Study Institute on Thermal Energy Storage for Sustainable Energy consumption. Cesme-Izmir (Turkey) 2005.

Guía técnica de sondeos geotérmicos superficiales. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. Madrid, 2009.

Guía técnica IDAE: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Madrid, 2010.

H. Yang, P. Cui, Z. Fang. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. Applied Energy, Volume 87, Issue 1, January 2010, Pages 16-27

ingeopres.es/publicaciones/Ingeopres_200/files/assets/seo/page86.html

Juan Franqueza, Edasu S.L. Técnica de perforación a emplear en sondeos geotérmicos. I Congreso Geoener, 2008.

Kim Stubbergaard Reese, Muovitech. Geothermal energy collectors norms. I Congreso Geoener, 2008.

Capítulo 3: Propiedades térmicas del terreno.

Carlslaw, H.S. y Jaeger, J.C. (1959). Conduction of Heat in Solids, Clarendon Press, London.

Erbs, D., Klein, S., y Beckman, W. (1983). Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly average temperatures. ASHRAE Journal, pp.60-65.

Flores Larsen, S. y Lesino, G. (1999). Aplicación para la ciudad de Salta de un modelo de distribución horaria de temperatura. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 3, Nº2, pp. 11.25-11.28.

Givoni, B. y Katz, L. Earth Temperatures and Underground Buildings, Kiryat Sede Boqer, Israel, Blaustein Institute for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, sin fecha, 30 p.

Guía técnica IDAE: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Madrid, 2010.

Kusuda T., Achenbach P.R. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States. ASHRAE Transactions. 1965, vol 71, p. 61-75.

Labs, K. y Harrington, K. Proceedings Earth Shelter Performance and Evaluation, Boyer L. L., ed. Stillwater, OK: Architectural Extension/Oklahoma State University 1982, 41.

Paud, D. Geothermal energy and heat storage. 2002

Silvana Flores Larsen y Graciela Lesino. Intercambiadores tierra-aire: uso del suelo para enfriamiento pasivo. INENCO – Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional. Universidad Nacional de Salta – CONICET. Buenos Aires 177, 440 Salta, Argentina.

Teresa Magraner Benedicto. Validación experimental de los métodos de diseño de instalaciones de bomba de calor acoplada al terreno. Departamento de física aplicada, Universidad de Valencia, 2010.

Ground-source heat pump project analysis, in: Clean Energy Project Analysis, CANMET Energy Technology Centre - Varennes (CTEC), Minister of Natural Resource Canada 2001-2005.

Capítulo 4: Test de Respuesta térmica.

Bruno, R., Focaccia, S. & Tinti, F. Geostatistical modeling of a shallow geothermal reservoir for air conditioning of buildings. IAMG 2011, Mathematical Geosciences at the Crossroads of Theory and Practice. Salzburg. September 5 - 9 2011. (pp. 146 - 163).

Burkhard Sanner, Constantine Karytsas, Dimitrios Mendrinou, Ladislaus Rybach. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. Geothermics 32 (2003) 579-588.

Burkhard Sanner, Erich Mands, Marc Sauer & Edgar Grundmann. Technology, development status, and routine application of Thermal Response Test. Proceedings European Geothermal Congress 2007 ; Unterhaching, Germany, 30 May- 1 June 2007.

Excel Witte 2012. groenholland.com/nl/publications/.

Guía técnica de sondeos geotérmicos superficiales. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. Madrid, 2009.

Henk J.L. Witte. Error Analysis of Thermal Response Tests. Innostock 2012. The 12th International Conference on Energy Storage.

Ingersoll, L.R., and H.J. Plass, 1948. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. ASHVE Trans., 47, 339-348.

Marc Sauer, Burkhand Sanner, Erich Mands, Edgar Grundmann, Alfredo Fernández. Thermal Response Test: Practica experience and extended range of application. Innostock 2012. The 12th International Conference on Energy Storage.

Petr Hemza, Zdenek Rozehnal, David Grycz. Thermal Response Test - Evaluation of a serie of measurements in the same rock environment. Innostock 2012. The 12th International Conference on Energy Storage.

Samuel Iglesias Mendoza. Análisis de las instalaciones de climatización con bomba de calor geotérmica. Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. Diciembre, 2010.

Thermalresponsetest.org.

Capítulo 5: Diseño del intercambiador de calor enterrado.

Guía técnica de sondeos geotérmicos superficiales. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. Madrid, 2009.

Guía técnica IDAE: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Madrid, 2010.

Juan Franqueza, Edasu S.L. Técnica de perforación a emplear en sondeos geotérmicos. I Congreso Geoener, 2008.

Samuel Iglesias Mendoza. Análisis de las instalaciones de climatización con bomba de calor geotérmica. Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. Diciembre, 2010.

Capítulo 6: Sensibilidad del COP variando los parámetros de diseño.

Miguel Zamora. Diseño de intercambiadores de calor enterrados. Modelo de cálculo y análisis de sensibilidad a los parámetros de mayor relevancia. I Congreso Geoener, 2008.

Paud, D. Gethermal energy and heat storage. 2002

Capítulo 7: Energía renovable aportada por la bomba de calor.

Directiva 2009/28/CE.

<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:es:PDF>

Eurostat. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>

Epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/other_documents (EUROSTAT Tabla η)

Miguel Zamora. Aproximación al valor del rendimiento medio estacional (SPF) a partir del COP de diseño obtenido por el método IGSHPA. III Congreso Geoener. Madrid, abril de 2012.

M. Zamora, N. Molero. Estimación de la contribución de energía renovable de las bombas de calor geotérmicas a partir del COP de diseño obtenido del software de dimensionado GEO2. Revista Montajes e Instalaciones. Julio - Agosto 2012.

Norma PrEn 14825.

<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=P&codigo=P0034901&pdf=#.UJvhtMXQeEx>

Teresa Magraner Benedicto. Validación experimental de los métodos de diseño de instalaciones de bomba de calor acoplada al terreno. Departamento de física aplicada, Universidad de Valencia, 2010.

Capítulo 8: Aumento/disminución de la temperatura del terreno a largo plazo.

Teresa Magraner Benedicto. Validación experimental de los métodos de diseño de instalaciones de bomba de calor acoplada al terreno. Departamento de física aplicada, Universidad de Valencia, 2010.

Yan Shang, Sufen Li, Haijun Li. Analysis of geo-temperature recovery under intermittent operation of ground-source heat pump. Energy and buildings 43 (2011) 935-943.

Yong Wang, Yuanyuan Ma, Qinghua Liu, Min Luo. Influence of Intermittent Operation on Ground Thermal Balance in GCHP System. Innostock 2012. The 12th International Conference on Energy Storage.

Capítulo 9: Sistemas híbridos.

Elisabeth Kjellsson, Göran Hellström, Bengt Perers. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings. Energy, Volume 35, Issue 6, June 2010, Pages 2667-2673

H. Zhang. Design of ground-source heat pump system with vertical ground heat exchanger of Hubei Land and Resource Archives (in Chinese). Building Sci 2010;26(6):105-9.

Teresa Magraner. Optimización de sistemas geotérmicos mediante la implementación de sistemas híbridos. I Congreso Geoener, 2008.

Wang X, Zheng M, Zhang W, Zhang S, Yang T. Experimental study of a solar-assisted ground-coupled heat pump system with solar seasonal thermal storage in severe cold areas. Energy and Buildings, Volume 42, Issue 11, November 2010, Pages 2104-2110

Wei W, Zhang J, Chen T, Zhang Y. A novel heating and cooling system combining a ground source heat pump with an ice storage (in Chinese). Fluid Mach 2007;35(8):72-5.

X.Q. Zhai, M. Qu, X. Yu, Y. Yang, R.Z. Wang. A review for the applications and integrated approaches of ground-coupled heat pump systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 6, August 2011, Pages 3133-3140

Yi Man, Hongxing Yang, Jinggang Wang. Study on hybrid ground-coupled heat pump system for air-conditioning in hot-weather areas like Hong Kong. Applied Energy, Volume 87, issue 9, September 2010, Pages 2826-2833.

Yuehong Bi, Tingwei Guo, Liang Zhang, Lingen Chen. Solar and ground source heat-pump system. Applied Energy, Volume 78, Issue 2, June 2004, Pages 231-245

Capítulo 10: Empresas del sector.

Dolmeningenieria.com

Fenercom.com/pages/normativa/empresas-geotermia.html

Geoscan.es

Solucionesgeotermicas.es

Capítulo 11: Software.

Buildingphysics.com/index-filer/Page1099.htm

Groundloopdesign.com/index.html

Hvac.okstate.edu/glhepro/

Manual de usuario Geo2 v1.0. Software de cálculo para intercambiadores de calor enterrados acoplados a bombas de calor agua-agua de CIAT. Noviembre, 2010.

Capítulo 12: Modelos matemáticos.

Sung Lok Do, Jeff S. Haberl. A review of ground coupled heat pumps models used in whole-building computer simulation programs. Energy Systems Laboratory, Department of Architecture, Texas University.

Manual de usuario Geo2 v1.0. Software de cálculo para intercambiadores de calor enterrados acoplados a bombas de calor agua-agua de CIAT. Noviembre, 2010.

Gld-online.com/forums/viewtopic.php?f=5&t=66

H. Yang, P. Cui, Z. Fang. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems Review Article. Applied Energy, Volume 87, Issue 1, January 2010, Pages 16-27.

Capítulo 13: Algunas instalaciones en España.

Alejandra González. Resultados de funcionamiento de instalaciones de bomba de calor geotérmica en España. III Congreso Geoener. Madrid, abril de 2012.

Geoener.es

GEOPLAT (2010). Visión a 2030. Ministerio Ciencia e Innovación. 51 p.

Plan de energías renovables.

idaes.es/index.php/id.670/relnenu.303/mod.pags/mem.detalle

Capítulo 14: Aprovechamiento del acuífero en Zaragoza.

Eduardo Garrido, José Ángel Sánchez Navarro, Pablo Coloma. Aprovechamiento geotérmico somero del acuífero aluvial urbano de Zaragoza: primeros resultados. Geogaceta 49, 2010.

GEOPLAT (2010). Visión a 2030. Ministerio Ciencia e Innovación. 51 p.

Eduardo Garrido Schneider. Criterios técnicos e hidrogeológicos para la explotación del acuífero urbano de Zaragoza por sistemas geotérmicos abiertos. III Congreso Geoener, 2012.

Eduardo A. Garrido Schneider, Celestino García de la Noceda. Implicaciones hidrogeológicas de la utilización de los acuíferos por los pozos de climatización. El caso de la ciudad de Zaragoza. I Congreso Geoener, 2008.