UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Geotermia y su tecnología

Roberto Arranz-Revenga, Ph.D.

Juan Herrera Herbert, Ph.D.

Departamento de Ingeniería Geológica y Minera

Noviembre | 2025

Imagen de portada: erupción del Pico Sarychev, Islas Kuriles. (12 de Junio de 2009).
Copyright NASA ©2009.

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía

POLITÉCNICA

Geotermia y su tecnología

Roberto Arranz-Revenga, Ph.D.
Juan Herrera Herbert, Ph.D.

Departamento de Ingeniería Geológica y Minera

Noviembre | 2025

Esta página está en blanco intencionalmente.

Aviso legal
Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito comercial. La respuesta ante un caso particular requerirá, siempre, un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución y los riesgos afrontados en cada caso.

Copyright © 2025 – Roberto Arrranz-Revenga & Juan Herrera Herbert.

Open Archives Initiative La distribución de la obra está bajo los términos de la licencia *Creative Commons Atribución 4.0 Internacional*. Esta licencia permite compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, siempre que se cite debidamente a los autores originales y a la fuente, se proporcione un enlace a la licencia *Creative Commons* y se indique si se han realizado cambios. Puede hacerlo de cualquier forma razonable, pero no de tal manera que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de los licenciantes. No puede hacer uso del material con propósitos comerciales. Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado. No se pueden aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier uso permitido por la licencia. Para más detalles sobre la licencia aplicada, visite: creativecommons.org.

Maquetación
El manuscrito ha sido editado en formato electrónico, empleando **XeLaTeX**. Se ha usado como base el conjunto de clases y paquetes KOMA-Script a través de la clase kaobook. Esta clase es de dominio público y ha sido modificada por los autores.

DOI: 10.20868/UPM.book.91817
Archivo Digital de la UPM: oa.upm.es:91817

Esta página está en blanco intencionalmente.

Preámbulo

En un mundo ávido de energía, y cada vez más consciente de la importancia de la sostenibilidad y el respeto al medio ambiente, cada tecnología es importante. La geotermia, como energía sostenible, tiene un papel cada vez más relevante.

Por otra parte, en la inmensa mayoría de las instalaciones de energía geotérmica se emplean técnicas mineras, y en particular, tecnología de sondeos. El avance de estas tecnologías en las últimas décadas ha permitido el abaratamiento de la perforación y una mayor seguridad y rapidez en las operaciones. Paradójicamente, estas técnicas son milenarias y unen el legado tecnológico de la minería y la investigación geológica con el presente y futuro de la eficiencia energética.

El objetivo principal de este libro es dotar a los lectores de un entendimiento amplio, que abarque, tanto las ventajas como las limitaciones inherentes al empleo de esta fuente de energía. Se trata de ofrecer una herramienta para la comprensión, no solo de los aspectos técnicos, sino también de la complejidad económica y ambiental asociada a estas prácticas.

Con el foco puesto en la viabilidad económica, el libro destaca el escaso número de zonas aptas para el aprovechamiento de la energía geotérmica de alta temperatura. Están caracterizadas por la existencia de anomalías térmicas en el subsuelo, así como la presencia de flujos de agua subterránea y, todo ello, a una profundidad moderada. Esto permite el uso directo de la energía en forma de calor o para producir electricidad.

No obstante, más allá de estos lugares privilegiados, la geotermia encuentra aplicaciones diversas en la climatización y la obtención de agua caliente sanitaria. La complejidad y la variabilidad de estos escenarios se abordan ofreciendo un análisis de las posibilidades existentes.

Como cierre, se abordan de manera concisa los fundamentos de perforación de sondeos. Un aspecto crucial para comprender la construcción de pozos geotérmicos someros y de alta temperatura.

Los autores

Esta página está en blanco intencionalmente.

Índice general

Preámbulo vii

Índice general ix

Fundamentos 1

1 Introducción 3
1.1 ¿Qué es la geotermia? . . . 3
1.2 Leyes de transferencia . . . 4
1.3 Efecto del Sol . . . 5
1.4 La atmósfera y los océanos . . . 6
1.5 Formación de la Tierra . . . 7
1.6 Estructura de la Tierra . . . 8
1.7 Fuentes de calor . . . 12
1.8 Distribución térmica . . . 13
1.8.1 Anomalías térmicas . . . 15

2 Yacimientos geotérmicos 19
2.1 Definiciónes . . . 19
2.2 Tipos de yacimientos . . . 21
2.3 Ley de Minas y geotermia . . . 22
2.3.1 Aguas termales . . . 26
2.3.2 Recursos de alta entalpía . . . 27
2.4 Investigación geotérmica . . . 29
2.4.1 R. de uso directo . . . 29
2.4.2 R. de Alta temperatura . . . 32
2.5 Metodología . . . 33
2.5.1 Exploración geológica . . . 34
2.5.2 Manantiales . . . 34
2.5.3 Depósitos superficiales . . . 39
2.5.4 Geotermometría . . . 40
2.5.5 Estudio de los isótopos . . . 42
2.5.6 Exploración geofísica . . . 43
2.5.7 Estudios magnéticos . . . 44
2.5.8 Mapas resistivos . . . 44
2.5.9 Mapas magnetotelúricos . . . 45
2.5.10 Gravimetría . . . 47
2.5.11 Sismología de reflexión . . . 48
2.5.12 Termometría . . . 49

3 Usos de la geotermia 51
3.1 Uso directo . . . 51
3.2 Generación eléctrica . . . 53
3.3 Climatización geotérmica . . . 54
3.3.1 Modelo térmico superficial . . . 54

Geotermia de alta entalpía 57

4 Perforación geotérmica **59**
4.1 Evolución tecnológica . . . 59
4.2 Tecnología de perforación . . . 60
4.2.1 Sistema de perforación . . . 61
4.2.2 Lodos de perforación geotérmicos . . . 61
4.2.3 Entubado y cementado de sondeos geotérmicos . . . 62
4.3 Acondicionado y puesta en producción . . . 65
4.4 Sistemas de bombeo geotérmico . . . 66

5 Plantas geotérmicas **69**
5.1 Tipos de planta . . . 70
5.1.1 Tecnología de vapor seco. . . . 70
5.1.2 Tecnología "*flash*" . . . 72
5.1.3 Tecnología binaria . . . 73
5.2 Generación eléctrica . . . 75
5.2.1 Calidad del vapor . . . 75
5.2.2 Ciclo de *Rankine* . . . 76
5.2.3 Tipos de turbinas . . . 78

6 Sistema geotérmico mejorado (EGS) **81**
6.1 Concepto de HDR . . . 81
6.2 Tecnología actual . . . 83
6.3 Localización . . . 85
6.4 Dimensionado . . . 86
6.5 Fracturación hidráulica . . . 87
6.6 Nuevos desafíos . . . 87

7 Impacto medioambiental **91**
7.1 Introducción . . . 91
7.2 Efluentes gaseosos . . . 92
7.3 Efluentes líquidos . . . 95

Geotermia de baja entalpía 97

8 Intercambiadores geotérmicos **99**
8.1 Sistemas horizontales . . . 100
8.1.1 Tendido diáfano . . . 101
8.1.2 Tendido en zanjas . . . 102
8.2 Sistemas verticales . . . 103
8.2.1 Perforación de sondeos . . . 104
8.3 BHE abiertos . . . 105
8.3.1 Acuíferos . . . 106
8.3.2 Almacenamiento hídrico . . . 113
8.3.3 Sistemas ORGS . . . 115
8.3.4 Sistemas ATES . . . 116
8.4 BHE cerrados . . . 118
8.4.1 Construcción del sondeo . . . 118
8.4.2 Mortero termoconductor . . . 122
8.5 Sistemas termoactivados . . . 124

8.6 Otros sistemas . . . 125

9 Bombas de calor **127**
9.1 Fundamentos . . . 127
9.1.1 Ciclo teórico de una bomba de calor . . . 129
9.1.2 Ciclo real de una bomba de calor . . . 131
9.1.3 Diagramas de *Mollier* en las bombas de calor . . . 132
9.1.4 Otros indices de rendimiento . . . 133
9.1.5 Refrigerantes primarios . . . 134
9.2 Componentes de una bomba de calor . . . 135
9.3 Bombas de calor geotérmicas . . . 137
9.3.1 Refrigerantes secundarios . . . 139

Apéndices **141**

A Pozos canadienses **143**
A.0.1 Intercambiadores tierra-aire . . . 143

Bibliografía **147**

Lista de términos **155**

Esta página está en blanco intencionalmente.

Índice de figuras

1.1 Ley de la conducción térmica de *Fourier*. . . . 4
1.2 Ley de enfriamiento de *Newton*. . . . 4
1.3 Ley de radiación térmica de *Stefan-Boltzmann*. . . . 4
1.4 Flujo de calor terrestre 5
1.5 Balance de energía Sol-Tierra. . . . 6
1.6 Representación artística de la "teoría del gran impacto". . . . 8
1.7 Pozo Kola SG-3 en la península de Kola (Rusia). . . . 9
1.8 Estructura terrestre según su su composición 10
1.9 Estructura terrestre según su su reología 11
1.10 Representación gráfica de tres curvas de distribución de temperatura de la corteza terrestre, con una potencia estimada de 35 km. . . . 14
1.11 Representación gráfica de las tres curvas de la Figura 1.10. Aunque la potencia de la corteza continental sigue siendo de 35 km, tan solo se representan los primeros 3000 m. . . . 15
1.12 Diagrama esquemático que muestra la configuración de los principales elementos que componen las estructuras tectónicas de placas. . . . 16

2.1 Diagrama de *McKelvey*, también conocido como "Caja de *McKelvey*". . . . 20
2.2 Diagrama del proceso de aprobación de un proyecto de geotermia de muy baja temperatura. . . . 25
2.3 Esquema del concepto de cuadrícula minera. . . . 28
2.4 Esquema de fluidos geotérmicos interactuando con aguas meteóricas a través de una fallas y fracturas. . . . 35
2.5 Aguas meteóricas formando celdas convectivas debido al calor del subsuelo. . . . 36
2.6 Terrazas de travertino en *Pamukkale* (Turquía). . . . 37
2.7 Terrazas de travertino con depósitos de azufre nativo (Etiopía). . . . 37
2.8 Diagrama ternario del sistema (Cl^-, $SO_4{}^-$, $HCO_3{}^-$). . . . 39
2.9 Columnas de toba en el lago Mono, California (USA). . . . 40
2.10 Geotermómetro del cuarzo. Diagrama de solubilidad. . . . 41
2.11 Valores $\delta^{18}O$ y δD procedentes de aguas geotérmicas. Expresado en partes por mil (‰). . . . 43
2.12 Ejemplo de un tomografía eléctrica, basada en un estudio de la resistividad eléctrica del terreno. 45
2.13 Ejemplo de interpretación de un tomografía MT en el Monte *Tongariro*. . . . 46
2.14 Esquema de rayo incidente con reflexión y refracción por cambio de medio. . . . 48
2.15 Sección de apilamiento sísmico que muestra una correlación entre una zona de alta reflexión sísmica con objetivos geotérmicos. . . . 49
2.16 Sondeos termométricos en abanico. . . . 50

3.1 Imagen de una fuga de la red de vapor de la ciudad debido a una avería en la ciudad de Nueva York (EE.UU). . . . 52
3.2 Imagen de instalaciones de descanso en *Blue Lagoon*, Islandia. . . . 52
3.3 Representación en 2D de la ecuación de *Kusuda*, Figura 3.3. . . . 55
3.4 Perfil de temperaturas en sondeo de ensayo de 120 m de profundidad. . . . 55

4.1 Imagen de Preventor de reventones (BOP) 60
4.2 Estructura de filtro de alambre tipo *Johnson* 64
4.3 Filtros de captación tipo *Johnson* terminados 64
4.4 Tubos de revestimiento soldados helicoidalmente 65
4.5 La bomba de motor de imanes permanentes y de alta eficiencia para geotermia. . . . 66
4.6 Imagen de una (Y-tool). . . . 67

5.1 Esquema simplificado de la fase previa de una planta de vapor seco. 71
5.2 Esquema simplificado de una planta geotérmica de vapor seco, sin incluir su fase previa, Figura 5.1. 71
5.3 Esquema simplificado de la fase previa de una planta de vapor *flash* de una sola fase. 72
5.4 Esquema simplificado de una planta geotérmica de vapor flash de una sola fase. 73
5.5 Esquema simplificado de la fase previa de una planta de ciclo binario. 73
5.6 Esquema simplificado de una planta geotérmica binaria. 74
5.7 Ciclo ideal de *Rankine* (Temperatura-Entropía) aplicado a una central geotérmica. 78

6.1 Concepto original de HDR. 82
6.2 Diagrama de un EGS. 84
6.3 Sistema de control de inyección en zona de interés mediante tapón de mortero y obturador inflable. 87
6.4 Uso de materiales de aislamiento zonal térmicamente degradables (TZIM). 88
6.5 Representaciones esquemáticas de la degradación en función del tiempo para dos compuestos TZIM. 89
6.6 Operación en el varillaje del pozo de perforación del pozo de *Kola*. 90

7.1 Concentración de CO_2 en fluidos geotérmicos, en función de la temperatura del yacimiento. . . 93

8.1 Intercambiadores geotérmicos horizontales extendidos en un terreno diáfano. 102
8.2 Intercambiadores geotérmicos horizontales, tipo *Slinky*, extendidos en un terreno diáfano. . . . 102
8.3 Arquetas y distribuidores horizontales. 102
8.4 Intercambiadores geotérmicos *Slinky* plano dispuestos en el fondo de la zanja. 103
8.5 Intercambiadores geotérmicos lineales dispuestos en zanja. 103
8.6 Intercambiadores *Slinky* planos aprovechando las tres superficies de una zanja. 103
8.7 Esquema de dos pozos de extracción de agua en un acuífero libre. 107
8.8 Esquema de dos pozos de extracción de agua en un acuífero confinado. 107
8.9 Definición de altura hidráulica o piezométrica. 109
8.10 Experimento de *Darcy*. 109
8.11 Esquema de sistema geotérmico de muy baja temperatura abierto ORGS. 116
8.12 Esquema de sistema geotérmico de muy baja temperatura abierto ATES. Modo calefacción. . . . 116
8.13 Esquema de sistema geotérmico de muy baja temperatura abierto ATES. Modo refrigeración. . . 117
8.14 Colocación de un intercambiador helicoidal en un sondeo vertical. 118
8.15 Esquema de pozo geotérmico con intercambiador vertical en simple U. 119
8.16 Pozo de agua relleno de grava usado como intercambiador térmico. Sistema pseudo-abierto. . . 125

9.1 Esquema conceptual de la acción de un motor térmico 127
9.2 Esquema conceptual del efecto que produce la bomba de calor 128
9.3 Diagrama de *Clapeyron* del ciclo de *Carnot* para una bomba de calor. 130
9.4 Diagrama temperatura-entropía del ciclo inverso de *Carnot* de una bomba de calor. 130
9.5 Diagrama T-S de ciclo compresivo de gas no-ideal en bomba de calor. 132
9.6 Ejemplo de diagrama de *Mollier* de un refrigerante genérico en bomba de calor. 132
9.7 Esquema de funcionamiento de una bomba de calor simple. 135
9.8 Esquema de funcionamiento de una bomba de calor simple con válvula de cuatro vías. 136
9.9 Imagen de válvula de cuatro vías para bomba de calor. 137
9.10 Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica simple. 138
9.11 Esquema constructivo de un intercambiador térmico de placas. 139

A.1 Esquema conceptual del uso de pozos canadiense. 143
A.2 Recuperador de calor. 143

A.3 Sistema de tubería, en construcción, de intercambiadores tierra-aire. 144

Índice de tablas

1.1 Parámetros plausibles de la Ecuación (1.7) que definen las gráficas de la Figura 1.10 y de la Figura 1.11. 14

2.1 Cantidades aproximadas de emisiones de químicos Tm/año por cada 100 MW generados. 38
2.2 Nucleidos (isótopos) estables y su abundancia. 42

3.1 Algunas aplicaciones de la energía geotérmica de uso directo. 53

4.1 Sondeo 1 - Diámetros de perforación y revestimiento 63

6.1 Superficie de las fracturas rectangulares que se han propagado a la distancia indicada desde un pozo. 87

7.1 Muestra de concentración de gases “no condensables” de varias plantas geotérmicas al rededor del mundo. 95

8.1 Rangos de la conductividad hidráulica k y la permeabilidad intrínseca $\hat{k}$ para algunos materiales naturales. 111

9.1 Clases de seguridad y su determinación en función de la inflamabilidad y toxicidad. 134
9.2 Listado de los refrigerantes secundarios más empleados en industria. 140

Esta página está en blanco intencionalmente.

Fundamentos

Esta página está en blanco intencionalmente.

1 Introducción

1.1 ¿Qué es la geotermia?

1.1 ¿Qué es la geotermia? . . 3
1.2 Leyes de transferencia . . 4
1.3 Efecto del Sol 5
1.4 La atmósfera y los océanos 6
1.5 Formación de la Tierra . . 7
1.6 Estructura de la Tierra . . 8
1.7 Fuentes de calor 12
1.8 Distribución térmica . . . 13
1.8.1 Anomalías térmicas 15

Cuando, en los medios de comunicación y redes sociales, se habla de geotermia, se suelen escuchar términos como: sostenibilidad, energía alternativa, energía verde y otros similares. Pero, ¿qué es realmente la geotermia?

Definición de geotermia

El diccionario de la Real Academia Española de la lengua contiene dos acepciones para el término geotermia [1]:

Geotermia (De *geo-* y *-termia*)

1. f. Conjunto de los fenómenos térmicos internos del globo terrestre.

2. f. Estudio científico de la geotermia, considerada como una fuente de energía.

Por tanto, el término geotermia se puede emplear para referirse al calor interno de la Tierra, a la fuente de energía y a la tecnología asociada para su aprovechamiento.

Energía geotérmica

"*La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie de la corteza terrestre*".
— Definición alemana en la Guía de energía geotérmica VDI 4640 [2].

Si se profundiza en el interior del planeta, se puede comprobar que, una vez alcanzados los primeros 15 m de profundidad, aproximadamente, se observan dos fenómenos interesantes: por un lado, la temperatura del suelo, para una cota dada, se vuelve invariable con respecto a las fluctuaciones climáticas de la superficie. Y, en segundo lugar, se percibe un aumento progresivo de la temperatura a medida que la profundidad se incrementa. Este último fenómeno es de vital importancia en minas, túneles y cavidades profundas. Es necesario el empleo de un potente sistema de aire acondicionado, además de los sistemas de ventilación habituales en espacios subterráneos. Por tanto, se constata la existencia de un gradiente térmico ϕ, constante, denominado gradiente geotérmico, y cuyo valor promedio es de 0.03 K/m [3]. Se estudiará, más adelante, el origen de este calor terrestre y su distribución; pero primero, es necesario repasar los mecanismos de transferencia de calor en el entorno.

Cabecera: Fotografía de la erupción del volcán *Raikoke*, en las Islas *Kuriles*, desde la Estación Espacial Internacional el 22 de junio de 2019. Fuente: *NASA Earth Observatory*.

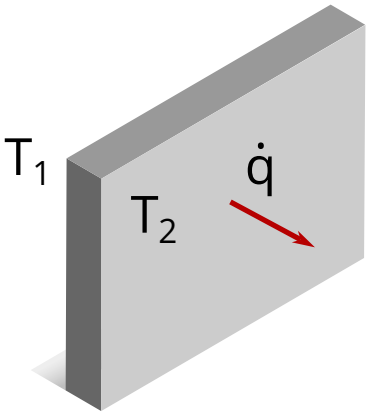


Figura 1.1: Conducción térmica. La diferencia de temperaturas entre ambos lados de la placa (T_1 y T_2) hace que surja un flujo de calor por unidad de superficie en función del tiempo $\dot{q}$. Fuente: los autores.

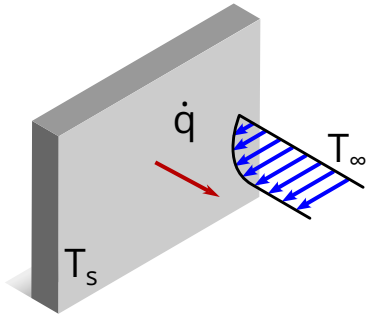


Figura 1.2: Convección térmica debido a una corriente de fluido. La capa limite del fluido (en azul) produce un flujo de calor $\dot{q}$ debido a la diferencia de temperaturas de la superficie (T_s) y la temperatura del fluido distante (T_∞). Fuente: los autores.

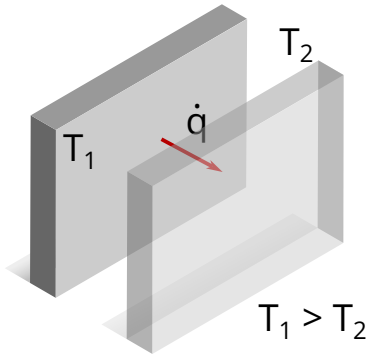


Figura 1.3: Radiación térmica. Se produce un flujo de calor neto $\dot{q}$ entre dos objetos, debido a la diferencia de temperaturas entre ellos. El flujo de calor que emite cada objeto es proporcional a su temperatura elevado a la cuarta T^4. Fuente: los autores.

1.2 Leyes de transferencia térmica

Según la física clásica, existen tres mecanismos para la transferencia de calor. Añadiendo la ley de la difusión térmica, queda definido matemáticamente el problema de la transferencia de calor de forma analítica [4].

Mecanismos de transferencia de calor

Conducción (Ley de *Fourier*) - Figura 1.1

$$\dot{q} = -k\nabla T \quad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.1}$$

Convección (Ley de enfriamiento de *Newton*) - Figura 1.2

$$\dot{q} = h(T_s - T_\infty) \quad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.2}$$

Radiación (Ley de *Stefan-Boltzmann*) - Figura 1.3

$$\dot{q} = \varepsilon\sigma({T_1}^4 - {T_2}^4) \quad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.3}$$

Ley de la difusión térmica

$$\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\dot{q}}{k} + \nabla^2 T \quad [\mathrm{K/m}] \tag{1.4}$$

Las tres primeras ecuaciones definen los posibles modelos de flujo de calor. Mientras que la ecuación (1.4) particulariza el problema, integrando los flujos de energía térmica dentro de un único sistema. De esta manera, se puede calcular la temperatura en un punto a lo largo del tiempo. Como veremos más adelante, las ecuaciones presentan una aparente simplicidad. Cuando, en realidad, solo pueden resolverse de forma analítica en problemas muy sencillos.

No obstante, la metodología de estudio sigue siendo válida. Experimentalmente, se sabe que el interior del planeta está más caliente que la superficie, y el siguiente paso es averiguar por qué. En mediciones de campo, se ha constatado que existe un flujo de calor hacia la superficie. Su valor suele situarse entre 48.10 $\mathrm{mW/m^2}$ y 72.15 $\mathrm{mW/m^2}$ [5], tal y como se muestra en la Figura 1.4.

Como la temperatura de la atmósfera se encuentra dentro de un rango de valores más o menos estables, dependientes del clima de cada región, ese flujo de calor se pierde necesariamente en el espacio exterior. Y, como fuera de la atmósfera se encuentra en un estado de casi vacío total, el único mecanismo por el cual se puede disipar calor fuera del planeta es mediante radiación, según la ley de *Stefan-Boltzmann* (1.3).

Se han publicado numerosas teorías sobre el origen de la formación del Sistema Solar, en general, y de la Tierra, en particular. Siendo los planetas interiores de naturaleza rocosa, mientras que los más grandes y exteriores son gaseosos. Según las últimas teorías en vigor, en el momento de escribir este texto, el proceso de formación del sistema solar fue largo y violento. Sufriendo, durante la última etapa de su formación, el bombardeo de numerosos meteoritos. Estos cuerpos rocosos se mueven a enormes velocidades y, al chocar con un planeta, liberan toda su ener-

gía cinética en forma de calor. Debido a esto, la Tierra sufrió la fusión completa de su superficie por este motivo.

Como se ha visto, según la ley de *Stefan-Boltzmann* (1.3), la emisión de calor por radiación depende de la temperatura del emisor elevada a la cuarta potencia. De esta forma, cuanto más caliente está un objeto, emite mucha más energía en forma de calor. Una vez enfriada la corteza y solidificada de nuevo, las pérdidas de calor se reducen drásticamente. Adicionalmente, la existencia de una atmósfera y, por tanto, de un sistema climático, hace que el calor del Sol minimice estas pérdidas al atemperar aún más la superficie de la Tierra.

Sin embargo, si consideramos la edad de la Tierra, estimada en unos 4500 millones de años [6], el planeta debería haberse enfriado por completo para convertirse en un planeta geológicamente muerto. Por tanto, es lógico pensar que existen otras fuentes de calor que contribuyen a mantener el calor en el subsuelo [5].

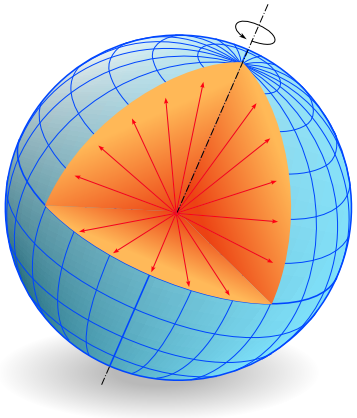


Figura 1.4: Flujo de calor terrestre hacia la superficie. Fuente: los autores.

1.3 Efecto de la radicación solar

La historia de la formación del planeta ha sido violenta y tumultuosa, pero una vez que la corteza terrestre se solidificó y se formaron los océanos de la Tierra, la temperatura de la superficie descendió y se estabilizó. Esta disminución y la presencia de una cantidad moderada de gases de efecto invernadero permitieron una temperatura media adecuada para la vida en la Tierra. En otros planetas interiores del Sistema Solar, como Venus, la cantidad de gases de efecto invernadero, una presión 92 veces la de la Tierra y una velocidad de rotación 243 veces menor [7], hace que la temperatura media ronde los 465 °C frente a los 15 °C de la Tierra. A esa temperatura, el plomo está en estado líquido. No obstante, la temperatura media de la Tierra o de los demás planetas no tiene relación con el balance energético existente entre el Sol y los planetas que orbitan a su alrededor.

La única fuente de energía exterior, con algún efecto térmico sobre el planeta, es la radiación proveniente del Sol. El balance energético terrestre con el Sol se mantiene equilibrado. El planeta retorna al espacio la misma energía que recibe del Sol. Según se aprecia en la Figura 1.5, un tercio de la energía procedente del Sol, en forma de radiación electromagnética, es reflejada hacia el exterior por las nubes y la superficie del planeta. De forma que la energía efectiva que se queda en el planeta es el 67% de la procedente del Sol. Siendo absorbida por la atmósfera y la superficie terrestre [8]. Durante la noche, la totalidad de esta energía absorbida durante las horas de luz se emite de vuelta al espacio en forma de radiación infrarroja.

En caso de que la radiación solar aumente, debido a una mayor actividad termonuclear de nuestra estrella, la Tierra emitirá una mayor cantidad de radiación infrarroja durante la noche, equilibrando el sistema [8]. Si se produce una ocultación temporal de la luz solar, por ejemplo, por erupciones volcánicas que cubren las capas altas de la atmósfera con ceniza, la temperatura de la Tierra descenderá a corto plazo. Sin embargo, al tener una superficie más fría, el suelo emitirá una menor cantidad de radiación infrarroja por la noche. En épocas de glaciación, el planeta

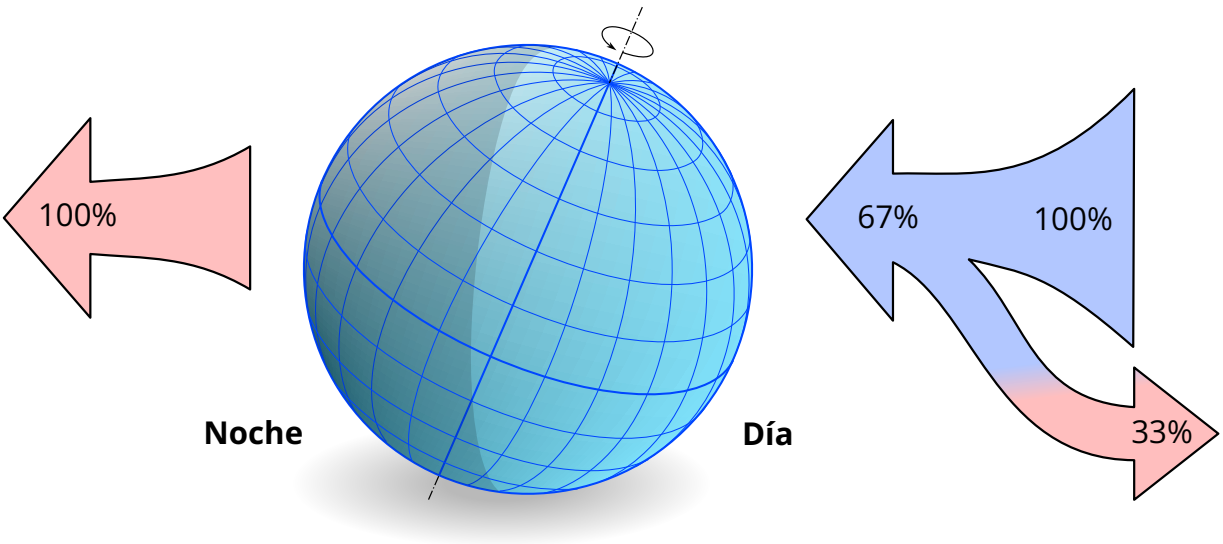


Figura 1.5: Balance de energía entre el Sol y la Tierra. Mientras el Sol aporta energía a la Tierra, durante el día, aproximadamente un tercio de esta energía es reflejada hacia el espacio. La parte opuesta del planeta emite la totalidad de la energía absorbida durante el día anterior, en forma de radiación infrarroja. El resultado es un balance de energía cero. Fuente: los autores.

se cubre parcialmente de hielo, se refleja una mayor cantidad de energía hacia el exterior debido al efecto albedo y, por tanto, también disminuye la emisión de radiación infrarroja, volviendo a alcanzar el equilibrio. Así pues, la temperatura media de la Tierra no depende del balance energético entre la Tierra y el Sol, que se equilibra constantemente, sino de la climatología.

La energía geotérmica, que es emitida desde el interior del planeta en forma de un flujo constante de calor, como se ha visto en la Figura 1.4, es una cantidad pequeña de energía en comparación con la radiación solar incidente [8]. También se expulsa al espacio exterior en forma de radiación infrarroja, al igual que el calor proveniente de las erupciones volcánicas.

1.4 La atmósfera y los océanos

La existencia de una atmósfera estable en la Tierra produce varios efectos sobre el planeta. Los dos efectos más importantes son: la existencia de un clima y la posibilidad de la existencia de grandes masas de agua líquida en la superficie terrestre. A su vez, el agua líquida posibilita la vida y la producción de oxígeno en el planeta. Esto influye en el clima en dos aspectos: la estabilidad de las temperaturas y la distribución de la energía térmica entre zonas distantes de la Tierra.

Desde un punto de vista geológico, la existencia de una climatología permite fenómenos como la erosión, el transporte y la sedimentación de estos materiales. Por tanto, posibilita la existencia de rocas y minerales cuyo origen no es intrusivo ni ígneo. Dinamizando geológicamente la corteza continental.

Sin embargo, desde el punto de vista geotérmico, la existencia de una atmósfera hace que las temperaturas no sufran cambios tan drásticos entre la noche y el día, o entre la solana y la umbría.

El eje de rotación de la Tierra es de aproximadamente 23°27′ respecto a la eclíptica, el plano orbital formado por la Tierra y el Sol. Esto permite la existencia de estaciones al recibir ambos hemisferios diferentes cantidades de energía a medida que el planeta gira alrededor del Sol. Dada la gran capacidad térmica del agua, las corrientes marinas permiten distribuir agua caliente procedente de la zona ecuatorial y agua fría procedente de los polos por todo el planeta. De esta forma, se equilibra y suaviza el clima en las diferentes estaciones.

El oxígeno en la atmósfera es la materia prima para la formación de moléculas de ozono, O_3. En su mayoría, está ligado a los fenómenos tormentosos que se producen durante las erupciones volcánicas. Este ozono protege la superficie de la radiación ultravioleta de alta energía.

Uniendo la existencia de la capa de ozono, una gravedad suficiente y un campo magnético planetario adecuado, la atmósfera terrestre puede perdurar.

1.5 Formación de la Tierra

La estructura de nuestro planeta, su composición y su comportamiento son consecuencia de la formación del Sistema Solar. Existen muchas teorías, pero la más extendida hoy en día es la "Acreción". Partiendo de un disco de gas y polvo de origen nebular que gira alrededor del Sol. Las primeras etapas de la formación de los cuatro planetas interiores de naturaleza rocosa: Mercurio, Venus, Tierra y Marte, comienzan a partir de la condensación de pequeñas partículas de polvo interestelar. Estos guijarros van creciendo, primero debido a fuerzas electrostáticas y, posteriormente, a la gravedad.

La acreción de elementos cada vez mayores permite la formación de planetesimales, o embriones planetarios, que, con el tiempo, darán lugar a protoplanetas y, finalmente, a los planetas interiores y sus satélites. Aunque cada planeta se desarrolló por separado, el crecimiento de la Tierra no puede abstraerse de la evolución del resto del Sistema Solar [6].

Mediante la observación de la formación de otros sistemas solares, del estudio de los meteoritos y de otras técnicas, se pueden inferir las fases de la formación del Sistema Solar. Además, se han desarrollado modelos informáticos que permiten simular el comportamiento de todo el sistema, validando o descartando las posibles teorías y sus variantes.

Según concluyen *Jacobson* y *Walsh* [6], en su artículo *Earth and Terrestrial Planet Formation*: "*La distribución de la masa y la órbita de los planetas interiores, así como las pruebas del bombardeo intenso tardío, descartan los modelos clásicos de formación de los planetas interiores. Los modelos de disco truncado reproducen la distribución de la masa y la órbita de los planetas interiores, en particular la relación de masa entre la Tierra y Marte. De estos modelos, solo el Grand Tack es completamente coherente y compatible con un bombardeo intenso tardío a través del modelo de Niza.*"

Aunque puedan existir algunas dudas sobre ciertos aspectos puntuales, parece que hay pruebas sólidas de que la Tierra ha pasado por varias fases de fusión total o parcial. Se formó hace 4500 millones de años, a

El planeta *Theia*

El nombre *Theia* , o *Tea*, proviene de la mitología griega y corresponde a la titánide madre de *Selene*, que es la diosa lunar. Se le dio este nombre a un protoplaneta cuyo tamaño se estimo parecido al de el actual Marte. Según se cree, se formo en la misma orbita que la Tierra primigenia, en un punto de *Lagrange*, donde los efectos de la gravedad del planeta se anula en relación con los del Sol, separado de esta un arco de 60°. Una vez que alcanzo masa suficiente la acción gravitatoria hizo que perdiera la posición de estabilidad del punto *lagrangiano* chocando con la Tierra primigenia, y formando la Luna con los escombros que no se llegaron a fusionar para formar la nueva Tierra.

partir del disco de gas y polvo nebuloso, tal como se postula en la teoría de la Acreción.

Por su parte, la "teoría del gran impacto" establece que el choque del planeta *Theia* con la Tierra primigenia, entre 70 millones de años y 110 millones de años después, dio lugar a la formación de la Luna a partir de los restos de la colisión y a un aumento en el tamaño de la Tierra.

Figura 1.6: Representación artística de la "teoría del gran impacto". Fuente: NASA/JPL-Caltech

Se estima que en un periodo de entre 4100 millones de años y 3800 millones de años se produjo el denominado "bombardeo intenso tardío" *Late Heavy Bombardment* (LHB), por sus siglas en inglés, que fundió nuevamente la corteza terrestre. Este evento se produjo por el impacto de innumerables meteoritos, los cuales sufrieron alteraciones masivas en sus órbitas debido a la inestabilidad orbital tardía de los planetas gigantes. El LHB refleja la fase final de la acreción de la Tierra [9].

Mediante un estudio de composiciones isotópicas de rutenio y molibdeno, así como características genéticas de las rocas derivadas del impacto lunar, se demuestra que los meteoritos, durante el LHB, se originaron en la región de los planetas interiores. Esto último también justifica que no pueden ser la fuente principal del agua de la Tierra [9].

Por tanto, en la primera fase de formación de la Tierra, el planeta se encontró en estado fundido, lo que hizo que los elementos pesados se hundieran hacia el núcleo del planeta por diferencias de densidad. Posteriormente, y una vez solidificada la corteza, se produjo una nueva fusión parcial a causa del LHB, que permitió que aparecieran de nuevo depósitos de elementos pesados en la corteza terrestre.

1.6 Estructura de la Tierra

La Tierra está formada por una serie de capas de diferentes materiales, y su estudio ha sido realizado principalmente mediante métodos indirectos,

puesto que solo se ha podido llegar hasta unos pocos kilómetros de la corteza terrestre.

El sondeo más profundo, alcanzado hasta la fecha, tiene una cota de −12 262 m, sobre la superficie de perforación. Su construcción se realizó entre mayo de 1970 y 1989, aunque su planificación comenzó en 1962. Perforado en la península de *Kola*, en Rusia, a unos 10 km al norte de la ciudad minera de *Zapolyarny*, cuyo cierre se puede ver en la Figura 1.7.

Figura 1.7: Pozo Kola SG-3, el más profundo de la Tierra (−12 262 m). Situado en la península de *Kola*, Rusia. Fuente: *Alexander Novikov* - Bajo licencia CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=129668124

Por tanto, la única forma de estudiar el interior de la Tierra con la tecnología actual es la sísmica. Se aprovechan las ondas mecánicas que se producen en un terremoto y que son recogidas por unos sensores llamados sismógrafos, colocados en todo el mundo. Estas ondas son las únicas lo suficientemente potentes para atravesar todo el planeta, con la excepción de las explosiones nucleares.

Se producen dos tipos de ondas: las ondas P y las ondas S. Mientras que las primeras atraviesan todo tipo de material, las ondas S no atraviesan los líquidos. Midiendo la refracción de dichas ondas en los diferentes materiales y el retraso de las ondas que atraviesan las diferentes capas, se ha establecido la estructura interna del planeta, así como algunas de sus propiedades.

Tal y como se puede observar en la Figura 1.8 y la Figura 1.9, existen dos formas principales de clasificación de las diferentes capas de la Tierra, ya sea por tipos de materiales o por la reología de dichos materiales, respectivamente.

Según su composición, se divide en corteza, manto y núcleo:

- **Corteza**. Es la capa más superficial de la Tierra. Existen dos tipos de corteza: continental y oceánica. Ambas con diferentes espesores.

  La corteza continental emerge por encima de mares y océanos y posee una potencia de 10 km a 70 km, aunque la media suele estas sobre los 35 km. Siendo su composición bastante heterogénea, en la que predominan los silicatos de aluminio y magnesio. Su parte más profunda está compuesta por rocas ígneas y metamórficas relativamente ligeras, sobre las que aparecen rocas sedimentarias y sedimentos (suelos). Debido a su menor densidad relativa, siempre

cabalga sobre la corteza oceánica en los procesos de subducción de la tectónica de placas [10]. A mayor altura, sobre el nivel del mar, presenta una mayor potencia por debajo de él. Esto hace que el espesor de la corteza varíe mucho más entre las zonas montañosas y las tierras bajas de lo que pueda parecer a simple vista. A modo de ejemplo, en la zona del *Himalaya* la corteza continental pose un espesor de 70 km.

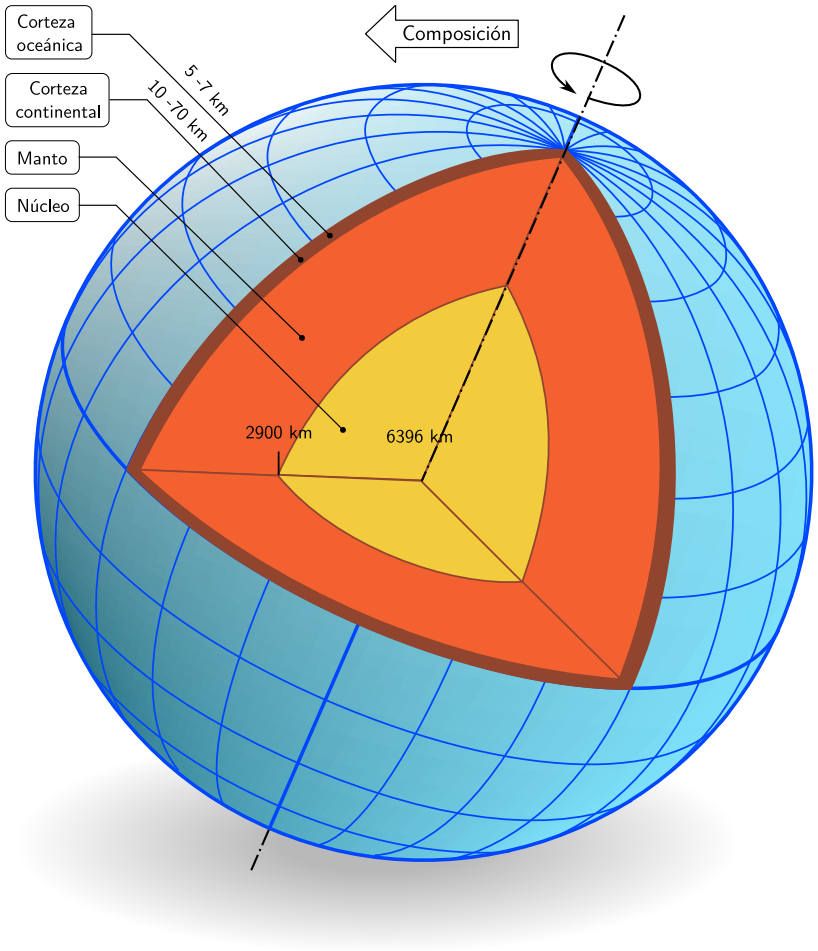


Figura 1.8: Estructura terrestre según su su composición. No está a escala. Fuente: los autores.

La corteza oceánica está formada por rocas relativamente más densas que las de la corteza continental. De origen basáltico efusivo y de color más oscuro que las rocas ígneas de la corteza continental. Presenta un espesor mucho menor de 5 km a 7 km y está cubierta de agua, procedente de mares y océanos.

- **Manto.** Constituye la parte más voluminosa de la Tierra. Su comienzo depende del grosor de la corteza que, como se ha visto, es variable. En todo caso, finaliza a una profundidad de aproximadamente 2900 km. Está formado por rocas aun más densas formadas, principalmente, por silicatos de hierro y magnesio. La temperatura son más elevadas que en la corteza y oscilan en un rango de 1500 °C a 5000 °C.

- **Núcleo.** La parte central y más gruesa del planeta constituido en su mayor parte por hierro y níquel. Contiene además la mayor parte de los materiales pesados que se hundieron desde la superficie durante la formación del planeta. Comienza a una profundidad de

unos 2900 km hasta el mismo centro situado a 6396 km, cuya temperatura se estima en unos 6000 °C.

Si se atiende a la reología del planeta, esta variará con el aumento de la presión y la temperatura a medida que aumenta la profundidad. Se distinguen cinco capas diferenciadas, según sus propiedades reológicas: litosfera, astenosfera, mesosfera, núcleo externo y núcleo interno [10]:

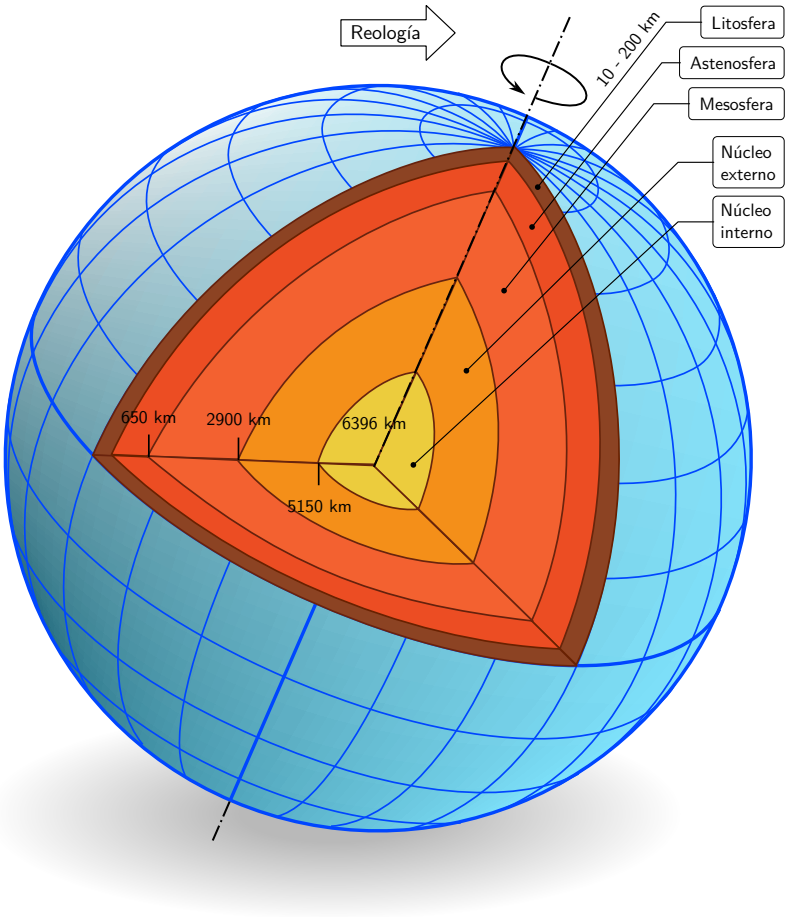


Figura 1.9: Estructura terrestre según su su reología. No está a escala. Fuente: los autores.

- **Litosfera.** Es la capa más externa, formada por la corteza y parte del manto. Es sólida y rígida, y por tanto, tendente a romperse y formar "placas tectónica", que flotan sobre la capa subyacente denominada astenosfera. La litosfera posee una potencia variable que oscila de 10 km a 200 km.

- **Astenosfera.** Es la capa sobre la que descansan las placas tectónicas que componen la litosfera. Esta capa, que presenta un comportamiento mecánico dúctil, está cerca del punto de fusión sin alcanzarlo. Llega hasta una profundidad de 650 km. A medida que aumenta la presión con la profundidad, la plasticidad del material disminuye.

- **Mesosfera.** La mesosfera comprende desde los 650 km a 2900 km. Presenta un comportamiento más rígido que la astenosfera, pero sin llegar a la rigidez de la litosfera. Además, su plasticidad es más homogénea que la que presenta la astenosfera.

- **Núcleo externo.** En esta zona se produce el campo magnético planetario producido por la circulación de una masa de níquel y

hierro en estado fundido y la rotación de la Tierra. Se extiende en la franja comprendida entre los 2900 km a 5150 km

- **Núcleo interno**. Llegando a los 5150 km la presión hace que el núcleo interno sea solido, aunque de hecho, la temperatura sea superior a la del núcleo externo, alcanzando los 6000 °C en el centro del planeta.

1.7 Fuentes de calor geotérmico

Como se ha estudiado en el Apartado 1.5, la formación del planeta fue un proceso largo y violento, durante el cual el planeta sufrió fusiones totales y parciales. Se enumeran a continuación las fuentes de calor que mantienen el interior de la Tierra caliente en la actualidad. Siendo las principales, según *Boden* [10], las tres primeras de la siguiente lista:

- El calor residual, procedente de la formación del planeta y de los múltiples eventos, violentos, posteriores. Como el planeta está situado en el espacio interplanetario,el único mecanismo de transmisión de calor es el de radiación, que se rige por la ley de *Stefan-Boltzmann* (1.3). Según esta ley, la emisión de energía depende de T^4. La emisión de calor al espacio se redujo drásticamente cuando la superficie de la corteza se enfrió y se formaron mares y océanos. Además, la roca de la corteza es un conductor de calor mediocre, con un coeficiente de conductividad térmica que no suele superar los 2 W/mK. Por tanto, actúa como aislante, manteniendo el interior del planeta caliente.

- La desintegración radiactiva de elementos inestables produce calor como efecto secundario. Estos elementos son en su mayor parte uranio, torio, rubidio y potasio. La mayor parte de los elementos más pesados se encuentran en el núcleo, debido a la segregación gravitatoria durante la formación del planeta. Los más ligeros están en la corteza por el mismo motivo. Sin embargo, también existen elementos pesados en la corteza debido a la LHB, como se vio en el Apartado 1.5.

  Por otra parte, *Glassley* [11], postula que parte de estos elementos pesados contenidos en el manto son conducidos hasta la corteza, propiciando su concentración a través del vulcanismo y de plumas de magma en "puntos calientes" de la corteza. El motivo es que sus grandes radios atómicos son menos compatibles con las estructuras de los minerales que se suelen formar en el manto. Esto no significa que no existan en el manto, sino que su concentración es menor que en la corteza. Debido al gran volumen del manto, se estima que el aporte de calor por desintegración nuclear natural es igual al calor geotérmico de origen residual [10]. Mientras que el 60% del calor en la corteza continental se debe a la desintegración radioactiva.

- La presión gravitacional es la menor importante de las tres primeras. Todo cuerpo sometido a presión se calienta y al despresurizarse se enfría. Aunque es un efecto más acusado en gases, también se produce en sólidos a gran presión. El calor producido en el interior del planeta por la compresión se acumula en profundidad. Lo mismo ocurre en grandes fallas de la corteza, donde la presión no es

de origen gravitacional sino de origen tectónico. En este caso se puede producir una fusión parcial de la roca.

- Por último, en la superficie que separa el núcleo externo del núcleo interno de la Tierra se forman cristales metálicos de hierro-níquel. Este crecimiento del núcleo interno del planeta, debido a la cristalización del núcleo externo, es un proceso exotérmico. La entalpía de cristalización se libera al medio en forma de calor, ya que la estructura ordenada del cristal posee una energía interna menor que la masa fundida de la que proviene.

Estas fuentes de calor, en su conjunto, mantienen el planeta geológicamente vivo. Creando y destruyendo placa continental debido a los movimientos convectivos del material dúctil del manto, sobre el cual flotan las placas tectónicas. Como veremos en el Apartado 1.8.1, los movimientos lentos y constantes de los bordes entre placas constituyen el origen de la mayoría de las anomalías geotérmicas de la corteza continental.

1.8 Distribución térmica

Estudiando la arquitectura y el movimiento relativo de las placas tectónicas, se puede concluir que la transferencia de calor dentro de la corteza continental se produce, principalmente, mediante el mecanismo de la conducción térmica, definido por la ley de *Fourier* (1.1). A gran escala y en estado estacionario, se puede simplificar considerando una conductividad térmica constante y la aparición de un gradiente geotérmico que define la temperatura en la corteza en función de la profundidad. Dicha simplificación, junto con las condiciones de contorno, queda de la siguiente manera [12]:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + A = 0 \quad [\mathrm{W/m^3}] \tag{1.5}$$

$$\text{Condiciones de contorno} \begin{cases} T(z=0) = T_0 & [^\circ\mathrm{C}] \\ k\dfrac{\partial T}{\partial z}(z=d) = \dot{q_m} & [\mathrm{W/m^2}] \end{cases} \tag{1.6}$$

Siendo k la conductividad térmica media de la corteza continental, A la producción de calor en la propia corteza, T_0 la temperatura media en la superficie, d el espesor de la corteza y $\dot{q_m}$ el flujo de calor procedente del manto. Todos estos parámetros se consideran constantes. Con la ayuda de la ley de la difusión térmica (1.4), la temperatura, en función de la profundidad z dentro de la corteza, se define según la ecuación (1.7).

$$T(z) = \frac{-A}{2k}z^2 + \frac{(\dot{q_m} + Ad)}{k}z + T_0 \quad [^\circ\mathrm{C}] \tag{1.7}$$

Para unos parámetros dados, reflejados en la tabla Tabla 1.1, la ecuación (1.7) se representa gráficamente en la Figura 1.10.

La representación gráfica de la Ecuación (1.7) con los parámetros y constantes contenidos en la Tabla 1.1 da como resultado dos parábolas, cuyas

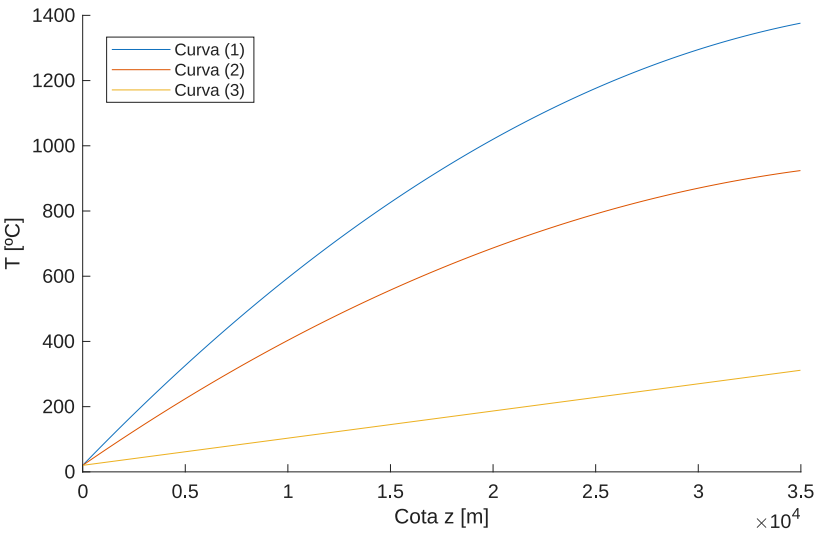


Figura 1.10: Representación gráfica de tres curvas de distribución de temperatura de la corteza terrestre, con una potencia estimada de 35 km. Las curvas (1) y (2) presentan una fuente de calor interna, mientras que la curva (3) tan solo conduce el flujo de calor procedente del manto. T_0 tiene un valor, en este caso de 20 °C. Las curvas son una representación gráfica de la ecuación (1.7), cuyos parámetros están indicados en la Tabla 1.1. Fuente: los autores.

Tabla 1.1: Parámetros plausibles de la Ecuación (1.7) que definen las gráficas de la Figura 1.10 y de la Figura 1.11. Fuente: los autores.

Parámetros de las curvas térmicas de la Figura 1.10			
Curva (1)	Curva (2)	Curva (3)	Unidades
$A = 3 \times 10^{-6}$	$A = 3 \times 10^{-6}$	$A = 0$	$[W/m^3]$
$\dot{q_m} = 25 \times 10^{-3}$	$\dot{q_m} = 25 \times 10^{-3}$	$\dot{q_m} = 25 \times 10^{-3}$	$[W/m^2]$
$k = 2$	$k = 3$	$k = 3$	[W/mK]
Potencia de la corteza terrestre $d = 35\,000$ m			

curvaturas y rango de temperatura dependen de la relación entre dichos parámetros. La curva (3) se transforma en una ecuación lineal al anularse el valor de A, presentando una pendiente mucho menor. En este caso, se trata de ejemplos que representan varias distribuciones de temperatura para una potencia de corteza continental de 35 km. Este espesor es el promedio, pero varía de unas zonas a otras, situándose en un rango de 10 km a 70 km. Es necesario recalcular las curvas en cada zona de la corteza, considerando todos los parámetros, además del espesor de la corteza en esa zona.

Son simplificaciones y, por tanto, dan una idea aproximada de la temperatura a la que se encuentra el terreno a una profundidad dada. Sin embargo, en la práctica, estos valores pueden sufrir desviaciones importantes debido a que no se cumplen las suposiciones iniciales, como la conductividad constante del terreno u otras.

Este tipo de problemas ya se observó en la perforación del pozo de *Kola*, mostrado en la Figura 1.7. A modo de ejemplo, en este sondeo se había predicho encontrar un cambio de materiales según los estudios previos, al estilo de la discontinuidad de *Mohorovičić*. Sin embargo, al llegar el momento previsto, no se encontró ningún cambio en el material.

Las mismas tres curvas se pueden observar en la Figura 1.11, pero esta vez mostrando solo los tres primeros kilómetros. A simple vista, se observa que, siendo las mismas curvas, se pueden asimilar a rectas para este rango de profundidad. Esto permite concluir que, en el rango de profundidades en el que se trabaja en geotermia, se puede considerar el gradiente geotérmico como constante, sin cometer errores apreciables. Además, esta simplificación es consistente con las medidas empíricas en el interior de sondeos a estas profundidades. Estas medidas permiten saber cuál es la

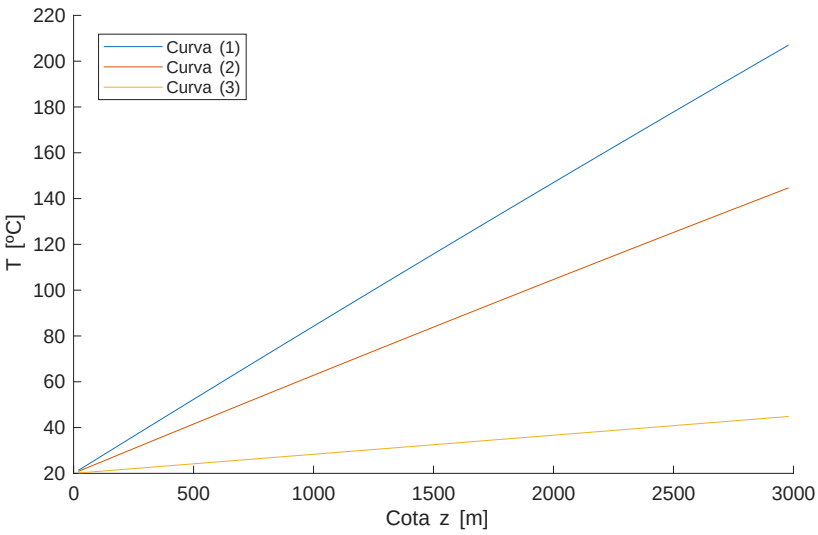


Figura 1.11: Representación gráfica de las tres curvas de la Figura 1.10. Aunque la potencia de la corteza continental sigue siendo de 35 km, tan solo se representan los primeros 3000 m. Fuente: los autores.

pendiente de la curva real, asimilada a una recta en los primeros kilómetros, y facilitan la obtención de algún dato desconocido por comparación con la Ecuación (1.7).

En la representación de estas gráficas no se han considerado los 20 primeros metros, puesto que, hasta que se llega a esa profundidad, se hace patente la influencia climática estacional local. T_0 es la temperatura media de la superficie, pero en realidad solo se puede garantizar esta temperatura a una profundidad de entre 15 m a 20 m. En todo caso, no tiene demasiada importancia si se estudia el fenómeno a escala planetaria. Este y otros aspectos se estudiarán en profundidad más adelante, cuando se trate la geotermia de temperatura ambiente.

1.8.1 Anomalías térmicas

El flujo de calor procedente del interior de la Tierra suele presentar un valor medio de aproximadamente 0.087 W/m^2 [11]. Estimándose un total de 8.368×10^8 TW al año, correspondiente a toda la superficie del planeta [5]. Las zonas donde se perciben, a simple vista, la existencia de anomalías térmicas son las volcánicas. Donde suelen aparecer procesos asociados, como fumarolas, géisers o pozas de lodo caliente. El calor medio evacuado, debido a las erupciones volcánicas, se ha estimado anualmente en 25.104×10^5 TW y una cantidad similar en los procesos asociados no eruptivos [5].

Según la teoría de *Alfred Wegener* de 1929, que no fue aceptada mayoritariamente hasta la década de 1960, los continentes y cuencas oceánicas son móviles [11]. Sus estudios han dado lugar a lo que actualmente se conoce como la tectónica de placas. Se producen anomalías térmicas en zonas concretas debido a la tectónica de placas y a la existencia de "puntos calientes".

Las placas tectónicas son fragmentos de litosfera oceánica, continental o una mezcla de ambas. Flotan sobre la astenosfera y se mueven sobre ella debido a las corrientes convectivas de material plástico, tal y como se muestra en la Figura 1.12.

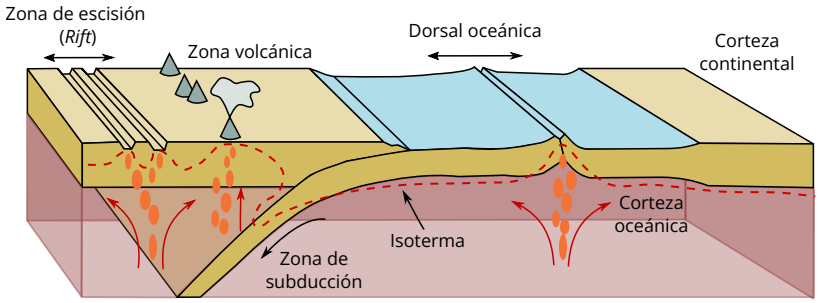


Figura 1.12: Diagrama esquemático que muestra la configuración de los principales elementos que componen las estructuras tectónicas de placas. Las flechas indican el movimiento local del material convectivo del manto. Las masas lenticulares rojizas representan los cuerpos de magma a medida que ascienden desde el manto hacia la corteza. Obsérvese que la mayor parte del magma que se encuentra en la litosfera se localiza en las dorsales, los volcanes de las zonas de subducción o las zonas de *Rift*. Fuente: [11] Modificado.

Un punto caliente es una "pluma" de magma procedente del manto que llega hasta la corteza terrestre , en una localización lejos del borde de la placa tectónica [13]. Las causas de estas fuentes magmáticas localizadas son objeto de debate y pueden ser muy diversas [11]. De manera que la placa se mueve y la pluma de magma permanece en la misma localización. Algunos ejemplos son: Islandia, Hawái, las Islas Canarias, etc. No solo se producen en la corteza oceánica, sino que, en ocasiones, lo hacen en la corteza continental, como es el caso de *Yellowstone*, en el estado de *Montana* (EE. UU.).

Este tipo de vulcanismo se denomina "intraplaca" y presenta un tipo de magmatismo alcalino de tipo basáltico. En este caso, el magma sube rápidamente hasta la superficie, disipando poco calor a las rocas contiguas. Debido a esta peculiaridad, normalmente solo se podría aprovechar geotérmicamente si el vulcanismo es muy seguido y frecuente, o si existe una red amplia de fracturas que permite la formación de bolsas de magma cercanas a la superficie. En otras ocasiones, se presentan las condiciones para que un vulcanismo antiguo y extinto eleve los niveles térmicos de una zona, permaneciendo así hasta el día de hoy.

No obstante, la mayor parte de las anomalías térmicas se producen, sobre todo, por el movimiento relativo de los bordes de las placas. Existen tres movimientos relativos entre placas, pero solamente dos de ellos producen vulcanismo:

- **Convergencia de placas.** Si dos placas chocan entre sí, se produce un cabalgamiento. De forma que la placa más pesada se hunde por debajo de la más ligera y la levanta, mediante un proceso de subducción. En este proceso se producen grandes presiones, aumento de calor y la destrucción de la placa descendente. Se produce magma de tipo calcoalcalino.

  En la Figura 1.12 se observa que en la parte superior de la subducción de una placa oceánica bajo una continental, pero también existe subducción entre placas continentales. Esto sucede en la subducción entre la placa India que está chocando con la placa euroasiática. El resultado es que la placa India está desapareciendo poco a poco y el *Himalaya* aumenta de altura.

- **Divergencia de placas.** Si dos placas se separan, la disminución de presión hace que material fundido procedente de la astenosfera ascienda hasta la superficie, como en el caso de las dorsales oceánicas. Para que este proceso sea posible, se debe destruir corteza en el lado opuesto de la placa. De no ser así, la superficie de la litosfera

aumentaría, en valor neto, lo que es imposible. Se produce magma de tipo toleítico.

Del mismo modo existe divergencia de placas continentales. Todo comienza con la escisión de una placa continental en dos subplacas. La divergencia da lugar a una zona de *Rift*, formándose grietas y un adelgazamiento progresivo de la litosfera y por cuyos bordes aflora material fundido procedente de la astenosfera. Con el tiempo, la depresión se cubre de agua procedente de los mares u océanos cercanos. Este proceso es el que se está produciendo en el Gran Valle del *Rift* africano, de unos 3000 km de longitud. Dando lugar a la placa Nubia y a la Somalí, y la aparición de un nuevo mar en un tiempo estimado de entre 5 millones de años a 10 millones de años.

- **Rozamiento entre placas**. Este tipo de limite entre placas también recibe el nombre de limite transformante. Se produce en zonas fronterizas entre placas con movimiento de fricción entre ambos bordes. El mecanismo es similar al de las fallas. Se genera algo de calor por rozamiento y sobre todo terremotos, cuando la energía mecánica acumulada se libera de manera brusca.

Las anomalías térmicas, ligadas o no a la tectónica de placas, suelen estar asociadas con la aparición de magma en casi todos los casos. El magmatismo favorece la transmisión de calor, puesto que, al encontrarse la roca en estado fundido, se añade un segundo mecanismo de transferencia de calor, además de la conducción: la convección (1.2).

En el caso de la subducción, cuando se produce una convergencia de placas, la presión hace que determinados minerales procedentes de las rocas de la litosfera se deshidraten. El agua que se libera actúa como fundente, bajando el punto de fusión de la roca y generando magma.

La descompresión de la roca también puede hacer que se funda más fácilmente, como ocurre en las zonas de divergencia de placas, en dorsales y zonas de *Rift*. En el caso de los puntos calientes, el material circundante se funde debido a la alta temperatura de la pluma de magma ascendente.

Con respecto a las zonas de rozamiento de placas, algunos ejemplos son la *Falla de San Andrés* en *California* (EE.UU.), la falla de *Anatolia* en el norte de Turquía o la falla del Mar Muerto. Permiten la circulación de agua a grandes profundidades, lo que suele producir aguas termales. No se produce magma, aunque hay pruebas isotópicas de que pueden pasar fluidos procedentes del manto que contribuyen al debilitamiento de las fracturas a profundidades sismológicas [14].

Existe un tipo de anomalía térmica que carece de vínculos directos con la tectónica de placas ni con los puntos calientes. Se da cuando rocas ricas en elementos radiactivos, normalmente graníticas, se encuentran en un entorno geológico que las aísla durante largos períodos de tiempo [11]. Este tipo de anomalías es muy apreciado en los sistemas geotérmicos mejorados o *Enhanced Geothermal Systems* (EGS). Que emplean la técnica de roca seca caliente o *Hot Dry Rock* (HDR) para mejorar el yacimiento.

Todas estas anomalías térmicas, con la tecnología actual y las condiciones adecuadas, permiten rendimientos termodinámicos suficientemente altos como para ser aprovechados en la producción de energía eléctrica. En su defecto, se puede emplear para su aprovechamiento directo en forma de calor, como se verá con más detalle en el Capítulo 2.

Por último, existen unas zonas que no presentan anomalías térmicas, sino de porosidad a una profundidad elevada. No están localizadas en las zonas estudiadas, sino en grandes cuencas sedimentarias. El material acumulado en el interior de un valle es muy poroso, ya que proviene del transporte de procesos erosivos y no de rocas plutónicas o volcánicas.

La alta porosidad a una profundidad de 3000 permite la existencia de acuíferos de agua caliente. A esa profundidad, con un gradiente promedio de 0.03 °C/m, se pueden alcanzar temperaturas próximas a los 90 °C sin necesidad de que exista una anomalía térmica por encima de la media.

Existen zonas como el centro de Francia o el Levante español, donde abundan estas formaciones geológicas, y donde se pueden aprovechar para un uso directo del calor generado a esa profundidad.

Una variante de este tipo de yacimientos se encuentra a presiones más elevadas de las que le corresponden por presión hidrostática de 0.1 bar/m, pero no llega a alcanzar la presión litoestática, cuyo valor medio es de 0.385 bar/m. Esta anomalía de presión suele aparecer a una mayor profundidad, alrededor de 6000 m, y por diversos motivos. Uno de ellos es que parte de la presión litoestática se transfiere al fluido del acuífero. Esto genera posibles hundimientos si se extrae el agua caliente, puesto que actúa como "fluido hidráulico", al soportar parte de la carga de las rocas que confinan el acuífero. Al encontrarse a una mayor profundidad, también posee una temperatura mayor (unos 150 °C a 5000 m de profundidad[1]). En estos casos, se aprovecha la presión del agua y una mayor temperatura operativa.

1: En el momento actual, la profundidad límite para que el yacimiento sea rentable es de 5000 m, en el caso de alta temperatura, y de 3000 m, en el caso de uso directo

2 Yacimientos geotérmicos

2.1 Definiciónes

En el mundo de la geología, la minería y las materias primas de origen mineral, existe una serie de conceptos básicos que permiten a los ingenieros, geólogos y economistas expresarse con precisión, evitando ambigüedades. Estos conceptos están relacionados, entre otros, con las anomalías minerales, su explotabilidad y transformación en un activo económico.

En el campo de la geotermia se aplican los mismos conceptos, aunque a veces puede parecer algo confuso porque se habla de calor y no de minerales. Repasaremos ahora todas estas ideas y las relacionaremos con el aprovechamiento del calor interno del planeta.

- **Anomalía:** En el mundo de las materias primas, una anomalía hace referencia a la aparición de un elemento o elementos que se encuentran en una zona determinada en una concentración atípicamente alta. Es un término relativo a la abundancia de dicho elemento en la corteza terrestre. Por ejemplo, el hierro es un elemento muy abundante en la corteza terrestre con una concentración del 5% de media, o lo que es lo mismo 50 kg por cada tonelada de roca o suelo. En este caso, si en una zona del planeta aparece una concentración muy superior a la concentración media, decimos que es una anomalía. En el caso del oro, el valor medio es de 1.3 mg por cada tonelada de terreno. Y encontrar unos pocos gramos por cada tonelada de roca se considera una anomalía.

  En el caso de la geotermia, como se ha visto en el Capítulo 1, un indicador del flujo de calor procedente del interno de la Tierra, en una zona concreta, es el gradiente geotérmico. El valor medio del gradiente geotérmico es de 0.03 °C/m, por tanto, un valor significativamente mayor se considera una anomalía térmica.

- **Yacimiento:** Es importante la forma en la que el elemento aparece en las zonas de anomalías. Un ejemplo es el aluminio, que siendo también un elemento muy abundante, tan solo se puede extraer, con la tecnología actual, si aparece en forma de bauxita. Por tanto, una anomalía se transforma en yacimiento si es explotable [15]. Aunque la explotabilidad va ligada a obtener un beneficio económico, los limites son más bien ambiguos, y de hecho, dependen del

2.1 **Definiciónes** 19
2.2 **Tipos de yacimientos** . . 21
2.3 **Ley de Minas y geotermia** 22
2.3.1 Aguas termales 26
2.3.2 Recursos de alta entalpía . 27
2.4 **Investigación geotérmica** 29
2.4.1 R. de uso directo 29
2.4.2 R. de Alta temperatura . . 32
2.5 **Metodología** 33
2.5.1 Exploración geológica . . 34
2.5.2 Manantiales 34
2.5.3 Depósitos superficiales . . 39
2.5.4 Geotermometría 40
2.5.5 Estudio de los isótopos . . 42
2.5.6 Exploración geofísica . . . 43
2.5.7 Estudios magnéticos 44
2.5.8 Mapas resistivos 44
2.5.9 Mapas magnetotelúricos . 45
2.5.10 Gravimetría 47
2.5.11 Sismología de reflexión . . 48
2.5.12 Termometría 49

Cabecera: Fotografía de poza de lodo caliente geotérmico en *Fukuoka* (Japón). Fuente: *ben lim* en Unsplash.

modelo económico que se aplique y de las condiciones del mercado en cada momento.

En el mundo de la geotermia se denomina yacimiento una zona donde existe una anomalía térmica y esta es explotable. Como veremos más adelante, esto también depende del desarrollo de la tecnología, como en el caso de los sistemas geotérmicos mejorados (EGS) que convirtió anomalías en yacimientos.

• **Recurso:** Un recurso no es exactamente igual a un yacimiento, y aunque conceptualmente son compatibles, la idea de recurso es más amplia que la de yacimiento. Se define recurso como un bien capaz de proporcionar un beneficio o utilidad al que lo posee [15]. En este caso, un yacimiento geotérmico es, según su naturaleza, un recurso energético renovable.

Ahora bien, si ponemos el foco en la necesidad de cuantificar la explotabilidad de un determinado recurso, es necesario introducir un nuevo concepto llamado "reserva" que veremos a continuación. De forma, que realizando una ampliación en la definición de recurso diremos que: un recurso engloba todos los yacimientos plenamente identificados, los hipotéticos basados en indicios más o menos claros pero sin comprobar y, por último, los recursos especulativos basados en razonamientos y suposiciones, pero sin indicios o pruebas. Aplicando el mismo criterio en geotermia.

Basándose en este nuevo enfoque se desarrollo un diagrama denominado la Caja de *McKelvey* entre la décadas de los 70 y 80 del siglo XX. Dicho diagrama y sus variantes permiten clasificar los yacimientos como recursos y reservas, según la Figura 2.1.

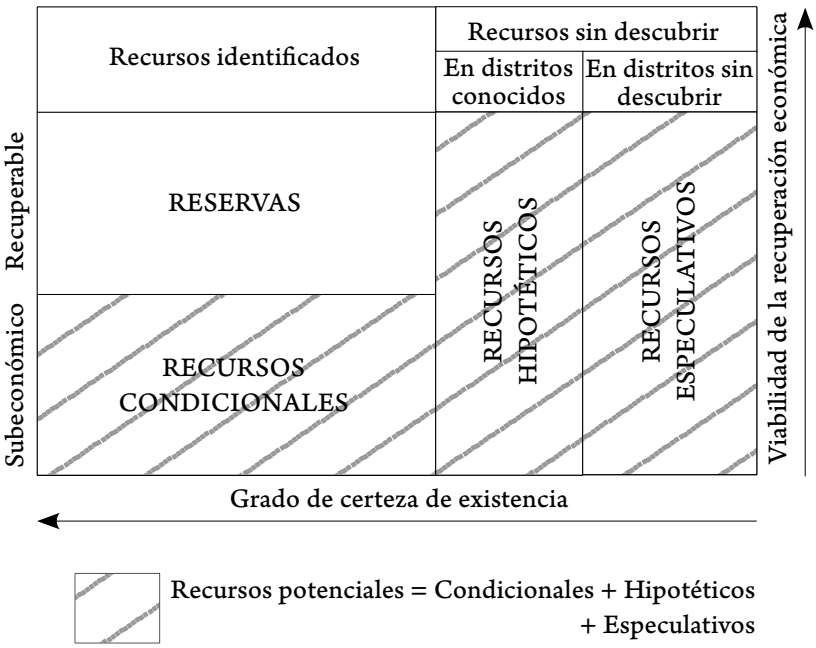


Figura 2.1: El Diagrama de *McKelvey*, conocido como "Caja de *McKelvey*", es una representación gráfica que intenta clasificar los recursos naturales en función de su potencial económico y el nivel del conocimiento que se tiene sobre ellos. Fuente: [16] Adaptado.

• **Reserva:** Las reservas, según *McKelvey* son un tipo de recurso perfectamente identificado y cuantificado, cuya explotación es rentable económicamente en el momento de realizar la valoración [15]. Las condiciones del mercado y el desarrollo tecnológico pueden ha-

cer que las reservas aumenten o disminuyan, pero siempre formaran parte de los recursos.

Las reservas en geotermia se diferencian de las reservas minerales en que las primeras pueden ser renovables mientras que las segundas no lo son en ningún caso.

Esta clasificación no se aplica en la geotermia de temperatura ambiente, puesto que no existe ninguna anomalía térmica. En estos casos, se aprovecha la inercia y la estabilidad térmica del suelo. Lo que permite mejorar el rendimiento de las bombas de calor (BC).

Aunque es cierto que su empleo como fuente de calefacción enfría el suelo, también es cierto que ese calor, en realidad, proviene del Sol y no del calor geotérmico procedente del subsuelo. Esto se debe a que los sondeos geotérmicos de muy baja entalpía raramente superan los 200 m de profundidad, mientras que la acción del Sol llega a los primeros 300 m a 400 m de profundidad.

2.2 Tipos de yacimientos geotérmicos

Una vez definido el concepto de yacimiento geotérmico en el Apartado 2.1, se sabe que debe buscarse una anomalía térmica que pueda ser explotada económicamente. Normalmente, esa anomalía supone valores de flujo de calor provenientes del subsuelo del orden de 10 a 15 veces el flujo de calor medio terrestre. Por tanto, estamos hablando de zonas con un gradiente geotérmico que va de 0.2 °C/m a 0.3 °C/m, siendo el gradiente medio de 0.03 °C/m. Por el momento, no se estudiará si es viable económicamente, sino si se puede aprovechar de alguna manera.

En la actualidad, hay dos tipos de aprovechamiento del calor geotérmico procedente de una anomalía: su empleo directo como fuente de calor y su utilización para generar electricidad. Según el uso que se le dé, las características geológicas buscadas serán distintas, más allá de encontrar una anomalía geotérmica. Existen tres tipos básicos de yacimientos geotérmicos:

Yacimientos geotérmicos
- Alta temperatura
- Baja y media temperatura
- Sistemas geotérmicos mejorados (EGS)

Existen tecnologías que permiten que un yacimiento se pueda emplear, potencialmente, para varios fines, aunque hay muchos factores que pueden inclinar la balanza en un sentido u otro.

- **Alta temperatura:** Estos yacimientos son los que permiten obtener vapor de agua a temperaturas por encima de los 150 °C. Se conoce como yacimiento de "vapor seco", que sube por la tubería por acción de la diferencia de presión. Por tanto, no es necesario un sistema de bombeo. Su geología esta formada por una roca almacén que contiene vapor de agua formado a partir de corrientes subterráneas y calor procedente de una fuente activa de calor situada mas abajo. La roca almacén posee una cubierta impermeable que mantiene el vapor retenido hasta que se perfora.

- **Baja y media temperatura:** En este caso la temperatura esta en un rango desde los 150 °C a 30 °C. Se necesita bombeo para su extracción y posterior reinyección. Se suelen emplear para uso directo del calor o para producir electricidad, mediante tecnología binaria. Su geología es similar a los yacimientos de alta temperatura, con una capa impermeable superior que actúa de sello. En este caso la roca almacén contiene agua caliente y no vapor. Se emplean pozos de producción y pozos de reinyección para su explotación.

- **Sistemas geotérmicos mejorados (EGS):** En este caso no existe agua, pero si una roca granítica caliente, entre 250 °C a 300 °C. Se emplea en la producción de electricidad, preparando la roca e inyectando agua desde la superficie. Dado que las rocas graníticas presentan escasa fracturas de manera natural, se procede a la rotura hidráulica del macizo rocoso de manera controlada y localizada (HDR). Para ello, se inyecta una pulpa de arena silícea y agua a alta presión, hasta que se fracture la roca. Al cesar la presión del bombeo los granos de arena evitan el cierre de las fracturas. En este caso, también se emplean pozos de producción y de reinyección.

En general, los yacimientos suelen presentarse a una profundidad no superior a los 3000 m. A mayor profundidad, la rentabilidad económica suele desaparecer. En el caso de los yacimientos de EGS, la profundidad puede ser bastante mayor, puesto que también presentan una temperatura más elevada, compensando así los costos adicionales.

La naturaleza polar del agua hace que sea un buen disolvente de sales, especialmente si está caliente y a alta presión. En tal caso, es capaz de disolver también minerales como la sílice (SiO_2), además de sufrir una variación importante en su pH, volviéndose extremadamente ácida. Esta característica es de suma importancia en el aprovechamiento geotérmico de alta temperatura, tanto por la corrosión como por las incrustaciones de minerales que se producen en las conducciones de agua procedentes del subsuelo. Estos aspectos son críticos en el mantenimiento de las instalaciones geotérmicas y pueden suponer un importante costo económico.

2.3 La Ley de Minas y la geotermia

En España, la geotermia está regulada por la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas [17]. A continuación, y sin ánimo de ser exhaustivos en cuanto a la casuística del derecho minero, se expone el tipo de recursos geotérmicos contemplados en este momento.

Según esta ley y sus modificaciones posteriores, existen varios tipos de recursos geotérmicos, con una tramitación administrativa específica para su investigación y explotación para cada uno de ellos.

La Ley de Minas establece que los recursos minerales, entre los que se encuentra la energía geotérmica, se clasifican en cuatro secciones nombradas por letras: A, B, C y D. Mientras que el gas natural y el petróleo, en la actualidad, se rigen por la Ley de Hidrocarburos [18]. Además de la clasificación por secciones, se considera el uso y el valor económico del

recurso a explotar. Considerando esto, en el ámbito de la geotermia, se tienen en cuenta los siguientes tres supuestos legales:

Supuestos legales
- Geotermia de temperatura ambiente
- Aguas termales
- Geotermia de alta entalpía

• **Geotermia de temperatura ambiente:** En estos casos se emplean bombas de calor geotérmicas para su aprovechamiento. Según la ley de Minas, en su tercer artículo, apartado dos: *"Queda fuera del ámbito de la presente Ley la extracción ocasional y de escasa importancia de recursos minerales, cualquiera que sea su clasificación, siempre que se lleve a cabo por el propietario de un terreno para su uso exclusivo y no exija la aplicación de técnica minera alguna."*

En este supuesto tan solo es necesario cumplir la legislación medioambiental, nacional y autonómica, y el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [19] en la instalación térmica del edificio.

Sin embargo, si se emplean intercambiadores geotérmicos verticales, es necesaria la realización de sondeos que constituyen tecnología minera. En estos casos, además de lo anterior, es preceptiva la presentación de una memoria de la perforación a la Dirección General de Minas correspondiente. Dicha memoria se redactará desde el punto de vista del Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (NBSM) [20].

Si la potencia térmica instalada es igual o mayor de 70 kW será necesario presentar un proyecto, en lugar de una memoria. Si la instalación es igual o menor de 5 kW será suficiente con presentar un esquema de la instalación. En todos los casos es necesario pagar las tasas correspondientes a la perforación de los sondeos.

Si el sistema de geotérmicos fuera abierto hay que contar, además de lo anterior, con la aprobación del Órgano de la Cuenca Hidrográfica correspondiente y la legislación aplicable, específica del agua.

El peticionario siempre será el titular del terreno, o un apoderado notarial que actúe en su nombre, no admitiéndose ningún otro.

• **Aguas termales:** En estos momentos, la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas [17] establece que las aguas termales son aquellas cuya temperatura es, al menos, 4 °C por encima de la temperatura media anual del lugar donde se exploten. Considerando dichas aguas como un recurso perteneciente a la sección B.

Como se verá, en el Capítulo 3, la temperatura del subsuelo se estabiliza en un rango de 15 m a 20 m. Con una temperatura del suelo, en ese punto, que corresponde a la media climática de esa zona. Esto permite hacer una valoración rápida de si un agua se considera termal o no, sin necesidad de tomar medidas del suelo. Así, en una zona donde la temperatura media anual es de 15 °C, el agua natural con temperaturas iguales o superiores a 19 °C, en el momento de su alumbramiento, se considera, legalmente, agua termal. En la práctica, son necesarias temperaturas mayores para su aprovechamiento directo.

La termia

Es una medida de energía, equivalente a un millón de calorías-gramo. En algunos ámbitos se emplea como medida de energía en la comercialización de gas, en lugar de emplear el m^3. Actualmente, en España, se emplea la conversión a kW/h.

Por otra parte, se establece un límite en cuanto al aprovechamiento energético del yacimiento. Dicho límite viene establecido por un consumo máximo de 500 termias cada hora. La termia, denotada con "th", equivale a un millón de calorías-gramo.

Dado que 1 caloría-gramo equivale a 4.186 05 J, se tiene que el consumo de 500 th durante los 3600 segundos, que forman una hora, dan una potencia máxima de:

$$500\ \frac{\text{th}}{\text{h}} = 500 \times 10^6\ \frac{\text{cal}}{\text{h}} = \frac{2093 \times 10^6}{3600}\ \frac{\text{J}}{\text{s}} \approx 581\ \text{kW} \qquad (2.1)$$

Aunque la ley no limita la cantidad de energía a explotar, con una potencia máxima de algo más de 0.58 MW, el único uso comercial posible es el de balnearios y centros de *spa*. Descartándose cualquier uso industrial o de climatización de distrito a gran escala.

A modo orientativo, una caldera de gas natural comercial para una vivienda en España suele tener una potencia de 23 kW. Simplificando mucho el cálculo, con la potencia máxima permitida para la sección B, se podría dar calefacción a unas 25 viviendas, localizadas al lado del yacimiento geotérmico. Quizás permita la climatización de un invernadero, a pequeña escala, pero en todo caso este tipo de recurso está orientado al autoconsumo.

En caso de buscar un aprovechamiento de uso directo del calor con fines industriales o para generación de electricidad, es necesario ir a la geotermia de alta entalpía.

• **Geotermia de alta entalpía:** Si se sobrepasa la potencia que estipula la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas [17] para los recursos de la sección B, estos pasan a pertenecer a la sección D. Los recursos de este tipo, cuyas derechos mineros fueron otorgados con anterioridad al 11 de diciembre de 1980, son pertenecientes a la sección C. Con vigencia hasta su extinción.

Las concesiones solo se adjudican a la figura jurídica de una empresa especializada, con recursos financieros suficientes y con la solvencia técnica necesaria.

En este caso, y con carácter general, es necesario solicitar permiso de exploración, investigación y, finalmente, una concesión minera. Pagando las correspondientes tasas, además de hacer frente a los costes de todo el proceso.

Es un proceso complejo, caro y largo. En los casos más complejos, la tramitación puede durar hasta diez años. Aunque el proceso contempla expropiaciones de los terrenos involucrados, por el bien común, esto no exime de indemnizar a los legítimos dueños.

Puede ocurrir que varias empresas diferentes soliciten, de manera concurrente, la concesión. En estos casos es la Administración la que valora la idoneidad técnica y financiera de cada candidata. Eligiendo finalmente una de ellas, o rechazándolas a todas. En todo caso, la concesión será adjudicada por un periodo de 30 años, prorrogable un máximo de dos veces hasta completar un total de 90 años.

Siempre que se aplica tecnología minera, como los sondeos, es especialmente importante considerar el artículo seis, apartado uno, de la Ley de Minas, que dice: *"Para el perfeccionamiento y actualización del conocimiento geológico y minero del país, toda persona natural o jurídica u órgano de la Administración que realice un trabajo, cualquiera que sea su clase y objeto, cuya profundidad sobrepase los veinticinco metros por debajo de la superficie del suelo emergido o a cualquier profundidad en suelos sumergidos, consolidados o no, deberá, además de obtener las autorizaciones que fueren pertinentes, informar a la Delegación Provincial correspondiente del Ministerio de Industria sobre la iniciación de los trabajos y suministrar al Instituto Geológico y Minero de España, si éste lo solicita, los datos geológicos y mineros que del trabajo en cuestión se hayan obtenido, así como permitir al personal titulado competente designado por el Ministerio de Industria el acceso a las obras, a fin de comprobar dichos datos o completar la toma de los mismos".*

Por tanto, es importante guardar la información que se recaba durante los sondeos geotérmicos. Ya sean de alta o baja entalpía, puesto que todos tendrán una profundidad mayor a los 25 m. Esta información debe guardarse durante el tiempo que la ley indique y facilitarse a la Administración si ésta lo requiere.

Siempre es una buena práctica y signo de profesionalidad la presentación voluntaria de un informe de fin de perforación. Estos informes contienen la columna estratigráfica real, que puede variar respecto a la indicada en la memoria de perforación. Otros datos de interés pueden ser las pequeñas correcciones en las coordenadas de los emplazamientos de los sondeos, por motivos sobrevenidos. U otro tipo de información adicional que el sondista considere oportuna.

Conviene recordar que la legislación minera es de carácter estatal, mientras que la legislación medioambiental es tanto estatal como autonómica. Siendo obligatorio el cumplimiento de todas ellas. En muchos casos, la Delegación Provincial de Minas se coordina, de oficio, con el Órgano Medioambiental correspondiente, tal como se muestra en el esquema de la figura Figura 2.2.

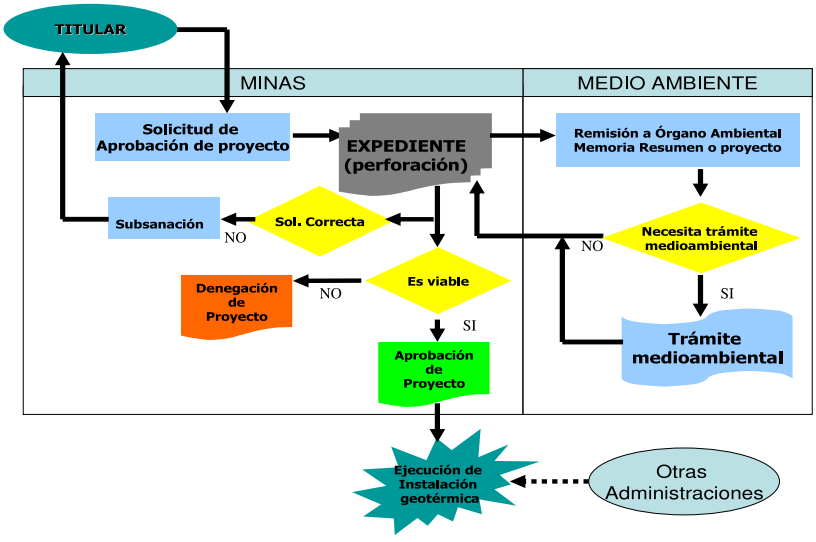


Figura 2.2: Diagrama del proceso de aprobación de un proyecto de geotermia de muy baja temperatura. Fuente: Comunidad de Madrid.

A modo de ejemplo, en el caso particular de la Comunidad de Madrid, las leyes a aplicar, además de la Ley de Minas, son: la Ley 21/2013, de 9

de diciembre, de evaluación ambiental [21] de carácter estatal, y la Ley 2/2002, de 19 de junio, de Evaluación Ambiental de la Comunidad de Madrid [22] de carácter autonómico.

2.3.1 Aguas termales

Entalpía *vs* temperatura

Llegados a este punto, es recomendable recordar la diferencia entre alta temperatura y alta entalpía. El motivo es que, aunque físicamente hablando la diferencia es muy clara, la Ley de Minas no lo distingue de forma tan evidente y, de hecho, puede llevar a confusión. En este contesto, alta entalpía se refiere a un recurso que puede proporcionar una cantidad de energía elevada mientras que un recurso de alta temperatura hace referencia a que su temperatura esta por encima de los 150 °C. A modo de ejemplo, un recurso de baja temperatura podría ser de baja entalpía si se usa en un *spa*, diluyéndolo con agua fría, y de alta entalpía (superando las 500 th/h) si se emplea en climatización de distrito. Empleándose en ambos casos a una temperatura menor de 90 °C. Lo habitual es asociar la alta temperatura a la alta entalpía, pero según la Ley de Minas, no siempre es así.

En el caso de la explotación de aguas termales, dentro del límite de potencia máxima de uso contemplado por la ley, es preceptiva la solicitud de una autorización de aprovechamiento de recursos de la sección B. Es imprescindible un paso previo: obtener la declaración de aguas termales.

Según el artículo treinta de la ley de minas, las aguas termales que sean destinadas a usos terapéuticos o industriales se considerarán como aguas minerales a todos los efectos. Por tanto, los pasos a seguir para declarar la condición de agua minero-termal son:

- Declaración de la condición de aguas termales-minerales mediante resolución del Ministerio de Industria a propuesta de la Dirección General de Minas. Con un informe previo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y de su Consejo Superior.

- Emisión de un informe, vinculante, por parte de la Dirección General de Sanidad si se trata de aguas minero-medicinales. En este caso, si el fin de las aguas termales es medicinal.

- Notificación fehaciente de la resolución ministerial y su publicada en los boletines oficiales correspondientes.

El propietario de los terrenos, en el momento de la declaración de agua termal, tiene preferencia. En caso de que sean terrenos públicos, la preferencia será para quien haya solicitado la declaración de aguas termales.

Los derechos prescriben si, al año de la publicación de la resolución ministerial, no se han ejercido dichos derechos. Para ejercerlos, es necesario solicitar una autorización de aprovechamiento de recursos:

- Solicitar la autorización de la Delegación Provincial correspondiente del Ministerio de Industria. Para ello, hay que presentar, entre otros: el proyecto de aprovechamiento del agua, el presupuesto y el estudio de viabilidad económica. También se indicará el perímetro de protección para garantizar la cantidad y calidad del agua, así como su justificación.

- La Delegación Provincial elevará el expediente, con la propuesta que proceda, a la Dirección General de Minas. Esta autorizará el aprovechamiento, aceptando o rectificando el perímetro propuesto, previo informe del IGME.

- Los ministerios de Obras Públicas y de Agricultura emitirán un informe en relación con otros posibles aprovechamientos para dichas aguas. Si no hay acuerdo entre Agricultura, Obras Públicas e Industria, se resolverá en el Consejo de Ministros.

2.3.2 Recursos de alta entalpía

Según la Ley de Minas, en el caso de los recursos geotérmicos de alta entalpía, aunque pertenecientes a la sección D, se procede de forma similar al procedimiento seguido en los recursos de la sección C. No hay que olvidar que, originalmente, los recursos de la sección D formaban parte de la sección C. Por tanto, al igual que en la sección C original, para su explotación es necesario obtener los derechos de una concesión minera, siguiendo los mismos trámites que para la sección C.

De forma muy resumida, los pasos a seguir son los siguientes:

- Solicitud de permiso de "exploración". Permite al peticionario realizar estudios y reconocimientos, mediante la aplicación de técnicas de cualquier tipo que no alteren sustancialmente la configuración del terreno. En otras palabras, ni sondeos, galerías o calicatas.

- Solicitud de permiso de "investigación". Permite al peticionario realizar los estudios y trabajos encaminados a definir y confirmar los recursos. En este caso no hay límites en cuanto a las técnicas a emplear.

- Solicitud de una concesión minera. Una vez demostrado que el recurso es susceptible de aprovechamiento racional, este permiso permite la explotación de los recursos durante períodos de 30 años. Estos lapsos son renovables, un máximo de dos veces, hasta completar un total de 90 años. Además, permite la explotación de todos los recursos comprendidos en la sección D.

Como norma general, primero se solicita el permiso de exploración y, una vez completada esta fase, se solicita el permiso de investigación. El paso final siempre es la solicitud de una concesión minera. No obstante, hay casos contemplados por la ley de Minas que permiten omitir el permiso de exploración e incluso solicitar la concesión minera de forma directa.

La Ley de Minas introduce cuatro nuevos conceptos con respecto al terreno, que a grandes rasgos son:

- **Cuadrícula minera.** Es el volumen de forma pseudo piramidal definido por un vértice, coincidente con el centro de la Tierra y cuya base es una superficie que queda comprendida entre dos paralelos y dos meridianos, cuya separación es de veinte segundos sexagesimales. Los vértices de dicho trapecio "esférico" deben coincidir con grados y minutos enteros y, en su caso, con veinte o cuarenta segundos. Por tanto, la superficie depende de la latitud a la que se encuentre la cuadrícula. La cuadrícula minera no es divisible, salvo que se salga del territorio nacional o de las aguas jurisdiccionales. Se puede observar un ejemplo en la Figura 2.3.

- **Zonas de reserva a favor del Estado.** El Estado podrá reservarse zonas de cualquier extensión en el territorio nacional en las que el aprovechamiento de uno o varios yacimientos minerales pueda tener especial interés. Ya sea económico, social o para la defensa nacional.

- **Terrenos francos.** Un terreno es franco si no está incluido en una reserva del Estado, específica para ese tipo de recurso, o si alguien ha solicitado previamente permiso de exploración, investigación o

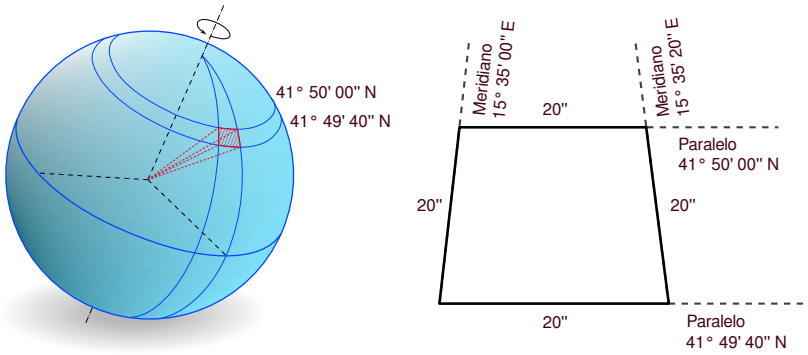


Figura 2.3: Esquema del concepto de cuadrícula minera. No está a escala. Fuente: los autores.

una concesión. Dicho de otra forma, indica si el terreno está "disponible", legalmente, para este tipo de recurso.

- **Terrenos registrables.** Si, además de ser franco, tiene la extensión mínima exigible por ley. El Gobierno podría declarar no registrables zonas determinadas por razones de interés público.

Tanto los permisos de exploración e investigación como las concesiones se otorgarán utilizando como referencia cuadrículas mineras.

Siendo la extensión para un permiso de exploración de entre 300 cuadrículas mineras y 3000 cuadrículas mineras. Para un permiso de investigación, el límite está entre una cuadrícula minera y 300 cuadrículas mineras. En el caso de la concesión, el valor mínimo sigue siendo una cuadrícula minera y el máximo es de 100 cuadrículas mineras.

Con respecto a la explotabilidad de un terreno que forma parte de una reserva del Estado, solamente éste puede explotar el recurso. Ya sea directamente o mediante concurso público de empresas privadas. En todo caso, los derechos mineros serían del Estado y las empresas actuarían como contratistas.

Si el terreno no forma parte de una reserva del Estado, se emplean los conceptos de terreno franco y registrable. En el caso de los permisos de exploración, no es necesario que sean francos ni registrables en el momento de la solicitud, pero es necesaria la autorización previa de los titulares de los permisos. Mientras que en el caso de los permisos de investigación y de las concesiones, directas o no, es necesario que los terrenos sean francos y registrables.

El principio de bien común prima sobre los intereses particulares y, por tanto, la expropiación y los permisos de ocupación están contemplados y regulados legalmente. Por supuesto, bajo condiciones estrictas y con la correspondiente compensación económica a los afectados. Por tanto, los permisos de exploración, investigación y concesión de explotación otorgan derechos adicionales en este sentido.

Las palabras "exploración" e "investigación" poseen implicaciones legales, según la Ley de Minas. Desde un punto de vista exclusivamente técnico, si bien los conceptos son básicamente los mismos, la separación entre qué tipo de pruebas se hacen en cada fase del estudio no tiene por qué coincidir necesariamente con lo que indica la Ley de Minas española.

2.4 Investigación geotérmica

La investigación de cualquier tipo de yacimiento minero supone una inversión económica que puede resultar significativa en algunos casos. Lo mismo ocurre en el ámbito de la geotermia. En esta ocasión, es especialmente cierto si se tiene en cuenta que los sondeos profundos son tremendamente caros.

El principal objetivo es la evaluación de la cantidad de energía aprovechable, económicamente rentable, con la tecnología del momento y la vida útil del yacimiento. Esto significa que, antes de nada, se debe asegurar, con datos, que la investigación tiene un grado suficiente de probabilidad de ser rentable. No obstante, la metodología a seguir en función del recurso buscado es muy diferente.

En todo caso, es un proceso largo y costoso que no garantiza el éxito de la investigación ni la rentabilidad final. Es por eso que solamente las grandes empresas de este sector son las que suelen aventurarse en este tipo de proyectos.

La metodología de la investigación difiere mucho dependiendo del tipo de recurso y, sobre todo, de la escala de la investigación. Así, no es lo mismo una investigación local sobre recursos de baja temperatura que una sobre yacimientos de alta temperatura. Lo mismo sucede con la escala de la investigación, que puede ser para una localidad concreta o puede ser una exploración a nivel nacional o autonómico, normalmente encargada por la Administración.

Según *Glassley* [11], en los estudios a nivel global de recursos geotérmicos se obtienen diferentes resultados, en función del método de evaluación empleado y de los supuestos de partida en cada caso. Como resultado, es posible que se produzcan estimaciones muy diferentes y, sin embargo, todas ellas pueden ser correctas.

El enfoque de la metodología ofrecido en esta obra es siempre de ámbito local y se divide en recursos de uso directo y recursos de alta temperatura, ligados a cuencas sedimentarias profundas y a zonas de anomalías térmicas, respectivamente.

2.4.1 Recursos de uso directo

Los recursos geotérmicos de uso directo normalmente son los de baja temperatura. Por tanto, no superan los 90 °C. En este supuesto, no es necesario que exista una anomalía térmica para que se produzcan. Bastará con un gradiente geotérmico medio de 0.03 °C/m y rocas porosas, a una profundidad suficiente que permita el paso de agua para su calentamiento. Esta geología se puede encontrar en las grandes cuencas sedimentarias. Donde, si las condiciones son favorables, se podría encontrar agua caliente, a unos 85 °C, a una profundidad de unos 2500 m.

Para una explotación rentable, es preciso que el acuífero sea lo suficientemente poroso y tenga buena transmisividad, lo que permite el bombeo y la reinyección de agua con facilidad.

Hay que considerar dos aspectos importantes a tener en cuenta:

- Debido a que la fuente de calor es la profundidad y no una anomalía térmica, el acuífero debe ser lo suficientemente extenso para que su explotación sea sostenible en el tiempo, al menos hasta la amortización de la instalación.

- Los costes de explotación y la inversión de la instalación no deben ser demasiado elevados, dado que el uso directo de calor no es tan rentable como la producción de electricidad.

En consonancia con el segundo punto, la investigación del yacimiento tampoco debe ser excesivamente cara. Es preciso tener conocimientos y datos suficientes antes de proceder con los sondeos a gran profundidad. Cualquier información y los estudios previos son de enorme utilidad. De hecho, el peso de la investigación se basa en datos previos conocidos.

En estos casos, se suele seguir un proceso de investigación en tres fases:

Fases
- Documentación previa
- Sondeos de verificación
- Plan de viabilidad técnico-económica

- **Documentación:** En la primera fase se estudia la geología e hidrogeología de la zona, con la intención de buscar acuíferos a la profundidad adecuada. Se emplea toda la bibliografía disponible procedente de otras investigaciones, como ensayos y mediciones de otras campañas. Son especialmente útiles los datos procedentes de sondeos profundos previos. Recalcando una vez más la importancia que tiene para el bien común el facilitar información de cualquier trabajo en profundidad, tal y como indica el artículo 6, apartado uno, de la Ley de Minas.

  Una vez recabada la información, se debe elegir qué acuíferos son los más interesantes para los propósitos iniciales del proyecto. Para ello se realizan estudios sobre las estructuras geológicas que los contienen, la estratigrafía de la zona a perforar para alcanzarlos desde la superficie. Así como otras características, como su potencia, porosidad, permeabilidad, transmisividad, temperatura y salinidad. Como se ha mencionado anteriormente, las aguas calientes procedentes de grandes profundidades suelen presentar alta salinidad. En este campo es de gran interés los estudios geoquímicos disponibles.

  Toda esta información permite encontrar las posibles ubicaciones de los pozos de producción y de reinyección. Minimizando costos y riesgos en la perforación. Es importante saber de antemano la estimación de sondeos a realizar, la capacidad de bombeo necesaria y posibles riesgos geológicos como la existencia de fallas.

- **Sondeos de verificación:** Una vez terminada la fase de documentación y elaborado un modelo del acuífero a explotar y las ubicaciones de los sondeos, es necesario realizar un proyecto de perforación y ejecutarlo.

  Se realizara, al menos un sondeo, con el objetivo de confirmar sobre el terreno los datos inferidos de la fase de documentación y por otra parte obtener los datos que puedan faltar. Con frecuencia se toman muestras de testigo continuo para realizar pruebas de laboratorio.

En ocasiones es necesario la realización de un segundo sondeo para realizar las pruebas de inyección.

Es de especial importancia confirmar la profundidad final del sondeo, el caudal de producción de agua caliente, la presión en el acuífero, así como la columna estratigráfica real atravesada.

El sondeo se aprovechará, una vez terminada la investigación, en la fase de producción. Por tanto, es preciso realizar los ensayos geofísicos pertinentes antes de proceder al revestimiento definitivo. Los ensayos programados dependerán en gran medida de los datos previos obtenidos durante la fase de documentación.

Normalmente los datos de mayor interés son: la determinación de la litología atravesada, la porosidad de las rocas y su temperatura.

Una vez terminadas los ensayos geofísicos, y terminada la construcción del sondeo se procede a pruebas de bombeo, con el fin de medir la capacidad de extracción de agua y la recuperación del acuífero. Midiendo las variaciones de temperatura durante el proceso.

La salinidad y el pH del fluido geotérmico determinarán el plan de mantenimiento y las medidas de protección contra la corrosión y las incrustaciones de sales.

• **Viabilidad técnico-económica:** Como punto de partida, se empieza por el estudio de la demanda térmica. También es necesario saber si se pretende suministrar un 100% de dicha demanda o solo un porcentaje y durante cuantos meses al año. En función de estos datos se diseña una o varias propuestas de instalación para el aprovechamiento térmico, considerando todos los aspectos de la instalación como sondeos, sistema de bombeo, costes de mantenimiento y de personal.

Un aspecto importante, que con frecuencia se tiende a olvidar, es el tiempo máximo de funcionamiento de la instalación, que no tiene por que coincidir con la vida útil de la instalación en si. Al igual que una mina dispone de unas reservas de mineral finitas, los recursos geotérmicos son limitados. En este tipo de yacimientos el fluido geotérmico está a una temperatura elevada debido al efecto del gradiente geotérmico. Si se extrae el calor del fluido, reinyectadolo a una temperatura menor, con el tiempo las rocas y el propio fluido se enfriarán. La hidrogeología del yacimiento, la localización de los pozos y el ritmo de explotación definen estos tiempos.

Esto se cumple para todos los yacimientos geotérmicos, pero en el caso de los yacimientos de alta temperatura, el calor proviene de una anomalía geotérmica. Esto permite una reposición del calor a un ritmo mayor y puede dar la sensación de que el yacimiento es "para siempre".

El último paso es realizar el estudio económico, que contiene las diferentes propuestas a valorar. Cada propuesta debe mostrar los siguientes aspectos:

- Propuesta
  - G. económicos y financieros
    - C. instalación
    - C. operación
    - C. inversión
    - Rentabilidad
    - T. amortización
  - G. administrativos
    - C. gestión
    - C. administración
    - C. mantenimiento

Se elegirá, de entre todas las opciones, la que de un mejor resultado desde un punto de vista económico. Pero en todos los casos la propuesta debe ser entable y por supuesto amortizable durante la vida útil de la instalación y el periodo de viabilidad térmica del yacimiento. De no ser así, no será económicamente sostenible.

Debido a la situación geopolítica y económica actuales, en algunos casos puede resultar aplicable esta tecnología, incluso siendo una opción más cara que otras. Sin embargo, en todos los casos debe ser rentable.

2.4.2 Recursos de alta temperatura

En el caso de la geotermia de alta temperatura, el planteamiento es totalmente diferente al de la geotermia de uso directo (baja temperatura). Y su metodología de investigación también lo es. El método seguido en la evaluación de yacimientos de alta temperatura busca la anomalía tanto térmica como hidrogeológica mediante la búsqueda de indicios, empleando para ello tecnología y métodos avanzados. Estas técnicas se estudiarán más adelante. Una vez localizada la zona de anomalía aprovechable, se estudia su viabilidad económica.

Los recursos de alta temperatura se orientan hacia la producción de energía eléctrica. Los factores más importantes a tener en cuenta desde el punto de vista económico son:

- Factores económicos
  - Inversión inicial
  - Costes de explotación
  - Vida útil de la instalación
  - Producción de energía media
  - Coste de distribución

Dado que las instalaciones geotérmicas de producción de energía eléctrica son caras, la instalación debe ser rentable considerando el mercado local. Los factores de la lista anterior permiten establecer un precio unitario de producción de energía eléctrica.

Los factores que afectan la economía de la producción de energía geotérmica la convierten en una tecnología de conversión energética competitiva. El factor de capacidad, que refleja la proporción de tiempo que

una tecnología de conversión está disponible para generar energía, es el más alto de todas las demás tecnologías, superando a menudo el 90%. El coste nivelado de la energía, que representa el saldo de los gastos que una tecnología de generación debe absorber para generar energía, se encuentra entre los más bajos de las tecnologías de generación de energía competidoras.

En conjunto, estos factores indican que la producción de energía geotérmica es actualmente una tecnología de conversión energética económicamente competitiva. Si se considera en términos de madurez con respecto a la inversión en I+D y la mejora del rendimiento, la energía geotérmica se encuentra en las primeras etapas de un análisis tecnológico de curva S. Esto indica que es posible lograr una mejora significativa en el rendimiento con una inversión relativamente pequeña, en comparación con las tendencias históricas.

La tendencia a la reducción de costos de la generación de energía geotérmica se ha mantenido durante algunos años, lo que ha dado lugar a que, en general, sea menos costosa que la producción a partir de combustibles fósiles.

Para ser económicamente viable, un proyecto geotérmico debe abordar los pasos necesarios para completarse con éxito y dentro del plazo previsto. Se requiere una serie de acciones secuenciales que, en circunstancias normales, tardan entre 5 y 7 años en completarse. Entre ellas se incluyen la adquisición de los derechos para explorar y utilizar el calor geotérmico del subsuelo, una evaluación adecuada del recurso y un estudio de viabilidad para demostrar que este recurso es adecuado para los objetivos del proyecto. Una vez implantada, la energía geotérmica es un recurso muy competitivo en comparación con todos los demás recursos energéticos, incluso si se considera desde la perspectiva de los nuevos enfoques de análisis económico, como las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida (LCA[1]) o la Tasa de Retorno Energético (EROI[2]).

2.5 Metodología

Cuando se trata de localizar y evaluar un sondeo de alta entalpía a alta temperatura, no es suficiente estudiar la documentación preexistente. Dado que estos yacimientos están ligados a anomalías térmicas que, por su naturaleza, no son evidentes, es necesario el empleo de una metodología científica para su investigación.

Más allá de la exploración superficial y de la búsqueda de indicios, como la presencia de pozas de lodo caliente, fumarolas, géisers, o incluso conos volcánicos, existe una serie de herramientas y técnicas de búsqueda e investigación. Se dividen en tres grupos: métodos geológicos, geofísicos y geoquímicos.

En una primera fase, se emplean métodos geológicos que ayudan a obtener un inventario de manifestaciones superficiales de la geotermia en la zona. También se toman muestras de agua, estudiando su procedencia para su análisis durante la etapa siguiente de la investigación. Por último, se recoge información sobre estructuras geológicas, fallas, acuíferos, etc.

1: La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (LCA - *Life Cycle Assessment*, en inglés) evalúa el impacto ambiental de a lo largo de todas las etapas de su existencia. Se basa en cuatro fases: Definición del objetivo y su alcance, inventario de ciclos de vida, evaluación de impactos e interpretación de resultados. Se rige por normas internacionales como la ISO 14040 [23].

2: La metodología de la Tasa de Retorno Energético (EROI - *Energy Return on Investment*, en inglés) compara la cantidad de energía utilizable con la energía invertida en su extracción, procesado y distribución [24].

En una segunda fase, se emplean los métodos geoquímicos que permiten obtener las propiedades térmicas y químicas del suelo. Esto posibilita un mejor conocimiento geológico e hidrogeológico de la zona. Y delimita, a grandes rasgos, la zona donde centrar la investigación en una segunda fase, señalando posibles objetivos a investigar con más detalle. Indicando posibles localizaciones para perforar sondeos de investigación.

Para refinar la investigación y obtener información más precisa de la zona de estudio, se emplean métodos geofísicos que permiten una mayor definición del recurso.

Como se ha mencionado al principio de este apartado, el objetivo final de todas estas fases es obtener una serie de datos que permitan establecer, con alta fiabilidad, las posibilidades energéticas del yacimiento y su rentabilidad.

2.5.1 Exploración geológica

Además de la creación de listas e inventarios de manifestaciones geotérmicas en superficie, existe una serie de técnicas geológicas que permiten acotar la zona de búsqueda del yacimiento o, en su defecto, marcar el punto de inicio de la investigación. De forma que se puedan establecer los posibles acuíferos, el origen del agua, la profundidad aproximada, etc.

Algunas de estas técnicas geológicas son:

- Hidrogeología: Estudia los posibles acuíferos, capacidad y geometría, basados en las estructuras geológicas de la zona y su tectónica. En este estudio se realiza un inventario exhaustivo de todos los manantiales y afloramientos de agua, frías o calientes, y se geolocalizan.

- Geología estructural: Estudia la deformación de las rocas y las estructuras geológicas que resultan de esta deformación. Analiza cómo las fuerzas tectónicas afectan la corteza terrestre, dando lugar a pliegues, fallas y otras estructuras. Sus aplicaciones son clave para entender la historia geológica, la exploración de recursos minerales y la evaluación de riesgos geológicos.

- Vulcanismo: En este caso se estudia la petrografía de la zona y su química. La composición de sus gases y la posible evolución de las cámaras magmáticas.

- Mineralogía: En este caso se estudia la composición de los minerales de relleno de las fracturas de rocas de la zona. Normalmente, estos se forman por corrientes hidrotermales procedentes de zonas profundas. Con esta información se pueden estudiar la temperatura y la presión a las que se formaron.

2.5.2 Manantiales

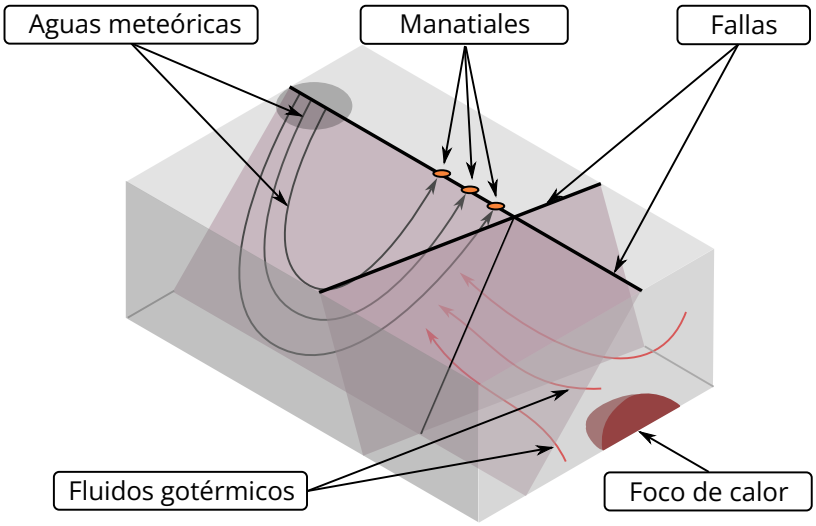
Mediante el estudio de las composiciones químicas e isotópicas del agua, así como de la composición de la fase gaseosa del fluido, se puede establecer la temperatura base de los fluidos geotérmicos profundos.

El agua meteórica, que procede de precipitaciones en forma de lluvia, granizo, nieve, etc., solo contiene elementos provenientes de la contaminación difusa[3] de la atmósfera [25]. Una vez que llega al suelo, se infiltra en el terreno, llegando a los acuíferos hasta desembocar en ríos y lagos. Por el camino, ha disuelto una serie de materiales que forman parte de su composición. Normalmente, la cantidad de sustancias disueltas, o residuo seco, es muy pequeña. Siendo, en España, el valor medio de residuo seco de las aguas naturales de 324 mg/l. La clasificación del agua, atendiendo al residuo seco, es la siguiente:

- **Mineralización muy débil:** Hasta 50 mg/l.
- **Mineralización débil:** Menor de 500 mg/l.
- **Mineralización fuerte:** Mayor de 500 mg/l.

Naturalmente, las sustancias disueltas y su cantidad dependen de las zonas por las que pasan, la temperatura, la presión y el tiempo de contacto. Esto es especialmente importante si el agua desciende a grandes profundidades, como en el caso de los fluidos geotérmicos. En ocasiones, se puede producir un depósito de sustancias si las condiciones cambian; por ejemplo, una bajada brusca de temperatura puede provocar la saturación de algún componente disuelto. Es por eso que el historial de las temperaturas puede ser relevante.

Las aguas termales se producen por la recirculación de agua, normalmente procedente de agua meteórica o de deshielo (también de origen meteorológico)[4], a través de zonas con alta permeabilidad o bien mediante grandes fallas Figura 2.4, que la conducen cerca de una anomalía térmica. Esta anomalía puede deberse a diferentes motivos: un cuerpo magmático, altos flujos de calor, un plutón granítico calentado por elementos radiactivos, etc.



Hay que considerar que hay otros tipos de agua, además de la meteórica, que pueden interactuar con los fluidos geotérmicos. Una de ellas es el agua marina, cuyas filtraciones son más probables en zonas muy cercanas al mar, como es el caso de Islandia. En otras ocasiones, son aguas procedentes de cuencas sedimentarias que, con el paso de millones de

3: La contaminación atmosférica difusa es importante si el agua meteórica proviene de zonas con vulcanismos activo, puesto que parte del material puede acabar en las precipitaciones y debe ser tenido en cuenta en el momento de los análisis químicos del agua.

4: Hay que considerar que hay otros tipos de agua además de la meteórica, que pueden interactuar con los fluidos geotérmicos. Una de ellas es el agua marina, cuyas filtraciones son más probables en zonas muy cercanas al mar, como es el caso de Islandia. En otras ocasiones son aguas procedentes de cuencas sedimentarias que, con el paso de millones de años, se han transformado en salmueras concentradas. Son las denominadas aguas fósiles. Su interacción con un fluido geotérmico puede crear sistemas sumamente complejos.

Figura 2.4: Esquema de fluidos geotérmicos interactuando con aguas meteóricas a través de una fallas y fracturas. El agua meteórica alumbra por manantiales geotérmicos después de mezclarse con fluidos geotérmicos calentados por un foco de calor cercano. El foco de calor también actúa sobre el agua meteórica directamente. Fuente: los autores.

años, se han transformado en salmueras concentradas. Son las denominadas aguas fósiles. Su interacción con un fluido geotérmico puede crear sistemas sumamente complejos.

La recirculación del agua suele presentar trayectorias convectivas con forma de celdas. Debido a que el fluido disminuye de densidad a medida que se calienta, tiende a subir y, cuando se enfría, se hunde al aumentar de nuevo su densidad, Figura 2.5. Estas celdas convectivas se extienden a lo largo de kilómetros, disolviendo minerales e interactuando químicamente con las rocas por donde pasan. Si los fluidos emergen, formarán manantiales cuyas temperaturas varían en función de la distancia a la fuente de calor.

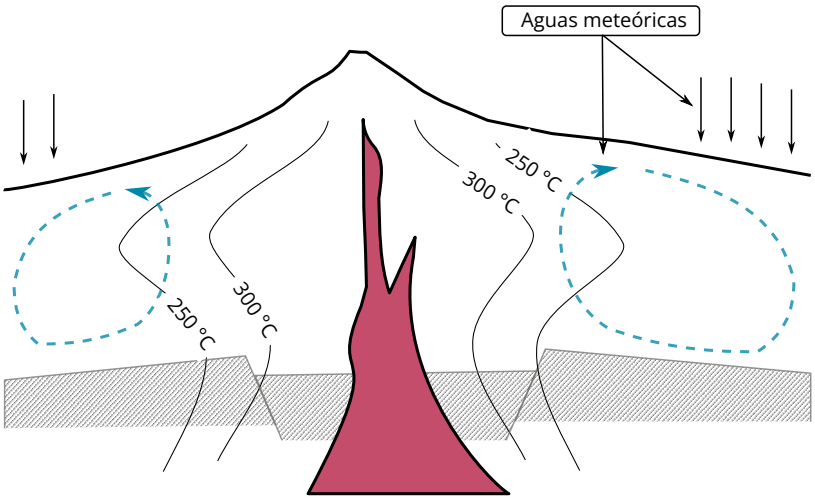


Figura 2.5: Aguas meteóricas formando celdas convectivas debido al calor del subsuelo. Fuente: los autores.

Si los fluidos son de mineralización débil, aparecerán en su composición algunos carbonatos y cloruros. En este caso, los carbonatos tienen su origen en el CO_2 procedente del aire. Los cloruros aparecen en todas las aguas de origen natural[5], en mayor o menor medida, al ser un "elemento incompatible[6]" [11]. Se formarán fluidos mucho más complejos en el caso de que entren en contacto con compuestos y gases segregados de los fluidos residuales del magma en proceso de cristalización. Algunos elementos que se pueden encontrar en las aguas se muestran en la Tabla 2.1. Las huellas de estos elementos dejados en el agua, recogidas de los manantiales, brindan información muy valiosa para la investigación.

Existen ciertos tipos de agua que son especialmente ricos en algún compuesto en particular. Las más frecuentes son las siguientes:

- **Aguas bicarbonatadas (HCO_3^-):** Se forman encima del yacimiento geotérmico por el contacto entre agua meteórica y los fluidos geotérmicos ricos en CO_2. En otros casos, un vapor rico en CO_2 se condensa. Un tercer caso es la disolución de dióxido de carbono procedente de la atmósfera en el fluido geotérmico.

  Este tipo de aguas, al salir al exterior y disminuir su temperatura, forman depósitos de carbonato cálcico. En algunos casos, los depósitos forman una piedra ornamental muy apreciada llamada "travertino", formando terrazas llenas de agua, como las de *Pamukkale* en Turquía, Figura 2.6 o las de *Saturnia* en la Toscana italiana. Está formada por calcita, aragonito y limonita. Siendo los dos primeros minerales formados por carbonato cálcico $CaCO_3$ cristalizados en

5: Según el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero [26] la cantidad de cloruros máxima permitido en un agua considerada potable es de 250 mg/l, que es el valor aceptado comúnmente en la mayoría de países de Europa y América.

6: El termino "elemento incompatible" se refiere a aquellos elementos, que debido a su tamaño atómico, no encajan bien en la red de minerales que se forman cuando el magma solidifica. De manera que al ser "incompatibles" con dicha red cristalina se concentran en el fluido residual. Lo mismo ocurre con los gases y el agua contenido en el magma. Todos estos elementos se mantienen en el fluido magmático residual hasta que se llega a un punto de equilibrio, propio de cada sistema, en el que migran hacia la roca madre que contiene el cuerpo magmático.

sistema romboédrico y hexagonal, respectivamente. La limonita es un mineral formado por una mezcla de óxido e hidróxido de hierro hidratados, sin una composición exacta definida $FeO(OH) \cdot nH_2O$.

Figura 2.6: Terrazas de travertino en *Pamukkale* (Turquía). Fuente: marvelsofnature.com.

- **Aguas ácidas sulfatadas (SO_4^-):** Se originan por la interacción de las aguas meteóricas con fluidos ricos en H_2S. Como se estudia en el Apartado 7.2, el origen primario del sulfuro de hidrógeno son minerales sulfurosos locales o la desgasificación magmática.

  Cuando las aguas sulfuradas se acercan a la superficie, el H_2S se oxida con el poco oxigeno que contiene el suelo superficial para producir ácido sulfúrico (H_2SO_4). Por tanto los manantiales de estas aguas poseen un pH bajo. Por oto lado, la oxidación del H_2S también puede dar lugar a azufre nativo, que se deposita en los conductos de las fumarolas de salida y en el exterior, Figura 2.7.

- **Aguas cloruradas (Cl^-):** Son ricas en iones Cl^- y como en los casos anteriores l motivo es que el cloro es un elemento "no compatible" y se concentra en los restos de fluido magmático en forma de

Figura 2.7: Terrazas de travertino con depósitos de azufre nativo (Etiopía). Fuente: *Jorge Tung* en Unsplash.

HCl. Una desgasificación magmática permite que pase a los fluidos geotérmicos y de allí al flujo de agua meteórica.

Como se ha mencionado, en el caso de las aguas bicarbonatadas y el de las sulfatadas, es frecuente que se formen depósitos minerales en el alumbramiento de los manantiales de aguas termales. El agua caliente los disuelve y se satura cuando llega a la superficie, al disminuir la temperatura. Además de los dos casos anteriores, el tercero más frecuente es el depósito de cloruros.

Tabla 2.1: Cantidades aproximadas de emisiones de químicos Tm/año por cada 100 MW generados. Fuente: [27] Modificado.

[a] En 1976
[b] En 1977

Emisión	Cerro Prieto	*Wairakey*	*Broadlands*	*The Geysers*
Li	320	350	300	—
Na	150 000	35 000	30 000	—
K	40 000	5500	5000	—
Ca	10 000	500	80	—
F	40	200	200	—
Cl	300 000	60 000	50 000	—
Br	500	150	150	—
SO_4	170	700	200	—
NH_4	800	50	500	1700
B	400	750	1100	200
SiO_2	40 000	20 000	20 000	—
As	30	100	100	—
Hg	—	0.025	0.035	0.04
CO_2	150 000	8000	400 000	300 000
H_2S	11 500	300	6000	1200[a] 900[b]

En todo caso, las soluciones con pH bajo y alta temperatura, como en estos casos, reblandecen las rocas y pueden producir minerales arcillosos y sulfatos. A temperaturas menores de 200 °C, los feldespatos, comunes en muchas rocas, también se descomponen para dar sulfatos y arcillas.

En el caso de las aguas cloruradas, si el pH es cercano a lo neutro, se pueden producir depósitos de minerales muy variados. Con temperaturas superiores a los 210 °C se pueden producir depósitos de sílice amorfa, también conocida como "geiserita". Su fórmula química es $SiO_2 \cdot nH_2O$.

Con frecuencia, se mezclan los tres tipos de agua. Un estudio minucioso y sistemático puede aportar información muy valiosa sobre la naturaleza del recurso geotérmico estudiado. La Figura 2.8 muestra un diagrama ternario en función de la proporción de estos tres cationes contenidos en las muestras de agua. La temperatura está codificada mediante una escala de colores.

Los manantiales pueden variar en composición si por ellos fluyen aguas químicamente agresivas. En caso de que el agua circule por rocas porosas y no por fracturas, el agua puede disolver diferentes minerales y aumentar la permeabilidad al acercarse a la zona caliente. Cuando se aleja de ella, estos minerales disueltos pueden precipitar. Si se produce cerca de la salida de un manantial, este podría secarse al disminuir la porosidad de la roca. Al cegarse la salida, la presión del fluido en aumento obligará a que este salga por otro punto, creando un nuevo manantial.

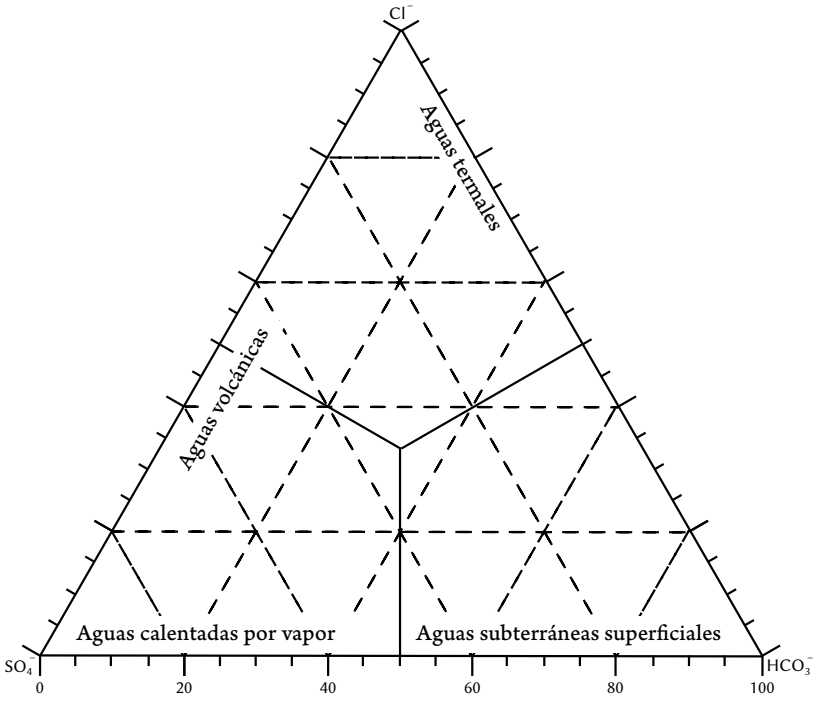


Figura 2.8: Diagrama ternario del sistema (Cl^-, $SO_4{}^-$, $HCO_3{}^-$). Muestra la zona aproximada de diferentes tipos de agua y las composiciones ternarias. Fuente: [11]. Modificado.

2.5.3 Depósitos geotérmicos superficiales

En ocasiones, no existen manantiales superficiales u otro tipo de manifestación que muestre evidencia de la presencia de yacimientos geotérmicos en el subsuelo. En estos casos, es necesaria la búsqueda de otro tipo de elementos, como son los depósitos de minerales de origen geotérmico, que se han estudiado en el Apartado 2.5.2.

Obviamente, si existen estos depósitos minerales, es porque hubo, hace tiempo, manantiales que los generaron. En particular, los depósitos de sílice amorfa y el travertino perduran mucho tiempo después de que los manantiales de agua caliente desaparecen de la superficie.

Otros elementos a tener en cuenta son las formaciones de toba[7] en el fondo de los lagos. Cuando el agua cargada de minerales emerge en lagos o lagunas, la concentración de CO_2 cambia. La pérdida de dióxido de carbono disminuye la solubilidad del carbonato de calcio, lo que provoca su precipitación. Este carbonato precipitado se deposita sobre el fondo de los lagos, formando estructuras porosas, a veces de grandes dimensiones y con forma tubular, Figura 2.9.

7: Es toba calcárea, no toba volcánica. La toba volcánica es una roca sedimentaria que se forma por la cementación de cenizas procedentes de erupciones volcánicas, como en la región de *Capadocia* en Turquía.

Las estructuras formadas en el fondo de los lagos suelen aparecer si motivos geológicos ulteriores drenan el lago total o parcialmente.

La precipitación en forma de calcita se produce según la siguiente reacción:

$$2\,HCO_3{}^-(aq) + Ca^{2+}(aq) \rightleftharpoons CaCO_3\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O \qquad (2.2)$$

Otros minerales, como sulfatos, boratos y cloruros, también indican la presencia pasada de manantiales hidrotermales. En particular, el boro es un elemento que no abunda en aguas subterráneas meteóricas, pero sí en aguas de origen hidrotermal [28].

Figura 2.9: Columnas de toba en el lago Mono, California (USA). Fuente: *Brocken Inaglory*, — CC BY-SA 3.0. Adaptado.

2.5.4 Geotermometría

Como se aprecia en la Figura 2.8, las composiciones de las aguas termales, por sí solas, no ofrecen demasiada información debido a la superposición entre muchos tipos de aguas subterráneas. La presencia de un único soluto anormalmente alto, aunque sea el boro, no prueba la existencia de un yacimiento geotérmico; sin embargo, es un indicio.

Sin embargo, mediante el estudio de las concentraciones de los componentes químicos, de la isotropía y de la composición de la fase gaseosa del fluido, se puede establecer la temperatura base de los fluidos geotérmicos profundos.

En el caso del estudio de las concentraciones, se puede aplicar siempre que el agua migre hacia la superficie a suficiente velocidad y con suficiente caudal, evitando más de un estado de equilibrio durante el trayecto ascendente del fluido. También existen otras limitaciones, como el rango de temperatura de aplicación, la presión, etc.

Así, los minerales contenidos en una roca bañada con agua caliente pasan al fluido, alcanzando un equilibrio en función de la temperatura. Conociendo la concentración de los minerales, se puede inferir la temperatura a la que se encontraban. Para su estudio, se dispone de diagramas de equilibrio concentración-temperatura. A modo de ejemplo, un alto contenido en SiO_2 presupone altas temperaturas, mientras que si hay un alto contenido en carbonatos, la temperatura del agua será menor, puesto que su solubilidad disminuye con la temperatura. Lo mismo ocurre con algunos gases procedentes de las profundidades.

Existen minerales con la misma composición química, pero con diferentes características fisicoquímicas. De forma que, en estado sólido, presentan diferentes temperaturas de disolución para una misma presión, como es el caso de la sílice amorfa, el cuarzo, la cristobalita, la calcedonia, etc.

En general, los geotermómetros más empleados son la concentración de cuarzo (SiO_2) y la concentración relativa de K, Na y C [3]:

- **Concentración de cuarzo (SiO_2)**: El cuarzo es soluble en agua a alta temperatura y presión. Si baja de forma brusca la temperatura,

la sílice precipita y no llega a la superficie. Por tanto, en general, si hay un alumbramiento de fluido con suficiente caudal y velocidad de ascensión, se considera que el cuarzo disuelto a alta temperatura se mantiene estable mientras asciende. Si el caudal es bajo y la velocidad de ascensión escasa, se puede disolver sílice amorfa durante la ascensión, dando concentraciones anormalmente elevadas[8].

Fournier, *Truesdall* y otros autores establecieron diferentes formulaciones, a partir de gráficas como las de la Figura 2.10, para calcular la temperatura T del yacimiento. A cada uno de estos geotermómetros se les aplica sus propias limitaciones y ámbito de uso.

En el caso del cuarzo, dos de los más usados, para una temperatura máxima de 250 °C y concentraciones expresadas en mg/l, o partes por millón (ppm), son los siguientes [29]:

— Sin perdida de vapor, en el ascenso (A):

$$T = \frac{1309}{5.19 - \log C} - 273.15 \quad [^\circ\text{C}] \tag{2.3}$$

— Con máxima perdida de vapor, en el ascenso (B):

$$T = \frac{1522}{5.75 - \log C_{ppm}} - 273.15 \quad [^\circ\text{C}] \tag{2.4}$$

8: No hay que olvidar que una vez disuelto, ya sea cuarzo, sílice amorfa, cristobalita, etc, no es distinguible el mineral de origen de la sílice, puesto que todos estos minerales tienen la misma composición química (SiO_2). Lo mismo ocurre a la inversa, donde las condiciones físico-químicas del entorno condicionan la forma en la que cristaliza la sílice.

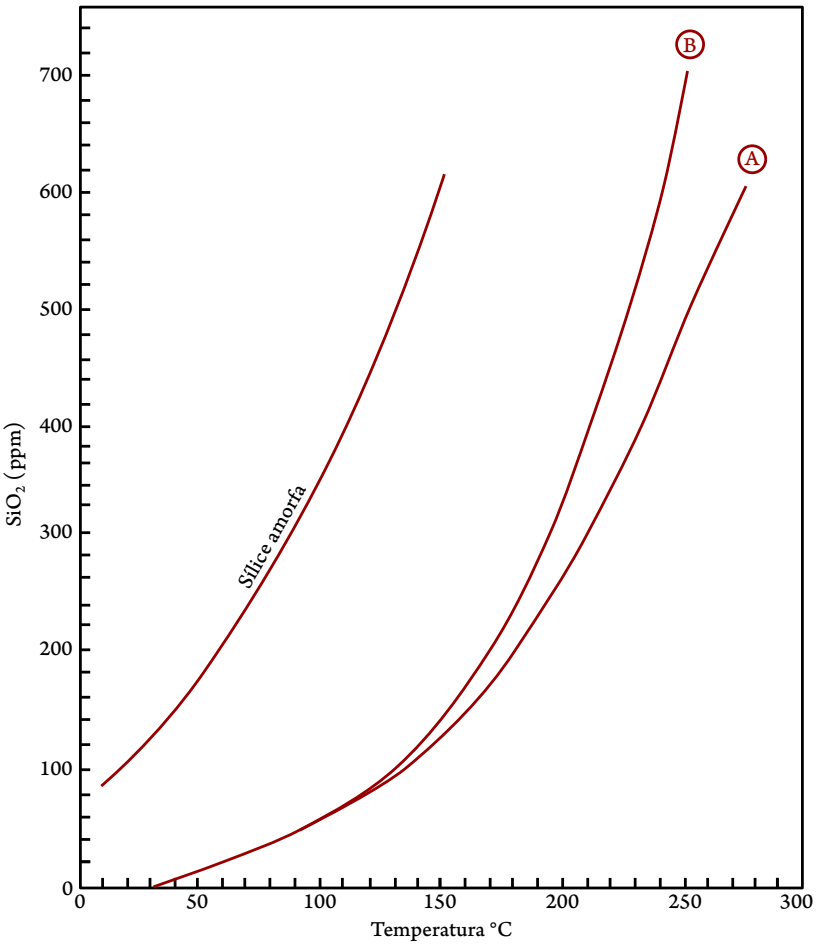


Figura 2.10: Geotermómetro del cuarzo. Diagrama de solubilidad. Presión estimada 150 bar. Fuente: [29, 30] Modificado.

- **Relación Na – K – Ca:** Este geotermómetro indica la temperatura

del agua a partir de la relación relativa de concentraciones Na/K y Ca/Na. Donde C_{Na}, C_K y C_{Ca} son concentraciones de sodio, potasio y calcio, respectivamente. Las concentraciones se expresan en mg/l, o partes por millón (ppm), aunque en este caso, al tratarse de relaciones entre concentraciones, las unidades empleadas no son relevantes. En este caso, la temperatura del acuífero T es igual a [29, 31]:

$$T = \frac{1647}{\log(C_{Na}/C_K) + \beta \log(\sqrt{C_{Ca}/C_{Na}}) + 2.24} - 273.15 \quad [^\circ\text{C}] \tag{2.5}$$

$$\begin{cases} T < 100^\circ\text{C}, \ \beta = 4/3 \\ T > 100^\circ\text{C}, \ \beta = 1/3 \end{cases}$$

2.5.5 Estudio de los isótopos

El estudio de los isótopos estables de oxígeno, hidrógeno, helio y azufre, principalmente, permite complementar el estudio de las aguas termales, sobre todo cuando existen dudas sobre resultados previos. En la Tabla 2.2 se indica la abundancia relativa de isótopos estables de estos elementos.

Tabla 2.2: Nucleidos (isótopos) estables y su abundancia. Fuente: [32].

Isótopo	Masa [u]	[%]
^{1}H	1.007 824	99.985
^{2}H (D[a])	2.014 101	0.015
^{3}He	3.016 03	0.000 14
^{4}He	4.002 60	99.999 86
^{16}O	15.9949	99.762
^{17}O	16.9913	0.038
^{18}O	17.9991	0.200
^{32}S	31.972	95.02
^{33}S	32.971	0.75
^{34}S	33.968	4.21
^{36}S	35.967	0.02

[a] Deuterio

Comparando los isótopos de un mismo elemento, se observa que poseen masas diferentes. La vibración del elemento es inversamente proporcional a su masa, y para una mayor vibración existe una mayor reactividad química y un mayor acomodo dentro de una red cristalina o en una fase de vapor.

Esto produce una segregación de los elementos más ligeros en una fase con un mayor estado de energía. Así, por ejemplo, existirá una mayor proporción de elementos relativamente más ligeros en la fase de vapor que en la fase líquida. Cuanto mayor sea la diferenciación de masa, mayor será el efecto.

El fraccionamiento se calcula comparando las proporciones de los isótopos de interés existentes en fases entre las que aparece un equilibrio. A modo de ejemplo, se considera el equilibrio entre cuarzo y calcita, y los dos isótopos de oxígeno, marcados en rojo [11]:

$$\mathrm{Si}^{18}\mathrm{O}_2 + \mathrm{CaC}^{16}\mathrm{O}_3 \rightleftharpoons \mathrm{Si}^{16}\mathrm{O}_2 + \mathrm{CaC}^{18}\mathrm{O}_3 \tag{2.6}$$

Siendo su constante de equilibrio K:

$$K = \frac{[\mathrm{Si}^{16}\mathrm{O}_2]\,[\mathrm{CaC}^{18}\mathrm{O}_3]}{[\mathrm{Si}^{18}\mathrm{O}_2]\,[\mathrm{CaC}^{16}\mathrm{O}_3]} = \frac{[^{18}\mathrm{O}/^{16}\mathrm{O}]_{\text{Calcita}}}{[^{18}\mathrm{O}/^{16}\mathrm{O}]_{\text{Cuarzo}}} = \alpha_{\text{Calcita–Cuarzo}} \tag{2.7}$$

Siendo (2.7) el factor de fracción isotópica, es equivalente a la constante de equilibrio para esta reacción de equilibrio.

Los valores de estas relaciones isotópicas se miden mediante el empleo de un espectrómetro de masas. En cambio, los valores absolutos de cada isótopo, por separado, no se miden. Para el estudio se emplean patrones de relaciones isotópicas, que se usan como patrón de comparación.

La comparación isotópica de la muestra con respecto al estándar[9], elegido en cada caso, da lugar a unos parámetros δ:

$$\delta \mathrm{D} = 1000 \left(\frac{\left[{}^{2}\mathrm{H}/{}^{1}\mathrm{H} \right]_{\text{Muestra}}}{\left[{}^{2}\mathrm{H}/{}^{1}\mathrm{H} \right]_{\text{Estándar}}} - 1 \right) \tag{2.8}$$

$$\delta^{18}\mathrm{O} = 1000 \left(\frac{\left[{}^{18}\mathrm{O}/{}^{16}\mathrm{O} \right]_{\text{Muestra}}}{\left[{}^{18}\mathrm{O}/{}^{16}\mathrm{O} \right]_{\text{Estándar}}} - 1 \right) \tag{2.9}$$

$$\delta^{34}\mathrm{S} = 1000 \left(\frac{\left[{}^{34}\mathrm{S}/{}^{32}\mathrm{S} \right]_{\text{Muestra}}}{\left[{}^{34}\mathrm{S}/{}^{32}\mathrm{S} \right]_{\text{Estándar}}} - 1 \right) \tag{2.10}$$

9: En el caso del oxigeno y el hidrógeno se emplea un patrón estandarizado denominado SMOW, por las siglas en inglés de "agua oceánica media estándar" (*Standard Mean Ocean Water*). La comparación isotópica de la muestra se expresa como la diferencia con respecto al patrón SMOW, en partes por mil. Para el azufre se empleaba el estándar VCDT, por las siglas en inglés de "Troilita del Cañón Diablo de Viena" (*Vienna Canyon Diablo Troilite*). Debido a que ya no está disponible, ahora se emplea el sulfuro de plata IAEA S-1 como patrón sustituto [33].

En el caso del agua meteórica, los valores δ^{18}O y δD dependen de la latitud y la altitud en las que se produce la precipitación. El motivo es la influencia que tiene la temperatura en el fraccionamiento isotópico durante la evaporación y la condensación. Además, se observa que existe una relación lineal entre ellos, tal y como se muestra en la Figura 2.11. En ella se muestra una recta que define el agua meteórica. Toda desviación respecto a esta recta indica que la historia de ese agua es más compleja que una simple evaporación y posterior precipitación, indicando posibles yacimientos geotérmicos.

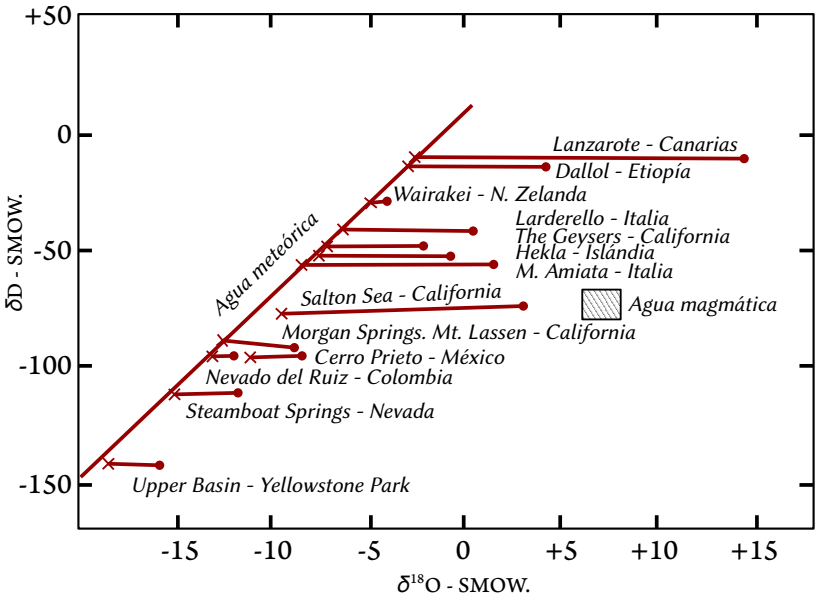


Figura 2.11: Valores δ^{18}O y δD procedentes de aguas geotérmicas. Expresado en partes por mil (‰). Fuente: [34] Modificado.

2.5.6 Exploración geofísica

La geofísica dispone de una serie de herramientas que permiten refinar la investigación hasta permitir la realización de una primera valoración de los recursos disponibles, su viabilidad económica y la duración estimada del yacimiento en condiciones productivas.

Son interesantes para identificar áreas de interés, su profundidad, etc. Con frecuencia, los resultados se pueden interpretar de diferentes maneras; por tanto, es conveniente disponer de varias hipótesis de trabajo

e ir comprobándolas a medida que se obtienen datos de los diferentes ensayos.

Algunos de ellos permiten las siguientes mediciones:

- Estudios de gravedad
- Estudios magnéticos aéreos
- Estudios magnetotelúricos
- Medidas de resistividad
- Sismicidad
- Sismología de reflexión y refracción
- Medidas de temperatura
- Teledetección multiespectral
- Otros

2.5.7 Estudios magnéticos

El campo magnético de la Tierra puede medirse mediante una brújula de geólogo y es muy útil para orientar estructuras geológicas en un contexto geográfico. Sin embargo, también existen campos magnéticos de ámbito local relacionados con la geología de esa zona.

Ciertos minerales poseen propiedades magnéticas, especialmente aquellos que contienen óxidos de hierro. En algunos casos, los minerales son magnéticos por sí mismos, como es el caso de la magnetita (Fe_3O_4). En otros, son sensibles a los campos magnéticos exteriores, como el campo geodinámico terrestre, generando un campo magnético inducido[10].

10: A esta propiedad se la denomina susceptibilidad magnética

Si se emplea un magnetómetro lo suficientemente sensible en la superficie, se medirá la suma del campo geodinámico, el campo magnético de los vientos solares y el campo magnético de las rocas locales. Conociendo los dos primeros campos magnéticos y restándolos de las lecturas del magnetómetro, se obtiene el patrón del campo magnético rocoso local. El rastreo se suele realizar vía aérea[11], siguiendo un patrón de rastreo que no permite profundizar demasiado en el subsuelo.

11: Actualmente, el empleo de drones ha permitido disminuir los gastos de este tipo de operaciones, y mejorar la la profundidad de las mediciones.

Los fluidos geotérmicos varían la mineralogía de las rocas por las que pasan, produciendo una anomalía magnética a la baja. Para poder detectarlo, es preciso tener un estudio detallado de la susceptibilidad magnética de las rocas del entorno. Este estudio se lleva a cabo con una recolección sistemática de muestras en la superficie y mediciones en el laboratorio. Conocida la historia geológica y la posible distribución de rocas en profundidad, se pueden detectar anomalías si estos datos se comparan con los estudios geoquímicos de la región.

2.5.8 Mapas resistivos

Los materiales de la corteza terrestre suelen ser malos conductores eléctricos y, por lo tanto, tienen una alta resistividad eléctrica.

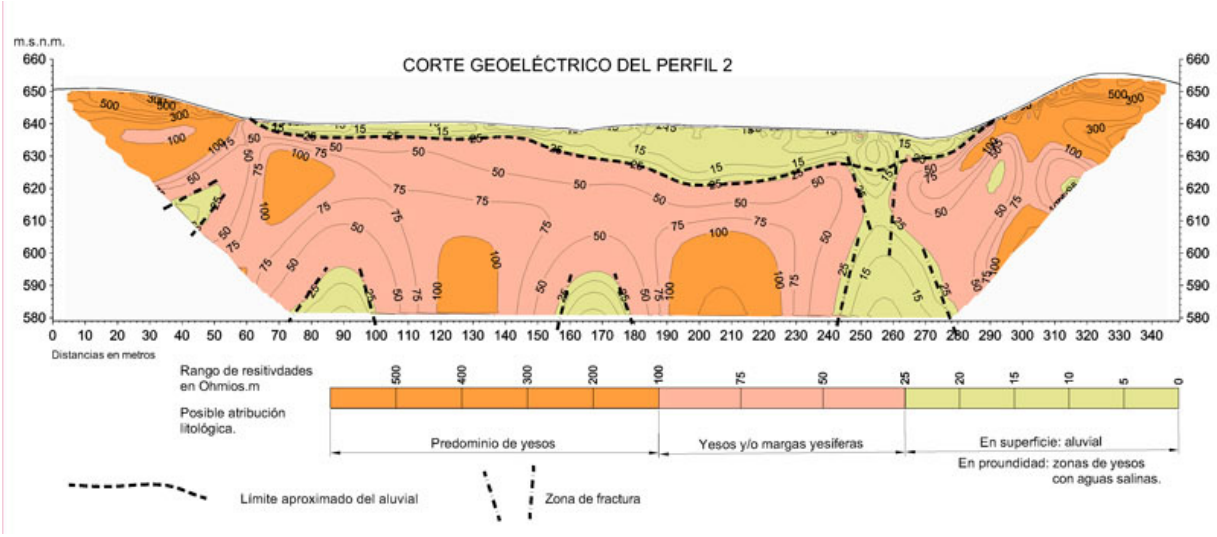


Figura 2.12: Ejemplo de un tomografía eléctrica, basada en un estudio de la resistividad eléctrica del terreno. En concreto es un perfil de investigación hidrogeológica para delimitar acuíferos. Fuente: OCSA - Técnicas Geofísicas. [35].

La resistividad[12] está relacionada con la resistencia eléctrica según la siguiente expresión:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad [\Omega] \tag{2.11}$$

Donde L es la longitud del material [m] y A es la sección [m^2]. La presencia de fluidos en los poros y fracturas, especialmente si son fluidos salinos, reduce la resistividad de manera apreciable.

Las mediciones se realizan introduciendo sondas separadas entre sí. Se alimentan algunas sondas con pulsos eléctricos y se estudia la respuesta resistiva del terreno atravesado. Esto permite establecer mapas resistivos del subsuelo hasta una profundidad de varios cientos de metros, como el mostrado en la Figura 2.12.

Estos mapas resistivos permiten cartografiar los recursos geotérmicos buscados, delimitando las zonas de baja resistividad. Una vez más, debe trabajarse conjuntamente con otras técnicas para evitar confusiones o interpretaciones erróneas de la baja resistividad.

Estos estudios presentan la limitación de la profundidad, puesto que la mayoría de los yacimientos de alta entalpía suelen estar situados a profundidades superiores a varios kilómetros.

12: La resistividad eléctrica, (ρ) que se mide en [Ω m]. Es una propiedad intrínseca de cada material y mide la oposición al flujo eléctrico a través de un material. Es la inversa de la conductividad eléctrica σ.

2.5.9 Mapas magnetotelúricos

Los estudios magnetotelúricos (MT) permiten obtener mapas de estructuras profundas, de varios kilómetros de profundidad. Se basan en la variación del campo magnético terrestre a lo largo del día, tanto en magnitud como en dirección. Estas variaciones inducen pequeñas corrientes eléctricas en las rocas que pueden medirse mediante sensores. Estas corrientes inducidas presentan frecuencias e intensidades distintas.

Las medidas se realizan con una frecuencia de muestreo continua o en períodos de varios segundos. La lectura de valores se alarga durante horas o incluso días. Respondiendo a cada material con una corriente de diferente frecuencia e intensidad.

El análisis de los registros permite la construcción de una tomografía de la geología del terreno a lo largo de la alineación de sensores en superficie, mucho más profunda que el estudio resistivo habitual. Se puede observar un ejemplo en la Figura 2.13 correspondiente al Monte *Tongariro*[13] en la Isla Norte de Nueva Zelanda.

13: En este volcán y la zona aledaña se rodó parte de la trilogía cinematográfica de "El Señor de los Anillos" de *Peter Jackson* [36].

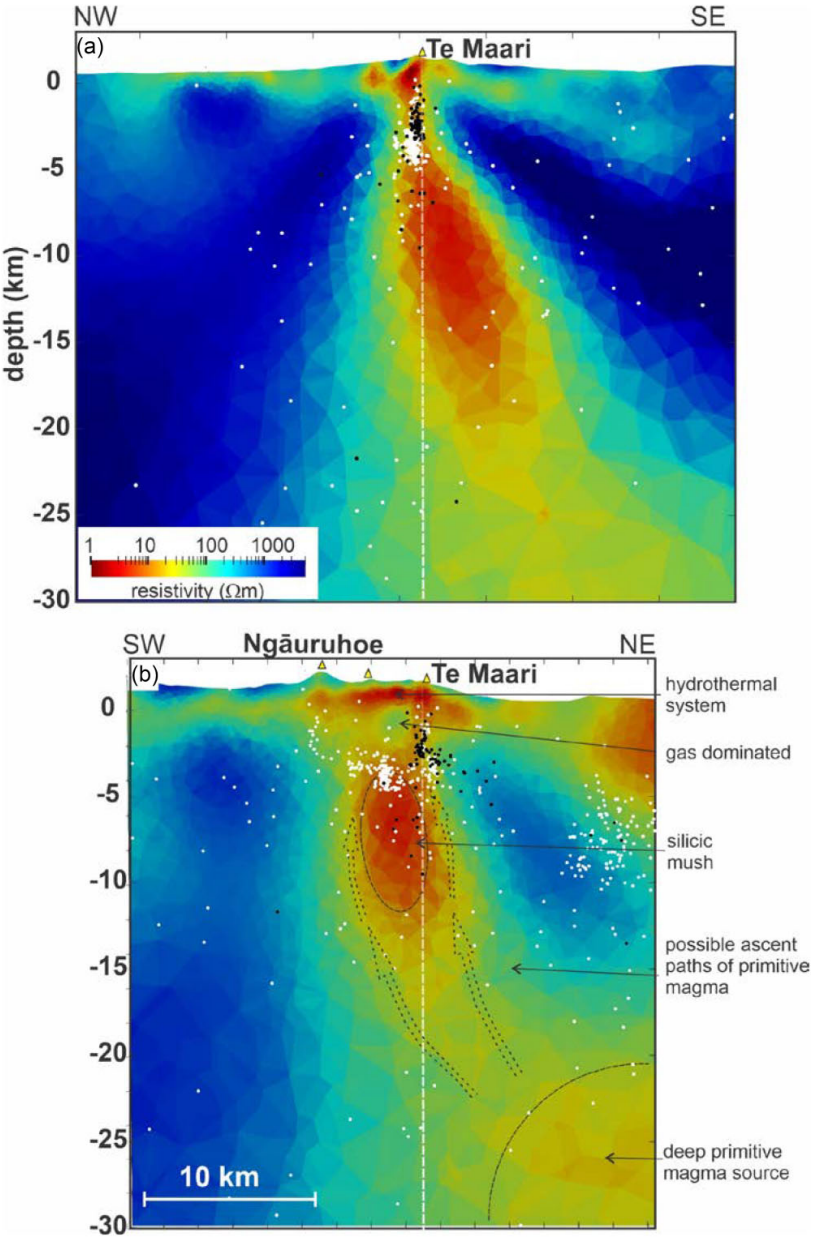


Figura 2.13: Ejemplo de interpretación de un tomografía MT en el Monte *Tongariro*. (a) Sección transversal NO-SE. Los terremotos, dentro de un radio de 1,5 km de la sección transversal, se muestran con puntos blancos y negros; los negros indican los terremotos que se produjeron en el período de seis meses anterior a la erupción de agosto de 2012. (b) Sección transversal SO-NE. Las líneas discontinuas blancas verticales muestran el punto de intersección de las dos secciones transversales. Fuente: [37].

Un estudio MT permite analizar zonas a profundidades de más de 20 km. Esto permite encontrar la fuente real de calor y las zonas de flujos ascendentes a poca profundidad.

En el ejemplo de la Figura 2.13, los datos obtenidos se han estructurado empleando un método de inversión de elementos finitos no estructurados, con forma de tetraedro, que incorpora la topografía. La técnica ha permitido resolver, por primera vez, los detalles del sistema hidrotermal superficial y su relación con el sistema magmático subyacente. En este caso, se combina la imagen de resistividad MT con la sismicidad, que es un indicador del ascenso del magma [37].

2.5.10 Gravimetría

En este caso, se emplea la fuerza de gravedad para determinar la distribución de los distintos tipos de rocas en el subsuelo. Para ello, se analizan los ligeros cambios en la intensidad del campo gravitacional en la superficie. Se realizan mediciones puntuales o sistemas de medición continua mediante barrido aéreo o marítimo. Esto permite crear cartografías detalladas de la gravedad.

Según la mecánica clásica *Newtoniana* , la fuerza de atracción gravitatoria entre dos cuerpos es:

$$F = G\,\frac{mm'}{r^2} \quad [\mathrm{N}] \tag{2.12}$$

Siendo G la constante de gravitación, y cuyo valor es $6.67{\times}10^{-11}\,\mathrm{Nm^2/kg^2}$. Los valores m y m' corresponden a las masas respectivas de los objetos que se atraen mutuamente. Y r la distancia entre ellos.

Dado que la masa de la Tierra es una constante y vale M, y R el radio medio del planeta, la fuerza de la gravedad sobre un objeto situado en la superficie del planeta es:

$$F = GM\,\frac{m}{R^2} \quad [\mathrm{N}] \tag{2.13}$$

Por otra parte, al ser la gravedad una fuerza, sabemos que su valor es la masa multiplicada por la aceleración de la gravedad g:

$$F = mg \quad [\mathrm{N}] \tag{2.14}$$

Igualando (2.13) y (2.14) podemos calcular el valor de g:

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad [\mathrm{m/s^2}] \tag{2.15}$$

Se considera $g_n = 9.806\,65\,\mathrm{m/s^2}$ el valor de la gravedad terrestre por convenio. Pero, como el planeta no es un esferoide perfectamente homogéneo y además la densidad varía con la composición del subsuelo, g también varía con la localización, la altura y la composición del subsuelo.

Tanto la corteza oceánica como la continental flotan sobre el manto. Debido a la plasticidad de los materiales a esa profundidad, se considera que su composición es homogénea. Por tanto, las variaciones en la medición de g dependerán del espesor y de la variación en la densidad de los materiales en los que se realiza la medición. Por otra parte, como la distancia al centro de masa de la Tierra está elevada al cuadrado, su valor es más sensible a la altura a la que se realiza la medición. Por el mismo motivo, la localización de masas rocosas con una densidad diferenciada en profundidad también afecta la medición. Para tomar estas medidas, se utilizan gravímetros con una precisión superior a una parte por millón (10^{-6}).

Por otra parte, los procesos geotérmicos pueden variar la densidad de las rocas debido a la interacción con los fluidos geotérmicos, al relleno de fracturas y poros. En otros casos, minerales ligeros como los carbonatos pueden ser sustituidos por sílice, que es más densa. O bien el caso contrario: la sustitución de feldespatos por zeolitas, que poseen una menor densidad. Una mayor facturación implica menor densidad, y un relleno de fracturas por minerales conlleva un aumento en la densidad. Todo

esto implica que, para poder usar la gravimetría como herramienta, es necesario conocer muy bien la historia geológica de la zona y complementarla con otras herramientas. O considerarlo como una herramienta de confirmación.

2.5.11 Sismología de reflexión

Las ondas de baja frecuencia se transmiten bien a través del terreno, llegando a grandes distancias. Por eso, los terremotos y las explosiones atómicas pueden detectarse a miles de kilómetros de distancia. Para medir su intensidad, se utilizan sismómetros.

Existen dos tipos de onda de baja frecuencia que se generan y transmiten durante un terremoto:

- **Ondas p:** Son ondas de presión que se transmiten comprimiendo y expandiendo el terreno de manera alternativa en la dirección de propagación de la onda. Normalmente se transmiten a velocidades en un rango de 1 km/s a 8 km/s en la corteza terrestre.
- **Ondas s:** También llamadas ondas transversales o de cizalladura, que provocan un movimiento perpendicular a la dirección de desplazamiento de la onda. Su velocidad ronda el 60% de la onda p asociada. No atraviesan material líquido.

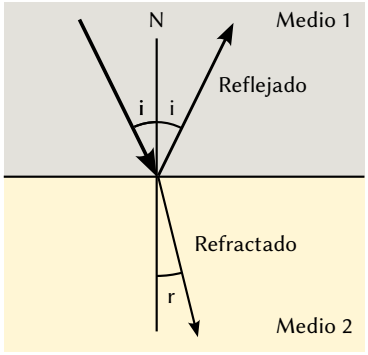


Figura 2.14: Esquema de rayo incidente con una reflexión de angulo (i) y refracción por cambio de medio con un angulo (r). Siendo N la normal al plano de cambio de medio. Fuente: los autores.

Las ondas sísmicas se transmiten a mayor velocidad en materiales densos. Cuando una onda se transmite a través de un material y se encuentra con un cambio en la densidad del material, se produce la reflexión de la onda. Este efecto se aprovecha en la sismología de reflexión para la exploración del medio. Al igual que en los fenómenos de propagación de la luz, también se producen efectos de refracción de las ondas, cuya desviación depende del índice de refracción propio de cada material, Figura 2.14.

En la sismología de reflexión se emplean pequeñas cargas explosivas o dispositivos mecánicos vibratorios como fuentes de ondas, y unos sensores denominados geófonos para recibir las ondas reflejadas. Una vez que se produce la emisión de ondas sísmicas, se reciben señales reflejadas por los geófonos. La intensidad de la reflexión de las ondas depende de varios factores:

- La resistencia al paso de las ondas (impedancia).
- El grado de fracturación de la roca.
- El angulo de incidencia de las ondas.
- El grado de saturación de fluidos líquidos o vapor de la roca.
- El grado de saturación de fluidos de la roca.
- El grado de definición del cambio de fase donde se refleja.

Para medir distancias y profundidades, se aprovecha la velocidad de propagación de la onda en su trayecto desde la fuente hasta su llegada, tras la reflexión, al sensor.

La parte mas complicada, una vez recabados los datos sísmicos, es la interpretación, que a menudo necesita confirmación por otras vías. En la Figura 2.15 se muestra un ejemplo del sofisticado tratamiento de señales

pertenecientes a un estudio que aplica la técnica de reflexión sísmica. En este caso, la zona marcada como objetivo geotérmico fue confirmada mediante un sondeo (linea discontinua vertical). Una mayor frecuencia en la fracturación de esa zona permitió una mayor reflexión de las ondas. En este caso, el estudio también permitió confirmar la correspondencia entre la reflexión anómala y la presencia de vapor caliente.

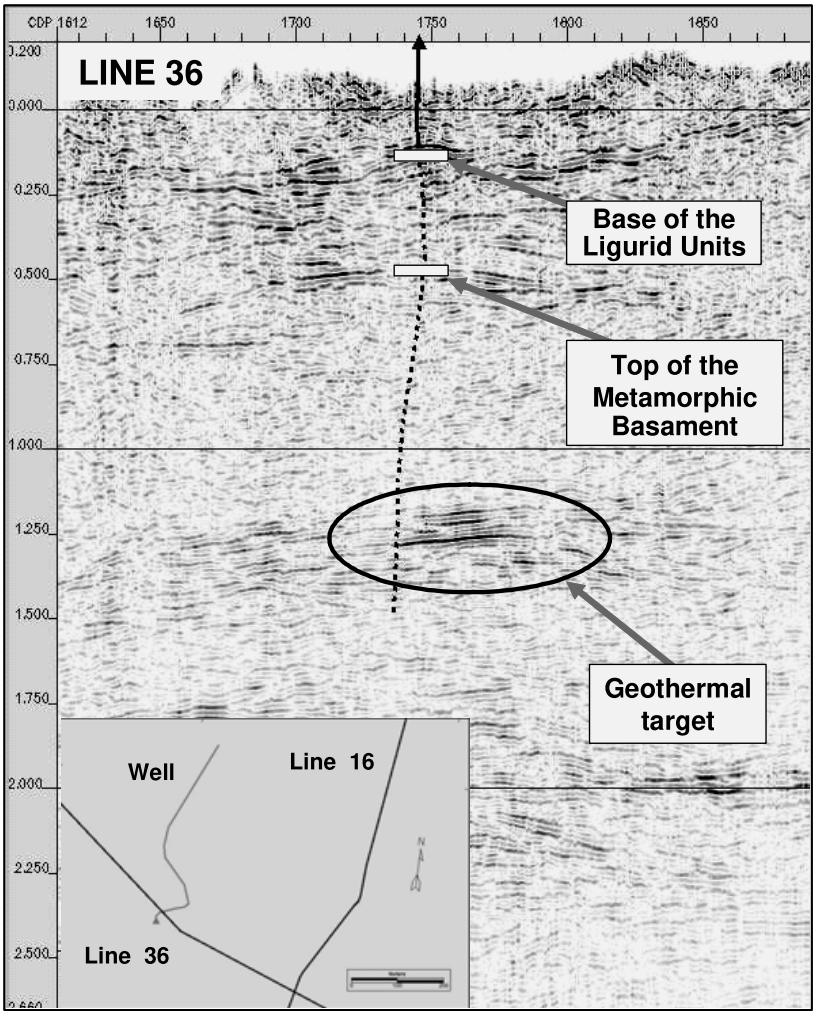


Figura 2.15: Sección de apilamiento sísmico que muestra una correlación entre una zona de alta reflexión sísmica con objetivos geotérmicos. Fuente: [38].

Los avances en el procesamiento complejo de datos han permitido estudios en 3D a partir del apilamiento de datos de reflexión sísmica en dos dimensiones para obtener modelos de las estructuras geológicas subterráneas [38].

2.5.12 Termometría

La medición de la temperatura del subsuelo permite calcular gradientes térmicos y estimar si existe un recurso geotérmico viable. Como ya se ha comentado anteriormente, la perforación es una tecnología muy cara y, por tanto, solo se realiza cuando hay datos sólidos que fundamentan una alta probabilidad de éxito para explotar el yacimiento. Solamente esto justifica el gasto.

Para reducir la inversión, se realizan sondeos de pequeño diámetro en la zona del objetivo. Esto implica que el diámetro máximo será de 150 mm. Reduciendo significativamente el gasto y el tiempo de perforación. Con estas condiciones, la profundidad máxima alcanzable es de unos 2 km, empleando máquinas más pequeñas y menos material.

El método para tomar medidas de temperatura consiste en realizar perforaciones de pequeño diámetro en la zona donde se encuentra el yacimiento, formando un abanico con diferentes ángulos, como en la Figura 2.16. Para tomar las medidas, se emplea equipo de pequeño diámetro. En la actualidad, las temperaturas se pueden medir con sensores de fibra óptica que permiten tomar lecturas en todo el sondeo.

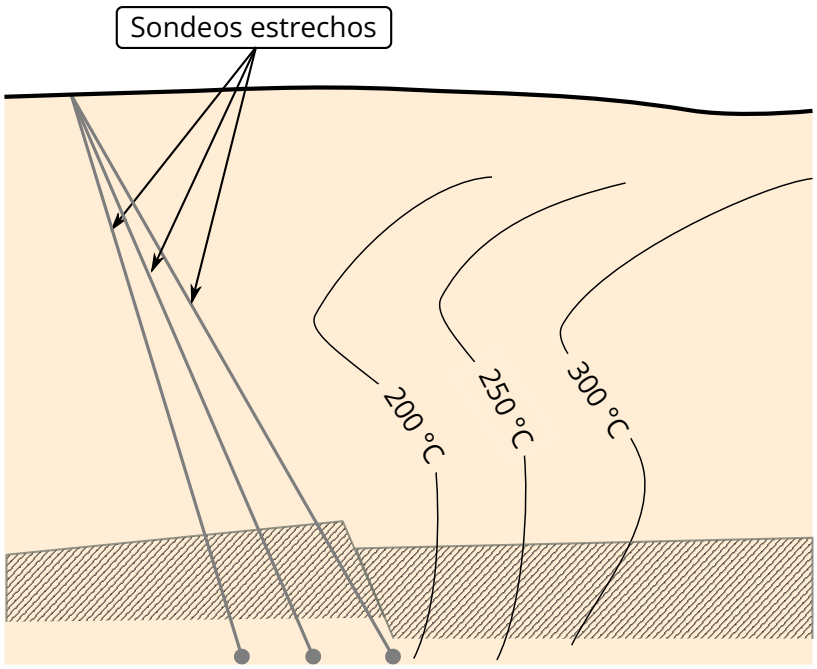


Figura 2.16: Sondeos termométricos en abanico. Se aprovechan para tomar muestras con recuperación de testigo. Fuente: los autores.

Aprovechando las perforaciones, se toman muestras con recuperación de testigo continuo para realizar medidas de conductividad térmica en el laboratorio. También se puede medir la porosidad y otras características de las muestras recogidas.

Con los valores de conductividad y de temperatura, se puede calcular el flujo de calor aplicando la ecuación de *Fourier* (1.1). Las regiones con yacimientos geotérmicos suelen presentar un mapa térmico complejo, donde el gradiente geotérmico no es lineal ni homogéneo. No se suelen tener demasiados datos para realizar un mapa detallado de anomalías térmicas superficiales, pero el conocimiento del flujo de calor medio de la zona permite interpretar mejor las anomalías térmicas encontradas.

Un indicio prometedor de viabilidad es encontrar flujos de calor del orden de 100 mW/m^2. Otro buen indicador es una temperatura moderadamente alta, pero estable en profundidad, y una zona con temperaturas más elevadas cerca de la superficie. Esto indicaría, potencialmente, que se ha encontrado una zona de afloramiento convectivo [11].

3 Usos de la geotermia

3.1 Uso directo 51
3.2 Generación eléctrica . . . 53
3.3 Climatización geotérmica 54
3.3.1 Modelo térmico superficial 54

Como se ha podido deducir de los capítulos anteriores, el aprovechamiento de la energía geotérmica de alta entalpía suele basarse en anomalías térmicas. En el caso de la media y baja entalpía, normalmente se buscan cuencas sedimentarias profundas. Esto significa que solo se podrá emplear en los lugares donde existan y sea económicamente viable su explotación. Dividiendo su aplicación en dos grandes grupos: Geotermia para uso directo y para generar electricidad.

Por otra parte, está la climatización geotérmica, que se basa en la estabilidad de temperaturas y la inercia térmica del subsuelo, a partir de los primeros 15 m a 20 m de profundidad, casi en cualquier parte. Para su aprovechamiento, se emplean principalmente bombas de calor geotérmicas.

3.1 Geotermia de uso directo

El uso que se hace de la geotermia, dado el estado y la evolución de la tecnología, no siempre depende de la temperatura, tal como se observa en la Tabla 3.1.

Además de la temperatura máxima de aprovechamiento, también es importante la distancia máxima a la que se encuentra el punto de consumo de la energía térmica. Hay que considerar las pérdidas térmicas y la energía consumida en el transporte. A modo de referencia, en aplicaciones de calefacción de distrito, se considera que una distancia límite es de 60 km.

Lo habitual, en aplicaciones de uso directo, es un rango de temperaturas de 35 °C a 95 °C, cuyos usos suelen ser:

- Calefacción.
- Invernaderos.
- Balnearios.

En menor medida, se emplea en usos industriales y en acuicultura, como los mostrados en la Tabla 3.1, pudiendo satisfacerse cualquier necesidad de calor moderado.

Cabecera: Fotografía aérea de un paisaje rodeado de montañas y lagos. Fuente: *wirestock* en *www.freepik.es*.

Figura 3.1: Imagen de una fuga de la red de vapor de la ciudad debido a una avería en la ciudad de Nueva York (EE.UU). Las canalizaciones suelen seguir la red de alcantarillado. En caso de fuga el equipo de mantenimiento municipal coloca una chimenea portátil que canaliza el vapor perdido a unos tres metros de altura. Esto, evita una nube de vapor que puede obstaculizar la visibilidad del trafico mientras dure la reparación. Fuente: los autores.

Figura 3.2: Imagen de instalaciones de descanso en *Blue Lagoon*, Islandia. Fuente: *Karsten Winegeart* en Unsplash.

En muchas ciudades del mundo se emplea vapor como sistema de distribución de calefacción de distrito, Figura 3.1. La geotermia constituye una solución que permite emplear tecnología ampliamente probada. Reduciendo el consumo de combustibles fósiles y aprovechando infraestructuras ya existentes.

En países con climas fríos, como Canadá y el norte de EE.UU. En el norte de Europa, se emplea para evitar la congelación de calles, aceras o puentes. Aunque en estos casos también se suelen utilizar bombas de calor geotérmicas. En el caso de Islandia, se emplea con propósitos lúdicos, como es el caso de la "Laguna azul" en *Reikiavik*, Figura 3.2. Y en la ciudad balneario de *Karlovy Vary*, en la República Checa, con propósitos de salud.

La utilización directa de la energía geotérmica ha permitido el ahorro del equivalente a 350 millones de barriles de petróleo anuales. Evitando 148 millones de toneladas de CO_2 en emisiones a la atmósfera [39]. Sin embargo, si esta cantidad se compara con las emisiones totales a la atmósfera en 1917, estimadas en 36 061 millones de toneladas [40], se observa que no se llega al 1% de las emisiones globales para ese año.

Por tanto, a día de hoy, la contribución de la energía geotérmica de uso directo sigue siendo muy pequeña frente al resto de las energías.

Tabla 3.1: Algunas aplicaciones de la energía geotérmica de uso directo. Fuente: [3]. Modificado.

Entalpía	(°C)	Aplicaciones
Alta entalpía		
	180	Evaporación de soluciones concentradas
		Pulpa de papel
	170	Obtención de agua pesada
		Secado de tierra de diatomeas
	160	Secado de madera y de algas
	150	Fabricación de alúmina (Proceso *Bayer*)
Media entalpía		
	140	Secado rápido de productos agrarios
	130	Refinado de azúcar
		Extracción de sales por cristalización
	120	Obtención de agua destilada
	110	Secado de forraje y hortalizas
	100	Lavado y secado de lana
Baja entalpía		
	90	Secado de pescado
	80	Calefacción convencional residencial
	70	Límite inferior de refrigeración por absorción
	60	Calefacción de invernaderos y establos
	50	Cultivo de setas
	40	Calefacción por suelo radiante
	30	Biodegradación, fermentación, piscinas
	20	Piscicultura y acuicultura

3.2 Generación eléctrica

Actualmente, la producción de electricidad es la aplicación de la geotermia que presenta el mayor interés comercial debido a la alta demanda de energía y a su elevado precio. Factores como la guerra en Ucrania, el desarrollo de la IA y los centros de datos, entre otros, hacen prever que los precios de la energía seguirán siendo altos durante mucho tiempo.

En el contexto de la energía geotérmica, las primeras plantas de producción eléctrica datan de principios del siglo XX. Por tanto, aunque no son novedosas, estas plantas eléctricas han evolucionado a la par que el resto de las plantas eléctricas, especialmente en aspectos como la optimización energética, el control de la contaminación y el impacto ambiental.

Conceptualmente, una planta de energía geotérmica es igual a cualquier planta térmica destinada a la producción de electricidad. Tal y como se estudia en el Capítulo 5.

En esencia, se trata de una turbina de vapor alimentada por vapor de agua de origen geotérmico. La turbina, a su vez, mueve un generador eléctrico estándar.

La primera planta geotérmica comercial disponía de una potencia total de 250 kW. Se puso en servicio en Italia en 1913, en *Larderello*. En 1958, se construyó la planta de *Wairakei* en la Isla Norte de Nueva Zelanda. En 1960, *The Geysers* en California, EE.UU. *Cerro Prieto*, en México, en 1963. La de *Matsukawa*, en Japón, fue la siguiente en 1966.

Con posterioridad, le han seguido plantas comerciales en todo el mundo [41]: Alemania, Argentina, Australia, Austria, China, Costa Rica, El Salvador, Etiopía, Filipinas, Grecia, Guatemala, Indonesia, Islandia, Kenia, Nicaragua, Papúa Nueva Guinea, Portugal (Azores), Tailandia, Taiwán, Turquía, etc.

3.3 Climatización geotérmica

Cuando no hay ninguna anomalía térmica localizada, o dicho de otra forma, si no existen temperaturas operativas significativamente altas, el uso de la geotermia se limita a aprovechar la enorme inercia térmica del suelo y la estabilidad térmica para una cota dada que presenta el terreno, teóricamente, a partir de los 15 m a 20 m de profundidad.

Se suelen emplear bombas de calor geotérmicas, obteniendo climatización (calefacción y aire acondicionado), así como la producción de agua caliente sanitaria (ACS). Es el sistema de bomba de calor más eficiente que existe. Se trata este tema con mayor profundidad en el Capítulo 9. En todo caso, la climatización geotérmica se basa en:

- Gran capacidad térmica del terreno.
- Aprovechamiento de la energía procedente del Sol, en los primeros 400 m de la corteza terrestre.

3.3.1 Modelo térmico superficial

La energía del Sol se acumula en los primeros 400 m, ya sea por radiación o penetrando en el subsuelo a través del agua meteórica. Por tanto, la temperatura del subsuelo está relacionada con el clima local.

Más allá de estos primeros cientos de metros, el calor procedente del interior del planeta cobra importancia. Por otra parte, la inercia térmica que posee el terreno hace que la temperatura sea estable a partir de los 15 m a 20 m de profundidad. De manera que, en ese punto, la temperatura del suelo coincide con la media climática local. Aumentando la temperatura con la profundidad, en función del gradiente geotérmico, y permaneciendo estable durante todo el año.

Esta característica es la que aprovechan las bombas de calor geotérmicas para minimizar el gasto energético. Intercambiando calor con el terreno que se encuentra a la temperatura media climática local, se optimiza el rendimiento termodinámico de la máquina.

Es especialmente interesante la ecuación que desarrolló *Kusuda* [42] y que está representada para cada mes del año en la Figura 3.3.

$$T_z = T_m - Ae^{\left(-z\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}\right)}cos\left[\frac{2\pi}{365}(t - t_0 - T_s\frac{z}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}})\right] \quad [°C] \qquad (3.1)$$

Siendo T_z, la temperatura en función de la cota z y el tiempo t, expresada en días. A representa la amplitud en la variación de la temperatura en la superficie del suelo y T_m, el valor medio de dicha temperatura. Por último, t_o es el día con la temperatura más baja del año.

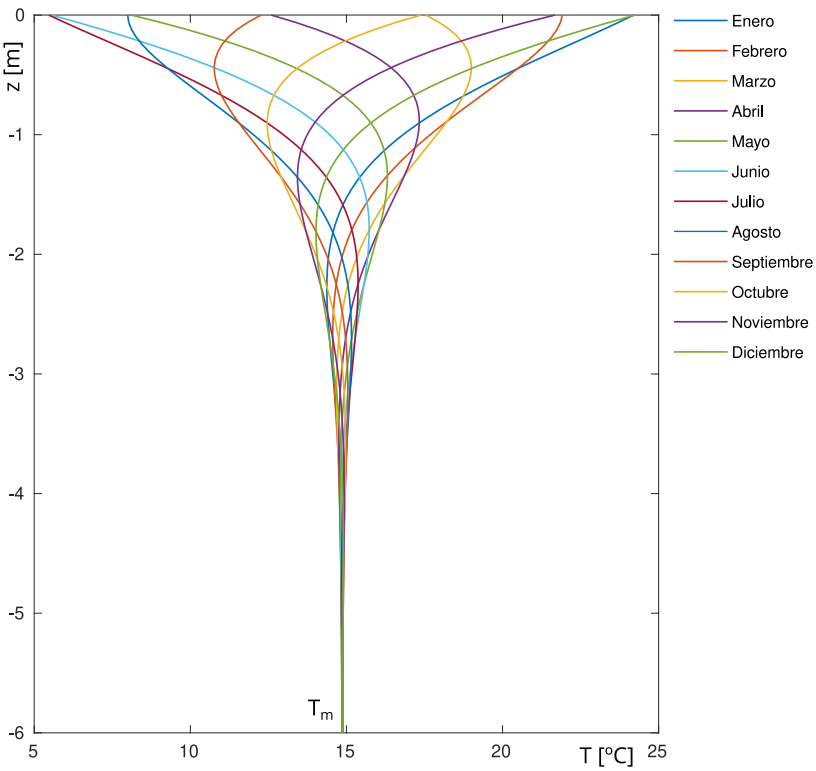


Figura 3.3: Representación en 2D de la ecuación de *Kusuda*, Figura 3.3. Solo se representa el primer día de cada mes de un año natural. Fuente: los autores.

Cuyos valores máximo y mínimo se calculan a partir de la Ecuación (3.1) y se muestran a continuación:

$$\text{T. máxima y mínima} \begin{cases} T_{max} = T_m + Ae^{\left(-z\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}\right)} & [^\circ\text{C}] \\ \\ T_{min} = T_m - Ae^{\left(-z\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}\right)} & [^\circ\text{C}] \end{cases} \tag{3.2}$$

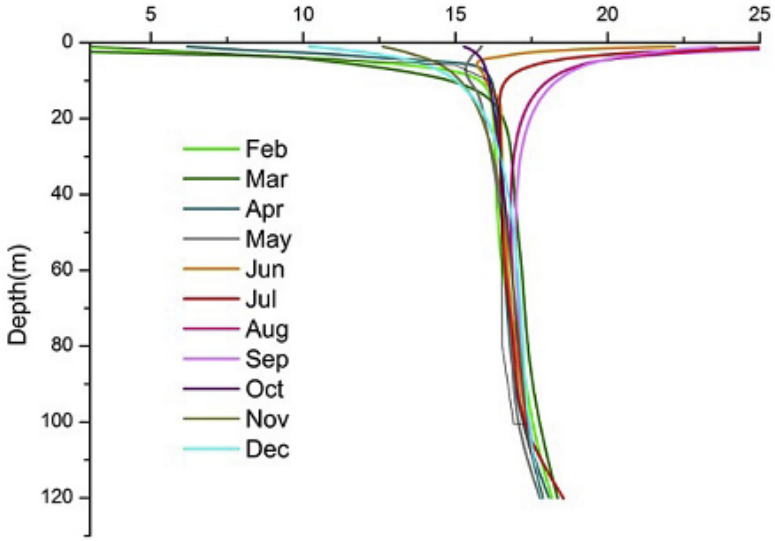


Figura 3.4: Perfil de temperaturas en sondeo de ensayo de 120 m de profundidad en el Polígono Industrial de *Tianfulong*, Distrito de *Caidian*, de la ciudad china de *Wuhan*. Fuente: [43].

Este modelo se ajusta bastante bien a la realidad y converge en la temperatura media local del año. Dicha temperatura es la semisuma de los

valores calculados en la Ecuación (3.2). En la práctica, la profundidad a la que se logra la estabilidad varía según el terreno y el clima. En Madrid, la estabilidad se suele alcanzar, según pruebas de campo, sobre los 5 m, pero en otros lugares esta cota es mayor. Un ejemplo de esto último se puede observar en la Figura 3.4, cuya estabilidad se alcanza a unos 20 m.

Como no siempre se tienen valores reales del perfil de temperaturas de un sondeo, la VDI 4640 [44] estima el comienzo de la estabilidad térmica en un rango de 15 °C a 20 °C, a efectos de diseño y dimensionamiento.

Geotermia de alta entalpía

Esta página está en blanco intencionalmente.

4 Perforación geotérmica

4.1 Evolución tecnológica

4.1 **Evolución tecnológica . . 59**
4.2 **Tecnología de perforación 60**
4.2.1 Sistema de perforación . . . 61
4.2.2 Lodos de perforación geotérmicos 61
4.2.3 Entubado y cementado de sondeos geotérmicos 62
4.3 **Acondicionado y puesta en producción 65**
4.4 **Sistemas de bombeo geotérmico 66**

Las primeras perforaciones para uso geotérmico industrial datan del año 1835. Se produjeron en la actual región italiana de *Larderello* para la producción de ácido bórico, aprovechando el calor procedente de fluidos geotérmicos. Con posterioridad, en 1912, se empleó por primera vez la geotermia para la producción de electricidad en la misma región de *Larderello*. En esta primera planta de producción eléctrica se instaló una turbina de vapor de 250 kW. En ambos casos, el sistema empleado fue la perforación por cable [45].

La perforación por cable, o perforación a percusión con cable, se basa en el izado y la posterior caída libre de un trépano pesado, de hasta 7 t. Al someter el cable de acero, con una distribución de fibras helicoidales, el peso del trépano produce una tendencia a girar sobre sí mismo. Debido a este efecto, el trépano no golpea de manera consecutiva en la misma posición y la perforación es óptima.

A comienzos de los años 1920, se acometieron nuevos proyectos para la producción de electricidad en Estados Unidos. Se perforaron siete sondeos mediante el método del cable en la planta *The Geysers*, en California. Poco después, en 1928, se aplicó por primera vez la geotermia para calefacción urbana. En este caso, en Islandia, se emplea el método de perforación con granalla.

La perforación con granalla emplea la granalla metálica como componente abrasivo de un chorro de aire a alta presión, utilizado para perforar o desbastar materiales duros. La granalla puede ser fabricada con varios materiales, en función de la dureza requerida. Las más habituales son las granallas de acero, acero inoxidable y granalla de alambre cortado[1].

Es en la década de 1950 cuando se empiezan a usar métodos de perforación modernos para la explotación geotérmica. Llegándose a profundidades medias de unos 1500 m. En esta época, se pusieron en marcha nuevas instalaciones en *Wairakee* , en la Isla Norte de Nueva Zelanda; *Pathé* , en México; y en muchas otras partes alrededor del mundo. Aunque todo el potencial de esta tecnología no se hace patente hasta la década de 1970, con la primera crisis del petróleo.

1: También existen granallas formadas por partículas de carburo de wolframio embebidas en una matriz de aleación de Cromo-Níquel. Esta granalla se suele emplear en fabricación de coronas de perforación [46].

Cabecera: Torres de perforación.
Fuente: © *pixabay*

La evolución en la tecnología de perforación, especialmente en pozos geotérmicos, está ligada a la profundidad de los sondeos y a la rentabilidad de las perforaciones.

4.2 Tecnología moderna de perforación geotérmica

Actualmente, la tecnología de perforación empleada en la geotermia de alta entalpía es básicamente la misma que se utiliza en la perforación de petróleo o gas, salvo por pequeñas modificaciones. Una de estas diferencias es el diámetro de los sondeos, que en geotermia son mayores. Esto implica que el peso de la sarta de perforación es sensiblemente mayor para una misma profundidad. Normalmente, es necesario sobredimensionar un equipo del orden de un 30% o un 40% para la misma profundidad en caso de usarse para perforar sondeos geotérmicos de alta entalpía. Y, aunque la sarta de perforación no necesita prestaciones especiales, también se recomienda el empleo de un varillaje de 127 mm o 168 mm de diámetro [45].

Las dimensiones de la cabeza de pozo y los preventores (BOP[2]) son mayores. La cabeza de pozo en perforaciones geotérmicas trabaja con presiones menores que en el caso del petróleo y el gas [45].

2: BOP del inglés *Blowout preventer*. En Español se suele traducir como "preventor".

Durante las operaciones de perforación, para evitar la intrusión de fluidos procedentes de la formación rocosa, se debe mantener la presión de la columna de lodo de perforación ligeramente por encima de dicha presión. Sin embargo, en la práctica, la presión de la columna de lodo suele ser, con frecuencia, menor que la de la formación. Esto puede producir reventones en la superficie, que pueden causar daños personales y materiales en las instalaciones. Para evitar esto, se usan los preventores, también llamados BOP, mostrados en la Figura 4.1.

El uso del BOP no es exclusivo de la geotermia ni de la perforación de hidrocarburos. Cualquier sondeo profundo puede presentar problemas de reventones. Como dato curioso, en la perforación del pozo Superprofundo de *Kola* en Rusia, cerca de la frontera con Noruega, se producía burbujeo de hidrógeno procedente de la formación rocosa a través del lodo de perforación. También se descubrió la presencia de roca saturada de agua a profundidades extremas [47].

Figura 4.1: Imagen de Preventor de reventones (BOP). Fuente: SGP [48].

Las bombas de lodo empleadas en geotermia son iguales a las empleadas en hidrocarburos, pero los caudales son mayores. Debido a la alta temperatura, presentan mayor desgaste que en el caso de perforaciones petroleras.

Con respecto al sistema de circulación de lodos, se emplean torres de refrigeración que permiten un salto térmico de hasta 20 °C. Si fuera necesario un mayor salto térmico, se emplearían intercambiadores de calor adicionales.

Tanto las grasas como los aceites lubricantes empleados en la planta deben estar diseñados para una mayor temperatura de funcionamiento. En general, todo el equipo sufre un mayor desgaste y es necesaria una mayor protección contra la corrosión.

4.2.1 Sistema de perforación

Se emplean equipos de perforación de petróleo y gas, pero la tecnología utilizada está adaptada a las condiciones de alta temperatura que imperan en un sondeo de alta entalpía.

Se emplean triconos con insertos de acero y de carburo de tungsteno. Pero hay que tener especial cuidado porque el coeficiente de dilatación del carburo de tungsteno es menor que el del acero y puede provocar que los insertos se salgan de su sitio. Aunque el diamante aguanta bien la temperatura, no se aconseja el empleo de coronas de diamante, ya sean de concreción o inserción, salvo en caso de necesitar muestras con testigo continuo.

4.2.2 Lodos de perforación geotérmicos

Sin ánimo de profundizar demasiado en el tema, conviene recordar cuál es el objetivo de los lodos de perforación en la perforación de un sondeo. Las tres funciones principales del fluido de perforación son: en primer lugar, refrigerar y lubricar la sarta de perforación. En segundo lugar, la limpieza y el transporte de detritus de perforación, fuera del sondeo. Y, por último, presionar sobre las paredes del pozo, estabilizándolas y contribuyendo a su sostenimiento a través de la presión hidrostática de la columna de lodo. Como función secundaria, está la de proteger contra la intrusión de fluidos procedentes de la formación rocosa.

Normalmente, se emplean lodos a base de agua-bentonita y más aditivos[3]. La bentonita contribuye a aumentar la viscosidad del fluido, lo que dificulta su intrusión en la formación rocosa. Pero, sobre todo, se emplea por sus propiedades tixotrópicas, que hacen que el fluido tenga un comportamiento no *newtoniano* [49]. De manera muy simplificada, permite disminuir la viscosidad del lodo al ser agitado, recuperando su viscosidad original cuando se cesa el movimiento. Uno de los efectos prácticos conseguidos es que, si la perforación se detiene, las partículas de detritus en suspensión tardan más tiempo en decantarse dentro del sondeo, evitando atascos y acuñamiento del material.

3: La bentonita es un tipo particular de arcilla, cuyo principal componente es un mineral denominado montmorillonita.

Naturalmente, se puede emplear agua limpia como fluido de perforación, pero es mucho más difícil de controlar y, debido a su baja viscosidad, es más probable que se produzcan intrusiones de agua en la formación. Además, el consumo de agua es mucho mayor, puesto que hay que limpiar totalmente el sondeo para evitar los atascos antes de detener la perforadora. En la mayoría de los casos, no hay agua dulce disponible en grandes cantidades, y el problema de la viscosidad reducida solo permite el uso de agua en formaciones con una geología que lo permita.

En sondeos de profundidad media y alta, la química variable debida a los aportes de los diferentes minerales atravesados durante la perforación, su pH y la diferente porosidad de las formaciones geológicas atravesadas, hacen necesario un control constante de la composición, densidad y viscosidad del lodo. En el caso de los pozos geotérmicos, la alta temperatura y el agua caliente complican aún más el escenario. Y con frecuencia es necesario añadir aditivos a los lodos, que incrementan su coste en un 130% de media[45].

La reología de los lodos

La reología de los fluidos de perforación vienen definidas por estos tres modelos [50]:

1. F. *Newtonianos*: $\tau = \mu\gamma$
2. F. *Bingham*: $\tau = \tau_0 + \mu_p\gamma$
3. F. *Ostwald*: $\tau = K\gamma^n$

Se define así el comportamiento del flujo de lodos. Presentando un comportamiento plástico los fluidos *Bingham* y *pseudoplástico* los fluidos *Ostwald*. Estos últimos, presentan una disminución de la viscosidad aparente a medida que aumenta la velocidad de corte, lo que hace que fluyen más fácilmente si están bajo agitación o se les aplica una fuerza.

En general, los factores que quedan más alterados por temperaturas por encima de 150 °C son el aumento de la viscosidad, una mayor tendencia a la floculación y el filtrado o intrusión del lodo en la formación. Mientras que el aumento de los dos primeros factores dificulta la recirculación del lodo, el aumento del tercer factor puede provocar el derrumbe o el cierre del sondeo si el lodo filtrado llega a interactuar con minerales expansivos contenidos en la formación. Además, la pérdida de lodos incrementa el coste de la operación, al tener que reponer el lodo perdido [45].

Existen aditivos específicos, derivados de residuos de la industria papelera a base de lignina, que permiten controlar la viscosidad y la intrusión del lodo. Como todo aditivo, son sensibles a las condiciones químicas del entorno y, por tanto, también requieren correctores para que funcionen en el rango de pH y en presencia de determinados cationes. Para controlar la floculación de la bentonita, se puede emplear cromato de sodio.

La perforación necesita una circulación continua de lodo para la refrigeración de la boca de perforación, lubricar la sarta y evacuar los detritus de perforación. Se debe vigilar la velocidad del lodo y su presión de bombeo. Una caída en la presión supone una posible fuga a través de las paredes del sondeo. Otra señal es una disminución del caudal de retorno de lodo. Esta situación se suele dar en rocas muy fracturadas.

En ocasiones, es suficiente esperar un breve lapso para que las grietas se llenen y el problema se resuelva. Sin embargo, en otras ocasiones no es posible, y la recirculación de lodo puede verse afectada, junto con la perforación. El proceso para la solución de estos problemas es variado: un aumento en la velocidad de bombeo puede hacer que las fracturas se llenen antes. Si el entramado de fisuras es muy extenso, se suelen añadir elementos como serrín, marmolina u otros materiales que obstruyen las grietas. Si el problema no son las fracturas, sino una porosidad elevada en la roca, se puede aumentar la viscosidad del lodo, evitando las filtraciones, pero también evitando la mala circulación del lodo a través del sondeo. De esta manera, el lodo debe formar una capa impermeable a lo largo de la pared del pozo, denominada costra.

4.2.3 Entubado y cementado de sondeos geotérmicos

Annulus* y *Casing

El término ***anulus***, aplicado a un sondeo, hace referencia al espacio anular situado entre el terreno y la superficie exterior del revestimiento.
El término ***casing*** es una palabra inglesa que se emplea, en perforación, para referirse al revestimiento del sondeo, que proporciona soporte estructural y previene el colapso de las paredes de la perforación. Ademas evita poner en contactos los diferentes horizontes de la formación atravesados. Se fijan a la perforación, sellándola, mediante el empleo de morteros de cemento y aditivos.

Los sondeos geotérmicos de alta entalpía presentan un mayor diámetro en su perforación y revestimiento, considerando la misma profundidad de perforación. Algunos factores que contribuyen a esto son: la necesidad de mayores caudales que en un sondeo de hidrocarburos, o la colocación de aislantes en el trasdos del revestimiento, a fin de evitar pérdidas de calor y como protección frente a la corrosión.

No obstante, los aceros de revestimiento, así como el tipo de cemento empleado en el mortero de relleno del *annulus* y el sellado de la tubería de revestimiento *(casing*), siguen los estándares de la industria gasística y petrolera estadounidense *American Petroleum Institute* (API).

El mortero emplea como árido arena silícea para mantener la estabilidad química y los retardantes del fraguado. El cemento será el adecuado para la temperatura de trabajo, que suele ser de 300 °C a 350 °C. En todo caso, son cementos que serán resistentes al tipo de contaminante químico que presente el subsuelo, como cloruros, sulfatos, sulfuros, etc.

En cuanto al tipo de tubería de producción, se suelen emplear aceros del tipo J55, K-55 y N-80. Con diámetros de 17 1/2", 13 3/8", 9 5/8" y 7".

Hay que prestar especial cuidado con la cementación, puesto que uno de los problemas que se suele presentar es la corrosión en el trasdos de la tubería de revestimiento. Normalmente, esto se debe a una cementación deficiente que permite el paso de salmueras con gases disueltos a través de una fisura en el *(annulus)* sellado incorrectamente. Este tipo de corrosión solo se detecta cuando ha atravesado totalmente la tubería y se muestra por el interior de esta. Además, puede comunicar diferentes capas de terreno, con el consiguiente riesgo de contaminación. En el peor de los casos, se pueden comunicar varios acuíferos entre sí.

Los otros problemas que suelen aparecer son la fatiga del material, producida por la alternancia de temperaturas entre producción y paro. Esto produce deformaciones que terminan con la aparición de grietas en la tubería.

También, el depósito de carbonatos, silicatos y otros tipos de minerales en las paredes internas de la tubería es algo que debe evitarse o corregirse. Normalmente, en casos de explotación de vapor seco, no se presenta este problema.

A modo de referencia, se cita a continuación un ejemplo real de aprovechamiento geotérmico para la calefacción de distrito y obtención de ACS, en el municipio de San Sebastián de los Reyes, al norte de la ciudad de Madrid, cuyos datos de diámetros y revestimiento se recogen en la Tabla 4.1. El proyecto aprovecha el agua caliente de origen geotérmico situada a una profundidad de unos 1300 m y con una temperatura por encima de los 83 °C. El proyecto involucraba a varios municipios y se realizaron diferentes sondeos y pruebas de rendimiento. Finalmente, se abandonó.

American Petroleum Institute

El *American Petroleum Institute* (API) también incluye los lubricantes en la industria de la automoción. La Unión Europea (UE) presenta sus estándares, como la Asociación de Constructores Europeos de Automóviles (ACEA) para el caso de lubricantes. La normativa europea EN 197-1 y otras normas complementarias, incluyendo requisitos específicos para resistencia a altas presiones, temperaturas, sulfatos y baja permeabilidad, tienen como objetivo asegurar la integridad y durabilidad del sellado de los pozos de petróleo. Sin embargo, en estos momentos, no existe un equivalente europeo unificado que englobe toda esta industria.

Datos técnicos del sondeo 1						
Fecha de comienzo:	17 de marzo de 1982					
Fecha de finalización:	22 de mayo de 1982					
Profundidad final:	2130 m					
Diámetro de perforación (Inicio ··· fin [m]) — ⌀ [pulgadas] [mm]						
0.0 m	···	421.5 m	13 1/2 ”	≈	342.9 mm	
421.5m	···	1506.5 m	12 1/4 ”	≈	311.2 mm	
1506.5 m	···	2130.0 m	8 1/2 ”	≈	215.9 mm	
Diámetro de tubería (Inicio ··· fin [m]) — ⌀ [pulgadas] [mm] — Acero						
0.0 m	···	421.5 m	13 3/8 ”	≈	339.7 mm	N-80
421.5 m	···	1506.5 m	9 5/8 ”	≈	244.5 mm	N-80
†1506.5 m	···	2125.0 m	7 ”	≈	177.8 mm	N-80
†Intercalado hay 300 m de filtro fabricado en acero K-55.						

Tabla 4.1: Sondeo 1 en el municipio de San Sebastián de los Reyes (Madrid) - Se muestran los tres tramos de perforación del sondeo, indicando el diámetro de la perforación y el de revestimiento, por cada tramo. También se indica la cota de comienzo y finalización de cada tramo. Fuente: Enadimsa [51] Adaptado.

En este caso, la emboquilladura está constituida por una tubería de hierro negro con terminaciones de chapa vuelta[4] y soldada helicoidalmente, como los de la Figura 4.4. Con un diámetro exterior de 20" (508 mm), longitud total de 50 m y 8 mm de espesor. El hierro negro es el nombre que recibe el acero con bajo contenido en carbono, entre un 0.3% y un 1.7% [52], que se caracteriza por un color negro mate de óxido de hierro. Se emplea cuando no es necesario proteger el acero con un galvanizado.

4: En tuberías, el termino "chapa vuelta" se refiere a que el borde del extremo ha sido doblado sobre sí mismo para crear un refuerzo. Se suele emplear para conectar dos secciones de tubería mediante soldadura, evitando deformaciones.

Como es obvio, no se comercializan tuberías tan largas. Las tuberías de revestimiento o emboquille suelen tener una longitud máxima de seis metros. Esto facilita el transporte por carretera o ferrocarril y permite izar las tuberías con la grúa de la torre de perforación. Se van soldando sección a sección mientras se introducen por el sondeo. Para su posterior cementado.

En sondeos geotérmicos de alta entalpía, ya sean para uso directo o para generación de electricidad, lo que se busca es la captación de agua caliente o vapor. Al igual que en los sondeos de captación de agua, este proceso puede producir arrastre de finos. Se emplean las mismas técnicas para su control, aunque con las modificaciones adecuadas a las nuevas circunstancias.

Debido a las condiciones de temperatura y corrosión, se suele emplear el acero inoxidable de forma preferente. Siendo muy común el empleo de filtros de alambre helicoidal, cuya estructura se muestra en la Figura 4.2. También se puede ver el aspecto del filtro una vez terminado en la Figura 4.3.

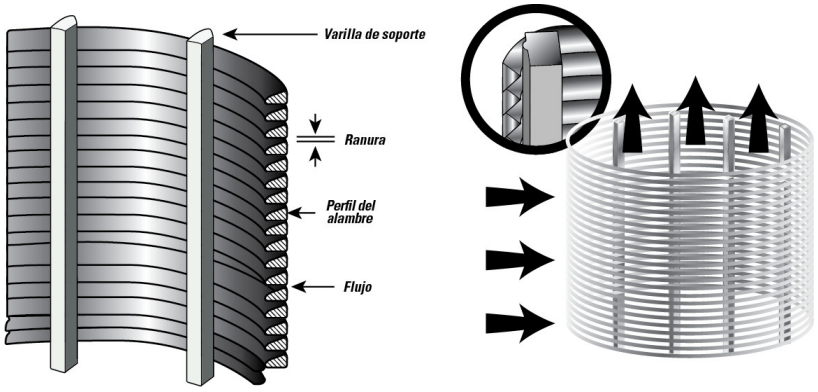


Figura 4.2: Estructura de filtro de alambre de acero inoxidable tipo *Johnson*. Fuente: [53].

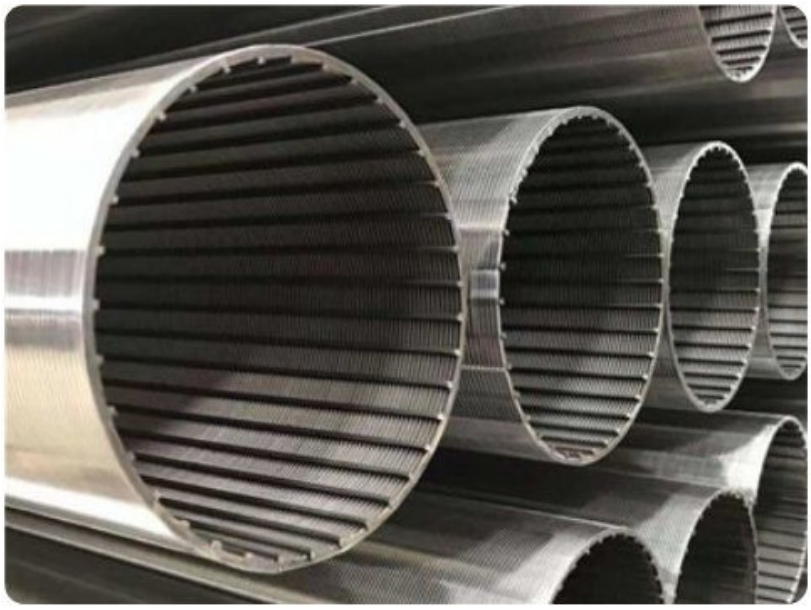


Figura 4.3: Filtros de captación tipo *Johnson* terminados y almacenados. Fuente: [53].

En el caso de necesitarse el empleo de empaquetadura de grava, debido a las características geotécnicas de la zona de captación, se emplea un doble filtro concéntrico, entre los cuales se coloca grava silícea de rodadura. De

esta forma, el filtro construido en el taller es compacto, fácil de instalar y de mantener.

Podemos concluir, a modo de resumen, que los materiales empleados en la construcción de los pozos geotérmicos no son específicos de esta industria, sino de la del petróleo y de los sondeos de extracción de agua. Empleando los materiales y técnicas que mejor se adaptan a cada proyecto en particular, considerando las condiciones de trabajo y las prestaciones necesarias en cada caso.

Figura 4.4: Tubos de revestimiento soldados helicoidalmente. Fuente: TBH (Taller Barragán Hermanos).

4.3 Acondicionado y puesta en producción

En esencia, un sondeo geotérmico es un pozo de captación de agua o vapor de agua caliente. Por tanto, se emplean tecnologías de construcción similares en algunos aspectos. Por supuesto, el hecho de que la captación de agua se realice a una profundidad superior a los 1000 m complica bastante las cosas, dejando poco margen para los errores.

Así pues, como en cualquier sondeo para la producción de agua, es necesario realizar un acondicionamiento del pozo antes de proceder a su puesta en producción [53]. El método empleado dependerá del tipo de yacimiento: vapor seco, agua caliente o vapor húmedo. Lo normal es valerse de un reventón controlado, que puede ser espontáneo o provocado.

En el primer caso, tan solo es necesario detener la circulación del fluido del pozo. De forma que se acumulan burbujas en el seno del líquido, aumentando su temperatura, hasta que se alcanza la presión de ebullición. En este punto, se libera la circulación y se produce una vaporización violenta, formándose fuertes chorros de vapor y agua caliente que limpian la zona de producción. En cierta forma, se trata de producir un géiser que limpie el sondeo.

Otros métodos empleados, especialmente cuando la temperatura del agua no es superior a 100 °C, son disminuir la presión de manera artificial y emplear los métodos habituales para la limpieza de pozos de agua convencionales. Merece una mención especial el empleo de nitrógeno líquido [45] en sustitución del habitual hielo seco [53] que se emplea en la limpieza de pozos profundos de agua.

Como cualquier pozo de agua, es necesario realizar un mantenimiento y una limpieza cada cierto tiempo [53]. Sobre todo, si la cantidad de minerales disueltos en los fluidos geotérmicos es elevada.

También es importante el aspecto de la corrosión que, junto con el calor, puede producir daños en el revestimiento del pozo. Los casos más

complicados de prever son los producidos por filtraciones de fluido geotérmico en el ”trasdos” de la tubería de revestimiento. En estos casos, la corrosión destruye la tubería desde el exterior hasta llegar a la superficie de producción. Para prevenir este tipo de daños, es conveniente ser muy meticulosos en las operaciones de cementado y de solapado de las tuberías telescópicas durante el revestimiento del sondeo.

4.4 Sistemas de bombeo geotérmico

En el Capítulo 5 se tratan las diferentes tecnologías para el aprovechamiento del calor geotérmico, entre las que se estudian sistemas en los que no se produce vapor, sino agua caliente. En estos casos, salvo que el yacimiento esté geopresurizado, el agua caliente no ascenderá por el sondeo por sí sola. Como ya se ha descrito, los sondeos geotérmicos de media y alta entalpía son básicamente sondeos de extracción de agua adaptados a las condiciones de calor, corrosión y profundidad. Por tanto, la tecnología de bombeo asociada es un aspecto importante.

Las tres tecnologías más representativas que se aplican hoy en día, según las circunstancias y teniendo en cuenta la presión y el caudal necesarios en cada caso, son:

Figura 4.5: La bomba de motor de imanes permanentes y de alta eficiencia para geotermia. Fuente: NOVOMET [54].

- **Bombeo electrosumergible (BES):** El bombeo Electrosumergible (BES) es un sistema que permite elevar fluidos empleando una bomba centrifuga sumergida en el fluido. La bomba centrifuga es accionada por un motor eléctrico. Para su alimentación, Se emplea un cable eléctrico desde la superficie para suministrar fluido eléctrico al motor. El conjunto se refrigera empleando el propio fluido que se bombea. La bomba puede ser monoetapa o multietapa, y el conjunto es estanco para evitar cortocircuitos. Normalmente se emplean cuando se necesita un gran caudal o un elevado volumen de fluido.

- **Bombeo por inyección:**Forman parte de las bombas de desplazamiento positivo; en este caso, se emplean pistones dentro de un cilindro para mover el fluido. Permiten grandes presiones, del orden de 7000 psi que equivalen a unos 483 bar, aunque los caudales son bajos. Suministran un caudal constante y son excelentes para fluidos con una alta viscosidad. Pueden ser eléctricas o hidráulicas.

- **Bombeo por derivación en Y de BES (Y-tool):** En origen, los sistemas de derivación de BES, también llamados (Y-tool), permiten acceder al pozo debajo de un sistema BES sin tener que extraerlo. Esta capacidad posibilita instalar un segundo sistema BES debajo del primero, mejorando así la producción. Realmente, se trata de una bifurcación en la tubería de bombeo, tal y como se muestra en la Figura 4.6.

Las bombas utilizadas en instalaciones geotérmicas deben ser especializadas, ya que los pozos son profundos y las temperaturas son elevadas, Figura 4.5. En general, los fluidos geotérmicos suelen ser corrosivos, por lo que no siempre se emplea acero inoxidable, sino materiales como el titanio y el bronce de aluminio. Las altas temperaturas también dificultan el trabajo de los lubricantes.

Figura 4.6: Imagen de una (Y-tool). Permite colocar un sistema doble de bombas geotérmicas, entre otras prestaciones. Fuente: NOVOMET [55].

La incrustación de minerales procedente de los fluidos geotérmicos es un problema mayor que en el resto de los pozos de agua. Por tanto, es necesario el empleo de una aleación antiincrustante, así como un mantenimiento y limpieza regulares.

Esta página está en blanco intencionalmente.

5 Plantas geotérmicas

5.1 Tipos de planta 70
5.1.1 Tecnología de vapor seco. . 70
5.1.2 Tecnología "*flash*" 72
5.1.3 Tecnología binaria 73
5.2 Generación eléctrica . . . 75
5.2.1 Calidad del vapor 75
5.2.2 Ciclo de *Rankine* 76
5.2.3 Tipos de turbinas 78

En función del uso, la tecnología empleada y la rentabilidad del beneficio que se pretende obtener, existe un rango de profundidades que marca la zona de trabajo:

$$\text{Profundidades} \begin{cases} \text{Uso directo de } 400 \text{ m a } 3000 \text{ m.} \\ \text{Generación eléctrica hasta } 5000 \text{ m.} \end{cases}$$

Naturalmente, estos rangos están determinados por la tecnología y la situación actual de los costos energéticos, y podrían variar en el futuro.

Aunque, tal y como se ha visto en el Apartado 2.2, los tipos básicos de yacimiento son tres. se puede hacer una nueva división si atendemos al tipo de explotación geotérmica:

- **Vapor dominante:** En este tipo de explotación se produce vapor seco, que se turbina para la producción de electricidad. Es el más sencillo, y por tanto el más apreciado, siendo también el menos frecuente.
- **Liquido dominante:** Se extrae agua caliente, que puede contener algo de vapor.
- **Geopresurizado:** Se extrae fluido caliente a mayor presión que la hidrostática.
- **Roca seca caliente:** Se recircula agua por una zona de la roca caliente fracturada hidráulicamente.

A diferencia del resto de las instalaciones geotérmicas de uso directo, el propósito de una planta geotérmica es la generación de energía eléctrica. Conceptualmente, no se diferencia mucho de las centrales térmicas convencionales, salvo por la fuente de vapor y la temperatura de este.

Por tanto, las partes principales de estas instalaciones son:

- **Fuente de vapor:** Pozos geotérmicos de producción. Con las diferentes variantes que se han estudiado. En algunos casos se emplean sistemas con intercambiadores de calor y un fluido de turbinado secundario, sistemas binarios.

Cabecera: Planta geotérmica. Fuente: Imagen de *WikiImages* en *Pixabay*.

- **Grupo generador:** Empleándose para ello turbinas de vapor, que siguen el ciclo termodinámico de *Rankine*, y alternadores eléctricos.
- **Condensador:** Recuperan el fluido geotérmico ya empleado.

Completan la planta sistemas como la unidad de transformación, que eleva la tensión eléctrica para su transporte. Sistemas de pozos de reinyección, evaporadores, tratamiento de efluentes líquidos y gaseosos, bombeo, etc.

5.1 Tipos de planta geotérmica

El tipo de fluido geotérmico es el que condiciona el tipo de planta que se debe construir. En concreto, se consideran varios aspectos importantes: la relación agua/vapor, la temperatura del fluido geotérmico y el contenido de gases no condensables. Algunos de ellos se pueden abordar de diferentes maneras, presentando múltiples soluciones para una misma problemática. Normalmente, la solución adoptada suele ser la más rentable. Los principales tipos de planta geotérmica son los siguientes:

- Tecnología de vapor seco.
- Tecnología de gasificación o "*flash*".
- Tecnología binaria.
- Tecnología híbrida.

En ocasiones, se construyen plantas híbridas que utilizan una mezcla de estas tecnologías. En otros casos, se emplea como fuente de calor complementaria la energía termosolar. Por último, existen plantas que generan electricidad y calor para sistemas de calefacción de distrito.

Los pozos de producción, salvo los de tecnología binaria, presentan un desvío en la boca del pozo para el escape directo del vapor a la atmósfera como medida de emergencia. El escape de vapor pasa por un sistema de silenciador que le permite cumplir con las normas de seguridad y salud en cuanto a contaminación sonora. Por supuesto, el pozo tiene instalada una válvula de cierre total, que suele accionarse de forma más lenta.

5.1.1 Tecnología de vapor seco.

Las centrales de vapor seco son las que presentan un mayor rendimiento. También reciben el nombre de centrales de vapor directo o *direct steam*, puesto que se emplea el vapor "casi[1]" directamente del pozo de producción.

En estas plantas, la totalidad de la masa de fluido producida por los pozos va a la planta de energía para impulsar la turbina. Debido a que suele ser vapor a una temperatura de 200 °C o superior, el vapor es seco o ligeramente sobrecalentado. Por tanto, no se produce gasificación de la fase líquida ni cesión de energía. La división entre vapor y líquido se produjo de manera natural, mediante el desarrollo de una capa de vapor sobre una salmuera hirviendo en el fondo del pozo [56].

1: Dado que el vapor sube a alta velocidad procedente del pozo de producción puede arrastrar pequeñas gotas de agua o incluso partículas solidas procedentes del filtro de la rejilla de producción. La separación de estas partículas se realiza mediante el paso de la corriente de vapor por sendos separadores ciclónicos, denominados separador de humedad y separador de sólidos, respectivamente.

En una fase previa, el vapor sale del pozo de producción (4), como se muestra en la Figura 5.1. Para su control y cierre, se ha instalado una llave de paso al resto de la instalación (b). Debido a que estas válvulas son de apertura y cierre motorizado, tardan desde unos segundos hasta varios minutos en cerrarse o abrirse totalmente. En caso de emergencia, está instalada una válvula rápida de escape (a) que desvía el vapor a la atmósfera, atravesando un silenciador (1). En condiciones de trabajo, la válvula (a) esta cerrada y la (b) esta totalmente abierta, de manera que el vapor entra en un filtro de separación de partículas y, posteriormente, a un separador de humedad para limpiar las partículas de agua arrastradas por el vapor desde el fondo del sondeo.

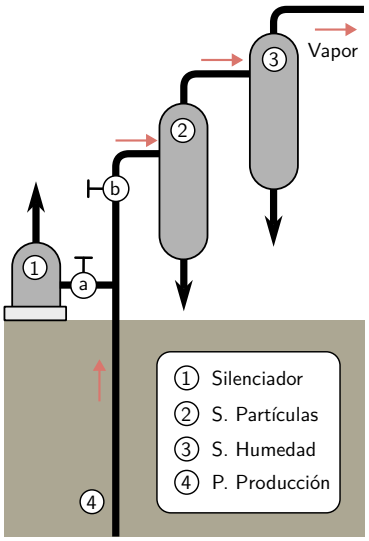


Figura 5.1: Esquema simplificado de la fase previa de una planta de vapor seco. Fuente: los autores.

En la Figura 5.2 se puede observar el esquema simplificado de la parte principal de la planta de vapor seco, a partir de la tubería que transporta vapor listo para alimentar la turbina de vapor. Se muestran los tres elementos principales de la planta: la turbina (1), el alternador (2) y el condensador (3). El vapor caliente hace girar la turbina que esta acoplada al generador. Este produce electricidad, que se lleva a una subestación de transformación para su distribución a través de la red eléctrica. El vapor pasa al condensador, donde disminuye la presión y la temperatura con la ayuda de un circuito de refrigeración secundario conectado a la torre de refrigeración. Mediante un sistema de bombeo, se envía al circuito del eyector de vapor para ser reinyectado en el yacimiento a través del pozo de inyección, previo paso por la torre de refrigeración.

Las bombas empleadas no están representadas en el diagrama para no complicarlo demasiado. Tampoco se ha representado el sistema de control de contaminantes del vapor. Todas las tuberías están aisladas térmicamente para minimizar perdidas de temperatura en el sistema. En estas plantas, puede haber kilómetros de conducciones si existen varios pozos de producción para una misma turbina. Es inevitable la condensación de pequeñas cantidades de agua en algunos tramos de tubería, que deben ser eliminadas del circuito mediante válvulas de purga.

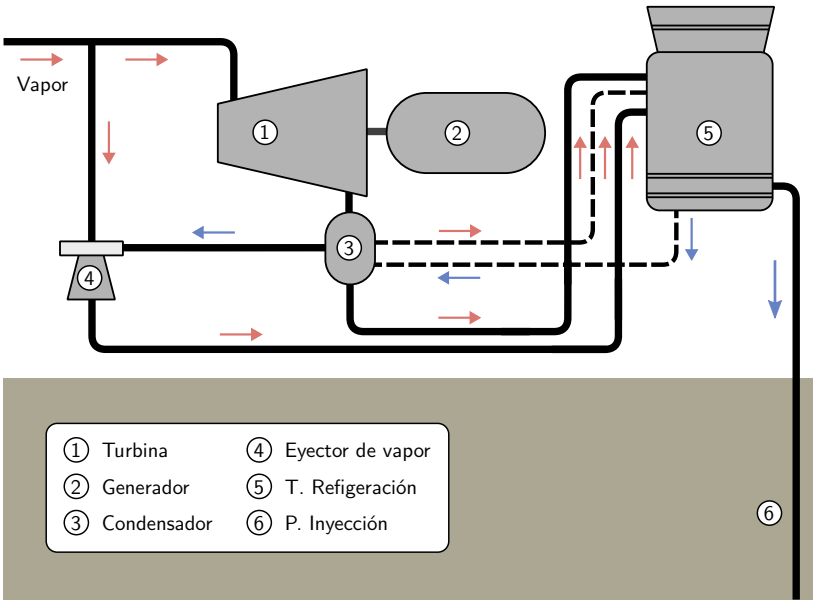


Figura 5.2: Esquema simplificado de una planta geotérmica de vapor seco, sin incluir su fase previa, Figura 5.1. Fuente: los autores.

La función del eyector de vapor (4) es conseguir disminuir la presión en el condensador para obtener un mejor rendimiento termodinámico; a cambio, consume una pequeña cantidad de vapor de producción. La salida del eyector, en este diagrama, se enfría en una torre de refrigeración, al igual que el condensador principal. Estas plantas presentan un mayor rendimiento termodinámico en la producción de energía eléctrica al utilizar vapor a mayor temperatura. Este tipo de plantas presenta un rango de potencia de 50 MW a 100 MW [10].

5.1.2 Tecnología "*flash*"

No siempre se consigue vapor seco o casi seco de los yacimientos geotérmicos; en muchos casos, se obtiene una mezcla de vapor y liquido a una presión y temperatura dependientes de cada pozo geotérmico. Las plantas de energía *flash* se emplean en sistemas geotérmicos de alta entalpía, con temperaturas que normalmente están por encima de los 175 °C [10]. Existe una manera de expresar la calidad del vapor, también llamado "título del vapor". Se expresa como la relación másica entre el vapor y la mezcla de vapor y liquido:

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{vapor}} + m_{\text{líquido}}} \tag{5.1}$$

Se expresa en tanto por uno, siendo 1 el valor del vapor seco y 0 el liquido sin vapor. Lo habitual a la salida de un pozo de producción de este tipo es una presión de entre 5 bar a 10 bar y una calidad del vapor de entre 0.1 a 0.5. Según estos valores de presión, las temperaturas de saturación están en un rango de 151.8 °C a 179.9 °C respectivamente [3].

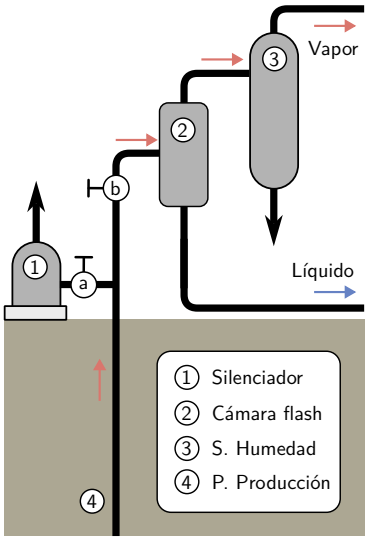


Figura 5.3: Esquema simplificado de la fase previa de una planta de vapor *flash* de una sola fase. Fuente: los autores.

Como la calidad del vapor es tan baja, no se puede usar directamente. Se pueden hacer dos cosas: bajar la presión mediante una expansión controlada, lo que provoca una vaporización del liquido a cambio de una bajada de temperatura, puesto que el cambio de estado de liquido a gas tiene este efecto. También se puede aumentar la calidad del vapor mediante la separación de las dos fases. En este último caso, se emplea un separador ciclónico, llamado también cámara flash (2), Figura 5.3.

En función de la calidad del vapor y de la presión del vapor de salida del pozo de producción, se empleara solo el primer sistema o ambos. En las plantas más sencillas, con una presión no muy elevada de vapor de salida, se emplean las plantas flash simples o de una sola fase. Este es el caso del esquema representado en Figura 5.4. En la fase previa, Figura 5.3, se expande o no el líquido, se mejorara el vapor pasándolo por la cámara flash, separando la fase líquida del vapor. El liquido extraído se reinyecta en el subsuelo. El vapor se pasa a continuación por un separador de humedad y, después, se procede a turbinarlo. El resto de la planta funciona como una de vapor seco, puesto que lo que se turbina es vapor seco.

Existen plantas de doble y triple flash[2] para los casos en los que el vapor posee una elevada presión. En ellos se procede a instalar dos o tres turbinas de diferentes rangos de presión. En función de la calidad del vapor, se vaporiza parte del líquido, reduciendo parcialmente su presión, y el vapor se turbina. El liquido recogido en la primera cámara *flash* se pasa a la siguiente etapa repitiendo la operación en una turbina con un rango

2: Los esquemas de las plantas doble y triple *flash* no están representadas en el texto.

de presión menor. Si la planta es triple, se repite una tercera vez. El fluido que resta se reinyecta en el subsuelo. De esta manera, se aumenta el rendimiento de las plantas de flash simple. Comparando una planta de vapor seco y una de tecnología *flash*, aunque el nivel térmico de trabajo pudiera ser el mismo, el caudal másico de la planta flash seria, aproximadamente, el triple que el de una planta de vapor seco [3].

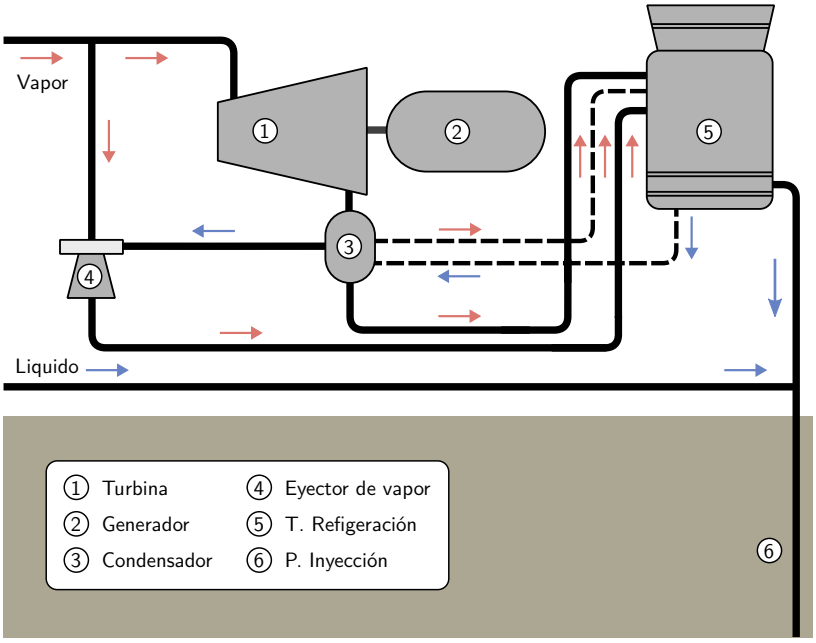


Figura 5.4: Esquema simplificado de una planta geotérmica de vapor flash de una sola fase. Fuente: los autores.

5.1.3 Tecnología binaria

Existen algunos elementos limitantes para el empleo directo de fluidos calientes procedentes de un yacimiento geotérmico. Uno de ellos es la concentración demasiado elevada de minerales disueltos en el agua. Un cambio de presión o temperatura puede hacer que los minerales precipiten, lo que hace inviable a la planta. Lo mismo ocurre si el contenido en efluentes gaseosos tóxicos de gases no condensables es elevado y no se puede eliminar hasta niveles seguros.

Por último, un nivel térmico demasiado bajo puede hacer que el margen térmico para el turbinado del vapor no sea económicamente rentable.

En 1961, *Harry Zvi Tabor* y *Lucien Bronicki* desarrollaron un método para utilizar un fluido orgánico de bajo punto de ebullición como fluido impulsor de turbinas de vapor en circuito cerrado y, así, poder generar energía eléctrica sin emplear vapor de agua [11]. Se observa en la Figura 5.5 que una de las características de este tipo de plantas suele ser, aunque no siempre, que el agua geotérmica esta por debajo del punto de ebullición. Esto implica que no subirá a la superficie por acción de la presión de vapor y, por tanto, es necesario su bombeo.

Puede ser que el agua esté a una temperatura ligeramente por encima del punto de ebullición, pero a una presión que hace que este totalmente liquida. En estos casos, una disminución de presión puede hacer que se gasifique, pero no lo suficiente como para que suba a la superficie. En la Figura 5.5 se observa que se emplea una bomba para extraer el agua

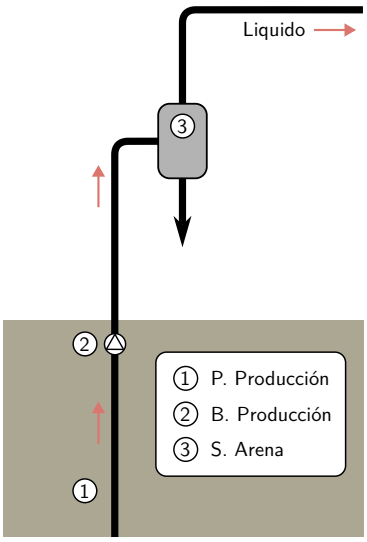


Figura 5.5: Esquema simplificado de la fase previa de una planta de ciclo binario. Fuente: los autores.

caliente del yacimiento. Es necesario que todo el sistema este presurizado para evitar que se gasifique parcialmente el líquido, lo que haría inviable el bombeo.

Una vez en la superficie, el agua pasa por un filtro separador de arena (3), que también está presurizado. Una vez libre de materiales sólidos arrastrados por el bombeo, se pasa por un intercambiador de calor de placas (4), Figura 5.6. Este tipo de intercambiadores presenta un alto rendimiento de recuperación del calor, que ronda el 85%, pero es muy sensible a cualquier tipo de suciedad presente en los fluidos que lo atraviesan. Suelen ser escalables, apilando la cantidad de placas necesarias en un bastidor de grandes dimensiones.

En el segundo circuito de refrigeración, representado en la Figura 5.6 por las conducciones de color gris, se emplea un fluido en estado liquido, pero con un punto de ebullición muy inferior al del agua a presión atmosférica. Debe ser poco reactivo químicamente con las aleaciones empleadas en tuberías y en la turbina. Algunos de estos productos son refrigerantes de uso industrial, ya sean puros o mezclas azeotrópicas, como el R-114, o bien hidrocarburos de bajo peso molecular, como el isobutano o el isopentano. Se suele elegir un producto que de el máximo rendimiento en función de las características del propio yacimiento.

El refrigerante se vaporiza cuando pasa por el intercambiador de calor (4) y se introduce en la turbina en estado de vapor, recolectándose una mezcla liquido-vapor de refrigerante en el condensador (3), donde vuelve a pasar al estado liquido mediante un circuito terciario (lineas discontinuas) de refrigeración, empleando para ello la torre de refrigeración. Una vez en estado líquido, el refrigerante secundario completa su ciclo regresando al intercambiador de placas.

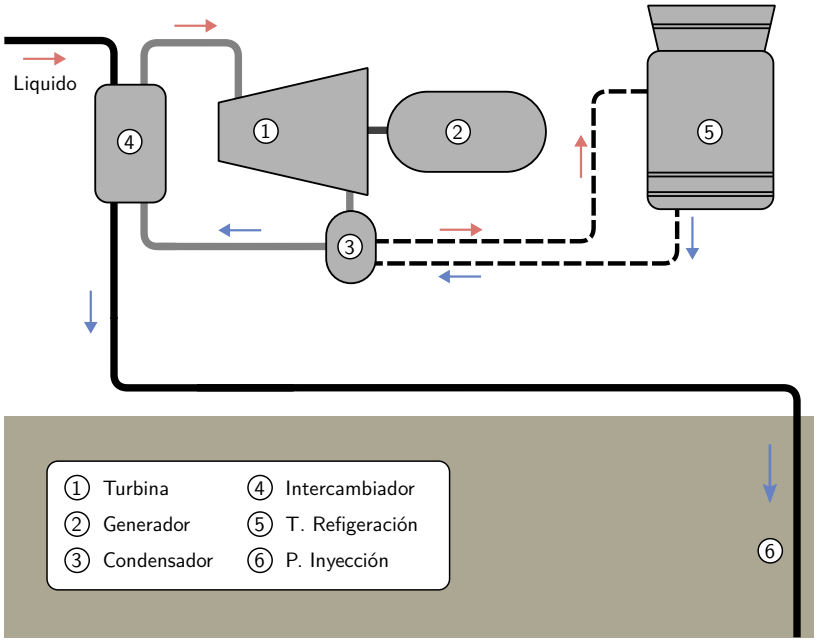


Figura 5.6: Esquema simplificado de una planta geotérmica binaria. Fuente: los autores.

En ocasiones, se optimiza el sistema añadiendo un segundo intercambiador de placas a modo de precalentador. De manera que en el precalentador se aprovecha el calor residual contenido en el agua justo antes de reinyectarla al subsuelo. El calor recuperado se aplica al refrigerante en estado liquido antes de pasarlo por el evaporador. En el condensador, solo

se refrigera la energía debido al cambio de estado, ahorrando así energía en la torre de refrigeración.

5.2 Generación eléctrica

Como se ha visto en la primera parte de este capítulo, las plantas geotérmicas emplean turbinas de vapor conectadas a un generador. Estas turbinas son alimentadas por vapor a alta presión y temperatura. En su interior, el vapor se expande hasta un estado de menor presión y temperatura. La diferencia de entalpía entre los dos estados del vapor se aprovecha para generar energía mecánica, que se expresa en energía por unidad de masa de vapor como:

$$W_t = \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = (h_1 - h_2)\eta_i \quad [\text{kJ/kg}] \tag{5.2}$$

Donde h_1 es la entalpía específica del vapor de entrada, h_2 la del vapor de salida y η_i el rendimiento de la turbina.

Para calcular la potencia eléctrica generada por el alternador que mueve la turbina, bastará con aplicar el siguiente cálculo:

$$P_e = W_t Q \eta_m \eta_e \quad [\text{kW}] \tag{5.3}$$

En este caso Q es el caudal de vapor expresado en kg/s. Siendo η_m el rendimiento del acoplamiento mecánico entre la turbina y el alternador. Por último, η_e es el rendimiento del alternador.

Por tanto, a mayor diferencia de presión y temperatura entre estados, mayor será la energía extraída del vapor. En los sistemas geotérmicos, el vapor es de origen natural; por tanto, no se puede aumentar su entalpía específica. Solo cabe disminuir la entalpía específica del vapor de salida para maximizar el proceso. Para ello, se debe intentar disminuir la presión y la temperatura de salida del vapor. En estas instalaciones, se trabaja en condiciones límite de las prestaciones de los equipos para que el proceso sea rentable.

5.2.1 Calidad del vapor

En este apartado no se consideran los químicos contenidos en el fluido, solo las condiciones de presión y temperatura, así como las fases de vapor, vapor húmedo y líquido. En las plantas térmicas convencionales se emplea una caldera para obtener vapor sobrecalentado a alta temperatura, con el fin de lograr un rendimiento óptimo de la planta, en función del equipo de generación instalado y del combustible empleado. Sin embargo, en las plantas geotérmicas, el vapor empleado es el que sale de los pozos de producción. Por tanto, el rendimiento máximo está limitado por la temperatura del vapor del pozo de producción, que, en ocasiones, puede variar de un pozo de producción a otro.

En otras ocasiones, se utiliza vapor procedente de varios pozos de producción, lo que obliga a transportar el vapor a través de cientos o miles de metros de tuberías térmicamente aisladas. En todo caso, el control es mucho más difícil que en una planta térmica convencional.

Vapor saturado

El vapor saturado es aquel que existe en equilibrio con su fase líquida a una temperatura y presión específicas. Si representamos en un diagrama Presión-entalpía (diagrama de *Mollier*), la curva de saturación separa las diferentes fases. A la izquierda de la curva aparece la zona liquida, a la derecha esta la zona de vapor sobrecalentado y en interior de la curva coexisten la fase liquida y el vapor. A menudo se denomina a está mezcla de fases como vapor húmedo.

Bajo ciertas circunstancias, se puede variar alguna característica del vapor, como se ha visto en el Apartado 5.1.2 con la tecnología "flash". En general, si se alimenta la turbina con vapor húmedo, el impacto de las gotas de líquido residual puede erosionar las palas de la turbina, lo que provoca una disminución de la eficiencia de esta y una mayor necesidad de mantenimiento. Es por eso que el vapor que entra en una turbina pasa a través de un separador de humedad residual debido a arrastres, como ya se ha visto. No es conveniente bajar demasiado la calidad del vapor de salida de las turbinas. Lo habitual es mantener menos del 10% de fase líquida en el vapor de salida.

- **Vapor sobrecalentado:** En una planta térmica, con caldera, se puede sobrecalentar el vapor saturado aportando energía adicional mediante un intercambiador de calor externo denominado sobrecalentador. Al conjunto caldera-sobrecalentador se le denomina generador de vapor.

  Como se puede apreciar en la Figura 5.7, La eficacia térmica del ciclo de *Rankine* con sobrecalentamiento es superior, puesto que existe una mayor diferencia de temperaturas ($T_1' - T_2'$) que en el caso de vapor saturado ($T_1 - T_2$). La calidad del vapor de escape también es mejor, al acercarse más T_2' al punto de saturación. De hecho, con un sobrecalentamiento suficiente, T_2' puede incluso caer en la región del vapor sobrecalentado.

  Lamentablemente en el caso del las instalaciones geotérmicas, tan solo los casos de vapor seco pueden presentar sobrecalentamiento de manera natural, y en cualquier caso será un sobrecalentamiento moderado.

- **Vapor recalentado:** Se trata de aumenta la eficacia minimizando la caída de la calidad del vapor. Para ello se emplea un turbinado dividido en varias etapas. De manera que el vapor se expande en la primera etapa del turbinado hasta alcanzar una presión intermedia entre la entrada y la salida al condensador. Entonces este vapor se recalienta mediante el generador de vapor, que se usa normalmente en el sobrecalentado. Minimizando en lo posible la perdida de presión y aumentando su temperatura. Después se expande en una segunda fase de turbinado hasta su salida al condensador. El recalentamiento no es posible en los sistemas geotérmicos, al no existir una caldera alimentada por combustible.

- **Ciclo supercrítico:** Si se trabaja en un ciclo de *Rankine* a presiones superiores al punto critico[3] se aumenta al máximo la eficacia del ciclo termodinámico. En centrales térmicas de combustión se ha conseguido gracias a una mejora de los materiales de construcción, ya que se requieren condiciones de temperaturas de presión y temperatura muy elevados. Dado el grado de temperaturas requeridos en el turbinado, por encima de 600 °C, no se puede aplicar en plantas geotérmicas.

3: El punto critico es el punto máximo de la curva de saturación.

5.2.2 Ciclo de *Rankine*

En una central térmica, para la producción de electricidad, se emplean turbinas de vapor que siguen el ciclo termodinámico de *Rankine*. En este

ciclo, el vapor que se turbina es reciclado, recalentándolo una y otra vez. En las plantas geotérmicas, la manera de reciclarlo es la reinyección del fluido geotérmico en el acuífero del cual se extrajo. Normalmente, la reinyección se realiza en pozos situados a miles de metros de distancia para evitar problemas de interferencia térmica entre el flujo de producción y el de reinyección.

O bien se reinyecta mediante sondeos inclinados, con cabeceras mucho más cercanas entre sí, evitando kilómetros de tuberías. Además, minimiza la cantidad de expansores para absorber la dilatación y contracción del trazado de tuberías.

El ciclo de *Rankine* ideal consta de cuatro procesos, indicados en la Figura 5.7, que se repiten de manera cíclica:

- **Proceso 1-2: (Turbina)** Expansión isentrópica del vapor de producción a través de la turbina desde el vapor saturado en el estado (1) hasta que llega al estado (2) con una presión menor.

$$W_t = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) \quad [\text{kJ/kg}] \tag{5.4}$$

- **Proceso 2-3: (Condensador)** El fluido que sale de la turbina (2) llega al condensador y se disipa la energía sobrante debido al cambio de estado. Transferencia de calor desde el fluido de trabajo de entrada en (2) que fluye a presión constante a través del condensador hasta ser un líquido saturado en el estado (3).

$$Q_c = \frac{\dot{Q_{OUT}}}{\dot{m}} = (h_2 - h_3) \quad [\text{kJ/kg}] \tag{5.5}$$

- **Proceso 3-4: (Bomba)** Compresión isentrópica en la bomba hasta llegar al estado (4) en la región de fluido comprimido donde se reinyecta en el terreno.

$$Q_b = \frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} = (h_3 - h_4) \quad [\text{kJ/kg}] \tag{5.6}$$

- **Proceso 4-1: (Caldera-geotermia)** En esta fase se realizaría una transferencia de calor al fluido de trabajo en una caldera, pero al ser un sistema geotérmico, la transferencia de calor se realiza en el subsuelo para completar el ciclo.

$$Q_{geo} = \frac{\dot{Q_{IN}}}{\dot{m}} = (h_1 - h_4) \quad [\text{kJ/kg}] \tag{5.7}$$

El ciclo de *Rankine* permite el sobrecalentamiento del vapor, aunque en geotermia, en caso de producirse, es muy pequeño. Según la Figura 5.7, en caso de sobrecalentamiento, el ciclo sería (1'-2'-3-4-1').

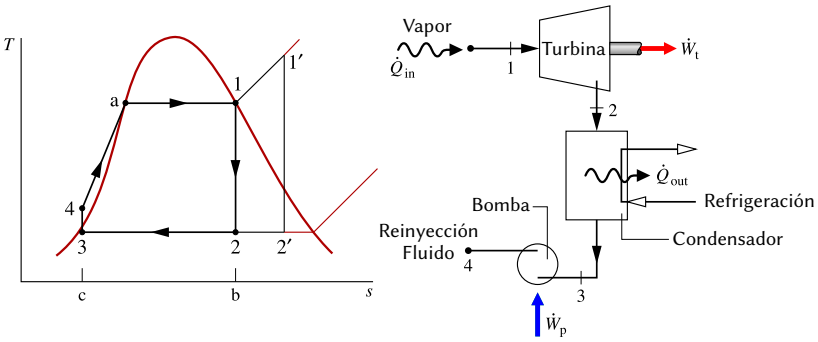


Figura 5.7: Ciclo ideal de *Rankine* (Temperatura-Entropía) aplicado a una central geotérmica. Si se emplea energía para la refrigeración del condensador (circulación forzada, etc.) esta no se contabiliza en del ciclo de *Rankine*, pero si en el balance energético del proceso global. Fuente: [57]. Modificado.

Sin considerar el sobrecalentamiento, según el gráfico de la Figura 5.7, el área (1–b–c–4–a–1) representa la transferencia de calor al fluido geotérmico en el subsuelo, y el área (2–b–c–3–2) es la transferencia de calor del fluido que pasa por el condensador. El área encerrada (1–2–3–4–a–1) puede interpretarse como la entrada neta de calor o, de forma equivalente, la salida neta de trabajo. En todos los casos, por unidad de masa de fluido [57].

El rendimiento de una planta geotérmica depende de la temperatura de salida de los fluidos geotérmicos. Siendo, también, sensible al tamaño de la planta. A modo de referencia, el rendimiento neto de una planta geotérmica con vapor, en cabecera, de 210 °C ronda el rango de 55 % a 45 %, mientras que a temperaturas de 170 °C desciende hasta un 10 %. En cuanto al consumo específico de vapor, se sitúa en un rango de 8 kg a 460 kg por cada kW/h [3].

Existen varios modelos de turbinas que se usarán en función de las características de cada pozo geotérmico, adaptándose a las condiciones de trabajo.

5.2.3 Tipos de turbinas

En las plantas de producción de electricidad geotérmica, se suelen emplear distintos tipos de turbinas dependiendo de la calidad y las condiciones del vapor de producción:

- **Turbina de condensación**: En las turbinas de condensación, la temperatura del condensador se sitúa en un rango de 40 °C a 60 °C lo que hace que el condensador trabaje a una presión menor que la atmosférica para mantenerse cerca del equilibrio líquido-vapor saturado. Para generar esta baja presión relativa se suelen emplear diferentes métodos, como el empleo de una bomba de succión o el empleo de un eyector de vapor. Estas turbinas tienen un buen rendimiento aprovechando la energía mecánica del proceso, aunque el vapor sobrante no se pueda aprovechar en calefacción.

- **Turbina de contrapresión**: En estas turbinas, se descarga vapor por encima de la presión atmosférica y se suele aprovechar en otros procesos industriales, especialmente en sistemas de calefacción. En cualquier caso, el vapor de descarga suele estar muy cerca de la zona de saturación.

- **Turbina con extracción intermedia:** Es un caso intermedio entre la turbina de condensación y la de contrapresión. En una primera fase se comporta como una turbina de contrapresión, donde se extrae parte del vapor para su uso industrial, mientras que el resto pasa a una segunda fase. En esta segunda fase se comporta como una turbina de condensación. Este tipo de turbinas permite un buen control para una demanda variable de electricidad y calor industrial.

Quedan fuera las turbinas con recalentamiento y las de ciclo supercrítico, puesto que en los sistemas geotérmicos comerciales actuales no se alcanzan los niveles de presión y temperatura necesarios para estos casos.

Esta página está en blanco intencionalmente.

6 Sistema geotérmico mejorado (EGS)

En los capítulos anteriores se ha estudiado la geotermia de alta entalpía basada en sondeos "superficiales", con una profundidad máxima de 5000 m. Entre los requisitos necesarios para poder ser explotada están la presencia de agua caliente subterránea y encontrarse a profundidades moderadas. Esto reduce considerablemente las localizaciones de los yacimientos.

En los últimos años, se ha desarrollado una nueva tecnología que elimina estos dos requisitos. Por un lado, se ha eliminado la barrera de la profundidad y, por otro lado, no es necesaria la presencia de agua de forma natural en el subsuelo. Dando lugar a los llamados sistemas geotérmicos mejorados (EGS). Esto permite obtener recursos de al menos 250 °C en casi todo el Planeta, puesto que estas regiones de la corteza terrestre están disponibles prácticamente en todo el mundo. El único inconveniente es el elevado costo de la perforación.

La profundidad de estos recursos oscila en un rango de 3 km a 10 km. Las perforaciones hasta esa profundidad suponen un reto tecnológico. Por otra parte, el subsuelo a esa profundidad, salvo excepciones, carece de permeabilidad suficiente y es necesario mejorarla de manera artificial. Para ello, se emplea la técnica de *Hot Dry Rock* (HDR).

Según algunos autores, la importancia de los sistemas geotérmicos mejorados (EGS) radica en que tienen el potencial de suministrar al menos diez veces más energía eléctrica que todos los sistemas de generación de energía hidrotermal existentes [58].

6.1 Concepto de HDR 81
6.2 Tecnología actual 83
6.3 Localización 85
6.4 Dimensionado 86
6.5 Fracturación hidráulica . . 87
6.6 Nuevos desafíos 87

6.1 Concepto de HDR

Los *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) emplean una técnica denominada HDR para aprovechar el calor de la roca caliente situada en profundidad, aunque no presentan una circulación natural de agua caliente.

Se atribuye la idea original a *Bob Potter*, quien trabajaba como químico en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en el estado de Nuevo México (EE.UU) en la década de 1970. En aquella época, presentó el concepto de "energía geotérmica de roca seca caliente" en un informe de laboratorio sobre un nuevo tipo de perforación basado en la fusión de la roca.

Cabecera: Tongonan, Leyte Geothermal power plant, Philippines. Fuente: www.thinkgeoenergy.com

La idea era acceder al calor contenido en una región rocosa del subsuelo mediante un sondeo y una elevadísima presión hidráulica que generaría una gran fractura vertical hidráulica con forma de "moneda" de grandes dimensiones, tal como se observa en la Figura 6.1. El calor se podía extraer de la roca mediante la recirculación en circuito cerrado de un fluido.

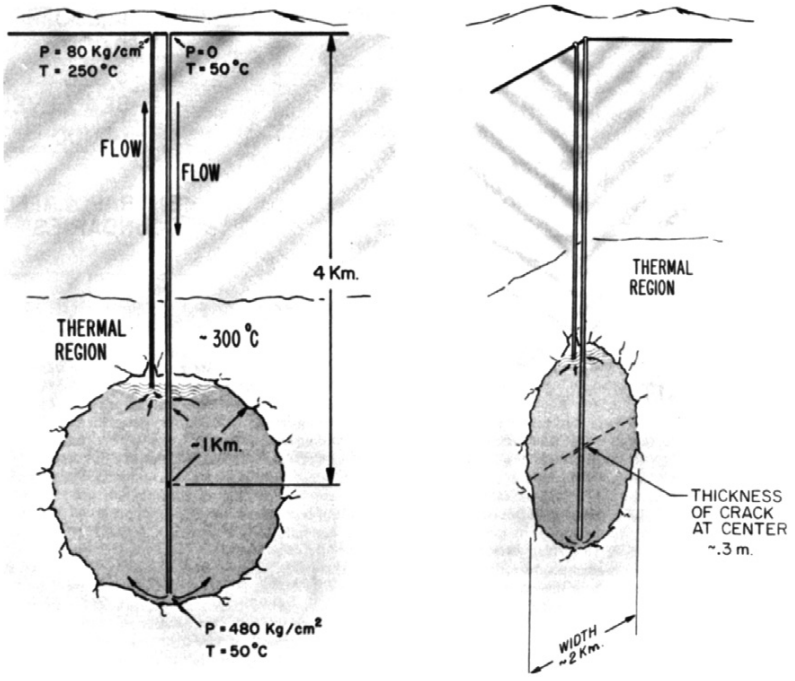


Figura 6.1: Concepto original de HDR. En su origen no estaba concebido como un sistema hidrotermal clásico. Fuente: [59].

Se constituyo un grupo de investigación sobre HDR perteneciente al Laboratorio Nacional de Los Álamos (LANL) y se comenzaron los trabajos de investigación en 1971. En diciembre 1971 comenzaron los primeros trabajos de campo. Sobre esas fechas, la *United States Atomic Energy Commission* (AEC) vio incrementadas sus atribuciones por el Congreso de EE.UU, asumiendo responsabilidades en materia de I+D relacionadas con el suministro, conversión, distribución y almacenamiento de energía nuclear y no nuclear. De esta manera, el proyecto sobre HDR obtuvo una importante financiación para realizar ensayos a mayor escala.

Se comenzó a perforar el primer pozo exploratorio *Granite Test 1* (GT-1) el 9 de mayo de 1972 en *Barley Canyon*. La profundidad final del sondeo fue de 785 metros, de los cuales 143 metros estaban dentro de un basamento de rocas cristalinas del Precámbrico. La parte cristalina estaba compuesta principalmente por gneis augen, granito y anfibolita, con una temperatura en el fondo del sondeo de 100.4 °C [59].

En aquellos momentos, la fracturación hidráulica en sondeos solo se había probado en formaciones sedimentarias en yacimientos de gas o petroleo. Según la teoría aceptada en aquel tiempo, si la roca era isotrópica con tensiones máximas en el sentido vertical, la fractura resultante seria plana, vertical y normal a la dirección de tensión mínima, que es horizontal. En caso de aplicar una presión continua, la fractura debería expandirse de forma radial, dando lugar a una fractura circular con forma de moneda, Figura 6.1. Cuando se realizo el ensayo en el GT-1, se aplico este principio erróneamente, puesto que la mezcla de rocas ígneas y metamórficas que formaba el basamento cristalino no era homogénea.

Este error de concepto siguió aplicándose en todo el mundo hasta la década de 1980. Estudiando los resultados, se dieron cuenta de que la rotura no se producía según lo previsto, rompiendo la roca intacta de esa manera. En realidad, la roca se rompía por las juntas preexistentes que estaban selladas y que no habían sido tenidas en cuenta por la teoría.

El 4 de abril de 1973 se realizo el ultimo ensayo de fracturación, consiguiendo un rango en la velocidad de inyección de 12 l/s a 13 l/s empleando equipos comerciales de bombeo. Con una fractura vertical de 35.6 m, según lo previsto. Sin embargo, no se entendió, hasta mucho tiempo después, que la fractura era en realidad una junta previa resellada, abierta por el efecto de la presión hidráulica.

6.2 Tecnología actual

En la actualidad, la teoría inicial de la fractura con forma de moneda fue sustituida por un nuevo modelo conceptual de una red de juntas preexistentes que se dilatan debido a la tracción y se cortan entre si, ademas de nuevas fracturas que aparecen por cizallamiento [58].

En una zona sin anomalías térmicas significativas, a medida que se profundiza en la corteza terrestre, la temperatura aumenta según el gradiente geotérmico local. Normalmente, en las regiones más profundas del subsuelo, la porosidad y la permeabilidad naturales son insuficientes para la existencia de acuíferos naturales. Por tanto, el planteamiento es la creación del yacimiento de forma artificial en lugar de buscar uno de origen natural. Obviamente, se debe buscar una roca caliente como fuente de calor, con el fin de poder usarla como deposito del agua inyectada desde la superficie. Para ello, se emplean pozos de inyección. Este agua es calentada por la roca caliente y seca (HDR), y se recircula en la superficie a través de pozos de producción. Para aumentar el rendimiento del sistema, se incrementa de manera artificial la fracturación de la roca caliente.

La fracturación hidráulica del terreno a grandes profundidades presenta ciertos riesgos que ya han sido considerados desde el inicio de las investigaciones de HDR en *Fenton Hill*, Nuevo México (EE.UU.), y es preciso asegurarse de que no actúe sobre ninguna falla cercana que pueda liberarse y provocar terremotos.

La HDR es calentada por una bolsa de magma que se encuentra a mayor profundidad. En ningún caso se pretende llegar al magma. Esto último podría resultar tremendamente peligroso, provocando una explosión por la transformación instantánea de agua liquida en vapor. También podría producir terremotos en los alrededores debido a las tensiones mecánicas generadas por la presión de vapor.

Para evitar estos problemas, solo se busca la roca caliente y se aumentan las fracturas que contiene para crear un almacén de manera controlada. Interesan rocas poco fracturadas o con fracturas muy localizadas, con el objetivo de que el resto de la roca caliente actué como barrera y evite que el agua migre a otras zonas, Figura 6.2.

La inyección de agua a alta presión produce un aumento en las fracturas naturales preexistentes por hidrocizallamiento del material, de manera que se ensancha la fractura y aparecen grietas en dirección perpendicular,

de forma similar a la progresión de la escarcha sobre un cristal. En el caso de que el punto de inyección se sitúe en una roca no fracturada, el fenómeno se denomina hidrofracturación.

Se debe ejercer un control muy preciso sobre la localización de la zona a mejorar. Evitando zonas frías y buscando las más cálidas. No solo para mejorar el rendimiento, sino también para evitar empeorarlo al moderar la temperatura del agua si se fracturan zonas frías.

Una forma de minimizar las zonas frías es detectar las áreas de fracturación natural durante la perforación. Estas zonas suelen ser sumideros de lodos de perforación al estar fracturadas, y se detectan por una disminución de la presión en la bomba de lodos durante la perforación. Si además lo comparamos con la temperatura de la zona y esta no esta a la temperatura adecuada, hay que proceder a su sellado[1]. De no hacerlo, se corre el riesgo de propiciar, a medio o largo plazo, las condiciones para una entrada de agua fría o para una fuga de agua caliente.

1: Como se ha visto en el Apartado 4.2.2, una perdida de lodo por filtraciones no siempre se soluciona con un sellado de las fracturas.

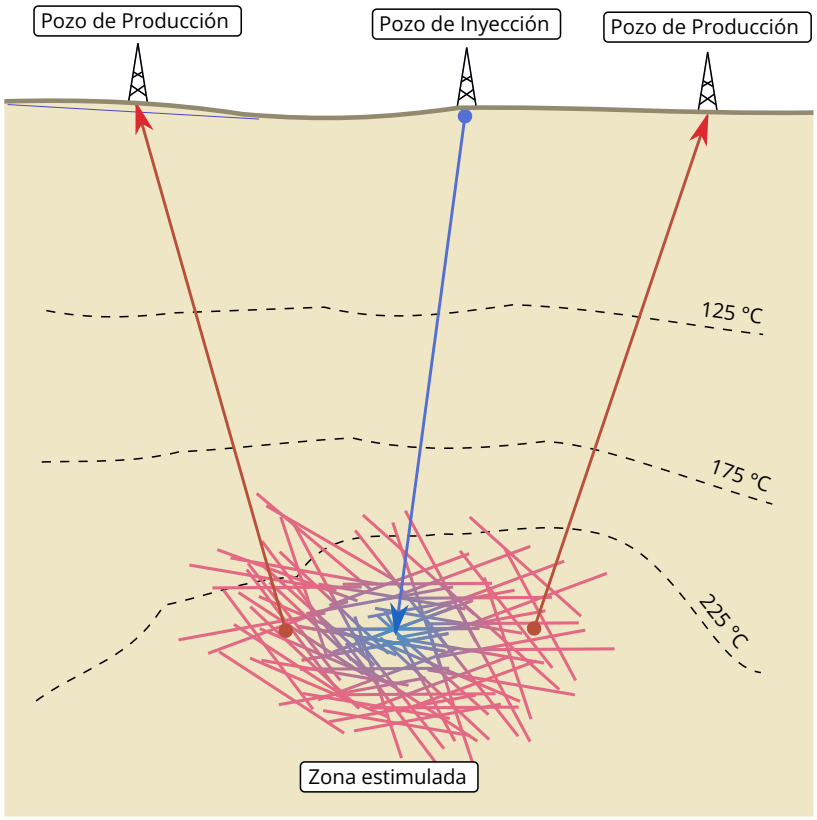


Figura 6.2: Diagrama de un EGS. Se aprovecha el pozo de reinyección para mejorar fracturación. Los pozos de producción recuperan el fluido calentado al atravesar las fracturas de la roca. Fuente: los autores.

En general, se deben cumplir una serie de condiciones previas para plantear la construcción de una planta de producción geotérmica EGS viable económicamente:

- **Calor suficiente**: Debe existir una temperatura suficientemente alta para que sea aprovechable. Esto también es aplicable a la geotermia "estándar", puesto que un recurso a una temperatura dada, en origen, desciende varias decenas de grados hasta que llega a la turbina. Perdidas de calor en el pozo, expansión con bajada de temperatura por cambio de estado, perdidas de calor en la instalación son algunos de los motivos.

- **Fluido suficiente:** Es necesario suficiente caudal de fluido para el transporte de calor. Si el fluido se aporta de manera artificial el coste puede ser elevado o no ser viable. En ocasiones se realiza mediante recirculación e intercambiadores de calor en superficie. En estos sistemas una perdía de fluidos de manera sostenida podría hacer inviable la planta.

- **Permeabilidad adecuada:** El sistema debe permitir la circulación del fluido con una perdida de carga asumible para el caudal demandado, con un rango de 10 kg/s a 50 kg/s [11].

- **Vida útil adecuada:** Debe poseer una vida útil adecuada para la amortización de inversión y la obtención de un beneficio suficiente. No solo económico, sino medio ambiental. En la actualidad las plantas están diseñadas par su funcionamiento durante muchas décadas. En definitiva, debe ser un proyecto atractivo frente a otras alternativas energéticas.

  Según esta limitación es necesario establecer limites en cuanto a la velocidad de recirculación de fluidos. De esta manera, se establece el tiempo en contacto del fluido con la roca caliente para una extracción máxima de calor pero, simultáneamente, sostenible en el tiempo. Esto permite maximizar el lapso de vida del yacimiento; es decir, se evita subemfriar el yacimiento demasiado rápido.

  Por otro lado es preciso obtener el fluido necesario por unidad de tiempo para que la planta resulte económicamente rentable. La mejor solución para ambos aspectos consiste en maximizar la fracturación de la roca de producción. Esto permite la extracción de calor a una velocidad compatible con la eficiencia energética y alcanzar la vida útil optima de la planta.

  Lo ideal es conseguir una planta donde el ritmo de extracción permitiera extraer energía térmica de manera indefinida, y simultáneamente una rentabilidad económica razonable y no marginal.

La mayor profundidad permite asegurar un flujo de calor más fiable, en contraste con los sistemas tradicionales más superficiales. Esto, unido a la presencia de agua cercana para la reinyección, puede asegurar la sostenibilidad de la planta a largo plazo.

Cada caso es único y se presentan varias alternativas para abordar cada uno de los cuatro puntos de la lista anterior. Un buen estudio previo de todos los elementos permite encontrar la solución optima para cada yacimiento. El avance progresivo en todos los campos de la ingeniería puede hacer que un proyecto que no era viable hace unas décadas lo sea en este momento. De ahí la necesidad de hacer hincapié en la calidad de los estudios de exploración e investigación, así como en la revisión de datos de estudios antiguos descartados, aplicando nuevas tecnologías de procesamiento de datos y recopilación de información.

6.3 Localización

En una primera aproximación, es interesante comenzar por las zonas donde se pierde lodo de perforación durante la fase de excavación inicial.

Esto indica que la zona esta fracturada previamente; aunque no se conocen detalles de la fracturación de esa zona. Pero hay que considerar que interesa la fractura hidráulica o hidrocizalladura, así como las fracturas preexistentes en las zonas más profundas y calientes. Si se encuentra una zona demasiado superficial, no se podrá sellar y el fluido caliente puede escapar a la superficie de forma incontrolada. [59]

La cartografía de las temperaturas a lo largo del pozo también suele proporcionar información muy útil. Es especialmente útil la medición de temperaturas empleando fibra óptica mediante el sistema de detección de temperatura distribuida (DTS). Este sistema emplea un tipo de sensor basado en un cable de fibra óptica situado dentro de un tubo de acero de pocos milímetros de diámetro y un equipo electrónico al que está conectado. Los equipos DTS permiten medir en tiempo real la temperatura de cualquier punto del sensor. Una vez instalado el sensor de fibra óptica, se realizan pruebas de bombeo y, cuando cesa la presión, se produce un reflujo de agua de las zonas que presentan porosidad natural suficiente. Las zonas del sondeo que presentan aumentos de temperatura indican puntos más calientes que el resto y, por tanto, posibles zonas interesantes candidatas a la fractura hidráulica.

6.4 Dimensionado

Es preciso conocer el volumen de roca caliente necesario para obtener la producción de calor que se busca. Esto permite saber cuanta roca hay que fracturar y si las condiciones del contorno del yacimiento contienen ese volumen de roca. No hay que olvidar que la roca que rodea el yacimiento debe ser lo suficientemente impermeable para que el fluido escape o se enfrié en su migración a zonas mas frías.

También es preciso saber cuál es la vida útil mínima del yacimiento y si justifica la inversión necesaria. Es necesario, ademas, conocer cual es el incremento de la temperatura mínima para maximizar la vida útil de la instalación. Estando todo esto relacionado con el caudal mínimo para que la producción sea eficiente.

A titulo orientativo, se sabe que para producir 5 MW eléctricos es necesario vapor en un rango de temperaturas de 200 °C a 250 °C y un caudal de 50 kg/s de vapor. Este objetivo requiere una superficie por fractura de fractura media de 100 000 m^2 [60].

Esto supone un volumen mínimo de unos 2 km^3, que esta dentro de la tecnología de uso común actualmente [61].

La superficie de las fracturas rectangulares que se han propagado a la distancia indicada desde un pozo se muestra en la Tabla 6.1. Es una estimación suponiendo condiciones ideales. Por otra parte, la red debe poseer una permeabilidad de fractura en un rango de 10 mD a 50 mD para que el caudal sea suficiente, ademas de alcanzar la temperatura esperada [11].

De todas formas, según los ensayos previos, se ha probado que las fracturas se abren condicionadas por las fracturas previas, aunque estén cerradas. Y estas fracturas son una respuesta al estado tensional previo de la roca. Por tanto, la dirección de las nuevas fracturas, en general, no será

Superficie de las fracturas [m^2] para las dimensiones indicadas				
	Distancia desde el pozo de inyección [m]			
Longitud [m]	50 m	100 m	1000 m	5000 m
2	200	400	4000	20 000
4	400	800	8000	40 000
6	600	1200	12 000	60 000
8	800	1600	16 000	80 000
10	1000	2000	20 000	100 000
20	2000	4000	40 000	200 000
50	5000	10 000	100 000	500 000
100	10 000	20 000	200 000	1 000 000

Tabla 6.1: Superficie de las fracturas rectangulares que se han propagado a la distancia indicada desde un pozo. Fuente: [11] Adaptado.

aleatoria, sino que estará orientada según ese patrón tensional previo. Esto condiciona la forma y la orientación de las fracturas, y debe ser tenido en cuenta al diseñar los sondeos de captación y reinyección.

6.5 Fracturación hidráulica

La fracturación hidráulica es una técnica que ya se usaba en el campo del petroleo y gas, salvo que en este caso se suele emplear en rocas sedimentarias. La forma habitual de hacerlo es la inyección de fluidos a alta presión, que produce una rotura frágil de la roca. Empezando por fracturas antiguas que abren y extienden, o por fracturas nuevas, normalmente en orientaciones perpendiculares a las preexistentes.

Los sondeos tienen longitudes de varios kilómetros y no toda la zona es adecuada para la inyección, como ya se ha observado anteriormente. Por tanto, es necesario que las zonas más adecuadas para la inyección sean aisladas del resto. Esta técnica, basada en la tecnología del petróleo, se fundamenta en emplear obturadores. Estos dispositivos cierran el sondeo entre dos puntos, aislando esa zona del resto. De esta manera, el fluido solo actúa en el tramo de sondeo situado entre los dos obturadores. En ocasiones, se cementan secciones de un pozo para su cierre temporal.

Los obturadores en la bibliografía anglosajona reciben el nombre de "*packers*". Existen obturadores mecánicos, formados por varias secciones metálicas que se adaptan al sondeo. También los hay fabricados de caucho y sus derivados, que son inflados y desinflados para adaptarse al sondeo. En este caso, se emplean fluidos como la taladrina para el inflado del obturador.

En todos los casos, es necesario que exista una tubería de paso entre el obturador y la pared del sondeo para que se pueda inyectar el fluido a presión dentro de la zona sellada. Una vez completada la fracturación hidráulica, se retiran los obturadores y las tuberías. Si se han empleado sellos cementados, se reperforan para retirarlos.

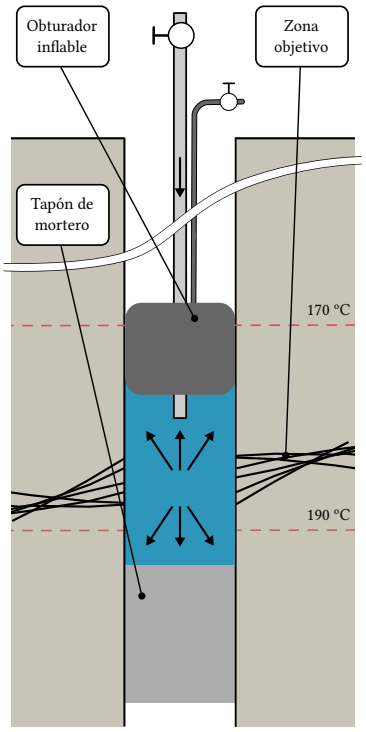


Figura 6.3: Sistema de control de inyección en zona de interés mediante tapón de mortero y obturador inflable. El fluido de fracturación pasa a través de una tubería que atraviesa el obturador inflable. Fuente: los autores.

6.6 Nuevos desafíos

Por lo general, los obturadores mecánicos y los hinchables no suelen ser fiables a temperaturas superiores a los 200 °C, porque se degradan y pre-

sentan fugas, incumpliendo su función.

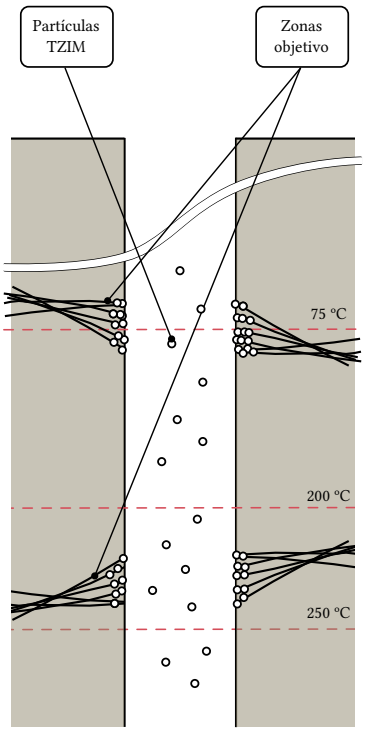


Figura 6.4: Uso de materiales de aislamiento zonal térmicamente degradables (TZIM) para cerrar las fracturas que no se van a estimular (conjunto de fracturas superior). El TZIM se bombea al pozo a alta presión hasta que ha taponado todas las fracturas y permeabilidad natural de la zona. El TZIM se elige de manera que se degrada lentamente a la temperatura del conjunto de fracturas superior, pero se degrada rápidamente a la temperatura del conjunto de fracturas inferior, lo que permite estimular la zona inferior poco después de la colocación del TZIM. Fuente: [11]. Modificado.

La tendencia actual es emplear nuevos materiales para cementar el sondeo en las áreas necesarias. Estos materiales se denominan "materiales de aislamiento zonal térmicamente degradables" o, en inglés: *Thermally Degradable Zonal Isolation Materials* (TZIM) [62]. Son materiales que se descomponen con el tiempo, ya sea por efecto del calor o mediante reacciones químicas, en otros compuestos no contaminantes como H_2O, CO_2, etc. [62]. Se aplican en las zonas del sondeo que nos interesan finamente molidos, Figura 6.4.

El fundamento del método se basa en que los materiales están diseñados para descomponerse solos después de un tiempo, pero que permanezcan, de manera selectiva, durante más tiempo en las zonas donde nos interesa evitar la propagación de la fracturación y desaparezcan rápidamente en las zonas donde queremos aumentarla. Por ejemplo, si hay zonas calientes a temperaturas por encima de los 200 °C, nos interesara fracturar esa zona; si el resto está muy por debajo de esa temperatura, nos interesara bloquear esos puntos. En este caso de ejemplo, puede interesar la aplicación de un TZIM que se descomponga rápidamente a temperaturas a partir de 200 °C, pero que permanezca más tiempo a temperaturas por debajo de 75 °C, Figura 6.5.

Según *Glassley* [11], la forma de proceder con estos productos es la siguiente: En primer lugar, se busca la zona de apertura aproximada empleando alguna de las técnicas estudiadas. Después, se prepara el compuesto A con una curva granulométrica adecuada para fluir a través de las fisuras. Se aísla la zona de interés y se inyecta el preparado a una presión moderada para que penetre en las fracturas. El sistema se estabiliza y el calor degradará el 50% del producto A en unos pocos días en las zonas de mayor temperatura y un 15% en las zonas más frías, Figura 6.5. En ese momento, se procede a la estimulación de las fracturas preexistentes, evitando la propagación de las zonas más frías taponadas por el TZIM. En un periodo aproximado de ocho semanas, el sistema se estabiliza y permite una segunda inyección de TZIM más estable para sellar de forma indefinida las zonas más frías a descartar.

Otro de los problemas que se plantea sobre el aumento de la fracturación hidráulica es como mantener las fracturas abiertas. En la tecnología del gas y el petroleo se emplea arena silícea de forma redondeada. Este árido se mezcla con el agua y se bombea en forma de pulpa. El resultado es un soporte para las fracturas abiertas durante el proceso de ruptura del subsuelo. De manera que, cuando la presión del bombeo cesa, las fracturas tienden a cerrarse. La arena introducida en las fracturas evita que esto suceda. El problema de este sistema, ademas del coste del árido, puesto que no vale cualquier tipo de arena, es que con el tiempo los granos se degradan.

En la práctica, se ha comprobado que no es necesario el proceso de inyección de arena. El motivo es que, ademas de fracturas por ampliación de las grietas debidas al campo tensional previo, también se produce rotura por hidrocizalladura en planos perpendiculares a los primeros. Cuando el procedimiento se realiza de manera reiterada, se generan múltiples fragmentos que se desprenden de las fracturas ensanchadas. Como la superficie de las grietas ensanchadas no es perfectamente plana, sino que

presenta una superficie irregular, estos fragmentos sueltos actúan como cuñas naturales.

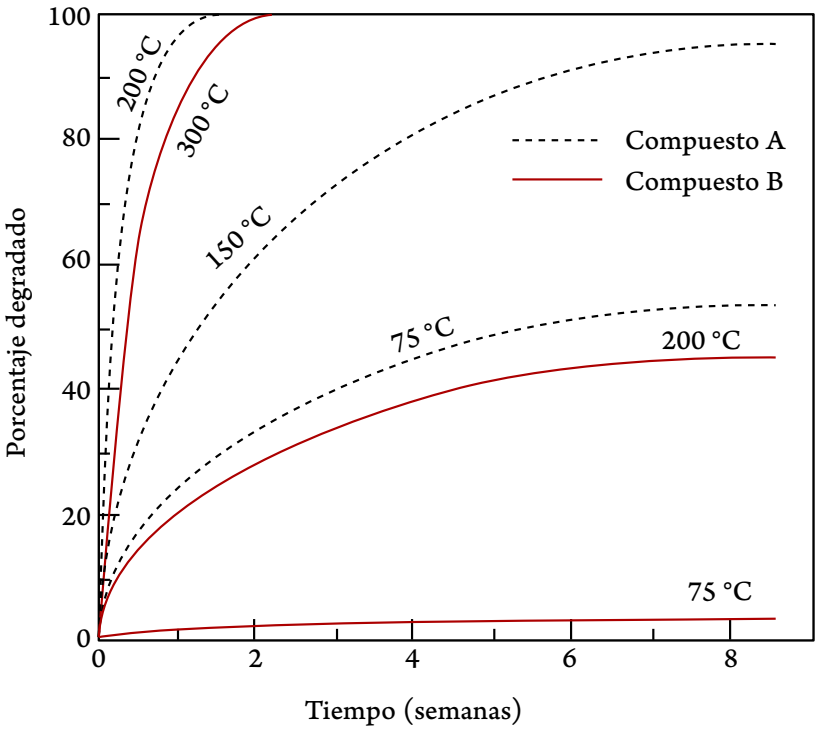


Figura 6.5: Representaciones esquemáticas de la degradación en función del tiempo para dos compuestos TZIM. El compuesto A se degrada con relativa rapidez a temperaturas moderadas, por lo que es adecuado para la estimulación de sistemas a temperaturas bajas o moderadas. El compuesto B es un TZIM más estable, adecuado para aplicaciones a temperaturas más altas. Fuente: [11]. Modificado.

Como se ha visto al tratar el tema de los obturadores, la alta temperatura, por encima de 200 °C, supone un problema tecnológico difícil de manejar. Conviene recordar las múltiples dificultades técnicas presentadas en la perforación del sondeo ultraprofundo de *Kola*, Figura 6.6. La tecnología hidráulica y los equipos electrónicos, como cámaras, sensores, etc., tienden a fallar.

La tecnología de perforación geotérmica proviene del mundo del petroleo y el gas, donde las condiciones no son tan extremas. Es necesario el desarrollo de nuevos materiales para el avance del sistema EGS a mayor profundidad, lo que permitirá un mayor rendimiento de las instalaciones y, sobre todo, una mayor disponibilidad de emplazamientos geotérmicos a explotar.

Una dificultad añadida es el comportamiento de los lodos de perforación. Su primera función es la refrigeración de la cabeza perforadora y de la sarta de perforación. Su segunda función es ayudar en la extracción de los detritos de perforación, manteniendo el frente de perforación limpio y evitando que se atasque el varillaje. Si el lodo se filtra a través de las paredes del sondeo, el sistema en su conjunto puede fallar si no se resuelve pronto. En esta situación térmica, se producen varios problemas:

- Los lodos de perforación normales suelen empezar a descomponerse en condiciones de alta temperatura. Principalmente por la deshidratación de las arcillas que lo componen.

- Variaciones en la viscosidad del lodo permiten que el lodo no selle adecuadamente el sondeo y se produzcan filtraciones incontrolables.

- Reacciones químicas no deseadas entre el lodo y los aditivos de mejora y estabilización debido al calor excesivo.
- Coagulación parcial o total del lodo.

Figura 6.6: Operación en el varillaje del pozo de perforación del pozo de *Kola*. Fuente: *Sputnik*.

La fracturación de la roca depende, sobre todo, del estado tensional previo del macizo rocoso, por lo que el control direccional de las fracturas inducidas es realmente limitado con la tecnología disponible en este momento.

Por último, hay que considerar que altas temperaturas y presiones pueden hacer que las fracturas recién formadas reaccionen inmediatamente con el fluido. Algunos efectos podrían ser: la disolución de minerales o la perdida de rugosidad de las paredes de la fractura. Una disolución de minerales podría mejorar el espacio disponible para el fluido de producción, pero también podría hacer que, con el cambio de condiciones durante la fase de producción, se precipiten, cegando las fracturas. La perdida de rugosidad, por su parte, podría hacer inestable el sostenimiento de las fracturas mediante los fragmentos de roca desprendidos durante la fracturación. Esto causaría un colapso parcial de las fracturas y un menor rendimiento en la producción.

7 Impacto medioambiental

7.1 Introducción

7.1 Introducción 91
7.2 Efluentes gaseosos 92
7.3 Efluentes líquidos 95

Casi cualquier actividad humana produce algún tipo de contaminación. En ocasiones se producen residuos sólidos y, otras veces, efluentes líquidos o gaseosos. La geotermia de alta entalpía no es la excepción. Con todo, los contaminantes procedentes de estas instalaciones suelen ser menos perjudiciales para el medio ambiente que los de las plantas de producción de energía convencionales. Además, el uso directo de fluidos geotérmicos para calefacción o procesos industriales suele tener, aún, menos impacto en el entorno natural.

En ocasiones, los efluentes, incluso la radiación procedente de minerales del subsuelo profundo, no tienen importancia y sus concentraciones o niveles de radiación están por debajo de los límites máximos permitidos por la legislación.

En el pasado, el control de la contaminación no era tan exhaustivo como lo es hoy en día, especialmente cuando comenzaron las primeras plantas experimentales a mediados del siglo XX. Por eso, en algunas ocasiones, se cometieron errores como el vertido de sulfuro de arsénico o mercurio a las aguas de los ríos, o de sulfuro de hidrógeno a la atmósfera [63]. En la actualidad, todos estos efluentes se controlan de manera satisfactoria mediante el empleo de la reinyección, la recuperación de gases y el uso de torres de refrigeración, entre otros.

No todos los vertidos geotérmicos son nocivos. De hecho, si se tratan convenientemente y se baja su temperatura antes del vertido, pueden aportar un aumento en las capacidades hidroeléctricas de algunas plantas eléctricas aguas abajo.

En otros casos, los efluentes son fuentes de metales o minerales interesantes, como el potasio o el litio. En este caso, se pueden recuperar mediante el empleo de balsas de evaporación, donde se extraen los lodos del fondo para su posterior procesamiento metalúrgico.

Conviene no perder la perspectiva en los aspectos medioambientales, recordando que los géiseres, fumarolas y demás manifestaciones de actividad volcánica en la superficie pueden llegar a ser peligrosas. No solo por las altas temperaturas de los fluidos geotérmicos, sino porque su comportamiento no siempre es predecible y puede producir daños a la fauna e,

Cabecera: Fotografía gran angular de vapor industrial. Fuente: Imagen de *wirestock* en *Freepik*.

incluso, a los seres humanos. En otros casos, los minerales disueltos en los efluentes acaban directamente en ríos y arroyos.

Los efluentes no siempre son sustancias inocuas, y en el caso de los gases, pueden afectar la atmósfera. Estos efectos se producirán tanto si hay una planta geotérmica como si no. Por tanto, es necesario estudiar el entorno natural y tener constancia de las condiciones previas a la construcción de una planta para producir energía eléctrica o para su aprovechamiento térmico.

La interacción del sistema con el medio se da principalmente mediante las emisiones gaseosas a la atmósfera y las reacciones químicas entre minerales y los fluidos geotérmicos. También se producen cambios físicos en el propio sistema como consecuencia de estas variaciones químicas. Por ejemplo, con variaciones de porosidad en las rocas debido a disoluciones o deposición de minerales. La solubilidad de los gases contenidos en los fluidos también puede variar si cambia la temperatura del medio.

7.2 Emisiones de efluentes gaseosos

En todo proceso natural, se producen interacciones químicas entre todos los componentes que lo constituyen. Cuando se produce un cambio, el sistema tiende a buscar un nuevo equilibrio, intentando llegar a un estado de mínima energía.

Un sistema geotérmico es complejo y, dado su estado térmico y las presiones litoestáticas, es mucho más activo químicamente que los entornos naturales superficiales.

Aunque existen muchos gases de origen natural contenidos en los fluidos geotérmicos, hay un reducido conjunto de ellos, especialmente los "no condensables[1]", que pueden causar problemas ambientales. En la Tabla 7.1 se muestran los porcentajes en peso de algunos gases "no condensables" procedentes de las plantas geotérmicas más importantes del mundo. Existen principalmente tres tipos de emisiones gaseosas a tener en cuenta, tanto por volumen como por la problemática particular de cada uno de ellos:

$$\text{Emisiones gaseosas} \begin{cases} \text{Gases de efecto invernadero } (CO_2) \\ \text{Sulfuro de hidrógeno } (H_2S) \\ \text{Metales pesados (vapor de Hg)} \end{cases}$$

Naturalmente, estas emisiones solo se producen si se emplean sistemas "*flash*" o de vapor seco, puesto que los sistemas binarios emplean intercambiadores de calor y, por tanto, no se producen emisiones gaseosas de ningún tipo. Todo esto se estudia con detalle en el Capítulo 5.

Los gases de efecto invernadero, en el caso de la geotermia, están constituidos principalmente por el dióxido de carbono (CO_2). Este gas está disuelto en los fluidos geotérmicos, y tanto la temperatura como los minerales carbonatados presentes en el terreno son responsables de su concentración final. La presencia de minerales carbonatados, como la calcita y la dolomita, hace que la concentración de dióxido de carbono aumente en los fluidos geotérmicos.

1: El termino gas "condensable" o "no condensable" proviene de la tecnología de los refrigerantes. Los gases "condensables" son aquellos que cambian de estado gaseoso a estado líquido y viceversa, fácilmente, mediante un cambio de temperatura o presión. Los gases no condensables (como el CO_2 o el H_2S) no cambian de estado bajo las condiciones habituales de un sistema de refrigeración. Esto hace que no puedan ser separados de una mezcla de gases por métodos físicos. Obligando al empleo de métodos químicos, o bien, a una destilación fraccionada de gases licuados.

A su vez, la concentración de dióxido de carbono en el fluido geotérmico también influye en la química de los minerales que atraviesa [11]. En la Figura 7.1 se puede ver la concentración de CO_2 en función de la temperatura de los fluidos geotérmicos.

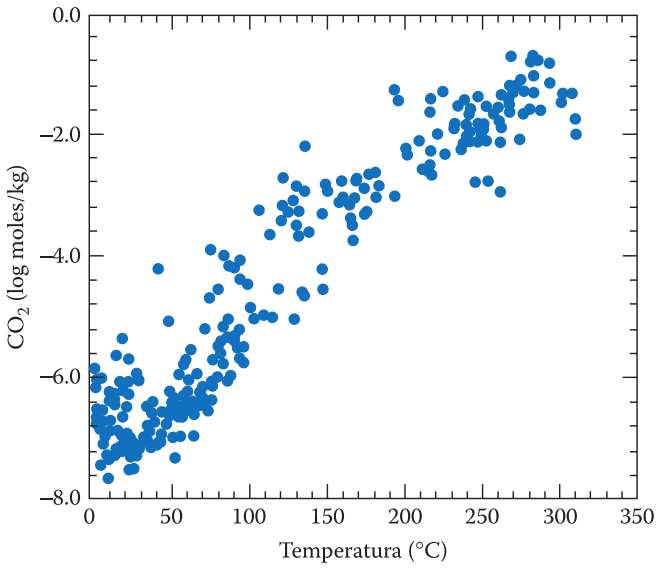


Figura 7.1: Concentración de CO_2 en fluidos geotérmicos, en función de la temperatura del yacimiento. Fuente: [11, 64] Adaptado.

Uno de los problemas del CO_2, más allá del efecto invernadero, es que es un gas no condensable y, por tanto, disminuye la eficiencia termodinámica de la turbina de vapor. Debido a esto, tanto el CO_2 como otros gases no condensables suelen eliminarse del vapor antes de turbinarlo. Esto provoca la liberación de algo de dióxido de carbono a la atmósfera. Con todo, la cantidad de CO_2 liberada es ínfima comparada con la producida en una central térmica que quema combustibles fósiles. Según *Glassley* [11], la cantidad de CO_2 liberada por una central geotérmica tipo "flash" frente a una central térmica de combustibles fósiles es del orden de entre 15 y 150 veces menor. Considerando que la mayoría del dióxido de carbono está disuelto en el fluido geotérmico, una central de vapor seco apenas emitirá CO_2. En función del *mix* energético y de la naturaleza química de los fluidos geotérmicos, la reducción de emisiones de dióxido de carbono puede ser incluso mayor.

Como las emisiones de CO_2 provienen de los fluidos geotérmicos locales, la reinyección de agua más fría y con un menor contenido de dióxido de carbono puede afectar el equilibrio químico con los minerales carbonatados. Esto podría variar la mineralogía de la zona a largo plazo. El crecimiento de minerales debido a este proceso podría reducir la porosidad del medio y la circulación de los fluidos geotérmicos.

Con respecto al H_2S, es un compuesto que se produce de forma natural, por descomposición de materia orgánica o, en el caso que nos ocupa, en zonas volcánicas con poco oxígeno. Es una sustancia inflamable, altamente tóxica y corrosiva; por tanto, es muy peligrosa [65].

De cara a un accidente, los efectos del sulfuro de hidrógeno (H_2S) sobre el cuerpo humano, según la concentración en el aire, son [66]:

- **2-5 ppm:** Irritación de ojos y garganta.
- **10-50 ppm:** Irritación respiratoria y dolor de cabeza.

- **50-100 ppm:** Pérdida del olfato y riesgo de edema pulmonar.
- **100 ppm:** Valor IPVS. Peligro inmediato para la salud o la vida.
- **A partir de 500 ppm:** Muerte, en minutos, por colapso pulmonar.

Se produce a partir de algunos sulfuros metálicos contenidos en el subsuelo. De manera que se suelen producir reacciones iguales o parecidas a las de FeS (pirrotita):

$$\underset{\text{pirrotita}}{\text{FeS}} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \underset{\text{wüstitita}}{\text{FeO}} + \text{H}_2\text{S} \tag{7.1}$$

Es un gas no condensable, al igual que el CO_2, y debido a ello, también es necesaria su eliminación del flujo de vapor antes de turbinarlo por las mismas razones de eficacia termodinámica. Su separación completa del vapor es complicada, dada su volatilidad. Aun así, lo habitual es una recuperación superior al 95%.

Para su eliminación, se emplean dos tipos de reacciones químicas: por vía seca y por vía húmeda, respectivamente. Así, el sulfuro de hidrógeno reacciona con el oxígeno para dar un precipitado de azufre o dióxido de azufre:

$$2\,\text{H}_2\text{S(aq)} + \text{O}_2\text{(aq)} \longrightarrow 2\,\text{S}\downarrow + 2\,\text{H}_2\text{O} \tag{7.2}$$

$$2\,\text{H}_2\text{S} + 3\,\text{O}_2 \longrightarrow 2\,\text{SO}_2 + 2\,\text{H}_2\text{O} \tag{7.3}$$

El empleo de uno u otro sistema dependerá de cómo se obtenga el H_2S, priorizando el costo mínimo. Considerando, además, que en la reacción (7.5) se produce dióxido de azufre. Este subproducto, aunque es menos contaminante, debe ser neutralizado. Para ello, se suele emplear hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) u otro producto alcalino, ya sea por vía húmeda o seca.

En ocasiones, se emplea el método *Klaus*, muy utilizado para la eliminación del H_2S en las explotaciones de petróleo y gas natural. En este sistema se produce azufre sólido a lo largo de dos fases con un rendimiento en un rango de 95 % a 97 % [67]. En la primera fase, o fase de llama, se quema parte del H_2S según la reacción (7.5), que produce dióxido de azufre y agua. En la segunda fase, fase catalítica, se hace reaccionar el SO_2 con el H_2S residual en varias etapas consecutivas [67]. Empleando un catalizador de bauxita o alúmina según la reacción:

$$2\,\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \overset{\text{Catalizador}}{\rightleftharpoons} 3\,\text{S}\downarrow + 2\,\text{H}_2\text{O} \tag{7.4}$$

El sistema finalmente empleado dependerá de la naturaleza de los gases no condensables separados del vapor y del costo final del tratamiento, que puede variar mucho según el caso.

Existen otros elementos tóxicos de los que se pueden encontrar trazas en los vapores de salida, como el arsénico, el boro, el mercurio e incluso el radón. El radón, aunque es un gas noble, presenta el inconveniente de ser radiactivo y, bajo ciertas circunstancias, puede producir cáncer de pulmón.

El más importante de todos estos elementos es el mercurio (Hg). El mercurio es un elemento pesado que daña el sistema nervioso central y se

acumula en el organismo durante décadas. En estado puro y a temperatura ambiente, su estado es el de un líquido que se evapora con facilidad, pasando a la atmósfera y contaminando el medio ambiente. Los niveles de mercurio en los gases procedentes de una fuente geotérmica pueden ser altos si hay minerales que lo contienen en las inmediaciones del yacimiento. La principal mena de mercurio es el cinabrio (HgS).

Gas	*The Geysers*	*East Mesa*	Cerro Prieto	*Wairakey*
CO_2	0.326	0.0893	0.689-0.897	0.1645
H_2S	0.0222	0.000 005	0.017-0.035	0.04
CH_4	0.0194	0.0011	0.015-0.032	0.000 44
NH_3	0.0052	—	0.012-0.019	0.000 75
N_2	0.0056	0.0037	0.0015-0.0041	0.000 46
C_2H_6	—	0.0001	—	0.000 18
H_2	—	0.000 005	0.0016-0.0041	0.0001
H_3BO_3	—	—	—	0.000 03
HF	—	—	—	0.001 78
Ar	—	0.0001	0.000 04-0.0001	—

Los valores están expresados en tanto por ciento en peso.

Tabla 7.1: Muestra de concentración de gases "no condensables" de varias plantas geotérmicas al rededor del mundo. Fuente: [63] Adaptado.

Existen tres formas principales de paliar la presencia de mercurio en los gases geotérmicos. La primera es emplear un sustrato mineral como carbón activado o zeolitas[2] para su adsorción. Se mejora la fijación del mercurio si el sustrato mineral poroso está impregnado de azufre.

El segundo método consiste en emplear el método de eliminación del sulfuro de hidrógeno, ya visto, después de haber oxidado previamente el vapor de mercurio. Para ello, se hace pasar el vapor de mercurio por una solución que lo transforma en cloruro de mercurio. Al ponerlo en contacto con un sulfuro, en este caso H_2S, el cloruro de mercurio se convierte en sulfuro de mercurio, que es insoluble, según la ecuación:

$$HgCl_2(ac) + H_2S(ac) \longrightarrow HgS\downarrow + 2\,HCl(ac) \tag{7.5}$$

Empleando este método, se optimiza el gasto en la instalación y se eliminan dos contaminantes. La recuperación de mercurio está por encima del 90%.

Un tercer método, innovador y mucho más seguro, es el empleo de sistemas electroquímicos. Para ello, se emplea un electrodo metálico que genera una aleación de mercurio. Así, el mercurio puede ser eliminado de forma segura[3].

2: Las zeolitas son minerales de origen volcánico, sedimentario o metamórfico pertenecientes a la familia de los aluminosilicatos. Poseen una estructura cristalina con forma de rejilla tridimensional con canales porosos. Poseen propiedades absorbentes, siendo ideales para portar catalizadores o en operaciones de intercambio iónico. También existen variedades sintéticas.

3: Siendo un método muy versátil, se han realizado ensayos para la limpieza de aguas de mina, ligadas a la extracción del oro, contaminadas con mercurio. Se han empleado electrólisis con pares de electrodos de aluminio y hierro [68]. Otro ejemplo, en sistemas altamente corrosivos, como plantas de fabricación de ácido sulfúrico, se ha usado con éxito un sistema electroquímico con electrodos finos cubiertos de platino que forman una aleación platino-mercurio ($PtHg_4$), pudiendo reutilizar los electrodos y separando el mercurio de forma segura [69].

7.3 Efluentes líquidos

En los sistemas geotérmicos, ya sea para uso directo o para producir energía eléctrica, se emplean diversas tecnologías para aprovechar la energía térmica. En algunos casos, el fluido geotérmico, ya sea líquido o vapor, no entra en contacto con la superficie porque se emplean intercambiadores de calor. En otros casos, el vapor es turbinado y la fase líquida residual y condensada se reinyecta en la roca de almacenamiento. Si el yacimiento es de vapor dominante, la cantidad de sustancias sólidas disueltas es pequeña y no suele representar un problema.

El problema surge cuando parte de este fluido no se reinyecta, normalmente por motivos de rentabilidad. En estos casos, el fluido se evapora o se vierte, normalmente en un río o lago cercanos. En estos casos, es necesario bajar la temperatura hasta un límite razonable para mezclarse con agua natural, normalmente regulado legislativamente.

En este proceso, existen dos posibles problemas: la composición química del efluente líquido y la precipitación de sustancias debido al descenso de la temperatura.

Un descenso de la temperatura puede hacer que parte de los minerales disueltos en la fase líquida precipiten debido a una disminución de la solubilidad. La precipitación se produce en las tuberías que conducen la fase líquida hacia los pozos de reinyección, los evaporadores o el exterior. Bastará con un mantenimiento preventivo y un control rutinario de la composición de los fluidos para prevenir averías.

Geotermia de baja entalpía

Esta página está en blanco intencionalmente.

8 Intercambiadores geotérmicos

8.1 Sistemas horizontales . 100
8.1.1 Tendido diáfano 101
8.1.2 Tendido en zanjas 102
8.2 Sistemas verticales . . . 103
8.2.1 Perforación de sondeos . . 104
8.3 BHE abiertos 105
8.3.1 Acuíferos 106
8.3.2 Almacenamiento hídrico . 113
8.3.3 Sistemas ORGS 115
8.3.4 Sistemas ATES 116
8.4 BHE cerrados 118
8.4.1 Construcción del sondeo . 118
8.4.2 Mortero termoconductor 122
8.5 Sistemas termoactivados 124
8.6 Otros sistemas 125

Como se ha visto en el Apartado 3.3, los sistemas geotérmicos superficiales aprovechan la estabilidad y la inercia térmica de los primeros 300 m a 400 m, cuya principal influencia es la energía procedente del Sol. Se aprovecha para proveer climatización y agua caliente sanitaria (ACS) tanto a edificios como a otro tipo de instalaciones, mediante el empleo de bombas de calor (BCs). Estos aparatos poseen un rendimiento muy alto y permiten la amortización de la inversión de manera relativamente rápida.

Para poder aprovechar el flujo térmico entre el terreno y la BC, es preciso disponer de uno o varios intercambiadores térmicos, por los que circula un fluido refrigerante secundario o *brine*.

Existe una gran variedad de tecnologías para el intercambio térmico con el terreno, que se adaptan a las peculiaridades del lugar, al espacio disponible y a la potencia térmica requerida. También existen otros condicionantes, como la estacionalidad del intercambio, la demanda, el tipo de climatización y, por supuesto, la tecnología de BC que se instale.

Más del 80% corresponde a los *Borehole Heat Exchangers* (BHEs), que se puede traducir como "pozos intercambiadores de calor". En español, se suele emplear el término "pozos de intercambio geotérmico".

En general, los sistemas de intercambio geotérmico se pueden dividir en varios grupos:

- Sistemas geotérmicos
  - Horizontales
    - Tendidos
    - En zanja
  - Verticales (BHE)
    - Abiertos
    - Cerrados
  - Termoactivados
    - Losas
    - Pilotes
    - Muros
  - Pozos de agua
  - Aguas de minas y túneles

Cabecera: Intercambiador horizontal *Slinky*. Fuente: Geothermal HeatPump Consortium

8.1 Sistemas de intercambio horizontales

Los intercambiadores horizontales son relativamente económicos, debido a que no se emplea tecnología minera de perforación. Tan solo un vaciado de entre 1.2 m a 2 m. A modo de referencia, los intercambiadores se tienden sobre el suelo con longitudes de entre 35 m a 60 m por cada kW térmico intercambiado con el terreno [70]. La profundidad depende mucho del espacio disponible, de la climatología local, de la naturaleza del suelo donde se encuentre la instalación, de la normativa de cada país y del sistema de cálculo que se emplee, entre otros aspectos. Hay que tener especial cuidado con la retirada previa de la capa de suelo vegetal y su conservación, con el fin de garantizar una restauración adecuada de la zona afectada por el vaciado y posterior relleno.

Una vez alcanzada la cota e igualada la superficie del terreno, se tienden sobre él las tuberías de intercambio térmico. Estas suelen estar fabricadas con plásticos como el polipropileno (PP-R), policloruro de vinilo (PVC) o el polietileno de alta densidad (HDPE). La elección del material dependerá de las condiciones ambientales y del presupuesto disponible. Por ejemplo, el PP-R está especialmente indicado para casos de corrosión exterior, sobre todo por el agua de lluvia, y la necesidad de bajas pérdidas de carga, si la longitud de las tuberías es elevada [71].

Una elección correcta del material de las tuberías y del fluido secundario que fluirá por ellas puede minimizar el mantenimiento. Así se evitan fugas e incrustaciones interiores que hacen necesarias reparaciones o limpiezas frecuentes.

Con el fin de evitar posibles problemas que ocasionen un mal funcionamiento de los intercambiadores, es aconsejable mantener unas distancias de seguridad con determinados elementos estructurales o instalaciones enterradas:

- Distancia mínima de 2 m a los árboles.
- Distancia mínima de 1.5 m a las conducciones subterráneas.
- Distancia mínima de 3 m a las cimentaciones y desagües.

Estas medidas de precaución reducen el riesgo de estar demasiado cerca de conducciones de agua que puedan romperse, afectando la conducción térmica de los intercambiadores. La rotura de las conducciones por la acción de las raíces de árboles cercanos, o la posible afectación térmica en la cimentación de los edificios próximos, también se minimiza al observar estas distancias de seguridad.

Por otra parte, hay que recordar que la mayoría de los plásticos presenta una mala conductividad térmica. A modo de ejemplo, la conductividad térmica del HDPE es de unos 0.44 W/mK frente a los 0.58 W/mK del agua pura. En todo caso, la conductividad térmica del suelo es superior a la del agua, pero nunca supera los 2 W/mK. Esto se traduce en varios aspectos a considerar:

- El suelo se puede ver saturado térmicamente, de manera puntual, si se aplica una circulación de fluido con un caudal demasiado elevado.

- Por otro lado, el refrigerante secundario debe circular por las tuberías de intercambio en régimen turbulento, para que la transmisión de calor sea la adecuada. Siendo necesario garantizar un número de *Reynolds* de al menos 4000, para secciones circulares [72].

- Para evitar que el suelo se sature térmicamente, a medio o largo plazo, es necesario que se emplee el volumen de terreno suficiente para cumplir con la demanda térmica de la instalación.

Con respecto a las dos geometrías de tendido de los intercambiadores, existen, fundamentalmente, dos tipos: los tendidos lineales y los tendidos de bucles o espiras superpuestas.

Aunque los sistemas de intercambio horizontales son más económicos, puesto que no emplean técnicas mineras, como la perforación de sondeos, también presentan sus inconvenientes [11]:

- Al estar dispuestos a poca profundidad, es necesario disponer de una gran superficie total, para evitar la saturación térmica del suelo.

- La interferencia del clima estacional es un problema puesto que no se alcanza la profundidad de estabilidad térmica. Esto significa que el rendimiento de las bombas de calor es menor.

- Es necesario que el terreno este libre para facilitar que se regenere térmicamente, lo que hace necesario que se le permita absorber el agua de lluvia, por su inmensa capacidad térmica, y la luz directa del sol. Por tanto no se puede aprovechar como superficie de aparcamiento de vehículos, o pistas deportivas.

- No se puede usar como huerto urbano o de otro tipo por la interferencia térmica de los intercambiadores.

- No se pueden plantar arboles, pues sus raíces podrían dañar los intercambiadores.

Se puede llegar fácilmente a la conclusión de que estos sistemas, aunque son más económicos, no son demasiado frecuentes en Europa por falta de espacio. Ya que el uso del suelo se reduce a poco más que su aprovechamiento como tierra de pastoreo.

8.1.1 Tendido en espacios diáfanos

Según se use un tipo u otro de geometría de tubo, se emplean dos formas de cubrir todo el espacio disponible:

- Mediante tubería dispuesta de manera lineal formando circuitos similares a los del suelo radiante. En este caso, las tuberías están situadas a una distancia entre sí de entre 0.3 m a 0.8 m aunque lo habitual es una separación de 0.4 m. Se conectan en diferentes circuitos en serie, paralelo o mixtos. Dependiendo de las necesidades térmicas e hidráulicas del circuito. Un ejemplo se muestra en la Figura 8.1.

Figura 8.1: Intercambiadores geotérmicos horizontales extendidos en un terreno diáfano. Fuente: *Geoda Sostenibilidad.*

- Empleando intercambiadores tipo *Slinky* con una disposición plana sobre el suelo se forman bandas compuestas por espiras que se separan, solapándose unas sobre otras. Estas bandas colocadas paralelamente cubren todo el terreno disponible. Este sistema presenta un consumo mucho mayor de tubería, pero también intercambia mucho más calor con el terreno. Se muestra en la Figura 8.2.

Figura 8.2: Intercambiadores geotérmicos horizontales, tipo *Slinky*, extendidos en un terreno diáfano. Fuente: *Geothermal HeatPump Consortium.*

En ambas disposiciones se unifican los colectores de impulsión y retorno de fluido de cada circuito o grupo de circuitos. De manera que se pueda centralizar su control mediante llaves, válvulas antirretorno, caudalímetros, etc. en una arqueta o registro. Figura 8.3

Una vez terminada la instalación de las tuberías de intercambio, se procede a rellenar el hueco con el material retirado previamente. Finalmente, se restaura la capa de tierra vegetal y se replanta césped o vegetación de raíces someras.

Figura 8.3: Arquetas y distribuidores horizontales. Fuente: *TermoTerra.*

8.1.2 Tendido en zanjas

En ocasiones, no es posible realizar un vaciado completo por diversos motivos, como la existencia de conducciones de servicio enterradas o la

falta de espacio disponible. Se pueden realizar zanjas de mayor o menor ancho y colocar en ellas los intercambiadores térmicos.

Las zanjas permiten aprovechar el fondo y los hastiales de la trinchera, aumentando el espacio neto disponible. Si bien las tuberías laterales están a una cota menor respecto a la superficie. Por tanto, la saturación térmica del suelo no debe ser un aspecto crítico en caso de usarse. Para minimizar este efecto, se suelen hacer zanjas más profundas, si la estabilidad del terreno lo permite.

Al igual que en el tendido en terreno diáfano, la disposición de las tuberías depende de la geometría del intercambiador:

- Si se emplean tuberías dispuestas de manera lineal se usa la misma disposición que en terrenos diáfanos, pero aprovechando también los hastiales de las zanjas. Las tuberías que recorren las superficies laterales se pueden fijar a los laterales mediante el empleo de grapas o bien, se realizan rellenados parciales mediante tongadas cada 0.4 m y colocando tuberías a ambos lados en cada operación, evitando los anclajes. Un esquema de este sistema se muestra en la Figura 8.4.

- Empleando intercambiadores tipo *Slinky* con una disposición plana se puede aprovechar un máximo de tres superficies: el fondo y los dos hastiales, como se muestra en la Figura 8.6. La distribución dependerá del diseño y de la necesidad de espacio Figura 8.5.

- Existe una variante que aprovecha el volumen completo de la zanja. Para ello se emplean intercambiadores tipo *Slinky*, pero en lugar de colocarlos con los bucles planos superpuestos, se instalan con una disposición helicoidal que ocupa totalmente la zanja, de forma que los bucles son perpendiculares al terreno. De esta manera se optimiza el intercambio de calor con el terreno minimizando la interacción de los bucles entre sí. El único inconveniente es que su instalación debe ser más delicada para evitar espacios sin llenar adecuadamente y evitar dañar el intercambiador.

Figura 8.4: Intercambiadores geotérmicos *Slinky* plano dispuestos en el fondo de la zanja. Fuente: *Instalaciones Alegre.*

Figura 8.5: Intercambiadores geotérmicos lineales dispuestos en zanja. Fuente: *Underfloor Heating Systems and Suppliers.*

Figura 8.6: Intercambiadores *Slinky* planos aprovechando las tres superficies de una zanja. Fuente: *David J. Boyer*

8.2 Sistemas de intercambio verticales.

El segundo tipo de instalación es el vertical. En este caso, se emplean técnicas mineras. Dependiendo del tipo de intercambiador, las características del sondeo serán diferentes. Pero en todas ellas se comienza con la perforación de uno o varios sondeos someros. Con perforaciones que raramente superan los 200 m.

Este tipo de sistemas permite un mejor aprovechamiento del espacio disponible para la instalación de intercambiadores de calor. Aunque estos sistemas son muy versátiles, no está garantizada la viabilidad de la instalación. Existen factores, como la demanda energética del edificio o la existencia de otras instalaciones geotérmicas verticales en el entorno del edificio, que dificultan o imposibilitan la viabilidad térmica del intercambio geotérmico.

En estos casos, se opta por soluciones creativas, como pueden ser: cubrir parcialmente la demanda energética del edificio, la adopción de sistemas

de apoyo para completar dicha demanda o realizar perforaciones de sondeos oblicuos que se alejan de los intercambiadores cercanos, entre muchas otras soluciones.

De cualquier manera, los sistemas verticales siempre son una opción; aunque son flexibles y eficientes, económicamente hablando, son más exigentes.

8.2.1 Perforación de sondeos geotérmicos.

La cuantificación del coste de perforación no es trivial debido a los múltiples factores que están interrelacionados, lo que implica que un mismo sondeo tenga diferentes presupuestos en función de factores como:

- Geología, profundidad, diámetro y número total de los sondeos.
- Sistema de perforación a emplear.
- Los plazos para la ejecución.
- Disponibilidad de máquinas de perforación adecuadas.
- Gálibo máximo disponible, si la perforación es bajo techo.
- Accesibilidad de los puntos de perforación.
- Logística y gestión de residuos.
- Experiencia de la empresa de perforación.
- Necesidad de revestimiento temporal del sondeo.
- Necesidad y tipo de cementación del sondeo.

Existen muchos tipos de tecnologías de perforación que se adaptan, en última instancia, al propósito y las circunstancias del proyecto. En este tipo de sondeos y dado el diámetro y el rango de profundidades, se suelen emplear los siguientes sistemas de perforación:

- Rotopercusión con martillo en fondo neumático.
- Rotación con circulación directa[1] y empleo de lodos.

1: Dado que en estos sondeos son de producción, y no de investigación, la circulación directa resulta más económica.

El sistema de rotopercusión con martillo en fondo, en inglés *Down the Hole* (DTH), neumático[2], se suele usar en terrenos duros y friables, como granitos, pizarras, calizas, etc. Si los terrenos son inestables y las paredes se desmoronan con facilidad, como en gravas, arenas o zonas muy meteorizadas, es preferible el empleo de rotación con circulación directa y lodo de perforación.

2: A día de hoy existen modelos de martillos DTHs hidráulicos, pero su uso, en España, es todavía marginal.

No obstante, en ocasiones es preciso contar, además, con máquinas de doble cabeza que permitan el revestimiento temporal simultáneo a la perforación. Esto es especialmente cierto si se alternan terrenos de naturalezas muy diferentes durante la perforación. O bien, si la geología varía mucho de un sondeo a otro en la misma instalación. También es recomendable su uso si se realiza una perforación a rotación sobre terreno detrítico.

Una solución intermedia es el empleo de tuberías de revestimiento temporal con perforación a rotopercusión. En concreto, son muy popularesla

máquinas de perforar del sistema ©ODEX[3] y del sistema ©OD[4]. Siendo el primero un martillo DTH de geometría variable y el segundo un sistema de martillo DTH telescópico [53].

3: ODEX - *Overburden Drilling with the Eccentric.*
4: OD - *Overburden drilling.*

Sin ánimo de profundizar, puesto que existe numerosa bibliografía especializada, en general, el sistema de rotopercusión presenta las siguientes características:

- Presenta un alto rendimiento.
- Es un sistema limpio que no genera efluentes líquidos.
- Permite trasladar rápidamente el equipo de perforación.
- No necesita una infraestructura adicional.
- Mantenimiento de maquinaria más simple y económico.
- No es muy adecuado para suelos inestables.

El sistema de perforación rotativa con circulación directa, por su parte, presenta estas características:

- Apto para formaciones inestables.
- Presenta un alto coste relativo frente a la rotopercusión.
- Su rendimiento es más bajo.
- Es necesaria una mayor superficie de trabajo.
- Mayor dificultad en el traslado del equipo de perforación.
- Se generan efluentes líquidos que deben ser tratados.
- Es necesaria infraestructura adicional para el empleo de lodos.

Una vez realizada la perforación de los sondeos, se procede de diferentes formas en función de si los circuitos hidráulicos son abiertos o cerrados. Mientras que los sistemas cerrados emplean la recirculación del refrigerante secundario para el intercambio térmico con el subsuelo, los sistemas abiertos aprovechan los acuíferos situados en la zona.

8.3 Intercambiadores verticales abiertos

Los sistemas abiertos en geotermia somera presentan algunos aspectos muy diferentes a los pozos de geotermia de alta entalpía, más allá de la temperatura del agua. En geotermia somera, se intercambia energía térmica con el terreno, empleando para ello bombas de calor y valiéndose del agua subterránea como vector energético y almacén. El medio de intercambiar este calor es el empleo de pozos de extracción e inyección de agua del acuífero que se acoplan a un sistema de BCs.

Además, en los sistemas abiertos de muy baja entalpía, el agua siempre pasa por el intercambiador de calor procedente del acuífero, a través del pozo de extracción, y es inmediatamente retornada a este mediante un segundo sondeo de reinyección. El agua nunca entra en contacto con la atmósfera de la superficie. Por tanto, legalmente, no se extrae agua ni se realizan vertidos.

Son interesantes, desde un punto de vista de la rentabilidad económica, las instalaciones a partir de los 150 kW térmicos, puesto que el número de sondeos que se emplean se reduce drásticamente. Considerando una estimación de "números gordos" para una instalación de esta potencia térmica, cumpliendo los requisitos ambientales, serían necesarios un par de sondeos de extracción y otro par de inyección para conseguir el caudal de agua subterránea necesario. Mientras que, si se hace con intercambiadores cerrados, para la misma potencia térmica, serían necesarios más de 22 000 metros m de intercambiadores en total [73].

Existen varios sistemas que emplean esta tecnología, pero los más utilizados son los sistemas geotérmicos abiertos de recirculación, o en inglés *Open Recirculation Geothermal Systems* (ORGS), y los sistemas de almacenamiento térmico en el acuífero, o en inglés *Aquifer Thermal Energy Storage* (ATES) [73].

Como se ha mencionado, los sondeos empleados en sistemas geotérmicos abiertos en geotermia de muy baja temperatura son, básicamente, pozos de agua. Por eso, se aplican todas las técnicas constructivas de esta especialidad de sondeos, salvo quizás la técnica de la presurización. Para ampliar los conocimientos sobre las técnicas de perforación de sondeos de agua, es conveniente consultar la bibliografía.

En todo caso, hay que tener en cuenta varios aspectos adicionales: el primero es que no se trabaja con la misma mecánica de fluidos que se aplica en los sistemas cerrados, y el segundo es que el calor se almacena en el agua del acuífero, pero también en el terreno poroso por el que circula. Estos dos aspectos hacen que el modelo matemático del sistema sea mucho más complejo que en un sistema cerrado, en el que solo se considera el terreno.

8.3.1 Acuíferos

Daremos ahora unas mínimas nociones de hidrogeología que permiten entender mejor cómo funcionan los sistemas geotérmicos abiertos. No obstante, dada la complejidad y amplitud del tema, un estudio detallado del mismo está fuera del alcance de este manuscrito. Para ampliar los conocimientos sobre el agua subterránea, se aconseja al lector consultar bibliografía especializada en hidrogeología.

El agua subterránea procede en su mayor parte de la lluvia que se filtra a través del terreno y se acumula en acuíferos. Estas formaciones están constituidas por materiales que permiten el paso del agua a través de ellos, como arenas, gravas o rocas fracturadas, actuando como almacenamiento. Su recarga se produce a través de las lluvias, salvo en casos muy excepcionales en los que el agua proviene de otro origen y no se renueva de manera natural.

Los acuíferos pueden ser libres, confinados o semiconfinados.

- Un acuífero libre esta formado por una capa de terreno porosa, sobre una capa de terreno impermeable. El agua procedente de la lluvia se filtra a través de fracturas y poros, ocupando todo el espacio disponible. A la superficie de separación entre aire y agua se le denomina "nivel freático[5]". Esta superficie varia a lo largo del año, disminuyendo su cota a medida que el aporte de agua hace que el

5: En la bibliografía inglesa, al nivel freático se le suele denominar *water table*.

acuífero acumule más volumen de agua. Su cota aumenta si hay periodos de sequía o se extrae agua a través de sondeos. En todos los casos, y sea cual sea su cota, la presión relativa en la superficie del nivel freático respecto de la atmósfera será cero. Esto significa que para extraer el agua será necesario emplear bombas de extracción. Un esquema, genérico, de este tipo de acuíferos puede observarse en la Figura 8.7.

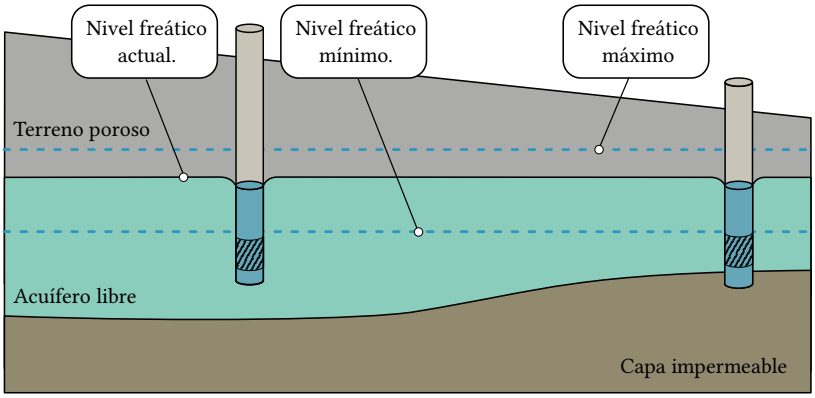


Figura 8.7: Esquema de dos pozos de extracción de agua en un acuífero libre. La forma del nivel freático varia en las proximidades de los sondeos, apreciándose una ligera depresión. Fuente: [53].

- Un acuífero confinado, por el contrario está formado por una capa de terreno porosa entre dos capas de terreno impermeable. Por tanto no existe una superficie libre de agua. Siendo la presión en cada punto de la frontera entre la capa porosa y la capa impermeable superior la que corresponde a la presión hidrostática. De manera que el bombeo necesario para extraer el agua depende de la localización exacta del pozo. Pudiendo llegar a no ser necesario en absoluto [53]. Un ejemplo es el pozo artesiano (b) que se muestra en la Figura 8.8.

- Un acuífero semiconfinado, también llamado acuitardo, pose una capa impermeable y otra con una permeabilidad limitada. En ocasiones la propia capa es semipermeable. Esta permeabilidad limitada hace que el agua pase por la capa con dificultad, normalmente en dirección vertical. Están presurizados como los confinados [73].

En ocasiones, los acuíferos afloran a la superficie, dando lugar a ríos, lagos y manantiales. Si el acuífero aflorado es confinado, puede dar lugar a manantiales que forman surtidores o a un "borboteo" que mueve los sedimentos en el fondo.

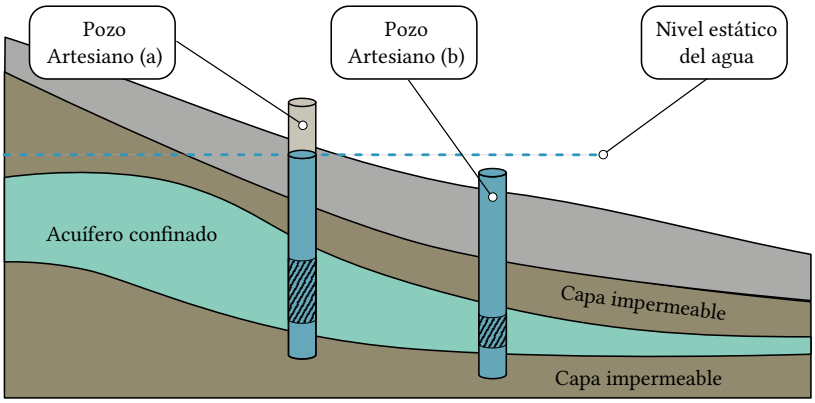


Figura 8.8: Esquema de dos pozos de extracción de agua en un acuífero confinado. En este caso, el pozo artesiano (a) permite que el agua ascienda por el sondeo, reduciendo la potencia de bombeo. En el caso del pozo (b), no es necesario el bombeo puesto que el agua fluye fuera del pozo, al estar la boca del pozo por debajo del nivel estático del agua (presión hidrostática nula). Fuente: [53].

En el caso de una instalación geotérmica somera abierta, dada una deman-

da energética concreta, la cantidad de agua disponible, la profundidad, la extensión del acuífero y el caudal máximo disponible determinan si el sistema es viable o no, desde un punto de vista económico. Es por esto que, en general, solo se suelen elegir acuíferos y no otros tipos de estructuras geológicas saturadas de agua.

Conceptos básicos

Porosidad del medio: razón entre área de los huecos y unidad de área. Se denota por n y se expresa en tanto por uno.

Flujo de *Darcy*: Volumen de agua que fluye a través de una unidad de área de terreno por unidad de tiempo. Se denota como q y posee unidades de velocidad [m/s].

Velocidad de filtración: Velocidad media en un punto del terreno. Se define como v y coincide con el flujo de *Darcy* dividido por la superficie de los huecos por unidad de área de terreno, que denominamos n.

$$v = \frac{q}{n} \quad [\mathrm{m/s}] \tag{8.1}$$

Dado que n es siempre menor que 1, v será siempre mayor que q. Por otra parte, siendo Q el caudal que atraviesa la sección del A:

$$q = \frac{Q}{A} \quad [\mathrm{m/s}] \tag{8.2}$$

$$v = \frac{q}{n} = \frac{Q}{nA} \quad [\mathrm{m/s}] \tag{8.3}$$

Tiempo de travesía: Valor t de tiempo que tarda una partícula de agua en recorrer el terreno, una distancia L, para una velocidad de filtración v, por tanto:

$$vt = L \quad [\mathrm{m}] \tag{8.4}$$

$$t = \frac{L}{v} = \frac{LnA}{Q} \quad [\mathrm{s}] \tag{8.5}$$

Para el estudio de las aguas subterráneas, la toma de muestras de suelos y las mediciones, existe una norma que trata estos temas, entre otros. Su aplicación es altamente recomendable, puesto que permite que los resultados de la investigación sean homologables en la redacción de informes técnicos y proyectos. Actualmente, la norma en vigor es la UNE-EN ISO 22475-1:2022. Investigación y ensayos geotécnicos. Métodos de muestreo y medición de aguas subterráneas. Parte 1: Principios técnicos para el muestreo de suelos, rocas y aguas subterráneas. (ISO 22475-1:2021) [74]. Esta norma es una transposición idéntica de la norma ISO 22475-1:2021, que es una norma internacional.

Para entender la complejidad del problema de las aguas subterráneas, basta con recordar que el flujo de agua a través de un medio poroso es errático. El agua cambia de dirección constantemente, y la velocidad del flujo es mayor en poros pequeños y más lenta en poros de mayor tamaño. Por tanto, en ingeniería, se suelen emplear trayectorias medias del flujo,

velocidades medias o la distribución de la presión en el suelo [75].

Altura hidráulica

Altura hidráulica: O altura piezométrica, asociada a un punto $\mathbb{P}$ del como el nivel al que asciende el agua por un tubo abierto desde un nivel de referencia, con la base de dicho tubo justo en el punto $\mathbb{P}$. Se denota por ϕ, como se observa en la Figura 8.9. La presión en el punto $\mathbb{P}$ se puede calcular a partir del peso de la columna de agua que hay sobre él:

$$p = \rho g(\phi - z) \quad [\text{Pa}] \tag{8.6}$$

$$\phi = \frac{p}{\rho g} + z \quad [\text{m}] \tag{8.7}$$

A la altura z, por encima del nivel de referencia z_0, se le conoce como la altura de elevación del punto $\mathbb{P}$. Mientras que a la fracción $p/\rho g$ se le conoce como la altura de presión. Por tanto, la altura hidráulica es la altura de presión más la altura de elevación. Esto es válido solamente si la densidad del fluido es constante en reposo. Si no lo fuese, las expresiones (8.6) y (8.7) no se cumplen y debería emplearse, para el eje z, la expresión:

$$p = -\int_{z_0}^{z} \rho g dz \quad [\text{Pa}] \tag{8.8}$$

Lo habitual es considerar la densidad ρ constante.

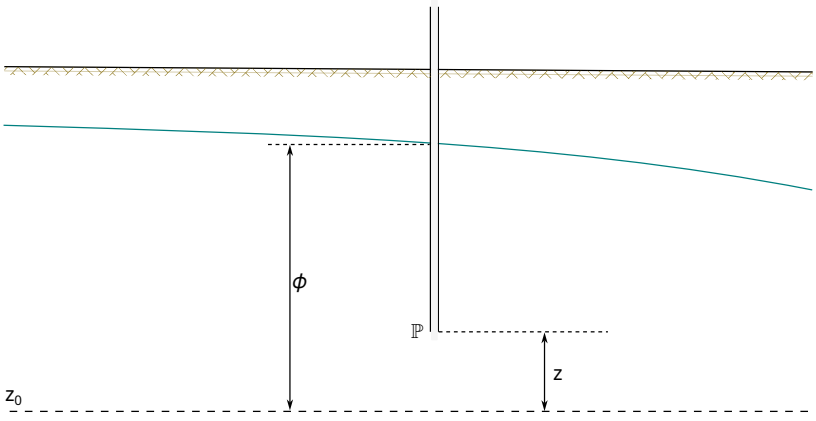


Figura 8.9: Definición de altura hidráulica o piezométrica. Fuente: [75] Adaptado.

En el experimento mostrado en la Figura 8.10, *Darcy* vertía agua en el depósito I, y el flujo de agua atravesaba un cilindro de arena, situado entre 1 y 2, y cuya área transversal es A, hasta llegar al depósito II.

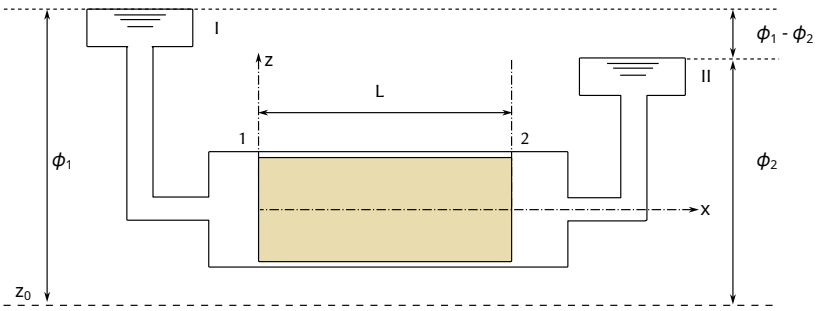


Figura 8.10: *Darcy* descubrió con este experimento que el flujo de agua que atraviesa un cilindro de arena, cuya área transversal es A y con longitud L, aumenta linealmente con la diferencia de altura en los extremos I y II. Siendo la altura hidráulica en I igual a ϕ_1. Del mismo modo, la altura en el extremo II es ϕ_2. Mientras que ambos extremos están conectados hidráulicamente a través de la arena. Fuente: [75] Adaptado.

Ley de *Darcy* original

La ley de *Darcy* es una relación empírica del flujo de *Darcy* q expresada en términos de alturas hidráulicas. La forma original de esta ley solo es aplicable al flujo rectilíneo de un líquido homogéneo, como el mostrado en el experimento de la Figura 8.10.

$$Q = kA\frac{(\phi_1 - \phi_2)}{L} \quad [\mathrm{m}^3/\mathrm{s}] \tag{8.9}$$

Simplificando mediante la aplicación de la ecuación (8.2) se tiene:

$$q = k\frac{(\phi_1 - \phi_2)}{L} \quad [\mathrm{m}/\mathrm{s}] \tag{8.10}$$

k es una constante de proporcionalidad y se conoce como conductividad hidráulica. En ocasiones se emplea el término inverso $1/k$ denominándolo "resistencia al flujo".

Considerando el eje de coordenadas x, según la longitud del cilindro de arena del experimento de la Figura 8.10, y tomando varias medidas de la altura hidráulica a lo largo de dicho eje, varía linealmente a lo largo de la muestra y se puede obtener la expresión:

$$\phi = \phi_1 + \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{L}x \quad [\mathrm{m}] \tag{8.11}$$

Esta ecuación representa una recta, por lo que:

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{L} \tag{8.12}$$

A (8.12) se le conoce también como gradiente hidráulico, para el eje x. Sustituyéndolo en la ecuación (8.10) se tiene que:

$$q_x = -k\frac{d\phi}{dx} \quad [\mathrm{m}/\mathrm{s}] \tag{8.13}$$

Como se ha visto, denominamos a la constante k, que aparece en la ley de *Darcy*, como conductividad hidráulica. Su valor depende tanto del fluido como del suelo. Pero es posible definir otra constante, la permeabilidad intrínseca $\hat{k}$, que depende únicamente de las propiedades del suelo y está relacionada con la conductividad hidráulica de la siguiente manera:

$$k = \frac{\hat{k}\rho g}{\mu} \quad [\mathrm{m}/\mathrm{s}] \tag{8.14}$$

Donde μ es la viscosidad dinámica. $\hat{k}$ se utiliza principalmente cuando la densidad o la viscosidad del fluido cambian con la posición. Se muestran los rangos de la conductividad hidráulica k y la permeabilidad intrínseca $\hat{k}$ para algunos materiales naturales en la Tabla 8.1.

La aplicación de la ley de *Darcy* está limitada a caudales específicos inferiores a un valor crítico. Para evaluarlo, se emplea el número de *Reynolds* *Re*, que se define para un flujo de agua subterránea como:

$$Re = \frac{D\rho}{\mu}q \tag{8.15}$$

Siendo D el diámetro medio de los granos. Experimentalmente, se ha observado que la ley de *Darcy* es aplicable para valores de Re menores o iguales a la unidad, que es el caso en la mayoría de las ocasiones [75]:

$$Re \leq 1 \tag{8.16}$$

En la práctica, el flujo rara vez es rectilíneo. Por tanto, la ecuación (8.13) no suele ser adecuada para resolver problemas reales. Debe establecerse una relación entre el vector de flujo de *Darcy* y el gradiente hidráulico. Así, el vector de flujo de *Darcy* tiene tres componentes en un sistema cartesiano.

Permeabilidades para algunos suelos naturales		
Material	k [m/s]	$\hat{k}$ [m^2]
Arcillas	$< 10^{-9}$	$< 10^{-17}$
Arcillas arenosas	10^{-9} a 10^{-8}	10^{-16} a 10^{-15}
Turba	10^{-9} a 10^{-7}	10^{-16} a 10^{-14}
Limo	10^{-8} a 10^{-7}	10^{-15} a 10^{-14}
Arenas muy finas	10^{-6} a 10^{-5}	10^{-13} a 10^{-12}
Arenas finas	10^{-5} a 10^{-4}	10^{-12} a 10^{-11}
Arenas gruesas	10^{-4} a 10^{-3}	10^{-11} a 10^{-10}
Arenas con grava	10^{-3} a 10^{-2}	10^{-10} a 10^{-9}
Gravas	$> 10^{-2}$	$> 10^{-9}$

Tabla 8.1: Rangos de la conductividad hidráulica k y la permeabilidad intrínseca $\hat{k}$ para algunos materiales naturales. Fuente: [75].

La ley de *Darcy* generalizada

Si se generaliza la Ley de *Darcy* para cualquier dirección, en lugar de para el eje x, se puede expresar como:

$$q_i = -k\frac{\partial \phi}{\partial i} \tag{8.17}$$

Siendo i cada una de las componentes cartesianas $\{x, y, z\}$. Por tanto, la expresión (8.17) hace referencia a tres ecuaciones según los tres ejes cartesianos.

Hasta este punto, se ha supuesto un terreno isótropo cuyas propiedades son iguales en cualquier dirección, como el caso del banco de arena del experimento de la Figura 8.10. Pero en la práctica, la conductividad hidráulica k no es la misma en todas las direcciones, puesto que el suelo suele estar estratificado. El problema consiste en emplear un tensor de conductividad hidráulica simétrico, de nueve componentes k_{ij}. Al ser simétrico, solamente seis componentes son diferentes entre sí, y el tensor queda expresado de la siguiente forma:

$$k = (k_{ij}) = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{xy} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{xz} & k_{yz} & k_{zz} \end{pmatrix} \tag{8.18}$$

Por tanto, si el suelo no es isótropo, la ley de *Darcy* se expresa de la siguiente forma, considerando la simetría del tensor:

$$
\begin{aligned}
q_x &= -k_{xx}\frac{\partial\phi}{\partial x} - k_{xy}\frac{\partial\phi}{\partial y} - k_{xz}\frac{\partial\phi}{\partial z} \\
q_y &= -k_{xy}\frac{\partial\phi}{\partial x} - k_{yy}\frac{\partial\phi}{\partial y} - k_{yz}\frac{\partial\phi}{\partial z} \\
q_z &= -k_{xz}\frac{\partial\phi}{\partial x} - k_{yz}\frac{\partial\phi}{\partial y} - k_{zz}\frac{\partial\phi}{\partial z}
\end{aligned}
\tag{8.19}
$$

Con frecuencia, la consolidación de los suelos se produce principalmente en dirección vertical, siendo la conductividad hidráulica menor en esta dirección y constante en los dos ejes horizontales. Por lo tanto, se podría simplificar considerando que k_{zz} es muy inferior y que el resto de las componentes del tensor tiene un valor igual a k. Quedando las ecuaciones de la ley de *Darcy* reducidas a:

$$
\begin{aligned}
q_x &= -k\frac{\partial\phi}{\partial x} \\
q_y &= -k\frac{\partial\phi}{\partial y} \\
q_z &= -k_{zz}\frac{\partial\phi}{\partial z}
\end{aligned}
\tag{8.20}
$$

Consideremos de nuevo un medio isótropo. Se requiere, al menos, una cuarta ecuación para describir completamente el flujo de agua subterránea y poder calcular, también, la altura hidráulica ϕ. Para estudiar esto, se emplea el concepto de divergencia, considerando un cubo diferencial de material poroso, que se aplica al vector flujo de *Darcy* $\overline{q} = (q_x, q_y, q_z)$ en este caso.

Si el fluido está en estado estacionario, la divergencia vale 0. También lo será si tanto el fluido como el medio poroso son incompresibles, aunque el fluido esté en régimen transitorio. En hidráulica se considera que el agua es incomprensible, al igual que los líquidos en general [72], aunque no es así en hidrogeología.

$$
\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = \nabla \cdot \overline{q} = 0 \tag{8.21}
$$

Si se introducen las ecuaciones q_x, q_y e q_z de la expresión (8.17) en la ecuación (8.21) se tiene que:

$$
\frac{\partial}{\partial x}\left[k\frac{\partial\phi}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[k\frac{\partial\phi}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[k\frac{\partial\phi}{\partial z}\right] = 0 \tag{8.22}
$$

Al ser el medio poroso isótropo, k es constante y, por tanto:

$$
\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \tag{8.23}
$$

Calculando la ecuación diferencial (8.23), con sus condiciones de contorno, el problema queda resuelto. Al ser una ecuación en derivadas parciales, solo existen algunos casos en los que el problema se puede resolver analíticamente. En la práctica, muchos problemas de flujo de agua subterránea son bidimensionales o pueden aproximarse mediante un análisis bidimensional.

8.3.2 Almacenamiento hídrico

Con respecto al almacenamiento, en régimen transitorio, en un acuífero, el problema se complica porque se presenta una simultaneidad entre dos problemas diferentes: el flujo de agua dentro del acuífero y el comportamiento mecánico de la estructura granular del terreno poroso. Supongamos que un pozo de agua está en reposo. Si la bomba del pozo se pone en funcionamiento, se produce una modificación en la curva de abatimiento del pozo y las presiones en el sistema cambian gradualmente hasta que, a efectos prácticos, se alcanzan condiciones de estado estacionario.

En un acuífero confinado, los efectos transitorios son causados por la compresión de la estructura porosa como resultado de la disminución de las presiones. Si tanto el terreno poroso del acuífero como el agua subterránea fueran totalmente incompresibles, se alcanzarían condiciones de estado estacionario instantáneamente [75]. La recarga de un acuífero debido a la lluvia también hace que el sistema funcione en régimen transitorio, hasta un tiempo después de que cese la lluvia.

Biot formuló matemáticamente el problema del flujo de agua transitorio, aproximando el esqueleto granular del material poroso como un material linealmente elástico [75, 76]. Afortunadamente, los cambios de presión debidos al flujo de agua subterránea suelen ser pequeños en comparación con las tensiones de sobrecarga en el esqueleto granular, lo que permite realizar simplificaciones importantes [75].

Para estudiar estos sistemas, nos valemos de dos conceptos importantes: la transmisividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento de un acuífero.

Transmisividad hidráulica

La transmisividad hidráulica T es el producto de la conductividad hidráulica k por la potencia, o espesor, D del acuífero saturado:

$$T = kD \quad [\mathrm{m}^2/\mathrm{s}] \tag{8.24}$$

De forma que el valor de la transmisividad, para un mismo acuífero, varía en función de la potencia del terreno saturado en cada momento. Así, en un acuífero abierto, la transmisividad variará a lo largo del año hidrológico, porque lo hace también el nivel freático.

Debido a la diferencia en la transmisividad entre diversas tipologías de acuíferos, es necesario establecer el concepto de coeficiente de almacenamiento, que nos permitirá conocer el volumen de agua almacenada tanto en acuíferos confinados como en abiertos.

Coeficiente de almacenamiento especifico

El coeficiente de almacenamiento específico se define como el volumen de agua capaz de ser intercambiado por $1\,m^3$ de acuífero , si se produce una variación de 1 m de la altura piezométrica ϕ.

$$S_s = \rho g(m_v + n\beta) \quad [m^{-1}] \tag{8.25}$$

Siendo m_v el coeficiente de compresibilidad volumétrica del suelo y n su porosidad. β es el módulo de compresibilidad del agua. Posee un valor de $45.8 \times 10^{-10}\,Pa^{-1}$, a una temperatura de 20 °C.

El rango de m_v va de $10^{-7}\,Pa^{-1}$ a $10^{-10}\,Pa^{-1}$, que corresponden a los valores de la arcilla y la roca, respectivamente. A modo de referencia, la arena posee un m_v de alrededor de $10^{-8}\,Pa^{-1}$ [75].

Una vez establecidos los parámetros hidráulicos del terreno y considerando la ecuación generalizada de *Darcy*, se define la ecuación del flujo que unifica los conceptos anteriores para estudiar el movimiento de las corrientes de agua subterránea:

Ecuación fundamental del flujo

Esta ecuación permite describir, de manera simplificada, el flujo de agua subterránea, para una dirección cualquiera, en régimen transitorio no confinado. Donde N representa el flujo de agua procedente de la infiltración de la lluvia y $\Phi = T\phi$. Considerando el balance de flujo de agua que entra y sale en un cubo de acuífero, de forma que si entra más agua de la que sale, parte de ella se almacena en el acuífero.

$$\nabla^2\Phi = \frac{S_s}{k}\frac{\partial\Phi}{\partial t} - N \tag{8.26}$$

Si no hay lluvia, coincide con la ecuación de flujo en acuíferos confinados [75]. Este tipo de ecuaciones se suele solucionar empleando métodos numéricos. Junto con las medidas tomadas en los pozos piezométricos instalados en una zona, permiten modelar el comportamiento del agua subterránea en la zona.

Cuando se emplean pozos geotérmicos abiertos con pozos de extracción y de inyección, se produce un intercambio de materia y energía con el acuífero. Por un lado, se intercambia agua entre dos zonas del acuífero. Por otro lado, el agua que se inyecta está a una temperatura diferente de la que se encuentra alrededor del pozo de inyección. El agua inyectada se comporta como si se tratara de un contaminante; sin embargo, en lugar de considerar la concentración de un contaminante, se considera la variación de temperatura con respecto al acuífero. Esto supone que, en ocasiones, la temperatura estará por encima y, en otras, por debajo.

Para describir el modelo de movimiento de fluido, se emplea la ecuación fundamental del flujo. Y para saber la distribución de temperaturas, se emplean modelos matemáticos ideados para el estudio de los contaminantes. En ambos problemas se emplean programas de resolución por métodos numéricos, puesto que no es viable encontrar una solución analítica.

El flujo de calor, ya sea positivo o negativo, se mueve a una velocidad menor que el flujo de agua. Normalmente, es aproximadamente un 50% menor que la velocidad del agua. El principal motivo es que parte del flujo de calor se transfiere al terreno poroso del acuífero [75].

El agua inyectada tiende a fluir en dirección al pozo de extracción debido al gradiente hidráulico creado por la extracción y la inyección simultáneas. Si se conoce el comportamiento del fluido y del calor, se puede dimensionar el sistema de sondeos. El objetivo es, si es posible, evitar que un flujo de calor entre en contacto con el otro. Si no es posible, se busca que el sistema funcione durante un lapso suficientemente largo para que la inversión sea rentable y tenga una vida útil suficientemente amplia, normalmente períodos iguales o superiores a 50 años.

Cada caso es diferente, y el estudio previo, los ensayos, las simulaciones y la experiencia previa son elementos críticos para la redacción y ejecución del proyecto.

Otro factor importante a tener en cuenta es la presión de inyección. Que varía con la profundidad. Si esta es excesiva, se puede producir una rotura hidráulica del terreno, con el consiguiente daño al acuífero. La presión de inyección se ve afectada por la presión hidrostática de la cota de inyección y también por la profundidad de ese punto. Existe una regla empírica aproximada que indica que, para producir la rotura hidráulica del terreno, se necesita aplicar una presión neta en superficie de 1 bar por cada metro de profundidad. A modo de ejemplo, y suponiendo una presión hidrostática de 5 bar a 100 m de profundidad, la presión superior límite sería de 105 bar. Por tanto, la presión de inyección debería estar muy por debajo de este valor, en función del coeficiente de seguridad que se desee y de la existencia de fracturas previas en el acuífero.

8.3.3 Sistemas ORGS

En los sistemas geotérmicos abiertos de recirculación ORGS, el agua sale del pozo de extracción y, una vez que ha pasado por el intercambiador de calor en la superficie, se inyecta de nuevo al acuífero, como se muestra en la Figura 8.11.

Por lo tanto, en los sistemas ORGS, siempre se extrae agua a la temperatura a la que se encuentra el acuífero en ese punto y se reinyecta a una temperatura mayor o menor. En modo calefacción, el caudal de agua hacia el pozo de inyección será más frío. Mientras que, si funciona en modo de refrigeración, el agua inyectada será más caliente.

Esto hace que la zona del pozo de reinyección se caliente en verano y se enfríe en invierno. Para que el sistema sea sostenible, es necesario controlar el balance energético anual. Lo ideal es que dicho balance sea lo más cercano a cero posible.

Otro factor importante es el salto térmico máximo permitido por la legislación. Varía mucho en función de la legislación de cada país. En España, la tendencia de los últimos años es un salto térmico de 5 °C.

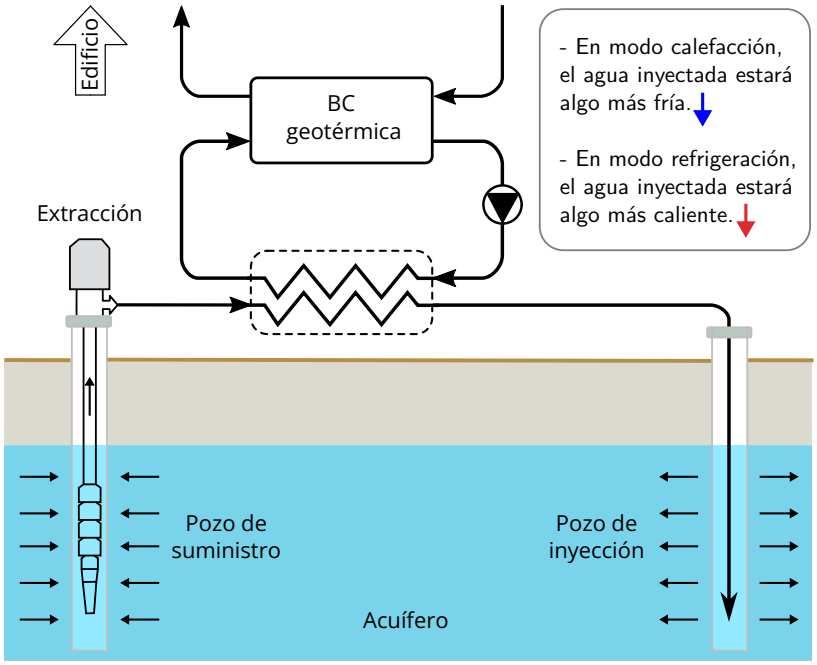


Figura 8.11: Esquema de sistema geotérmico de muy baja temperatura abierto ORGS. En este sistema el agua proviene siempre del pozo de suministro, manteniendo así constante su temperatura. El agua se inyecta a diferentes temperaturas, dependiendo del modo de funcionamiento de la BC, en el pozo de inyección. Ambos pozos están presurizados. Fuente: los autores.

8.3.4 Sistemas ATES

En los sistemas de almacenamiento térmico en el acuífero ATES, los pozos son bidireccionales, pudiendo elegir si se inyecta o se extrae. Por tanto, se elige un pozo "caliente" y otro "frío", de donde se extrae o inyecta agua de manera diferenciada.

De esta forma, el sentido del bombeo dependerá de la estación y del modo de funcionamiento de la bomba de calor. Así, en invierno, con un funcionamiento en modo calefacción, el flujo de agua irá desde el pozo caliente al frío, Figura 8.12. En verano, en modo refrigeración, el flujo de agua se invertirá, extrayendo agua del pozo frío y reinyectándola en el pozo caliente, Figura 8.13.

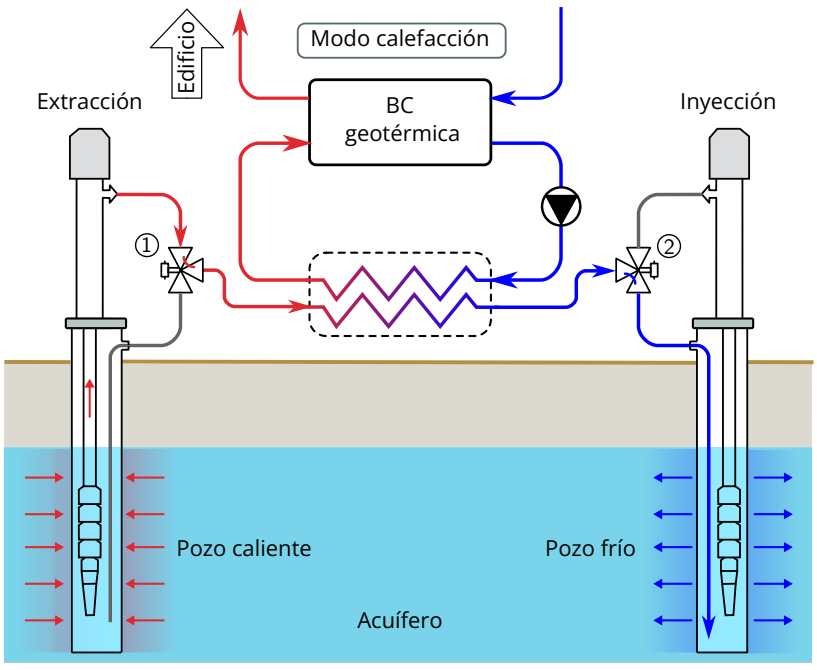


Figura 8.12: Esquema de sistema geotérmico de muy baja temperatura abierto ATES funcionando en modo calefacción mediante una bomba geotérmica. Cambiando el esquema, se podrían usarse más elementos como enfriadoras o calderas, simultáneamente. Esto optimizaría su funcionamiento, al emplear el foco caliente y frio simultáneamente. En este caso las válvulas de tres vías (1) y (2) y las bombas de extracción controlan el sentido del agua subterránea. Fuente: los autores.

El resultado final es que el agua que rodea el pozo caliente está por encima de la temperatura media del acuífero, y la que rodea el pozo frío está por debajo de la temperatura media del acuífero. De forma que se utilizan los pozos como almacenes de agua fría y caliente por separado.

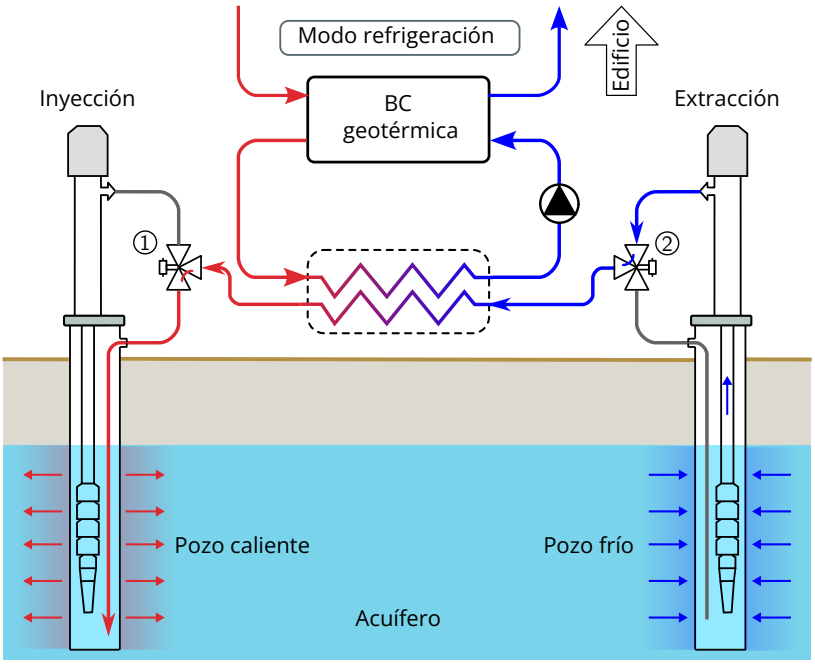


Figura 8.13: Esquema de sistema geotérmico de muy baja temperatura abierto ATES funcionando en modo refrigeración mediante una bomba geotérmica. Cambiando el esquema, se podrían usarse más elementos como enfriadoras o calderas, simultáneamente. Esto optimizaría su funcionamiento, al emplear el foco caliente y frio simultáneamente. En este caso las válvulas de tres vías (1) y (2) y las bombas de extracción controlan el sentido del agua subterránea. Fuente: los autores.

El rendimiento de estos sistemas depende mucho de la temperatura máxima de almacenamiento. Siendo mayor para temperaturas de hasta 25 °C con unos valores entre 70 % a 90 %, mientras que si se almacena agua caliente a 90 °C, el rendimiento estacional será de entre 50 % a 70 % [73].

Una ventaja de estos sistemas es que, a medida que aumenta el salto térmico entre ambos pozos, el rendimiento final del sistema también aumenta. Por otra parte, poder usar simultáneamente un pozo frío y uno caliente para almacenamiento de energía térmica optimiza el proceso y permite el empleo de varias tecnologías al unísono, de manera que en ocasiones se pueda usar el agua caliente o fría, directamente sin el concurso de una bomba de calor o una enfriadora, pudiendo obtenerse COPs por encima de 10 o 20, en determinadas condiciones. Mientras que un sistema con bomba de calor geotérmica convencional puede obtener un COP de entre 5 y 6 [73].

La posibilidad de almacenar calor y frío simultáneamente solo es factible si la naturaleza del acuífero lo permite, con una dispersión térmica de los pozos pequeña, y si la instalación tiene la envergadura suficiente para que la diferenciación térmica sea aprovechable [73].

El factor medioambiental también es crítico, y se debe obtener permiso de la administración. A modo de ejemplo, sería más probable una autorización en el caso de un acuífero de agua salobre, a una profundidad media, sin ningún interés medioambiental, que en el caso de un acuífero superficial de agua dulce, cerca de la superficie. En todo caso, es de vital importancia el estudio de la viabilidad económico-ambiental en colaboración con los técnicos de la Administración.

8.4 Intercambiadores verticales cerrados

Figura 8.14: Colocación de un intercambiador helicoidal en un sondeo vertical. Fuente: *Dominguez-energie*.

A diferencia de los sistemas abiertos que se han visto en el Apartado 8.3, en los sistemas cerrados no se entra en contacto con el agua subterránea existente. De hecho, no es necesario, en absoluto, que exista agua subterránea para funcionar. Se emplean intercambiadores formados por tuberías por las que circula un refrigerante secundario o *brine*. Las conducciones embebidas en su interior, por las que circula el refrigerante secundario, suelen denominarse "sondas o intercambiadores geotérmicos".

Los intercambiadores verticales son los más empleados, sobre todo en Europa, dada la escasez de espacio disponible. La profundidad de los sondeos suele ser de entre 10 m a 250 m y presentan diámetros de perforación de 100 mm a 160 mm. Estos valores son muy dependientes de la tecnología de intercambio que se emplea. Siendo muy diferente la instalación vertical de intercambiadores *Slinky*, como la mostrada en la Figura 8.14, que sondeos para un sistema abierto en la costa, que emplea el agua de mar como vector de intercambio geotérmico.

Por regla general, en un presupuesto de geotermia superficial, el coste de las partidas de perforación suele situarse en una horquilla de entre el 30 % a 60 % del coste total del proyecto.

8.4.1 Construcción del sondeo

Aunque existen diferentes modelos de intercambiadores verticales en bucle cerrado, el procedimiento para construir el sondeo e instalarlos en su interior es el mismo. Ahora bien, existe una serie de buenas prácticas que es recomendable seguir para un funcionamiento óptimo y para evitar posibles problemas y un deterioro prematuro de la instalación.

Cada país de la UE suele tener su propia normalización sobre casi todo, siendo muchas de ellas transposiciones directas de otras. En caso de no existir o no contar con la transposición de otra norma, se suele emplear una norma de referencia, como es el caso de la norma alemana VDI 4640 [44].

En la actualidad, en el caso de España, existen dos normas de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) referidas a los sondeos geotérmicos verticales.

- UNE 100715-1:2014: Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Parte 1: Sistemas de circuito cerrado vertical [77]. Hace referencia al diseño, ejecución y seguimiento de instalaciones geotérmicas someras verticales de bucle cerrado.

- UNE-EN ISO 17628:2017: Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos geotérmicos. Determinación de la conductividad térmica de suelos y rocas utilizando una sonda geotérmica instalada en un sondeo.[78]. Hace referencia a los ensayos geotérmicos para determinar la conductividad térmica del terreno. Es una transposición idéntica de las normas: EN ISO 17628:2015 e ISO 17628:2015.

El proceso de construcción consta de una serie de fases sucesivas. Si se dispone de maquinaria, número de sondeos y espacio suficiente, los trabajos se pueden optimizar aprovechando los tiempos de espera, como el fraguado del mortero termoconductor.

Las fases para construir un sondeo geotérmico vertical, Figura 8.15, son las siguientes:

I - Perforación del sondeo.

II - Llenado del sondeo con agua, si no está vacío. Si está lleno de lodo de perforación, se aprovecha dicho lodo.

III - Instalación de llaves de bola y de un manómetro en cada par de tuberías del intercambiador.

IV - Llenado del intercambiador de refrigerante secundario mientras el intercambiador está enrollado en un carrete metálico, horizontal o vertical.

V - Si se usan intercambiadores en doble U, se procede a su ensamblado por la zona de la punta.

VI - Se instala el contrapeso en el intercambiador, previamente calculado.

VII - Se procede a la colocación del intercambiador dentro del sondeo manualmente o con ayuda mecánica.

VIII - Se procede al primer test de estanqueidad, con el intercambiador en su posición final dentro del sondeo.

IX - Una vez superado el test, se coloca una cánula que llega hasta el fondo del sondeo y se procede al cementado desde el fondo del sondeo a través de ella.

X - Una vez lleno, se espera hasta su fraguado, según las instrucciones del fabricante del mortero termoconductor. Alrededor de 8 h.

XI - Se rellena el hueco formado en la parte superior del sondeo debido a la retracción con mortero fresco.

XII - Se procede a la segunda prueba de presión.

XIII - Se coloca la protección de la cabecera.

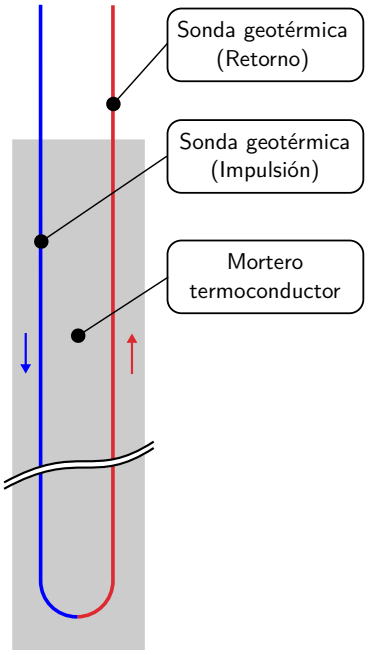


Figura 8.15: Esquema de pozo geotérmico con intercambiador vertical en simple U embebido en mortero termoconductor. Fuente: los autores.

Es indistinto el método de perforación empleado, pero es necesario mantener el sondeo inundado una vez finalizada la perforación. El motivo es que las tuberías del intercambiador se introducirán en el sondeo llenas de líquido y presurizadas. Las tuberías están arrolladas en un tambor que permite el giro para su colocación; sin embargo, al introducirse en el sondeo de manera vertical, aumenta la presión hidrostática en su interior.

Considerando que la presión nominal máxima de trabajo en este tipo de tuberías ronda los 16 bar, en el peor de los casos, la tubería podría reventar al llegar al fondo del sondeo. En el mejor de los casos, dificultaría el ensayo de estanqueidad y podría deformar la tubería de manera permanente. Por tanto, es necesario que el sondeo esté inundado para compensar la presión hidrostática en el interior de la tubería. Se tendría el mismo problema si se introduce la tubería vacía dentro del sondeo inundado, aplastando la tubería por la presión hidrostática externa. Por tanto,

siempre se deben introducir las tuberías llenas de líquido, con las llaves de bola cerradas en sus extremos, en el interior de un sondeo inundado.

El líquido recomendado para rellenar las tuberías es el mismo que se va a emplear en la instalación definitiva. De esta forma, se evitan problemas de contaminación o dilución si se emplea otro líquido, como el agua, por ejemplo. Además, los refrigerantes secundarios suelen ser más viscosos que el agua, por lo que el ensayo de estanqueidad no se realizaría en condiciones reales.

Los intercambiadores más usados son del tipo U. Se suele recomendar el empleo de intercambiadores del tipo doble U, puesto que, según *Yavuzturk* y *Chiasson*, se observa una mejora del 22% cuando se utilizan tubos en doble U en lugar de tubos en U simple [41]. El rendimiento no puede ser mayor debido a la interferencia térmica entre tuberías. Aun así, esta mejora permite, a igual profundidad, disponer de un margen de seguridad en el dimensionado de los intercambiadores de calor.

Por otra parte, en caso de rotura de una tubería, siempre se dispone de la otra, lo que permite seguir usando el pozo de intercambio, aunque con un menor rendimiento.

Los intercambiadores en doble U vienen de fábrica con la posibilidad de ser ensamblados, aprovechando un refuerzo en la punta que permite encajar uno en otro perpendicularmente, empleando para ello un pasador metálico que los mantiene unidos. Se puede aprovechar también para sujetar el contrapeso, ya sea en doble U o en U simple.

Estos intercambiadores están fabricados en material plástico y, por tanto, tienen una densidad menor que el lodo de perforación o el refrigerante secundario. Esto hace que, cuando se introduce en el sondeo, por el principio de *Arquímedes*, flote al llegar a la profundidad de equilibrio entre el peso propio y el empuje del fluido desalojado por la sonda. Para contrarrestar el empuje, se calcula un contrapeso adosado a la parte inferior del sondeo. Para calcularlo, se emplean las dimensiones de las tuberías, su densidad, facilitada en la ficha técnica del intercambiador, y la densidad del lodo de perforación, que puede determinarse *in situ*.

De no emplear el contrapeso adecuado, no se podrá introducir la sonda en su totalidad, desperdiciando parcialmente el sondeo. Para las personas con poca experiencia, este problema podría confundirse fácilmente con un derrumbe parcial del sondeo en profundidad, lo que llevaría a un intento de reperforación del sondeo, con la consiguiente pérdida de tiempo y recursos.

La colocación de la sonda en el interior del sondeo puede realizarse de manera manual o mecánica, pero es vital proteger la sonda del emboquillado del sondeo, que suele estar reforzado con un tubo de acero.

A modo de ejemplo, un arañazo con una profundidad del 10% del grosor en una tubería de HDPE o más dejaría inservible la sonda a medio plazo, debido a los ciclos térmicos de la tubería. El método de protección puede ser algo tan simple como el forrado de la emboquilladura del sondeo o el empleo de un embudo de plástico para introducir la sonda en el pozo.

Con el primer test de estanqueidad, se comprueba que la sonda está en buen estado. Para ello, se aplica una presión de 6 bar mediante una bomba sobre cada par de tuberías, durante un periodo de media hora, en el que

no debe producirse una caída de presión por encima de 1 bar. Si no se pasa esta prueba, la sonda se retira y se coloca otra en su lugar, repitiendo el proceso. Esto evita tener que repetir la perforación y el cementado del sondeo.

El proceso de cementado se realiza empleando una cánula o tubería fina de plástico que se utilizará para bombear mortero desde el fondo del sondeo. Se suele emplear una bomba de tornillo que se alimenta a través de una tolva superior. Estas bombas permiten una presión máxima de 30 bar, aunque en ocasiones también se utilizan bombas de pistón que permiten presiones máximas de 100 bar. Realmente, la presión necesaria no es tan elevada y su uso suele ser circunstancial. Se bombea lentamente para que el sondeo se rellene completamente, cubriendo perfectamente las tuberías de intercambio térmico. Los restos de lodos y detritus de perforación que puedan quedar flotando sobre la superficie del mortero, a medida que este sube a través del pozo, son expulsados por la boca del sondeo hasta que ha sido completamente sellada.

Hay que tener en cuenta el tiempo que se va a tardar en cementar por dos motivos: evitar que el mortero empiece a fraguar antes de que finalice el proceso y tener tiempo suficiente para preparar el mortero necesario para el cementado, a medida que se va cementando. El cementado es un proceso continuo que no puede ser pausado.

Una vez terminado el proceso de cementado, se deja endurecer entre 6 h a 8 h. Momento en el que se observa que el mortero es duro al tacto. Si bien no ha alcanzado la dureza máxima, todavía posee cierta plasticidad residual. También se observa que el mortero ha sufrido una retracción y que el mortero que lo llenaba ha bajado de cota, entre 1 m a 2 m.

Durante la perforación, el terreno sufre una descompresión y un esponjamiento de las paredes del sondeo. Parte de este esponjado se mitiga por la presión hidrostática del mortero de perforación. Al sustituir el lodo de perforación por mortero termoconductivo, la presión hidrostática aumenta aproximadamente un 250%, lo que comprime más las paredes del sondeo, aumentando ligeramente su diámetro y su volumen. Debido a la velocidad a la que se producen estos procesos, para cuando el mortero se ha endurecido lo suficiente, se ha producido una contracción longitudinal de la columna de mortero que se aprecia en la parte superior. En este momento, se rellena el hueco que ha quedado con mortero fresco y se pasa a la siguiente fase.

La retracción del mortero es muy variable y depende del grado de rigidez del terreno perforado y de la velocidad del cementado. Siendo abundante en terrenos detríticos y prácticamente inexistente en rocas resistentes y compactas.

El objetivo final de la segunda prueba de presión es conseguir una cierta holgura entre el mortero y las tuberías del intercambiador. Para ello, se procede a aplicar presión, nuevamente, a las tuberías de intercambio, logrando que se expandan y aumentando su diámetro unas décimas de milímetro. Esta expansión deforma el mortero que todavía conserva algo de plasticidad. Una vez finalizada la prueba de presión, la tubería recupera su forma original. Normalmente, se sigue el esquema contenido en la Norma UNE-EN 805 [79].

El proceso, resumido y adaptado, es el siguiente:

A - Se mantienen los tubos en reposo, sin carga en cabecera, durante un mínimo de 1 h. Aunque en este caso se ha establecido 6 h a 8 h una vez finalizado el relleno.

B - Se lleva la sonda a la presión de prueba de 12 ± 1 bar a lo largo de 10 min.

C - Se mantiene una presión de, como mínimo, 10 bar durante un tiempo de 10 min.

D - Durante 60 min más, la caída de presión máxima será del 30%.

E - Se reduce la presión rápidamente, como mínimo en un bar, mediante purgado de líquido. Se mide la cantidad evacuada y se anota el nuevo valor de la presión.

F - Durante los siguientes 30 min se mide la presión a los 10 min, 20 min y a los 30 min. Si la caída de presión máxima es de 0.1 bar durante este período, se continúa con la prueba.

G - Por último, después de un tiempo adicional de 90 min, la caída de presión debe ser inferior a 0.1 bar.

8.4.2 Mortero termoconductor

Habitualmente, se emplea mortero termoconductor para sellar las sondas de intercambio geotérmico al terreno que las rodea. Por un lado, facilita el sellado de los acuíferos y de las otras capas atravesadas por el sondeo, evitando conexiones hidráulicas entre ellas y la posible contaminación.

Por otra parte, se mejora el área de contacto para la transferencia de calor, ya que el aire es un buen aislante con una conductividad térmica aproximada de 0.024 W/mK, a temperatura ambiente. En muchas aplicaciones escandinavas, los tubos en U se instalan en sondeos perforaciones en la roca que están llenas de agua subterránea procedente de fracturas en la roca [41]. Dada la demanda de calefacción en esas zonas, a los pocos años, el agua se congela, lo que produce una mejora en el sistema. Esto se debe a que la conductividad del hielo a 0 °C es de 2.2 W/mK, que es muy superior a la del agua líquida, cuyo valor es de aproximadamente 0.6 W/mK.

Los morteros que se suelen emplear para el sellado son de base cemento-bentonita. La bentonita mejora la impermeabilidad del mortero, haciendo que, en caso de rotura de la sonda, se eviten posibles filtraciones al terreno circundante. El cemento *Portland* aporta la resistencia mecánica necesaria. Es recomendable el empleo de cementos resistentes a sulfatos, sulfuros y cloruros. Esto permite su estabilidad química durante muchas décadas frente a la aparición de acuíferos de agua salobre o la presencia de yesos en el subsuelo.

Como árido se suele emplear arena silícea, con una curva granulométrica adecuada. La arena silícea pura permite mejorar la transmisividad térmica del mortero. Las empresas que elaboran sus propios morteros a pie de obra también suelen añadir polvo de grafito. El grafito posee una altísima conductividad térmica, pero su estructura laminar hace que la conductividad entre capas sea mucho menor. Por tanto, la distribución aleatoria de

las partículas en el seno del mortero es mucho menor. Presenta, además, problemas en la manipulación manual debido a que su baja densidad facilita su diseminación en el aire, produciendo potenciales problemas de seguridad y salud.

La tendencia actual es el consumo de morteros preparados, con el envasado tradicional en sacos de papel. Estos morteros, dosificados de manera semiautomática, contienen una serie de aditivos que mejoran el comportamiento del mortero. Entre ellos se encuentran los superplastificantes, que permiten que el mortero se autocompacte y no se necesite vibrado para eliminar las burbujas de aire atrapadas durante la preparación y el bombeo.

En todo caso, cada fabricante tiene su formulación y especificaciones que cumplen con las normas medioambientales, de seguridad y salud vigentes.

No es necesario emplear un mortero termoconductor con una conductividad superior a 2 W/mK, puesto que el terreno nunca presenta una conductividad tan elevada. La presencia de terrenos saturados mejora la conductividad del terreno, pero nunca por encima del valor citado.

Ahora bien, en caso de la presencia de una corriente de agua subterránea, el flujo de calor aumenta mucho más que la conductividad del terreno. El motivo es que el mecanismo de transferencia térmica pasa de conducción, según la Ley de *Fourier* (1.1), a convección, según la ley de enfriamiento de *Newton* (1.2).

En estos casos, se recomienda emplear grava silícea de rodadura en lugar de mortero termoconductor en el tramo en el que el sondeo atraviesa el acuífero.

Para mantener aisladas las zonas del mortero del acuífero, se emplean capas de bentonita como sello. En estos casos, el proceso de construcción del sondeo es el mismo que el expuesto en el Apartado 8.4.1, pero dividido en fases en las etapas IX y X, tal como se explica en el siguiente ejemplo:

A modo de ejemplo genérico, supongamos que, en el transcurso de la construcción de un BHE en bucle cerrado, aparece un acuífero por el que circula un flujo de agua. En este caso, es preciso determinar perfectamente cuál es el techo y el muro del acuífero. En el momento de la cementación (IX) se procede por fases:

A - Se comienza con el cementado desde el fondo hasta llegar al muro del acuífero. Lo más fácil es calcular el volumen de mortero necesario hasta llegar a esa cota, considerando el mortero sobrante en la cánula de la cimentación y los restos de la bomba de inyección de mortero.

B - Una vez que ha pasado el primer período de tiempo de fraguado, alrededor de 8 h, se comienza con el vertido desde la superficie de la empaquetadura de grava de rodadura hasta llegar al techo del acuífero. Nuevamente, la forma más sencilla de calcular esto es, nuevamente, por cubicación.

C - Se añade una capa adicional de *pellets* de bentonita, que llene el sondeo hasta llegar a una altura aproximada de, como mínimo, un metro de altura por encima de la empaquetadura de grava. Esta

bentonita se comportará como un sello estanco para evitar la contaminación del acuífero.

D - Se procede a terminar el llenado con mortero termoconductor hasta completar el sondeo. A partir de este punto se continúa con el procedimiento habitual, descrito en el Apartado 8.4.1.

Como consideraciones adicionales, tenemos:

- En caso de que el agua del acuífero sea estática, sin corriente de agua apreciable, no tiene sentido llevar a cabo esta variante en la construcción, puesto que el BHE se comportará en la zona del acuífero como si atravesase un terreno saturado en agua.

- Si, en efecto, existe una corriente de agua y se ha empleado lodo bentonítico o polimérico durante la perforación, es conveniente sustituirlo por agua limpia antes de proceder con el cementado. De esta manera, la superficie de captación del acuífero quedará totalmente libre para la circulación del agua. En caso necesario, se emplearán los reactivos necesarios para eliminar la costra en las paredes del acuífero.

- Dependiendo de las circunstancias, quizás sea necesario esterilizar la grava de la empaquetadura antes de introducirla en el sondeo. Incluso, de una desinfección del sondeo, llegados a este punto en la construcción.

- Dado que el intercambiador de plástico estará sin protección frente a filtraciones en caso de rotura del mismo, es imprescindible el empleo de refrigerantes secundarios no tóxicos, como disoluciones agua-propilenglicol.

- Si la primera capa de mortero empleado para el sellado del pozo no es demasiado gruesa se pueden emplear acelerantes del fraguado, para facilitar la ejecución de la obra. No obstante, es un aspecto que debe estudiarse muy bien. Si se calcula mal, se puede producir un atrapamiento de la tubería de intercambio antes de que se complete la fase de llenado. Este tapón actuaría como émbolo y el mortero fresco inyectado como fluido hidráulico que empuja el émbolo. El resultado es que el tapón de mortero, ya fraguado, arrancaría y expulsaría parcialmente la tubería de intercambio fuera del sondeo.

8.5 Sistemas de estructuras termoactivadas

En un proyecto de intercambio geotérmico de temperatura ambiente, en bucle cerrado, los intercambiadores se calculan para una demanda térmica concreta. Por tanto, la partida presupuestaria destinada a la construcción de estos intercambiadores forma parte del coste del proyecto e incluye la obra y la infraestructura. Ahora bien, en la construcción de edificios con grandes superficies de cimentación, en forma de losa, o empleo de pilotes, se pueden usar como elementos termoactivados simplemente embebiendo, junto con la armadura de la cimentación, los intercambiadores geotérmicos.

La diferencia estriba en que, en el caso de los edificios termoactivados, la filosofía es aprovechar lo que se pueda en lugar de partir de un dimensionado previo. De esta manera, se calculará qué energía térmica se puede aprovechar utilizando las infraestructuras existentes.

Cuanto mayor sea el edificio, mayor será la cantidad de energía que se podrá aprovechar. Además, en estos casos, el costo de la obra no se considera, puesto que los elementos estructurales deben acometerse en todos los casos. Por tanto, el único gasto es el de los elementos de intercambio, consistentes en tuberías de plástico que se sujetan a la estructura metálica de pilotes, cimentación y muros pantalla, en contacto con el terreno.

Una vez que la estructura ha sido hormigonada[6], las tuberías embebidas en ella permiten intercambiar flujos de calor directamente con el terreno que rodea el edificio.

6: La palabra "hormigón" viene del latín *formicare*, que hace referencia a "moldear" empleando un encofrado. En Iberoamérica se suele emplear el término "concreto", que es un anglicismo derivado de la palabra inglesa *concrete*, que a su vez proviene del latín *concretus*, que significa "agregado".

Las estructuras que normalmente se emplean son las losas de cimentación, los muros pantalla, los muros encofrados a una cara en contacto con el terreno y los pilotes de cimentación. Aunque existen algunos proyectos experimentales que emplean la propia estructura del edificio como elemento de almacenamiento térmico. En estos casos, los forjados entre plantas son más gruesos de lo normal para permitir una inercia térmica dentro del edificio.

La filosofía que se persigue es la optimización en el aprovechamiento térmico de los elementos estructurales disponibles, mediante el empleo de bombas de calor geotérmicas, normalmente como forma de suplementar el sistema de climatización preexistente en el edificio. La mayor inversión en este caso son las bombas de calor geotérmicas, puesto que se aprovecha una estructura constructiva ya presupuestada en el proyecto original.

8.6 Otros sistemas

En este Apartado se tratan el resto de los sistemas que emplean la inercia térmica de las aguas subterráneas; sin embargo, a diferencia de los sistemas abiertos, el agua no esta almacenada en acuíferos. Por supuesto, debe existir una cantidad de agua almacenada para poder ser aprovechada con este fin. Es el caso de los pozos de agua, agua de mina abandonada o agua de túneles inundados, entre otros. Se enumeran a continuación las habituales:

- **Pozos de agua**: Es una variante de los sistemas abiertos, pero empleando un pozo de una profundidad suficiente para evitar problemas de saltos térmicos elevados.

  En esta aplicación se coloca la tubería de captación en el fondo del pozo, Figura 8.16. El sondeo se rellena con grava que filtra el agua procedente de la BC y cuya salida esta en en la boca del pozo. Normalmente el sondeo presenta una profundidad de más de un centenar de metros y diámetros no superiores a 200 mm. Estas dimensiones evitan un daño en el ecosistema debido a cambios bruscos de temperatura. No obstante hay que recordar la legislación medioambiental de cada país y la necesidad geológica de contar con acuíferos con potencias superiores a los 100 m. Una alternativa

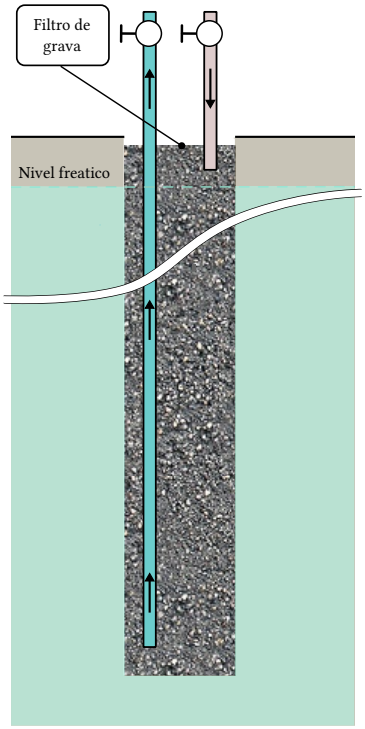


Figura 8.16: Pozo de agua relleno de grava usado como intercambiador térmico. Fuente: los autores.

para evitar problemas ambientales es transformar esta disposición en un intercambiador vertical en bucle cerrado, estándar, pero empleando grava en lugar de mortero termoconductor.

• **Agua de infraestructuras subterráneas**: En estos casos las temperatura del agua es constante todo el año, debido a la estabilidad térmica del subsuelo a partir de los 20 °C de profundidad. En función de las características de la obra subterránea y su profundidad la temperatura del agua variar de una instalación a otra. Siendo una temperatura más cálida a mayor profundidad.

Se aprovecha el agua drenada de instalaciones subterráneas en uso, como los túneles ferroviarios. En particular en países como Suiza, con grandes montañas y túneles muy largos a través de los Alpes, se recogen grandes caudales de agua procedentes de los drenes instalados a lo largo del recorrido. A modo de ejemplo se recogen 5400 l min en el túnel de *Furka* y 6700 l min en *Saint Gotthard*.

En general se recogen aguas subterráneas por toda Suiza con un rango de temperaturas de 16 °C a 30 °C útiles para su aprovechamiento mediante BC.

En las antiguas explotaciones mineras de interior, que actualmente están en desuso y que se han inundado, normalmente por estar situadas por debajo del nivel freático y haber cesado el sistema de bombeo del agua subterránea. En estos casos el agua que inunda las galerías y cavernas de la explotación proporciona grandes cantidades de agua con un gran potencial geotérmico.

Este tipo de fuentes geotérmicas, si bien no permiten obtener grandes cantidades de energía, si facilitan una ahorro energético importante en cuanto a gasto de calefacción en los edificios circundante.

9 Bombas de calor

9.1 Fundamentos de la bomba de calor

Comenzaremos por el concepto de motor térmico para después pasar al concepto de bomba de calor. Un motor térmico es un dispositivo termodinámico que se basa en la segunda ley de la termodinámica, también llamada ley de entropía o de las máquinas térmicas.

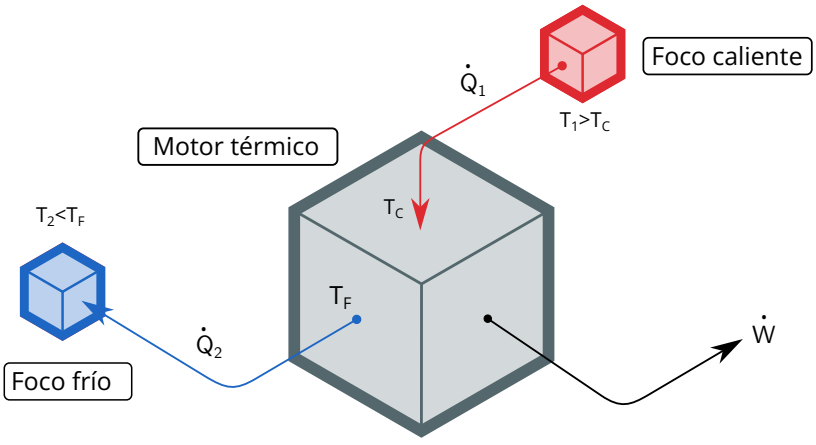
Según este principio, en un motor térmico no se puede convertir la totalidad del calor que se le suministra en trabajo. O dicho de otra manera, no puede existir un motor térmico con un rendimiento del 100%.

Por tanto, existe un foco caliente a una temperatura T_1, mayor que la del motor térmico T_C, y un foco frío a una temperatura T_2, menor que la del motor térmico T_F. El motor recibe un flujo de calor $\dot{Q}_1$ procedente del foco caliente y transforma parte de este en un flujo de trabajo $\dot{W}$. El resto del flujo de calor $\dot{Q}_2$ acaba en el foco frío, que actúa como sumidero energético, como se muestra en la Figura 9.1. Puesto que el calor siempre va desde el punto más caliente al punto más frío de cualquier sistema.

$$\dot{Q}_1 = \dot{W} + \dot{Q}_2 \quad [W] \tag{9.1}$$

Para calcular el flujo de trabajo, despejamos $\dot{W}$:

$$\dot{W} = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 \quad [W] \tag{9.2}$$



Cabecera: Bomba de calor para producción de ACS. Fuente: los autores.

Figura 9.1: Esquema conceptual de la acción de un motor térmico. Fuente: los autores.

9.1 Fundamentos 127
9.1.1 Ciclo teórico de una bomba de calor 129
9.1.2 Ciclo real de una bomba de calor 131
9.1.3 Diagramas de *Mollier* en las bombas de calor 132
9.1.4 Otros indices de rendimiento 133
9.1.5 Refrigerantes primarios . 134
9.2 Componentes de una bomba de calor 135
9.3 Bombas de calor geotérmicas 137
9.3.1 Refrigerantes secundarios 139

Y para calcular su rendimiento, en tanto por uno, dividiremos el flujo de trabajo entre la energía térmica aportada desde el foco caliente:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_1} = \frac{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} = 1 - \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} \tag{9.3}$$

Ahora bien, ¿qué ocurre si en el esquema de la Figura 9.1 invertimos los flujos de calor? La respuesta es que se obtendría una bomba de calor, tal y como se muestra en la Figura 9.2. En dicho esquema, se ha modificado la nomenclatura de los flujos de calor para evitar confusiones.

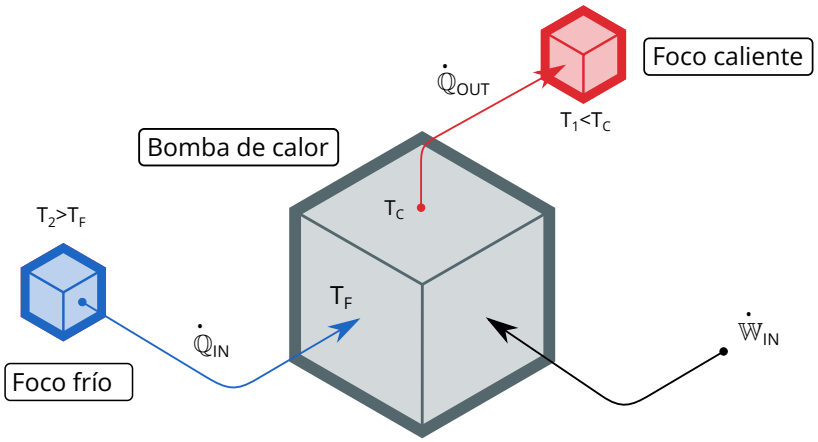


Figura 9.2: Esquema conceptual del efecto que produce la bomba de calor en dos focos de temperaturas T_1 y T_2, respectivamente. Fuente: los autores.

Una bomba de calor es una máquina térmica que ”bombea” calor desde un foco frío a uno caliente y, para realizar el proceso, consume un flujo de trabajo procedente del exterior. Aparentemente, este proceso viola la dirección natural del calor. Sin embargo, en la Figura 9.2 se observa que T_C es mayor que T_1 y T_2 también es mayor que T_F, con lo cual se mantiene la circulación natural del calor y el sentido de circulación del flujo térmico en ambos focos. El flujo de trabajo que se aporta a la bomba de calor desde el exterior hace que esto sea posible. Se verá más adelante el funcionamiento interno de la bomba de calor.

Aplicando el mismo razonamiento que en la ecuación (9.1) se obtiene:

$$\dot{Q}_{OUT} = \dot{W}_{IN} + \dot{Q}_{IN} \quad [W] \tag{9.4}$$

Y para calcular el flujo de trabajo que se debe aportar para que la bomba funcione, se despeja de la ecuación:

$$\dot{W}_{IN} = \dot{Q}_{OUT} - \dot{Q}_{IN} \quad [W] \tag{9.5}$$

Llegados a este punto, debemos calcular el rendimiento de la máquina; sin embargo, en este caso, debemos diferenciar qué rendimiento se está considerando. Si se utiliza la bomba de calor para calefacción, el rendimiento que nos interesa es el que considera el flujo de calor saliente dividido entre el flujo de trabajo entrante. Sin embargo, si nos interesa una bomba de calor para su uso como enfriadora, el rendimiento será el cociente entre el flujo de calor entrante y el flujo de trabajo entrante. Por supuesto, estos rendimientos no tienen por qué coincidir.

Para diferenciar un rendimiento de otro, se nombran de manera diferente. Si se utiliza como calefacción, el término empleado se denomina *Coeficient Of Performance* (COP), que se puede traducir como coeficiente de rendimiento. Por el contrario, si se emplea para refrigerar, se denomina *Energy Efficiency Ratio* (EER), cuya traducción sería índice o relación de eficiencia energética. Como se observa, el significado de ambas expresiones no difiere demasiado. No obstante, esto no es así considerando su uso o su significado físico. A continuación se muestran sus respectivas definiciones, compatibles con la norma UNE-EN 14825:2024 [80]:

$$\text{Rendimientos de BC} \begin{cases} \text{COP} = \dfrac{\dot{Q}_{OUT}}{\dot{W}_{IN}} = \dfrac{\dot{Q}_{OUT}}{\dot{Q}_{OUT} - \dot{Q}_{IN}} \\ \\ \text{EER} = \dfrac{\dot{Q}_{IN}}{\dot{W}_{IN}} = \dfrac{\dot{Q}_{IN}}{\dot{Q}_{OUT} - \dot{Q}_{IN}} \end{cases} \tag{9.6}$$

Las temperaturas de los focos frío y caliente son externas a la bomba de calor. Por tanto, tan solo se puede ajustar la bomba para que T_F y T_C sean las adecuadas para su correcto funcionamiento en un rango de temperaturas predefinidas de antemano. En todo caso, las temperaturas T_1 y T_2 pueden variar con el tiempo y, por tanto, es necesario el empleo de sensores que indiquen cuándo detener la máquina y cuándo ponerla en marcha en función de los niveles térmicos de ambos focos.

9.1.1 Ciclo teórico de una bomba de calor

Hasta ahora se han visto los rudimentos termodinámicos en los que se basa una bomba de calor. En esta sección se explica, de manera muy esquemática, los elementos y el funcionamiento interno de una bomba de calor. Comenzaremos con una definición más concreta de lo que es una bomba de calor:

Definición de bomba de calor

"*Máquina térmica que, utilizando un refrigerante en un ciclo termodinámico cerrado, transfiere energía térmica del entorno natural, aire, agua o tierra, a un edificio o a una aplicación industrial, invirtiendo el flujo natural del calor, lo que permite que fluya de una temperatura más baja a otra más alta.*" [81].

Las bombas de calor se basan en el ciclo inverso de *Carnot*, por el cual se absorbe un flujo de trabajo $\dot{W}_{IN}$ con el fin de obtener calor de una fuente a menor temperatura relativa T_2 y cederlo a una fuente con una temperatura mayor T_1, como se muestra en la Figura 9.2.

Lo forman cuatro transformaciones termodinámicas reversibles. El adjetivo "reversible" se refiere, en termodinámica, a un proceso ideal que, una vez realizado, puede ser revertido sin ningún cambio. O lo que es lo mismo, se pasa de un estado a otro a través de infinitos estados intermedios de equilibrio perfecto [41].

Las transformaciones se suceden secuencialmente y de manera cíclica. Cada proceso se realiza en una parte especializada de la máquina, a me-

dida que el fluido, en su forma gaseosa o líquida, pasa a través de cada tramo. Las fases son las siguientes:

- **Compresión isentrópica:** - Se produce una compresión del refrigerante gaseoso, adiabáticamente, con aumento de temperatura. En la compresión se absorbe un flujo de trabajo $\dot{W}_{IN}$.
- **Emisión de calor isoterma:** - El refrigerante, en estado gaseoso, cede un flujo de calor $\dot{Q}_{OUT}$ al foco caliente manteniendo la temperatura constante T_C. El refrigerante gaseoso se condensa.
- **Expansión isentrópica:** - El refrigerante, en estado líquido, se expande adiabáticamente y disminuye su temperatura.
- **Absorción de calor isoterma:** - El refrigerante, en estado líquido, se gasifica, absorbiendo un flujo de calor $\dot{Q}_{IN}$ del foco frio, y manteniendo una temperatura constante T_F.

Representando estas cuatro transformaciones en un diagrama de presión-volumen, se obtiene el gráfico mostrado en la Figura 9.3.

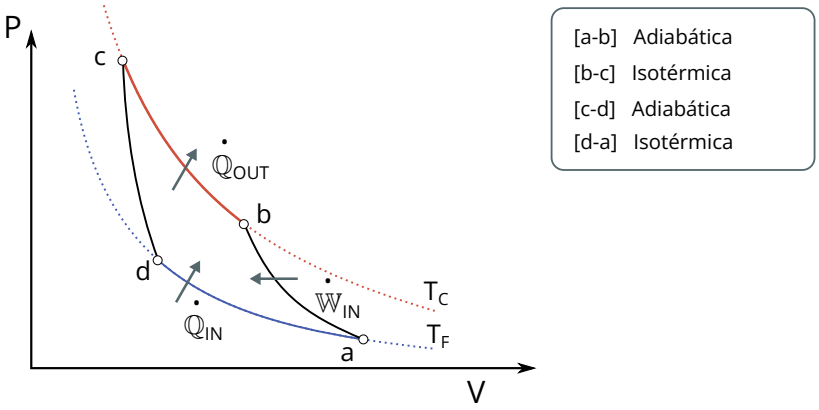


Figura 9.3: Diagrama de *Clapeyron* del ciclo inverso de *Carnot* para una bomba de calor. Fuente: los autores.

Si se traza un diagrama temperatura-entropía con las transformaciones que se acaban de describir, se obtiene el gráfico de la Figura 9.4.

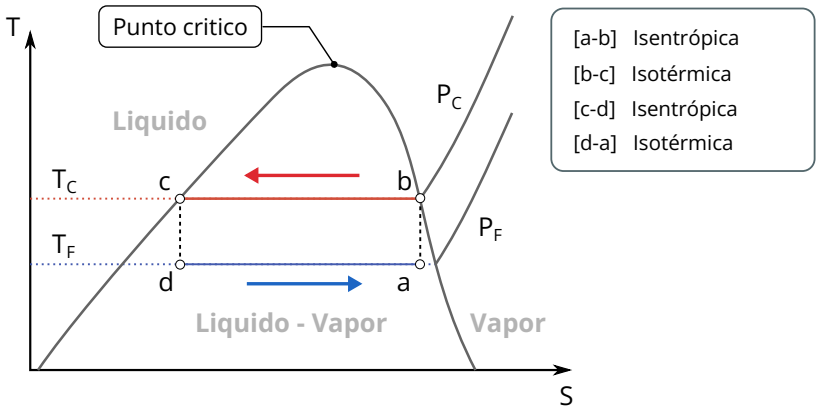


Figura 9.4: Diagrama T-S del ciclo inverso de *Carnot* de una bomba de calor, para un refrigerante genérico. Fuente: [41] Modificado.

Las transformaciones [a-b] y [c-d] corresponden a la compresión y expansión del refrigerante, respectivamente. Mientras que [b-c] y [d-a] son la evaporación y la condensación del refrigerante, respectivamente. Siendo P_F la presión en el evaporador y P_C la presión en el condensador.

Por tanto, según este ciclo reversible, las transformaciones isotérmicas dependen únicamente de T_C y T_F, y se cumple [41]:

$$\left(\frac{\dot{Q}_{IN}}{\dot{Q}_{OUT}}\right)_{Reversible} = \frac{T_F}{T_C} \tag{9.7}$$

En la práctica, la ecuación (9.7) no se cumple debido a pérdidas por fricción, aislamiento imperfecto, deformación, etc. [41].

Sin embargo, el ciclo termodinámico teórico permite la determinación del máximo rendimiento posible en función de las temperaturas de funcionamiento:

$$\text{Rendimientos máximos teóricos} \begin{cases} \text{máx COP} = \dfrac{T_C}{T_C - T_F} \\ \text{máx EER} = \dfrac{T_F}{T_C - T_F} \end{cases} \tag{9.8}$$

De estas ecuaciones, *Chiasson* deduce las siguientes conclusiones matemáticas de forma inmediata [41]:

- Los valores máx COP y máx EER son mayores que la unidad.
- Se cumple siempre que máx COP > máx EER.
- Cuanto menor es la diferencia de temperatura entre el condensador y el evaporador, T_C - T_F, mayor será el rendimiento teórico posible[1].
- Para un T_F mayor que 0 K el funcionamiento de una bomba de calor es teóricamente posible.

1: En un caso práctico, lo óptimo es intercambiar un flujo de calor con un foco que se encuentre a la temperatura media del clima en una zona dada. De esta manera, la diferencia de temperaturas será la mínima posible. Esto hace del intercambio térmico con el subsuelo un sistema tan eficiente.

9.1.2 Ciclo real de una bomba de calor

El ciclo real de una bomba de calor está lejos de poseer un comportamiento ideal. Sobre todo, debido a que existen procesos de compresión y expansión isotérmicos que son muy difíciles de conseguir, tecnológicamente hablando.

La inmensa mayoría de las bombas de calor actuales emplea un ciclo de compresión mecánica de un refrigerante gaseoso no ideal, basado en el ciclo inverso de *Carnot*. Suelen funcionar a presiones muy inferiores al punto crítico del refrigerante, siguiendo un ciclo de circuito cerrado de compresión, condensación, expansión y evaporación. En él hay irreversibilidades en todos los componentes [41].

De modo que el diagrama temperatura-entropía real, con un refrigerante genérico, mostrado en la Figura 9.5, contrasta con el gráfico homólogo ideal, mostrado en la Figura 9.4.

El rendimiento real de estas máquinas se ha visto reflejado en las ecuaciones (9.6) y se calcula a partir de los flujos reales de calor intercambiados con los focos térmicos. Se pueden comparar estos valores con los teóricos de las ecuaciones (9.8).

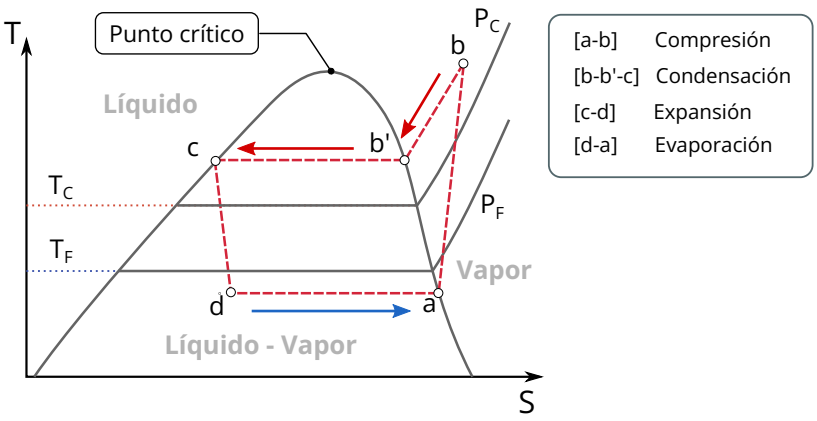


Figura 9.5: Diagrama T-S de ciclo compresivo de gas no-ideal en bomba de calor. Fuente: [41] Modificado.

Considerando los valores reales, se modifica la ecuación 9.7 de manera que se obtiene:

$$\left[\frac{\dot{Q}_{IN}}{T_F} - \frac{\dot{Q}_{OUT}}{T_C}\right] = \Delta S \tag{9.9}$$

Con esta modificación, se puede aplicar a casos ideales y reales. En caso de sistemas ideales $\Delta S = 0$. Por el contrario, su valor será positivo si el sistema es real. Como es obvio, la entropía negativa no tiene sentido.

9.1.3 Diagramas de *Mollier* en las bombas de calor

Habitualmente, se suele seguir el proceso de funcionamiento de una bomba de calor mediante el empleo de diagramas log(P)-H, también llamados diagramas de *Mollier*. Como se muestra en la Figura 9.6.

Se puede utilizar para medir flujos de calor y rendimientos de manera sencilla. Aunque cada fabricante tiene su propia tecnología, el comportamiento físico-químico de cada refrigerante es el mismo. Por tanto, existe un diagrama específico para cada refrigerante o para cada mezcla de estos.

Debido a posibles problemas medioambientales [82], todos los refrigerantes están sujetos a una legislación específica.

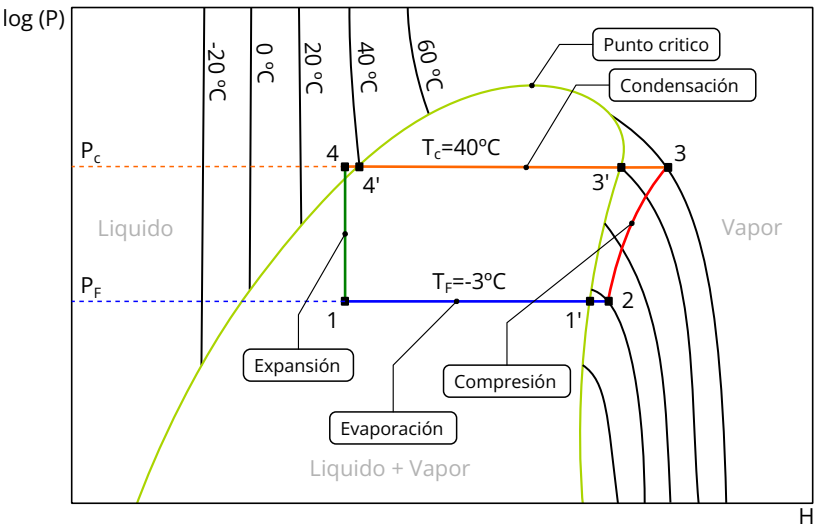


Figura 9.6: Ejemplo de diagrama de *Mollier* de un refrigerante genérico en bomba de calor. En este ejemplo, el refrigerante es puro y no una mezcla azeotrópica. Fuente: [83] Modificado.

9.1.4 Otros indices de rendimiento

Desde un punto de vista termodinámico, la eficiencia de los sistemas de bombas de calor se estudia introduciendo el concepto de exergía y comparando el rendimiento real (9.6) con el rendimiento máximo teórico (9.8). Así que hay dos rendimientos exergéticos en función del modo de funcionamiento de la bomba de calor:

$$\text{Rendimientos exergéticos} \begin{cases} \eta_C = \dfrac{\text{COP}}{\text{máx COP}} \\ \eta_F = \dfrac{\text{EER}}{\text{máx EER}} \end{cases} \tag{9.10}$$

Un ciclo real siempre será menor que la unidad e igual a uno si es un ciclo ideal. Por tanto, no es posible un rendimiento superior al 100%. Por otra parte, para que el ciclo inverso de *Carnot* sea ideal, todos los procesos deben ser reversibles, con transferencias isotérmicas de calor en el condensador y evaporador T_C y T_F, respectivamente.

Existen limitaciones físicas, técnicas y productos no aplicables debido a problemas de impacto ambiental. Existiendo un equilibrio entre los problemas físicos teóricos y la tecnología existente, y con un riesgo medioambiental asumible [41].

Desde el punto de vista del ahorro energético, independientemente del origen de la energía auxiliar consumida, para medir la eficacia se calcula el ratio de la energía térmica obtenida respecto de la energía auxiliar[2] aportada para su funcionamiento.

2: Si no se indica lo contrario, se considera que la energía auxiliar es eléctrica.

La eficiencia energética puede tener repercusiones legales de todo tipo, al igual que las emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero. Con el fin de conseguir una estandarización de los coeficientes relacionados con la eficiencia energética y poder comparar las bombas de calor entre sí, se han redactado normas técnicas que se actualizan cada cierto tiempo. En ellas se incluyen, también, conceptos y definiciones, como los coeficientes que se emplean comúnmente en la industria de la climatización y que permiten la normalización de su cálculo en los proyectos y en la aplicación de la legislación del sector. Una de ellas, aplicada en la UE, es la norma UNE-EN 14825:2024 [80].

Como se ha visto, las definiciones del rendimiento de calefacción COP y refrigeración EER están dadas por las ecuaciones (9.6). Estos valores son instantáneos, ya que las condiciones térmicas del entorno varían a lo largo del día, las semanas y los meses.

Para obtener valores más representativos para propósitos concretos, se consideran períodos más largos de tiempo, condiciones ambientales medias y otros aspectos adicionales. Se han definido una serie de valores estacionales que se enumeran a continuación [81]:

- SCOP. Coeficiente de rendimiento estacional. Para su cálculo, se considera la demanda de calefacción anual de referencia.
- SCOP_{on}. Coeficiente de rendimiento estacional en modo activo. Se emplea el funcionamiento activo en vez de la demanda de referencia.

Calefactores eléctricos

En ocasiones, y dependiendo del país, se emplean calefactores eléctricos de apoyo, con objeto de cumplir la normativa anti-*Legionella*. En España está recogida en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio. A día de hoy, la última actualización en vigor de este reglamento es la de 2 de agosto de 2022 [19].

- $SCOP_{net}$. Coeficiente de rendimiento estacional neto. En este caso se emplea el modo activo de calefacción sin contar la demanda de los calefactores eléctricos de apoyo.
- SEER. Factor de eficiencia estacional en modo refrigeración. Para su cálculo, se considera la demanda de refrigeración anual de referencia.

Todos los valores estacionales se calculan en base a unas condiciones y períodos de tiempo estipulados en la normativa. Se emplean con el propósito de comparación y certificación. Al ser una norma, considera elementos adicionales que no son estrictamente termodinámicos, como el gasto eléctrico auxiliar o la recirculación de fluidos, entre otros [81].

9.1.5 Refrigerantes primarios

A lo largo de la historia de las bombas de calor, se han utilizado varios refrigerantes en los circuitos de refrigeración de las bombas de calor, como el amoniaco, el clorometano, el propano o el dióxido de azufre [82], siendo estos inflamables o tóxicos. La gran revolución surgió en el siglo XX, en la década de 1930, con la aparición de los *CloroFluoroCarburos* (CFCS). Con posterioridad, se demostró que son dañinos para la capa de ozono del planeta.

Como alternativa, surgieron los *HidroCloroFluoroCarburos* (HCFCS) y los *HidroFluoroCarburos* (HFCS), que presentan un potencial efecto invernadero en la atmósfera terrestre. A día de hoy, se ha llegado a una solución de compromiso que permite la fabricación y el uso de muchos de estos compuestos por un tiempo limitado. En el momento de redactar este libro se aplica el Reglamento de la UE 2024/573, de 7 de febrero de 2024 [84]

En la actualidad, la tendencia es la vuelta a los antiguos refrigerantes de origen natural, como el CO_2, e hidrocarburos, y a nuevas mezclas [81].

En estos momentos, la clasificación desde un punto de vista de la seguridad se recoge en el Real Decreto 552/2019, de 27 de septiembre, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias. Se consideran la toxicidad y la inflamabilidad, entre otros factores. [85].

Tabla 9.1: Clases de seguridad y su determinación en función de la inflamabilidad y toxicidad. Los gases pueden ser sustancias puras o mezclas azeotrópicas. Fuente: [85]. Adaptado.

		Baja toxicidad	Alta toxicidad
Incremento riesgo - inflamabilidad ↓ ↓	Sin propagación de llama	A1	B1
	Baja inflamabilidad	A2L	B2L
	Media inflamabilidad	A2	B2
	Alta inflamabilidad	A3	B3
	→ → Incremento riesgo - toxicidad		

Agrupándose de forma simplificada de la siguiente manera [85]:

- Grupo L1 de alta seguridad = A1.
- Grupo L2 de media seguridad = A2L, A2, B1, B2L, B2.
- Grupo L3 de baja seguridad = A3, B3.

9.2 Componentes de una bomba de calor

Su funcionamiento se basa en un fluido refrigerante que circula en un circuito cerrado. Estas máquinas se basan en el ciclo inverso de *Carnot* y producen una serie de transformaciones termodinámicas que se repiten sin cesar mientras el aparato está en funcionamiento. Estas transformaciones se producen en las diferentes partes del circuito, que se muestran esquemáticamente en la Figura 9.7.

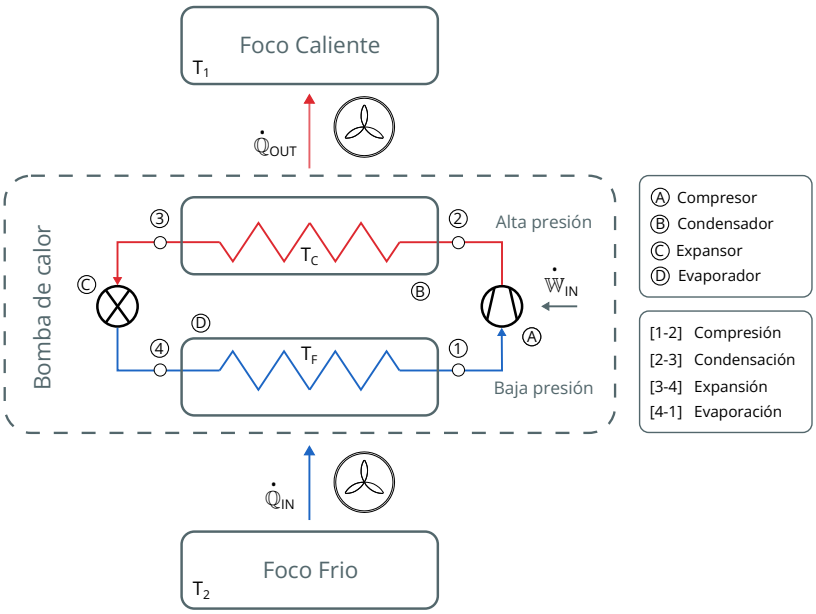


Figura 9.7: Esquema de funcionamiento de una bomba de calor simple. En este caso se emplea ventilación forzada, con aire, para el intercambio térmico de la bomba con los focos. Fuente: los autores.

- [1-2] **Compresor** - Compresión del gas. Flujo de potencia mecánica entrante $\dot{W}_{IN}$ a través del compresor. Se incrementa la temperatura.
- [2-3] **Condensador** - Cambio de gas a líquido. Se cede un flujo de calor $\dot{Q}_{OUT}$. La temperatura T_C se mantiene constante.
- [3-4] **Expansor** - Se fuerza una caída brusca de la presión con un aumento brusco de la sección. Hace bajar la temperatura.
- [4-1] **Evaporador** - Cambio de líquido a gas. Transformación isoterma T_E. Flujo de calor entrante $\dot{Q}_{IN}$.

El esquema de funcionamiento mostrado en la Figura 9.7 corresponde al de una bomba geotérmica con los focos fijos y prefijados, por ejemplo, a un refrigerador doméstico. Según esto, el foco frío a una temperatura T_2 es el interior de la nevera, mientras que el serpentín de refrigeración está a una temperatura T_F más baja. El foco caliente es la cocina, donde está situado el refrigerador, con una temperatura ambiental T_1 y el radiador de

la parte posterior de la nevera está a una temperatura T_C, sensiblemente mayor.

Siguiendo con este ejemplo, es necesario hacer hincapié en dos aspectos importantes: Primero, que la temperatura de ambos focos no se puede cambiar y depende de los factores ambientales. Y segundo, que la bomba de calor funciona con unas temperaturas T_F y T_C prefijadas por diseño.

Existen termómetros y sistemas de control que hacen que la máquina pare o arranque, pero no se puede variar la temperatura de la máquina establecida por diseño. Y como veremos más adelante, el rendimiento energético de la máquina variará en función de las condiciones externas y del diseño de la máquina.

En las bombas de calor más simples, el flujo de calor entre los focos y los serpentines térmicos se produce por convección, empleando ventiladores o el movimiento natural del aire en refrigeradores antiguos. Existen otros métodos, como intercambiadores de placas en circuitos secundarios que emplean refrigeración líquida.

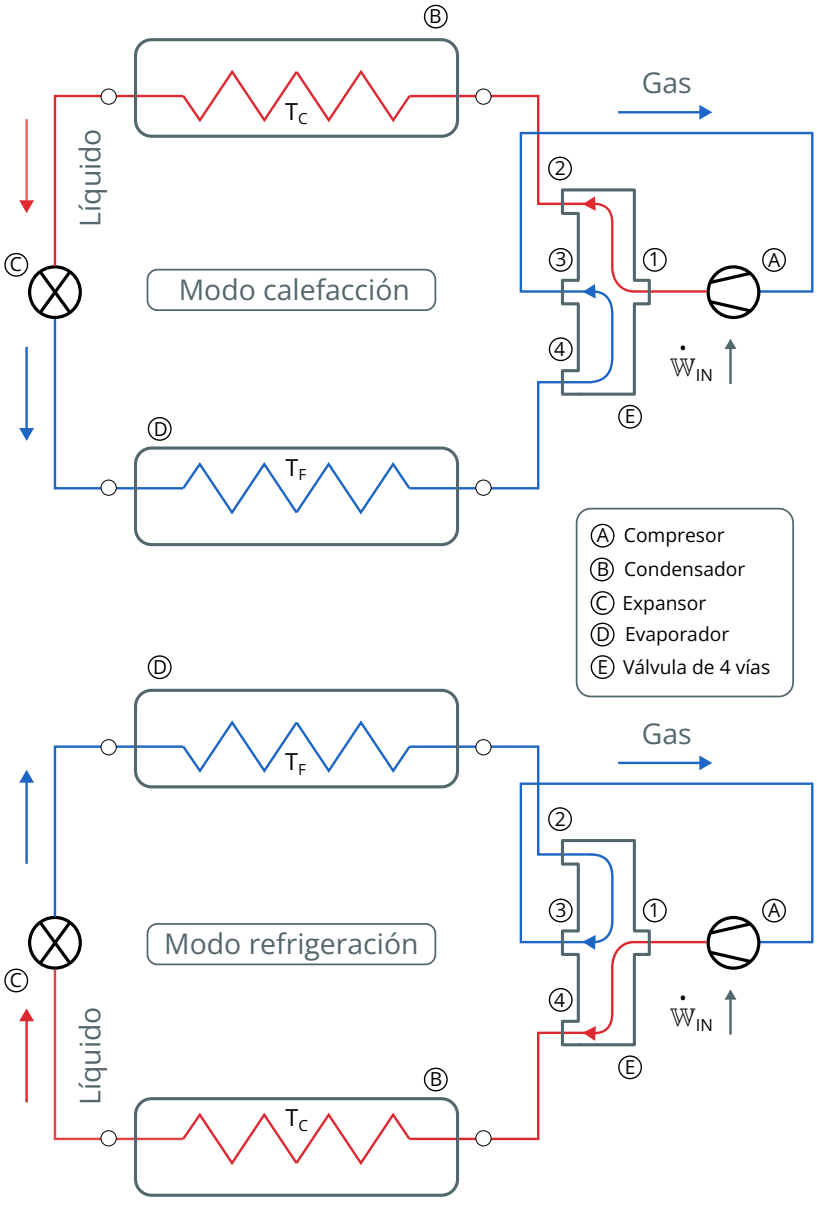


Figura 9.8: Esquema de funcionamiento de una bomba de calor simple con válvula de cuatro vías. Se cambia el uso de la bomba de calor intercambiando la función de los dos serpentines, que pueden funcionar indistintamente como condensador o evaporador, según del modo de comportamiento elegido por la válvula de cuatro vías. El expansor es bidireccional, disminuyendo la presión del liquido correctamente en ambos sentidos. Fuente: los autores.

Se puede aplicar el mismo principio para refrigerar la habitación de una vivienda. Pero surge el primer inconveniente: Si los focos están prefijados, solo se podrá emplear la máquina para aprovechar el foco frío o el caliente, pero no ambos. Por tanto, en climatización es necesario algún tipo de mecanismo que permita, de manera sencilla, intercambiar los focos. Con ese objetivo, se creó la válvula de cuatro vías Figura 9.9 , cuyo funcionamiento se puede ver en la Figura 9.8.

De manera que, si se pretende calentar el interior de la vivienda, se expulsará aire frío al exterior del edificio. Si es verano y se quiere refrescar el interior, se expulsará aire caliente al exterior. Para poder permitir eso, se emplean bombas de calor que cambian el sentido del refrigerante mediante una válvula de cuatro vías y un expansor que funciona en ambos sentidos.

La válvula de 4 vías está conectada por la vía (1) a la salida del compresor, que suministra refrigerante gaseoso a alta presión y a la mayor temperatura. La vía (3) de la válvula siempre proporcionará el refrigerante en estado gaseoso a baja presión y temperatura. En modo calefacción, el gas a alta presión y máxima temperatura sale por la vía (2), mientras que el gas frío a baja presión entra por la vía (4). Mientras que en modo de refrigeración, se intercambian las vías (2) y (4) entre sí, intercambiando también el sentido de circulación del refrigerante.

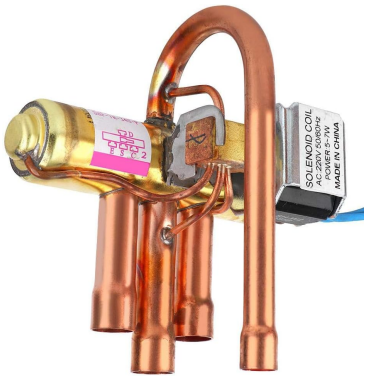


Figura 9.9: Imagen de válvula de cuatro vías para bomba de calor. Funciona con refrigerante gaseoso. Fuente: Amazon.es (©Jadpes).

Lo que se consigue con este dispositivo es que los dos serpentines de intercambio térmico puedan actuar como condensador o evaporador, dependiendo de si se está en modo calefacción o refrigeración, respectivamente. Pudiéndose usar en invierno y verano, sin necesidad de cambiar una sola tubería. Es suficiente actuar sobre el control electrónico de la válvula de 4 vías. Por supuesto, en el momento del cambio de modo de funcionamiento, la bomba sufrirá varios ciclos de transición mientras se estabilizan las zonas que operan con refrigerante gaseoso y las que lo hacen con líquido.

9.3 Bombas de calor geotérmicas

Una bomba de calor geotérmica es una bomba de calor especializada que emplea el subsuelo como uno de los dos focos térmicos y el interior de un edificio como el segundo foco. De esta manera, se conduce un flujo de calor en el sentido que el usuario considere oportuno. De forma que, si se demanda calor en el interior de la vivienda, se extraerá del subsuelo y, si se demanda refrigeración, el calor sobrante se inyectará en el terreno. A cambio, se consume un flujo de trabajo para que la máquina funcione, normalmente en forma de potencia eléctrica. Por tanto, se basa en los mismos principios de funcionamiento.

Por motivos obvios, no se puede emplear un sistema de convección por corriente de aire para intercambiar calor con el subsuelo. En cambio, se utilizan intercambiadores geotérmicos enterrados, cuya tecnología se estudia en detalle en el Capítulo 8.

La forma de transferir el calor es emplear un fluido portador de calor que circula entre la bomba de calor y el subsuelo, ya sea en circuito cerrado

o abierto. Por tanto, no se emplean simples serpentines o baterías de tuberías con aletas, sino intercambiadores de placas como el mostrado en la Figura 9.11.

Están formados por un paquete de placas metálicas finas, por las que circulan de manera alterna dos corrientes de fluido. El fluido recorre el espacio interplacas en diagonal para mejorar su eficacia. Este mecanismo permite una alta eficiencia en la transferencia de calor, alrededor del 85%. Además, evita que los fluidos se mezclen entre sí.

Así pues, el esquema de una bomba de calor geotérmica sencilla es el que se muestra en la Figura 9.10.

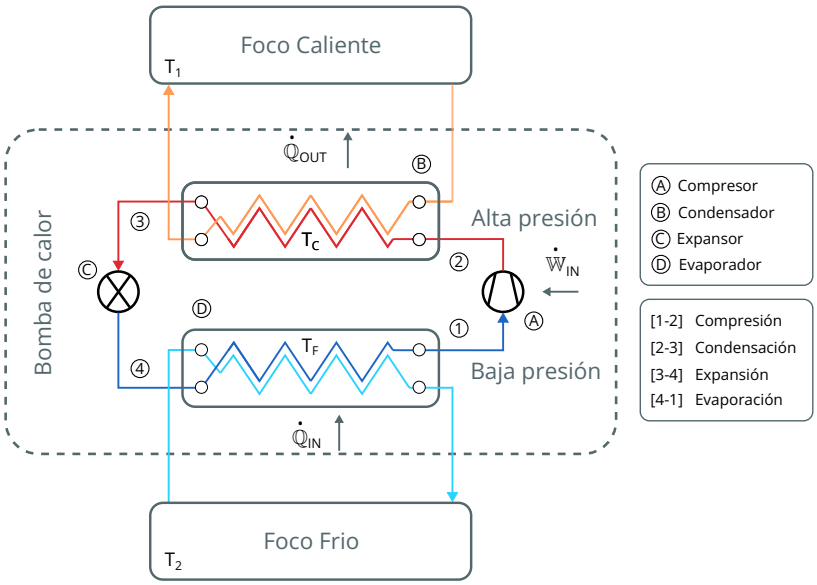


Figura 9.10: Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica simple. En este caso se emplean intercambiadores de placas para el intercambio térmico de la bomba con los focos. Y para una mayor simplicidad no se ha considerado el empleo de una válvula de 4 vías. Fuente: los autores.

Según el esquema de la Figura 9.10, aparecen tres circuitos de refrigeración. Un principal, dentro de la bomba de calor, y dos secundarios. Estos dos circuitos secundarios conectan térmicamente los focos caliente y frío con la bomba de calor.

Un elemento diferencial de una bomba geotérmica es el vaso de expansión. Se encarga de amortiguar la variación de volumen del refrigerante secundario debido al cambio de temperatura que sufre durante su funcionamiento. Se instala uno por cada circuito secundario de refrigeración.

El empleo de intercambiadores de placas supone que es necesario utilizar bombas adicionales para la circulación del fluido en los circuitos secundarios. Ni los vasos de expansión ni las bombas figuran en el esquema de la Figura 9.10 por motivos de simplicidad.

Con intercambiadores geotérmicos en bucle cerrado, se utilizan bombas de recirculación, cuyo consumo eléctrico es muy bajo y que suelen incluirse como parte del sistema. Por el contrario, si se emplean en sistemas abiertos, las bombas vendrán dimensionadas según el caudal y la altura piezométrica del nivel freático. En todo caso, para un mismo caudal, el consumo eléctrico será mucho mayor que el de una bomba de recirculación.

En ingeniería, los factores económicos también deben tenerse en cuenta; en este caso, la economía de escala hace que se tienda a aplicar tecnología

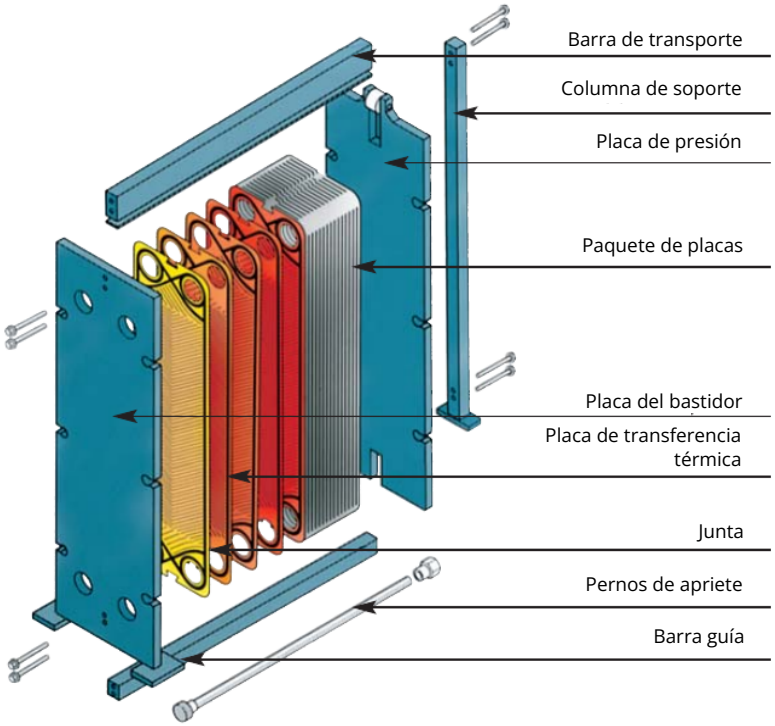


Figura 9.11: Esquema constructivo de un intercambiador térmico de placas. Se fabrican de muchos tamaños, y su capacidad de intercambio térmico es escalable apilando más o menos placas en el bastidor. Fuente: Xylem Inc. [86] Traducido.

de uso común con el fin de abaratar costos. Este factor hace que las bombas de calor geotérmicas no presenten los últimos avances en tecnología de refrigeración hasta que sean de uso masivo. A modo de ejemplo, la tecnología de variación de frecuencia eléctrica ©*Inverter*, para el control del compresor, se implantó casi una década después de que se comenzara a emplear en aparatos de aire acondicionado aire-aire.

9.3.1 Refrigerantes secundarios

Tal y como se ha visto en el Apartado 9.3, en las bombas de calor geotérmicas existen circuitos de refrigeración secundaria que intercambian calor con el subsuelo a través de intercambiadores de placas. Por ellos circula un fluido portador de calor que se distingue del refrigerante primario que circula por la bomba de calor. A estos líquidos, que no muestran cambios de estado en ningún momento, se les denomina genéricamente refrigerantes secundarios.

Internacionalmente, a los refrigerantes secundarios se les suele llamar también *brines*. Este término, en inglés, se traduce habitualmente al español como “salmueras”. No obstante, es importante señalar que, aunque esta palabra sugiere soluciones salinas, en sentido estricto no todas estas mezclas contienen sales. Sin embargo, suelen ser soluciones a base de agua.

La Tabla 9.2 muestra algunos de los refrigerantes secundarios más utilizados. Para su formulación, se emplea agua desmineralizada junto con un soluto adecuado en función de las prestaciones requeridas, evitando reacciones químicas indeseadas y la presencia de partículas en suspensión

Tabla 9.2: Listado de los refrigerantes secundarios más empleados en industria. Fuente: [87].

Refrigerantes secundarios de base acuosa		
Nombre del soluto	Rango de uso	Concentración máx. (peso)
Cloruro de calcio	−40 °C a 40 °C	30%
Etanol	−45 °C a 40 °C	60%
Etilenglicol	−51 °C a 125 °C	60%
Glicerina	−40 °C a 40 °C	60%
Carbonato potásico	−40 °C a 40 °C	40%
Acetato potásico	−33.5 °C a 40 °C	45%
Formiato potásico	−33.5 °C a 40 °C	48%
Cloruro de litio	−75 °C a 40 °C	24%
Metanol	−73 °C a 40 °C	60%
Cloruro de magnesio	−33.5 °C a 40 °C	30%
Cloruro sódico	−33.5 °C a 40 °C	23%
Hidróxido de amonio	−40 °C a 30 °C	30%
Propilenglicol	−50 °C a 135 °C	60%

que podrían obstruir los intercambiadores de placas. Se suelen añadir pequeñas cantidades de aditivos anticorrosivos para mejorar la durabilidad de la instalación.

Apéndices

Esta página está en blanco intencionalmente.

Pozos canadienses A

A.0.1 Intercambiadores tierra-aire

A.0.1 Intercambiadores tierra-aire 143

Una forma de aprovechar la inercia térmica del terreno es el empleo de los llamados pozos canadienses o provenzales. Estos consisten en un intercambiador de tierra-aire enterrado en los cimientos o en el terreno circundante de una edificación. Permite atemperar el aire que circula por el intercambiador, aprovechándolo para ventilar garajes o forjados sanitarios. También permite ahorrar energía en el aire empleado en la ventilación de edificios de bajo consumo energético.

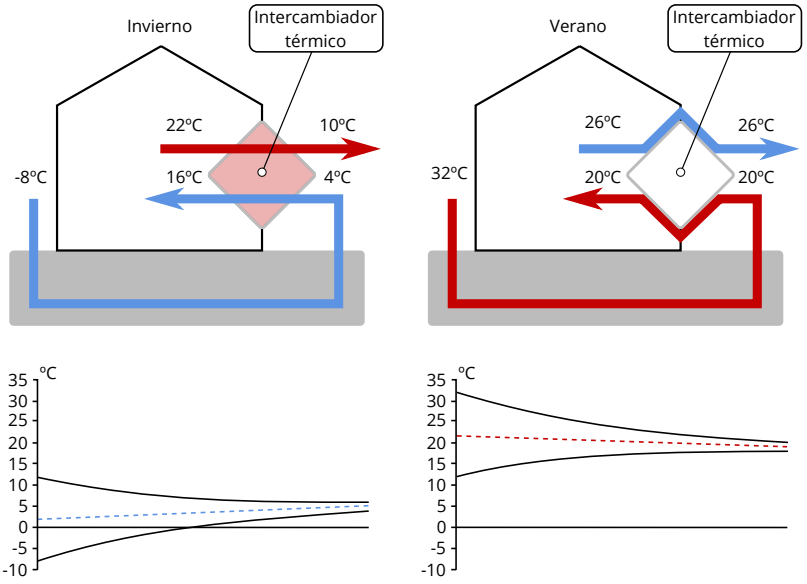


Figura A.1: Esquema conceptual del uso de pozos canadiense. Se muestran temperaturas de referencia en verano e invierno. Muestra la mejora de rendimiento si se emplea junto con un intercambiador de recuperación de calor del aire de la ventilación (izquierda) y sin el (derecha). Fuente: [88]. Adaptado.

En la Figura A.1 se presentan dos casos de uso comparados. Las temperaturas son orientativas, pero se observa que, en el primer caso, el rendimiento térmico es mejor. La pendiente de la recta discontinua azul es positiva, mientras que, en el lado derecho, la linea discontinua roja presenta una pendiente casi plana.

En las edificaciones modernas orientadas a optimizar el gasto energético, la envolvente del edificio se construye para ser estanca, eliminando totalmente las fugas de aire. Esto hace que la ventilación continua sea imprescindible para eliminar tanto el exceso de humedad como el dióxido de carbono producido por los ocupantes. Adicionalmente, se añaden todo tipo de filtros contra alérgenos, insectos y polvo. En este tipo de vivienda, no se realiza un ventilado puntual y manual abriendo las ventanas; sino que la ventilación es automática durante todo el día. El resultado es una mejor calidad del aire en el interior del edificio que en el exterior. Algo, aparentemente, contradictorio a lo que hay que acostumbrarse.

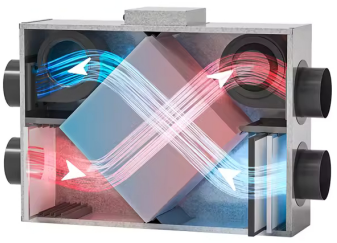


Figura A.2: Recuperador de calor. También denominado recuperador entálpico. Fuente: ©AliExpress.

En invierno, el aire entra al sistema a una temperatura de referencia de $-8\,^{\circ}\mathrm{C}$, aumentando su temperatura hasta los $-4\,^{\circ}\mathrm{C}$. Esta ganancia de temperatura se debe a la recuperación de calor del subsuelo, aprovechando la

inercia térmica del terreno. El sistema se puede mejorar si se emplea un recuperador de calor entre el aire atemperado por el pozo canadiense y el aire de salida de la ventilación del edificio. Si se emplea calefacción en la vivienda, el efecto es mas evidente, puesto que el aire de salida esta a una temperatura de referencia de 22 °C. Estos recuperadores de calor son similares a los intercambiadores de placas para fluidos presurizados, pero están fabricados con laminas de celulosa y aluminio, Figura A.2. Posee un rendimiento máximo de recuperación de alrededor del 85%. El resultado final es una temperatura de entrada del aire limpio procedente del exterior de 16 °C. Por tanto, solo hay que aplicar energía para suplir un salto térmico de 6 °C.

En el caso del verano, la temperatura de referencia del aire de entrada al pozo canadiense es de 32 °C y entra en el interior de la vivienda a una temperatura de 20 °C. En este caso de estudio, no se aplica un recuperador de calor. En estas condiciones, dado que la temperatura del aire de salida es superior a la de entrada del pozo canadiense, no tiene sentido la recuperación de calor, ya que se busca una sensación térmica menor de esos 26 °C. Sin embargo, la ventilación se realiza igualmente.

Puede darse el caso de que sea necesario el empleo de algún sistema de climatización. Si la temperatura del pozo canadiense fuera mayor que la del aire de salida de la ventilación, en tal caso sería interesante el empleo de la recuperación de calor. Así se enfriaría el aire procedente del pozo canadiense y se reduciría el salto térmico de la refrigeración, logrando un importante ahorro energético adicional.

En climas como el canadiense, los edificios no suelen tener instalados sistemas de aire acondicionado, pero si de calefacción. Cuando hay una subida anormal de las temperaturas, el sistema de pozos canadienses es una ayuda inestimable. Un ejemplo se dio en Canadá a finales de junio de 2021, en la ciudad de *Vancouver*, en Columbia Británica. Se produjo una tremenda ola de calor con temperaturas que llegaron a los 49.5 °C.

Figura A.3: Sistema de intercambiadores tierra-aire, en el *Centre for Sustainable Energy Technologies* (CSET), Universidad de *Nottingham*, en su campus de la ciudad China de *Ningbo*. Fuente: [89].

Las temperaturas de referencia de la Figura A.1 corresponden a climas continentales, caracterizados por fuertes oscilaciones entre el día y la noche, y entre el verano y el invierno, así como por valores extremos en dichas temperaturas. La inercia térmica del subsuelo hace que los cambios de temperatura sean más suaves (rectas discontinuas azul y roja). Lo

mismo ocurre en el caso de la atenuación de la diferencia de temperaturas invernales frente a las estivales [88].

Un intercambiador de calor tierra-aire esta constituido por una o varias tuberías, tendidas sobre el terreno y enterradas debajo de una capa de hasta dos metros de profundidad, Figura A.3. Se suelen emplear tuberías de uso típico en el mundo de la construcción; por tanto, suelen ser de policloruro de vinilo (PVC) normalizado o de prefabricados de hormigón si son de grandes dimensiones. En ocasiones, se utilizan tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE).

Las temperaturas se tienden con una inclinación de 3°, con el objeto de recoger los condensados procedentes de la humedad del aire en un pequeño deposito situado en la parte más baja de cada tramo de tubería. Además, se colocan protecciones, como filtros o rejillas, para evitar la entrada de insectos y pequeños roedores al interior de los conductos.

Se suele aplicar ventilación forzada, con presión negativa, en caso de longitudes largas y perdidas de carga importantes a lo largo del circuito de intercambio.

Esta página está en blanco intencionalmente.

Bibliografía

Referencias por orden de citado.

[1] Real Academia Española - Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario. *Definición de Geotermia*. URL: http://dle.rae.es/?id=J8ewRot (visitado 29-06-2018) (vid. pág. 3).

[2] *VDI 4640 Blatt 1 - Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. de. Jun. de 2010. URL: https://www.vdi.de/mitgliedschaft/vdi-richtlinien/details/vdi-4640-blatt-1-thermische-nutzung-des-untergrunds-grundlagen-genehmigungen-umweltaspekte (visitado 30-09-2025) (vid. pág. 3).

[3] Jaume Pous y Lluís Jutglar. *Energía geotérmica*. Energías alternativas y medio ambiente. Barcelona, España: Ceac, 2004, pág. 273. ISBN: 84-329-1061-9 (vid. págs. 3, 40, 53, 72, 73, 78).

[4] José Angél Sanchidrián. *Transferencia de calor*. Ed. por Fundación Gomez-Pardo y Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas. Madrid, España, 1999, pág. 489. ISBN: 8495063107 (vid. pág. 4).

[5] Instituto de la Ingeniería de España. *Energía geotérmica*. Ed. por IGME. Madrid, España: Instituto geológico y minero de España, 1985, pág. 263. ISBN: 84-7474-323-0 (vid. págs. 4, 5, 15).

[6] James Badro y Michael Walter, eds. *The early earth. Accretion and differentiation*. Geophysical Monograph Series 212. Washington, D.C: American Geophysical Union y John Wiley & Sons, Inc., 2015, pág. 181. ISBN: 9781119011729 (vid. págs. 5, 7).

[7] European Space Agency. *ESA - Venus compared to Earth*. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Venus_Express/Venus_compared_to_Earth (vid. pág. 5).

[8] Vaughn Nelson. *Introduction to renewable energy*. Ed. por Abbas Ghassemi. Energy and the environment. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011, pág. 350. ISBN: 978-1-4398-9120-9 (vid. págs. 5, 6).

[9] Emily A. Worsham y Thorsten Kleine. «Late accretionary history of Earth and Moon preserved in lunar impactites». En: *Science Advances* 7.44 (2021), eabh2837. DOI: 10.1126/sciadv.abh2837. URL: https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.abh2837 (vid. pág. 8).

[10] David R. Boden. *Geological fundamentals of geothermal energy*. Ed. por Abbas Ghassemi. Energy and the environment. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017, pág. 380. ISBN: 978-1-4987-0877-7 (vid. págs. 10-12, 72).

[11] William E. Glassley. *Geothermal energy - Renewable Energy and the Environment*. Ed. por Abbas Ghassemi. 2ª ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015, pág. 409. ISBN: 978-1-4822-2175-6 (vid. págs. 12, 15-17, 29, 36, 39, 42, 50, 73, 85-89, 93, 101).

[12] Ernst Huenges, ed. *Geothermal Energy Systems. Exploration, Development, and Utilization*. Potsdam, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010. ISBN: 978-3-527-40831-3 (vid. pág. 13).

[13] John Tabak. *Solar and Geothermal Energy. Energy and the Environment*. New York, USA: Facts on File, 2009, pág. 223. ISBN: 978-0-8160-7086-2 (vid. pág. 16).

[14] B. M. Kennedy et al. «Mantle Fluids in the San Andreas Fault System, California». En: *Science* 278.5341 (1997), págs. 1278-1281. DOI: 10.1126/science.278.5341.1278. URL: https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.278.5341.1278 (vid. pág. 17).

[15] Manuel Bustillo Revuelta y Carlos López Jimeno. *Recursos minerales. Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgía e impacto ambiental*. Ed. por Carlos López Jimeno. 2ª ed. Madrid, España: E.T.S.I de Minas - Universidad Pólitecnica de Madrid (UPM), abr. de 2000. ISBN: 84-921708-0-8 (vid. págs. 19, 20).

[16] Donald A. Brobst, Walden P. Pratt y V. E. McKelvey. *Summary of United States Mineral Resources*. Inf. téc. 682. Washington D.C., USA: United States Department of the Interior, Geological Survey, 1973 (vid. pág. 20).

[17] Jefatura del Estado. Gobierno de España. *Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. Legislación Consolidada*. Jul. de 1973. URL: https://www.boe.es/eli/es/l/1973/07/21/22/con (vid. págs. 22-24).

[18] Jefatura de Estado - Gobierno de España. *Ley 34/1998, de 7 de octubre, del sector de hidrocarburos. Legislación Consolidada*. Oct. de 1998. URL: https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1998-23284 (visitado 30-09-2025) (vid. pág. 22).

[19] Ministerio de la Presidencia - Gobierno de España. *Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*. 2007. URL: https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/20/1027/con (vid. págs. 23, 134).

[20] Jefatura del Estado. Gobierno de España. *Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. Legislación Consolidada*. Jul. de 1985. URL: https://www.boe.es/eli/es/rd/1985/04/02/863/con (vid. pág. 23).

[21] Jefatura de Estado - Gobierno de España. *Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Legislación Consolidada*. Dic. de 2013. URL: https://www.boe.es/eli/es/l/2013/12/09/21/con (vid. pág. 26).

[22] Comunidad de Madrid. *Ley 2/2002, de 19 de junio, de Evaluación Ambiental de la Comunidad de Madrid. Legislación consolidada*. Jul. de 2002. URL: https://www.boe.es/eli/es-md/l/2002/06/19/2/con (vid. pág. 26).

[23] AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006)*. Dic. de 2006. URL: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038060 (vid. pág. 33).

[24] Charles A.S. Hall, Jessica G. Lambert y Stephen B. Balogh. «EROI of different fuels and the implications for society». En: *Energy Policy* 64 (2014), págs. 141-152. ISSN: 0301-4215. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513003856 (vid. pág. 33).

[25] Herlane Costa Calheiros, Mônica Regina Gomes y Percy Máximo Anco Estrella. «Calidad de las aguas meteóricas en la ciudad de Itajubá, Minas Gerais, Brasil». En: *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 9.2 (jun. de 2014). ISSN: 1980-993X. DOI: 10.4136/ambi-agua.1329. URL: https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1329 (vid. pág. 35).

[26] Relaciones con las Cortes y Memoria Democráticaa Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. (Legislación consolidada)*. Nov. de 2023. URL: https://www.boe.es/eli/es/rd/2023/01/10/3/con (vid. pág. 36).

[27] A.J. Ellis. «Geothermal fluid chemistry and human health». En: *Geothermics* 6.3 (1977), págs. 175-182. ISSN: 0375-6505. DOI: https://doi.org/10.1016/0375-6505(77)90026-8. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375650577900268 (vid. pág. 38).

[28] Mark F. Coolbaugh et al. «Quaternary Borate Deposits as a Geothermal Exploration Tool in the Great Basin». En: *Geothermal Resources Council Transactions* 30 (2006), págs. 393-398. ISSN: 0193-5933. URL: https://www.geothermal-library.org/index.php?mode=pubs&action=view&record=1025064 (vid. pág. 39).

[29] Robert O. Fournier. «Application of Water Geochemistry ta Geothermal Exploration and Reservoir Engineering». En: *Geothermal Systems : Principies and Case Histories*. Ed. por L. Rybach y L.J.P. Muffler. John Wiley & Sons Ltd., 1980. Cap. 4, págs. 109-143 (vid. págs. 41, 42).

[30] IGME - Instituto Geológico y Minero de España. *Análisis metodológico de las técnicas geoquímicas empleadas en prospección geotérmica*. Ministerio de Industria y Energía. Secretaría de Energía y Recursos Minerales., 1985, pág. 417. URL: https://info.igme.es/SidPDF/035000/001/Analisis%20metodologico%20de%20las%20tecnicas%20geoquimicas%20empleadas%20en%20prospeccion%20geotermica/35001_0001.pdf (vid. pág. 41).

[31] R.O. Fournier y A.H. Truesdell. «An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters». En: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37.5 (1973), págs. 1255-1275. ISSN: 0016-7037. DOI: https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016703773900604 (vid. pág. 42).

[32] F.W. Walker et al. *Chart of the Nuclides*. 59ª ed. San Jose, California, USA: General Electric Co., Nuclear Engineering Operations, 1984 (vid. pág. 42).

[33] IAEA - International Atomic Energy Agency. *IAEA-S-1 is the primary reference material for the δ34S VCDT scale definition and realisation*. en. 2025. URL: https://analytical-reference-materials.iaea.org/iaea-s-1 (visitado 24-10-2025) (vid. pág. 43).

[34] *Stable Isotope Hydrology. Deuterium ans Oxygen-18 in the Water Cycle*. Viena, Austria: Internacional Atomic Energy Agency, 1981. 356 págs. (vid. pág. 43).

[35] OCSA - Técnicas Geofísicas. *Tomografía eléctrica*. URL: https://www.ocsa-geofisica.com/tomografia-electrica.html (visitado 03-11-2025) (vid. pág. 45).

[36] *Tongariro*. es. Page Version ID: 157643139. Ene. de 2024. URL: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Tongariro&oldid=157643139 (visitado 04-11-2025) (vid. pág. 46).

[37] Wiebke Heise et al. «Magmatic priming of a phreatic eruption sequence: the 2012 Te Maari eruptions at Mt Tongariro (New Zealand) imaged by magnetotellurics and seismicity». En: *Geophysical Journal International* 236.3 (ene. de 2024), págs. 1848-1862. ISSN: 1365-246X. DOI: 10.1093/gji/ggae022. URL: https://doi.org/10.1093/gji/ggae022 (vid. pág. 46).

[38] Guido Cappetti et al. «A New Deep Exploration Program and Preliminary Results of a 3D Seismic Survey in the Larderello-Travale Geothermal Field (Italy)». En: *World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005*. 2005 (vid. pág. 49).

[39] John W. Lund y Tonya L. Boyd. «Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review». En: *Geothermics* 60.April (2016), págs. 66-93. ISSN: 03756505. DOI: 10.1016/j.geothermics.2015.11.004. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037565051500156X (vid. pág. 52).

[40] U.S. Administration. *International - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Washington D.C., USA, 2017. URL: https://www.eia.gov/international/data/world (visitado 13-11-2020) (vid. pág. 52).

[41] Andrew D. Chiasson. *Geothermal heat pump and heat engine systems. Theory and practice*. New York, USA: Wiley-ASME Press, sep. de 2016. ISBN: 978-1118961940 (vid. págs. 54, 120, 122, 129-133).

[42] T. Kusuda y P. R. Archenbach. «Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States». En: *ASHRAE Transaction* 71.1 (1965), págs. 61-75 (vid. pág. 54).

[43] Jin Luo et al. «Investigation of shallow geothermal potentials for different types of ground source heat pump systems (GSHP) of Wuhan city in China». En: *Renewable Energy* 118 (2018), págs. 230-244. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2017.11.017. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117311187?pes=vor (vid. pág. 55).

[44] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. *VDI 4640 Blatt 2 /Part 2 - Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen | Thermal use of the underground - Ground source heat pump systems*. Jun. de 2019. URL: https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4640-blatt-2-thermische-nutzung-des-untergrunds-erdgekoppelte-waermepumpenanlagen (vid. págs. 56, 118).

[45] Manuel Bustillo Revuelta et al. *Manual de Sondeos. Aplicaciones*. Ed. por Carlos López Jimeno. Madrid, España: ETSI de Minas - Universidad Politénica de Madrid, 2001, pág. 407. ISBN: 8493129232 (vid. págs. 59-62, 65).

[46] José Bernaola Alonso, Jorge Castilla Gómez y Juan Herrera Herbert. *Perforación y voladura de rocas en minería*. Ed. por Juan Herrera Herbert y Jorge Castilla Gómez. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas., oct. de 2013. DOI: 10.20868/UPM.book.21848. URL: https://oa.upm.es/21848/ (vid. pág. 59).

[47] Sol de María. *Los secretos del misterioso proyecto soviético del Pozo superprofundo de Kola: por qué le dicen "la puerta de entrada al infierno"*. Ene. de 2025. URL: https://www.infobae.com/america/mundo/2025/01/22/los-secretos-del-misterioso-proyecto-sovietico-del-pozo-superprofundo-de-kola-por-que-le-dicen-la-puerta-de-entrada-al-infierno/ (vid. pág. 60).

[48] GPE Oil machinery. *What you don't know about the blowout preventer*. Jul. de 2025. URL: https://sgpe.com/what-you-dont-know-about-the-blowout-preventer/ (vid. pág. 60).

[49] Pål Skalle. *Drilling Fluid Engineering*. 5ª ed. bookboon.com, 2014. ISBN: ISBN 978-87-403-0791-7 (vid. pág. 61).

[50] Jean-Paul Nguyen. *Drilling data handbook*. Ed. por Gilles Gabolde. 7ª ed. L'Institut Francais Du Petrole, 1999, pág. 552. ISBN: 2-7108-0756-4 (vid. pág. 61).

[51] *Estudio de factibilidad técnico economica de explotación de energía geotermica en S. Sebastián de los Reyes (Madrid). Informe de subsuelo*. Inf. téc. Empresa nacional adaro de investigaciones mineras, S.A. (Enadimsa), mayo de 1984. URL: https://info.igme.es/SidPDF/022000/064/22064_0001.pdf (vid. pág. 63).

[52] HUSTEEL INDUSTRY GROUP. *Acero al carbono vs acero negro*. URL: https://www.husteel-group.com/es/events/carbon-steel-vs-black-steel.html (vid. pág. 63).

[53] Roberto Arranz Revenga y Juan Herrera Herbert. *Sondeos para explotación de acuíferos*. Ed. por Roberto Arranz Revenga. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera., sep. de 2024. DOI: 10.20868/UPM.book.84184. URL: https://oa.upm.es/84184/ (vid. págs. 64, 65, 105, 107).

[54] NOVOMET. *Sistemas de bombeo geotérmico sumergible (GSP)*. URL: https://www.novometgroup.com/es/products-services/renewable-energy-solutions/geothermal-pumps/index.html (visitado 06-11-2025) (vid. pág. 66).

[55] NOVOMET. *Sistema de derivación en Y de BES*. URL: https://www.novometgroup.com/es/products-services/artificial-lift/y-tool-esp-bypass-system/index.html (visitado 06-11-2025) (vid. pág. 67).

[56] D.E. White, L.J.P. Muffler y A.H. Truesdell. «Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems». En: *Economic Geology* 66.1 (feb. de 1971), págs. 75-97. ISSN: 0361-0128. DOI: https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.1.75 (vid. pág. 70).

[57] Michael J Moran y Howard N Shapiro. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Ed. por Howard N. Shapiro. 5ª ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2006. 1831 págs. ISBN: 978-0-470-03037-0 (vid. pág. 78).

[58] Sharad Kelkar, Giday WoldeGabriel y Kenneth Rehfeldt. «Lessons learned from the pioneering hot dry rock project at Fenton Hill, USA». En: *Geothermics* 63 (2016). Enhanced Geothermal Systems: State of the Art, págs. 5-14. ISSN: 0375-6505. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.08.008. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650515001091 (vid. págs. 81, 83).

[59] U.S. Departament of Energy (USA), ed. *A History of Geothermal Energy Research and Development in the United States. Reservoir Engineering 1976 – 2006*. Geothermal Technologies Program. U.S. Departament of Energy (USA), sep. de 2010. URL: https://geothermal.energy.gov (vid. págs. 82, 86).

[60] H. Christopher H Armstead y Jefferson W. Tester. *Heat Mining. A New Source of Energy*. Chapman & Hall, 1987, pág. 478. ISBN: 13: 9780419122302 (vid. pág. 86).

[61] Roy Baria et al. «Creation of an HDR reservoir at 5000 m depth at the European HDR project». En: *Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30-February 1, 2006*. Stanford University, feb. de 2006, pág. 9. URL: https://brgm.hal.science/hal-00768762v1 (vid. pág. 86).

[62] Susan PETTY et al. «Improving Geothermal Project Economics with Multi-Zone Stimulation: Results from the Newberry Volcano EGS Demonstration». En: *Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2013*. Stanford University, 2013 (vid. pág. 88).

[63] Robert Bowen. *Geothermal resources*. 2ª ed. London, UK: Elsevier Applied Science, 1989, pág. 486. ISBN: 1-85166-287-1 (vid. págs. 91, 95).

[64] Stefán Arnórsson. «Environmental impact of geothermal energy utilization». En: *Geological Society, London, Special Publications* 236.1 (2004), págs. 297-336. DOI: 10.1144/GSL.SP.2004.236.01.18 (vid. pág. 93).

[65] OSHA - Occupational Safety y Health Administration. U.S. Department of Labor. *Fatal facts - Hydrogen Sulfide Releases*. 18-2023. Occupational Safety y Health Administration. U.S. Department of Labor, 2023. URL: https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA4204.pdf (vid. pág. 93).

[66] Kunak Senging Anywhere. *Sulfuro de hidrógeno (H2S)*. es. URL: https://kunakair.com/es/sulfuro-de-hidrogeno/ (vid. pág. 93).

[67] CHIYODA CORPORATION (Japan). *Unidad de recuperación de azufre (SRU)*. es. URL: https://www.chiyodacorp.com/en/service/transionenergy/upstream-gasprocessing/sulfur-recovery-unit-sru/ (visitado 10-10-2025) (vid. pág. 94).

[68] *Remoción de mercurio en agua residual minera por la técnica electrocoagulación*. Vol. Memorias del II Seminario de Ciencias Ambientales Sue-Caribe & VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental, 2014. SUE-Caribe, 2014, págs. 168-171. ISBN: 978-958-9244-64-7 (vid. pág. 95).

[69] Vera Roth et al. «Mercury Removal from Concentrated Sulfuric Acid by Electrochemical Alloy Formation on Platinum». En: *ACS ES&T Engineering* 3.6 (2023), págs. 823-830. DOI: 10.1021/acsestengg.2c00417. URL: https://doi.org/10.1021/acsestengg.2c00417 (vid. pág. 95).

[70] Georgios Florides y Soteris Kalogirou. «Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications». En: *Renewable Energy* 32.15 (2007), págs. 2461-2478. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2006.12.014. URL: https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014 (vid. pág. 100).

[71] Italsantech. *Tuberías de polipropileno PP-R - Italsan*. URL: https://italsan.com/tuberias-polipropileno (vid. pág. 100).

[72] Frank M White. *Mecanica de fluidos, Sexta edición*. 6th. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2008. ISBN: 8448166035 (vid. págs. 101, 112).

[73] Eduardo Ruiz Delgado, Marcel Hendriks y Diego Toimil Matesanz. *Guía técnica de sistemas geotérmicos abiertos*. GeoEner. FENERCOM, Comunidad de Madrid, 2010. 130 págs. ISBN: 978-84-614-1418-5 (vid. págs. 106, 107, 117).

[74] AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 22475-1:2022. Investigación y ensayos geotécnicos. Métodos de muestreo y medición de aguas subterráneas. Parte 1: Principios técnicos para el muestreo de suelos, rocas y aguas subterráneas. (ISO 22475-1:2021)*. Jun. de 2022. URL: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0069910 (vid. pág. 108).

[75] Otto D. L. Strack. *Analytical Groundwater Mechanics*. Cambridge CB2 8BS, United Kingdom: Cambridge University Press, ago. de 2017. ISBN: 978-1-107-14883-3. DOI: 10.1017/9781316563144 (vid. págs. 109, 111, 113-115).

[76] Maurice A. Biot. «General Theory of Three-Dimensional Consolidation». En: *Journal of Applied Physics* 12.2 (feb. de 1941), págs. 155-164. ISSN: 1089-7550. DOI: 10.1063/1.1712886. URL: https://hal.science/hal-01368635v1 (vid. pág. 113).

[77] AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE 100715-1:2014. Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Parte 1: Sistemas de circuito cerrado vertical.* Mayo de 2014. URL: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0052899 (vid. pág. 118).

[78] AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 17628:2017. Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos geotérmicos. Determinación de la conductividad térmica de suelos y rocas utilizando una sonda geotérmica instalada en un sondeo. (ISO 17628:2015).* Nov. de 2017. URL: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059364 (vid. pág. 118).

[79] AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN 805:2000 - Abastecimiento de agua. Especificaciones para redes exteriores a los edificios y sus componentes. (EN 805:2000).* Madrid, España, 20 de dic. de 2000. URL: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0023912 (vid. pág. 121).

[80] Spanish Association for Standardization y Certification. *AENOR UNE-EN 14825:2024. Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de recintos. Ensayos y clasificación en condiciones de carga parcial y cálculo del rendimiento estacional.* Abr. de 2024. URL: https://tienda.aenor.com/norma-une-en-14825-2024-n0072804 (vid. págs. 129, 133).

[81] José Ángel Asensio et al. *La bomba de calor: fundamentos, tecnología y casos prácticos.* Madrid, España: Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización (AFEC), 2015. ISBN: 9788460654476 (vid. págs. 129, 133, 134).

[82] American Chemical Society. *Los clorofluorocarbonos y el agujero de ozono.* URL: https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/historia-quimica/clorofluorocarbonos-ozono.html (vid. págs. 132, 134).

[83] Asociación Cluster da Xeotermia Galega, ed. *Manual de climatización geotérmica.* Vigo, España: Asociación Cluster da Xeotermia Galega, 2012, pág. 448. ISBN: 978-84-616-2391-4 (vid. pág. 132).

[84] El Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión Europea. *Reglamento (UE) 2024/573 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de febrero de 2024, sobre los gases fluorados de efecto invernadero, por el que se modifica la Directiva (UE) 2019/1937, y se deroga el Reglamento (UE) nº 517/2014.* Español. 7 de feb. de 2024. URL: https://www.boe.es/doue/2024/573/L00001-00067.pdf (vid. pág. 134).

[85] Comercio y Turismo. Gobierno de España. Ministerio de Industria. *Real Decreto 552/2019, de 27 de septiembre, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias.* Español. Legislación consolidada. 27 de sep. de 2019. URL: https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/09/27/552/con (vid. págs. 134, 135).

[86] Xylem Inc. *Brazed Plate and Gasketed Plate Heat Exchangers.* 2011. URL: https://docs.rs-online.com/8998/0900766b81610cfd.pdf (vid. pág. 139).

[87] F-Chart Software. *Brines.* URL: http://fchart.com/ees/eeshelp/hs612.htm (visitado 24-08-2020) (vid. pág. 140).

[88] Pierre Hollmuller y Bernard Lachal. «Air–soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance». En: *Applied Energy* 119 (2014), págs. 476-487. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.042. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261914000610?via%3Dihub (vid. págs. 143, 145).

[89] J. Darkwa et al. «Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system». En: *Energy and Buildings* 43.2-3 (2011), págs. 728-736. ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.11.018. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778810004159?via%3Dihub (vid. pág. 144).

[90] Ronald DiPippo. *Geothermal power plants. Principles, applications, case studies and environmental impact. Principles, applications, case studies, and environmental impact.* Fourth edition. Waltham, MA 02451, USA: Butterworth-Heinemann, imprint of Elsevier, 2016, pág. 762. ISBN: 978-0-08-100879-9.

[91] Lev Eppelbaum, Izzy Kutasov y Arkady Pilchin. *Applied geothermics*. Ed. por Philippe Blondel et al. Lecture notes in earth system sciences. Berlin Heidelberg, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pág. 751. ISBN: 978-3-642-34023-9. DOI: 10.1007/978-3-642-34023-9.

[92] Karl Fuchs y Yevgeny A. Kozlovsky, eds. *Super-deep continental drilling and deep geophysical sounding. International Seminar Super-Deep Drilling and Deep Geophysical Research*. Exploration of the deep continental crust. Berlin, Germany: Springer Verlag, 1990. ISBN: 0-387-51609-3.

[93] Evgenij Aleksandrovič Kozlovskij y N. I. Andrianov, eds. *The superdeep well of the Kola peninsula*. Exploration of the deep continental crust. Berlin, Germany: Springer Verlag, 1987. ISBN: 0-387-16416-2.

[94] IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, ed. *Manual de geotermia*. Madrid, España: IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, jun. de 2008. ISBN: 978-84-96680-35-7. URL: https://web.igme.es/Geotermia/Ficheros%20PDF/Manual_Geotermia_2,5.pdf.

[95] Carles Canet Miquel et al. «Apunte geológico y revisión histórica de la zona geotérmica de Pathé, Hidalgo». En: *Geofísica Internacional* 60.3 (. de 2021), págs. 258-279. DOI: 10.22201/igeof.00167169p.2021.60.3.2130. URL: https://revistagi.geofisica.unam.mx/index.php/RGI/article/view/63.

[96] RAE - ASALE. *géiser | Definición | Diccionario de la lengua española*. URL: https://dle.rae.es/g%C3%A9iser (vid. pág. 155).

[97] RAE - ASALE. *exergía | Definición | Diccionario de la lengua española*. URL: https://dle.rae.es/exerg%C3%ADa (vid. pág. 155).

[98] P.M. Congedo, G. Colangelo y G. Starace. «CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations». En: *Applied Thermal Engineering* 33-34.1 (2012), págs. 24-32. ISSN: 1359-4311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.09.005. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431111004856.

[99] Ping Cui, Yi Man y Zhaohong Fang. «Geothermal Heat Pumps». En: *Handbook of Clean Energy Systems*. Ed. por Jinyue Yan. i. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014, págs. 1-22. ISBN: 9781118991978. DOI: 10.1002/9781118991978.hces041. URL: http://doi.wiley.com/10.1002/9781118991978.hces041.

[100] Lazaros Aresti, Paul Christodoulides y Georgios Florides. «A review of the design aspects of ground heat exchangers». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92 (2018), págs. 757-773. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.053. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302727.

[101] *Some unanswered questions [This Dynamic Earth, USGS]*. URL: https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/unanswered.html (visitado 29-09-2025).

[102] T. Kusuda y P. R. Archenbach. *8972 - Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States*. Inf. téc. USA: NBS - NATIONAL BUREAU OF STANDARDS REPORT, 1965, pág. 236.

Esta página está en blanco intencionalmente.

Glosario

A

ACEA Asociación de Constructores Europeos de Automóviles. 63

ACS agua caliente sanitaria. 54, 63, 99, 127

acuífero Es una formación geológica subterránea compuesta por rocas fracturadas o sedimentos permeables que almacenan y permiten la circulación del agua subterránea. Pueden ser libres o confinados, en función de si el techo de la formación es permeable o no, respectivamente. x, xiv, 18, 29–31, 33–35, 42, 45, 63, 77, 99, 105–109, 113–117, 122–125

AEC *United States Atomic Energy Commission.* 82

AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación. 118

API *American Petroleum Institute.* 62, 63

ATES *Aquifer Thermal Energy Storage.* x, 99, 106, 116

azeotrópica Mezcla de dos o más líquidos que tiene un punto de ebullición fijo y que, en estado de vapor, se comporta como si fuera una sustancia pura. Un ejemplo es el alcohol de 96° que es una mezcla azeotrópica de etanol y agua. Por tanto, no pueden separarse por destilación ordinaria al comportarse como una única sustancia. 132, 134

B

BC bomba de calor. 21, 99, 105, 116, 125, 126

BES Bombeo electrosumergible. 66

BHE *Borehole Heat Exchanger*. x, 99, 105, 107, 109, 111, 113, 115, 117, 119, 121, 123, 124

BOP *Blowout Preventer*. xiii, 60

brine Es una palabra inglesa que se traduce en español por salmuera. Sin embargo, el significado es mucho más amplio en geotermia. Hace referencia a refrigerantes secundarios de base acuosa. Normalmente, agua con un anticongelante, aunque en ocasiones excepcionales se pueden usar soluciones salinas. 99, 118, 139

C

CFCS *CloroFluoroCarburos.* 134

COP *Coeficient Of Performance.* 117, 129, 133

D

DTH *Down the Hole.* 104, 105

DTS Detección de Temperatura Distribuida. 86

E

EER *Energy Efficiency Ratio.* 129, 133

efluente Deriva del verbo efluir, que significa fluir o expulsar un líquido o gas hacia el exterior. Por lo tanto, un efluente es un líquido o gas que se vierte al exterior, procedente de un proceso industrial o urbano. x, 91–93, 95, 96, 105

EGS *Enhanced Geothermal Systems.* x, xiv, 17, 20–22, 81, 82, 84, 86, 88–90

EROI Tasa de Retorno Energético. 33

exergía Energía máxima de un sistema que se puede transformar en trabajo útil. Su nombre proviene del alemán *exergie* [97]. 133

G

géiser Es una fuente termal intermitente, en forma de surtidor. Su nombre proviene del ingles *geyser*, y este del islandés *geysir*. [96]. 15, 33, 65

H

HCFCS *HidroCloroFluoroCarburos.* 134

HDPE polietileno de alta densidad. 100, 120, 145
HDR *Hot Dry Rock*. x, xiv, 17, 22, 81–83
HFCS *HidroFluoroCarburos*. 134

I
IGME Instituto Geológico y Minero de España. 26

L
LANL *Los Alamos National Laboratory*. 82
LCA Análisis de Ciclo de Vida. 33
LHB *Late Heavy Bombardment* . 8, 12

M
MT magnetotelúricos. xiii, 45, 46

N
NBSM Normas Básicas de Seguridad Minera. 23

O
ORGS *Open Recirculation Geothermal Systems*. x, xiv, 99, 106, 115, 116

P
PP-R polipropileno. 100
PVC policloruro de vinilo. 100, 145

R
reología Es la rama de la física que se dedica al estudio de la deformación y el fluir de la materia en estado sólido o líquido. xiii, 9, 11, 61
RITE Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. 23, 134

S
Slinky En este contexto, se refiere a un intercambiador de calor formado por una tubería con forma de espiral helicoidal. Puede estar constituida por diferentes materiales, pero en geotermia suele estar fabricada de plástico. Se instala verticalmente u horizontalmente. Con las espirales superpuestas formando un plano o separadas formando una estructura helicoidal. xiv, 99, 102, 103, 118
SMOW *Standard Mean Ocean Water*. 43
sondeo Es un taladro realizado en el suelo con fines de exploración o para explotar algún recurso natural. Su profundidad es variable y va desde algunos metros a varios kilómetros. x, xiii–xv, 9, 14, 21, 23, 25, 27, 29–31, 33, 34, 49, 50, 55, 56, 59–66, 77, 99, 101, 103–107, 115, 118–124

T
trépano Es una herramienta de corte rotatoria que se utiliza para cortar o triturar la roca. La rotura se produce por impacto o por corte, dependiendo de la tecnología de perforación empleado. 59
TZIM *Thermally Degradable Zonal Isolation Materials*. xiv, 88, 89

U
UE Unión Europea. 63, 118, 133, 134

V
VCDT *Vienna Canyon Diablo Troilite*. 43

Y
Y-tool Bombeo por derivación en Y de BES. xiii, 66, 67

Copyright © 2025 – Roberto Arrranz-Revenga & Juan Herrera Herbert.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE MINAS
Y ENERGÍA