



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

“Estudio sobre el diseño y evolución de un sistema geotérmico somero. Influencia de los parámetros térmicos del terreno.”

Autor: Eva Montes Martínez

Tutores: Teresa Alonso Sánchez

Miguel Ángel Rey Ronco

Oviedo, junio de 2022



ÍNDICE

1. OBJETO DEL PROYECTO.....	6
2. INTRODUCCIÓN.	7
3. LA GEOTERMIA Y OTRAS DEFINICIONES ASOCIADAS.	7
4. ORIGEN DE LA GEOTERMIA.	11
5. CLASIFICACIÓN DE LOS YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS.	13
6. APLICACIONES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.	17
6.1. APLICACIONES INDUSTRIALES.....	18
6.2. APLICACIONES TÉRMICAS.	20
7. GEOTERMIA SOMERA.	24
8. INSTRUMENTOS PARA CAPTACIÓN DEL CALOR SOMERO DEL SUBSUELO.	27
8.1. SONDEOS DE CAPTACIÓN DE AGUA SOMEROS.....	27
8.2. BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA.....	27
8.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR (BHE).....	29
8.4. COLECTORES HORIZONTALES ENTERRADOS.....	32
8.5. SONDAS GEOTÉRMICAS.....	33
9. INVESTIGACIÓN DE RECURSOS DE MUY BAJA TEMPERATURA.	35
9.1. ESTUDIOS PREVIOS Y SONDEOS.....	37
10. PROGRAMA DE SIMULACIÓN EED.	39
11. REALIZACIÓN EXPERIMENTAL.	45
11.1. ANÁLISIS EED PARA SIMULACIÓN DE PROFUNDIDADES DEL SONDEO.....	46
12. RESULTADOS.....	61
12.1. INFLUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA EN LA LONGITUD FINAL DEL SONDEO.	61
12.2. INFLUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN LA TEMPERATURA MEDIA DEL FLUIDO EN EL AÑO 25 DE SIMULACIÓN.	64
12.3. COP DE LA BOMBA.	67
12.4. OPTIMIZACIÓN DE LA LONGITUD DEL SONDEO.....	68
13. CONCLUSIONES.....	69
14. BIBLIOGRAFÍA.	71



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura interna de la Tierra. (Fuente: https://www.google.com/search?q=estructura+interna+de+la+tierra&rlz=1C5CHFA_enES875ES875&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi1_5mEzpb3AhVKCxoKHWnYC4kQ_AUoAXoECAIQAw&biw=632&bih=664&dpr=2#imgrc=P0WmG2CgLTdVzM)	8
Figura 2. Parámetros térmicos según el tipo de roca. (Fuente: Paud, D. Geothermal energy and heat storage. 2002)	10
Figura 3. Temperaturas a grandes profundidades. fuente: Enrique Orche.....	12
Figura 4. Rangos de la temperatura terrestre según profundidad. Fuente: https://emtic.educarex.es/crea/biologia/tierra_interior_dinamico/el_puzzle.html	12
Figura 5. Yacimientos geotérmicos según Tª. Fuente: https://www.google.com/search?q=yacimientos+geotermicos+segun+su+temperatura&rlz=1C5CHFA_enES875ES875&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjFjMHgvM33AhXmz4UKHRFUAmQQ_AUoAXoECAEQAw&biw=806&bih=664&dpr=2#imgrc=Ht	17
Figura 6. Diferentes aplicaciones para la energía geotérmica. Fuente: Enrique Orche.	18
Figura 7. Planta de ciclo binario. Fuente: https://www.igme.es/geotermia/yacimientos-produccionelectricidad.htm	19
Figura 8. Configuración de una planta flash. Fuente: https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno13/geotermia/Introduccion.htm	20
Figura 9. instalación geotérmica con sondeos dobles. Fuente: https://www.google.com/search?q=sondeos+dobles+geotermia&client=firefox-b-d&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj3reWp8uP3AhUFQBoKHUG8DpoQ_AUoAnoECAEQBA&biw=1314&bih=735#imgrc=tIINsT6opk8g1M	23
Figura 10. Cimientos geotérmicos. Fuente: https://teoriadeconstruccion.net/blog/cimentacion-termoactiva/ ..	24
Figura 11. Diferentes niveles de calor superficial. Fuente: Enrique Orche.	25
Figura 12. Esquema de yacimiento geotérmico de baja temperatura. (Fuente: IGME, 2019.).....	26



<i>Figura 13. Esquema de una instalación con bomba geotérmica. Fuente:</i> <i>https://www.construible.es/comunicaciones/comunicacion-diseno-bomba-calor-reversible-dual-refrigerante-natural-edificios-energia-casi-nula</i>	28
<i>Figura 14. Sonda geotérmica en U. Fuente: https://www.ferroplast.es/</i>	30
<i>Figura 15. Sección transversal de la sonda geotérmica BHE con tubos en U (Fuente: J. Acuña y B. Palm, Proceedings World Geothermal Congress 2010)</i>	31
<i>Figura 17. Colectores horizontales enterrados. Fuente: https://feccjusa.es/geotermia/</i>	33
<i>Figura 18. Sondos geotérmicas. Fuente:</i> <i>https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calor_y_Frio_Renovables_Geotermia_30012012_global_196afed7.pdf</i>	34
<i>Figura 19. Esquema del equipo que forma un ensayo TRT. Fuente: https://www.geotermiavertical.es/test-de-respuesta-termica/</i>	37
<i>Figura 20. Diferentes métodos de perforación. fuente: https://www.hidroambientecr.com/notas/metodos-de-perforacion</i>	39
<i>Figura 21. Menús "Input" y "Cost data" del programa EED.</i>	40
<i>Figura 22. Menús para obtener soluciones y tipos de unidades en el programa EED.</i>	41
<i>Figura 23. Opciones del sondeo (geometría) y de materiales que atraviesa el sondeo.</i>	42
<i>Figura 24. Resistencia térmica del sondeo y fluido caloportador.</i>	43
<i>Figura 25. Demanda base.</i>	44
<i>Figura 26. Características del fluido caloportador del sondeo.</i>	45
<i>Figura 27. Datos que se mantendrán ctes en la simulación: la Tª superficial del terreno y el flujo geotérmico.</i>	46
<i>Figura 28. Representación de la influencia de la conductividad térmica de distintos materiales en la longitud final del sondeo.</i>	61



Figura 29. Conductividades y capacidades caloríficas vs longitudes del sondeo..... 63

Figura 30. Influencia de la conductividad en la temperatura mínima anual en el año 25 de la simulación. 65

Figura 31. Influencia del espaciado entre sondeos y la profundidad que se necesita para los mismos..... 68



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Recursos de baja T^a. Fuente: Enrique Orche</i>	15
<i>Tabla 2. Obtención de diferentes longitudes a partir de diferentes valores de conductividad según el material.</i>	62
<i>Tabla 3. Relación entre las capacidades caloríficas de un mismo material y las longitudes alcanzadas</i>	64
<i>Tabla 4. Simulaciones para obtener las temperaturas medias del fluido</i>	66
<i>Tabla 5. Resultados para el COP de la bomba en calizas en el año 5</i>	67
<i>Tabla 6. Resultados para el COP de la bomba en calizas en el año 25</i>	68



1. OBJETO DEL PROYECTO.

El presente trabajo tiene como fin estudiar cómo influyen los parámetros térmicos del terreno tales como la conductividad o la capacidad calorífica volumétrica en elementos de diseño de una instalación geotérmica somera. En concreto, la longitud del sondeo o la temperatura que va a tener el fluido geotérmico, en este caso monoetilenglicol.

Para ello se considerarán unas determinadas condiciones para hacer las simulaciones: una temperatura superficial fija, un mismo fluido caloportador e igual flujo de calor geotérmico en todos los casos.

A estos valores se le irán añadiendo unos valores de conductividad y capacidad calorífica que serán propios de cada material.

Con todo ello, como se dijo anteriormente se irán haciendo dos tipos de cálculos: longitud del sondeo y temperatura del fluido.

Por otro lado, se darán unas referencias teóricas sobre geotermia somera: definiciones y origen, aplicaciones e instrumentación principalmente.



2. INTRODUCCIÓN.

La geotermia aprovecha el calor procedente del interior de la Tierra, siendo por ello una fuente de energía renovable. Al lugar del que se extrae se le denomina “yacimiento geotérmico”.

No todos los yacimientos geotérmicos son iguales, siguen una clasificación en función de la entalpía que tengan que se explicará con detalle en apartados sucesivos. El tipo de yacimiento con el que se trabajará en este proyecto es de baja entalpía, para el que se describirán también los instrumentos propios de su medición tales como bombas de calor o intercambiadores, entre otros.

El trabajo queda organizado de la siguiente manera:

- Geotermia y otras definiciones asociadas.
- Origen de la geotermia.
- Aplicaciones de energía geotérmica.
- Geotermia somera.
- Instrumentos para la captación de calor somera.
- Investigación de recursos de muy baja T^a .
- Programa para el diseño de una explotación geotérmica somera EED.
- Realización experimental, resultados y conclusiones.

3. LA GEOTERMIA Y OTRAS DEFINICIONES ASOCIADAS.

Entrando más en detalle en la definición de geotermia y apoyándonos en las indicaciones de Enrique Orche, se denomina Energía geotérmica a la energía calorífica contenida bajo la superficie sólida de la Tierra. Esta energía cuando se extrae puede ser transformada y aprovechada en forma de energía eléctrica de manera limpia, siendo entonces la Geotermia aquella ciencia que se encarga del estudio del calor que procede del interior terrestre.



Consultando otras fuentes, como la norma aceptada por el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC), podemos definir esta energía como: “calor almacenado en las rocas, suelo y aguas subterráneas, sin diferenciar cuál sea su temperatura, profundidad y origen. No incorpora el calor encerrado en las masas de agua continentales o marinas.”

Manejando cifras actuales del alcance de la energía geotérmica, con la tecnología actual se puede llegar hasta los 350-400 metros de profundidad.

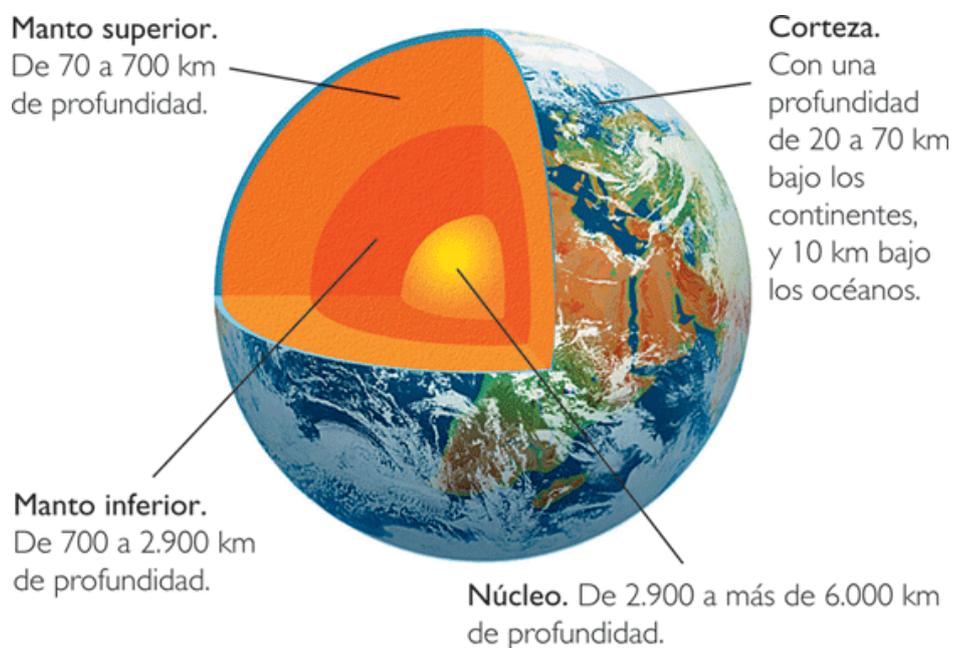


Figura 1. Estructura interna de la Tierra. (Fuente:

https://www.google.com/search?q=estructura+interna+de+la+tierra&rlz=1C5CHFA_enES875ES875&source=lms&tbnm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi1_5mEzpb3AhVKCxoKHWnYC4kQ_AUoAXoECAIQAw&biw=632&bih=664&dpr=2#imgrc=P0WmG2CgLTDVzM)

Los principales conceptos en los que debemos apoyarnos a la hora de hablar de la energía geotérmica son los siguientes:

- **Gradiente geotérmico:** es la temperatura que hay según la profundidad alcanzada en la corteza terrestre. Sus unidades de medida son °C/Km. Para conocerla debemos realizar sondeos el terreno. De media y en condiciones normales, esta temperatura aumenta en escalas de 2-4°C por cada 100 metros. Esto se mantiene estable hasta los 15 metros, a partir de ahí las temperaturas ya siguen otras variaciones menos constantes.



- **Conductividad térmica (λ):** varía en función del material y mide su capacidad de conducción del calor. Sus unidades de medida son $W/m \cdot C$. Un ensayo de Test de Respuesta Térmica (TRT) sobre un sondeo geotérmico, permite obtener la conductividad térmica media de los materiales cortados por el sondeo. Para ello, es necesario un equipo, llamado equipo TRT que se sitúa cercano al sondeo, y que se conecta hidráulicamente a las sondas geotérmicas introducidas en el sondeo. Se calienta con unas resistencias eléctricas el fluido que circula por el interior de las sondas y del equipo del ensayo se obtiene la conductividad térmica mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot p}$$

Donde:

- Q = Potencia inyectada en el terreno que es la aportada por las resistencias eléctricas del equipo. Se obtiene como el producto de la potencia por metro de perforación que se quiere disipar por la longitud del sondeo.
 - L = Longitud de la perforación.
 - Si se representa en una escala logarítmica la evolución temporal de la diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada del fluido en el sondeo, y la temperatura de salida del fluido se observa que es una recta que tiene una pendiente p, luego p = Pendiente de la recta.
- **Capacidad calorífica (C_p):** nos permite conocer hasta qué punto un determinado material puede soportar cambios de temperatura mientras se le aporta calor. Es uno de los parámetros más importantes, pues nos permite determinar la caracterización del potencial energético del terreno.
 - **Energía geotérmica somera:** es el calor que reside a poca profundidad en suelos, rocas y aguas subterráneas. Se considera una energía renovable y, por tanto, inagotable y que no contamina.
 - **Difusividad térmica:** es particular de cada material. Representa la velocidad



de reacción de un material concreto cuando se produce una variación de T^a .
Unidades: mm^2/s .

La siguiente tabla muestra los valores de estos parámetros térmicos que se pueden encontrar en la bibliografía.

TIPO DE ROCA	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica
	min.	valor típico	max.	(MJ/m ³ K)
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3 - 2,6
Diorita	2,0	2,6	2,9	2,9
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1 - 3,0
Peridotita	3,8	4,0	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
Rocas metamórficas				
Gneis	1,9	2,9	4,0	1,8 - 2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2,0
Metacuarcita		aprox. 5,8		2,1
Micasquistos	1,5	2,0	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2 - 2,5
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4,0	2,1 - 2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2 - 2,3
Cuarcita	3,6	6,0	6,6	2,1 - 2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6 - 2,8
Rocas arcillosas, limosas	1,1	2,2	3,5	2,1 - 2,4
Rocas no consolidadas				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4 - 1,6
Grava, saturada de agua		aprox. 1,8		aprox. 2,4
Morrena	1,0	2,0	2,5	1,5 - 2,5
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3 - 1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5,0	2,2 - 2,9
Arcilla / limo, seco	0,4	0,5	1,0	1,5 - 1,6
Arcilla / limo, saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6 - 3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5 - 3,8
Otros materiales				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2,0	aprox. 1,8
Hielo (-10 °C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		-
Aire (0 - 20 °C, seco)		0,02		0,0012
Acero		60,0		3,12
Agua (+10 °C)		0,58		4,19

Figura 2. Parámetros térmicos según el tipo de roca. (Fuente: Paud, D. Geothermal energy and heat storage. 2002)



4. ORIGEN DE LA GEOTERMIA.

Durante los primeros instantes tras el surgimiento de nuestro planeta, también comenzó a originarse el calor terrestre. Del conjunto primigenio formado por gas y polvo calientes que constituía la Tierra al principio, surgió tras su posterior enfriamiento una corteza terrestre que actuó como almacén de una gran cantidad de calor.

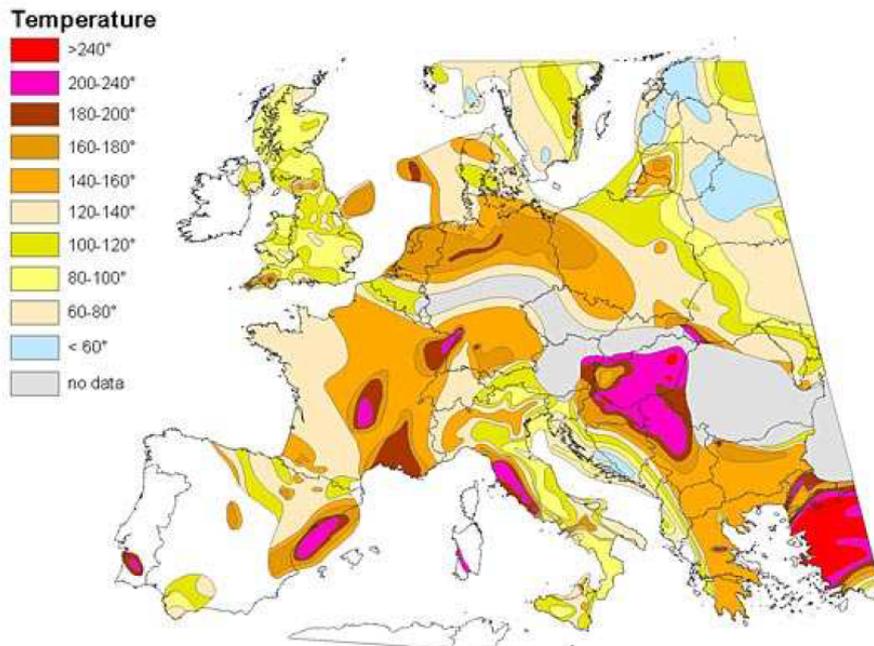
Actualmente, ese calor terrestre se ve fomentado por vario fenómenos naturales:

- Movimientos tectónicos de las placas que constituyen el núcleo y el manto.
- Desintegración de isótopos radiactivos en la corteza y el manto terrestres.
- Cristalización del núcleo, lo que provoca una liberación de calor.

Entrando más en detalle en las características de la corteza terrestre:

- La corteza tiene de media unos 1000 °C en la zona más alta del manto. Temperatura que desciende hasta los 15-20 °C en la superficie.
- En el manto la temperatura oscila entre los 1000-3000 °C, el cual se va solidificando a media que se acerca a la corteza.
- Por último, en el núcleo, la temperatura asciende 4000 °C.

En resumen, en nuestro planeta un 0,1% de su total se encuentra por debajo de los 100 °C. El 99% restante se encuentra a temperaturas por encima de los 1000 °C.



TEMPERATURA A 5.000 m DE PROFUNDIDAD

Figura 3. Temperaturas a grandes profundidades. fuente: Enrique Orche.

Este calor circula por las distintas capas del planeta hasta que asciende a la superficie y se disipa al espacio. Esta variación de temperatura es uno de los rasgos más influyentes en la energía geotérmica, se define como **gradiente geotérmico**, definido brevemente al comienzo del trabajo.

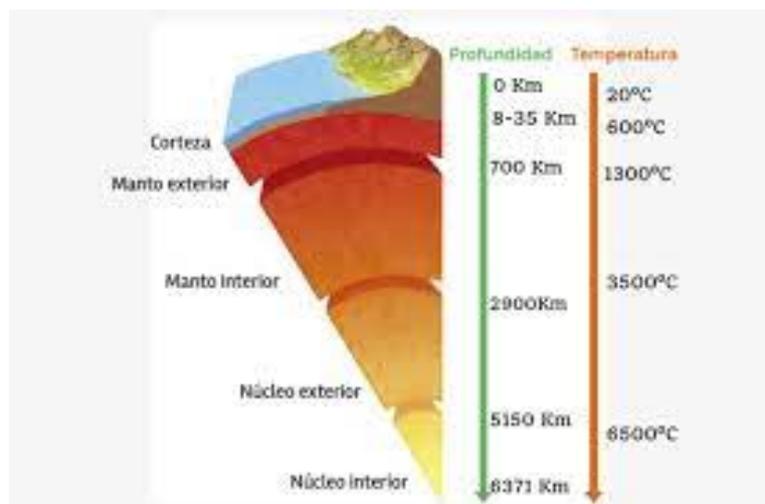


Figura 4. Rangos de la temperatura terrestre según profundidad. Fuente: https://emtic.educarex.es/crea/biologia/tierra_interior_dinamico/el_puzle.html



Respecto a los tipos de yacimientos geotérmicos, existen diferentes tipos según las características que agrupan. Para identificar estas características, primeramente, es necesario determinar su ubicación para así poder determinar su valor económico. Una vez que lo tenemos localizado, se definirán sus características. El resultado de la valoración de todo este conjunto nos dará distintos tipos de yacimientos geotérmicos. En el caso de que todos los rasgos fuesen favorables, nos encontraríamos entonces ante un yacimiento que permite su explotación de forma económica y que es potencialmente viable.

5. CLASIFICACIÓN DE LOS YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS.

Los yacimientos geotérmicos pueden agruparse principalmente en yacimientos de alta temperatura y baja temperatura. Para cumplir el requisito de ser yacimiento geotérmico deben cumplirse unos parámetros económicos y geológicos.

Desde un punto de vista geológico, un yacimiento geotérmico de alta temperatura debe presentar una serie de características:

- Contar con un foco de calor activo y un sello que evite el escape de fluido.
- Casi de forma paralela a los yacimientos de petróleo, debe contar también con una capa permeable e impermeable, de forma que el fluido puede moverse en una especie de almacén geotérmico en fase líquida o vapor.
- Desde un punto de vista económico, que una determinada localización sea considerada yacimiento geotérmico no lleva implícito que sea económicamente rentable. Para que un recurso sea considerado rentable a nivel económico influyen su localización (tanto en suelos como en rocas y acuíferos) y su potencial energético. Por tanto, una vez que se verifican todas estas condiciones favorables, se puede decir entonces que se tiene un yacimiento geotérmico que puede ser explotado de forma económica es viable económica y energéticamente.



Luego, una vez que el recurso y yacimiento geotérmico ya está estudiado y definido, se puede pasar a su clasificación por temperaturas:

- ***Yacimientos de muy baja temperatura.*** Con temperaturas inferiores a los 30 °C:

Los recursos geotérmicos de muy baja temperatura abarcan la totalidad de la superficie terrestre (descartando las masas de agua continentales, mares y océanos). El principio que se sigue es muy sencillo: las capas subterráneas del terreno que se encuentran como máximo a 400 m de profundidad, almacenan el calor que se genera en el interior de la Tierra. Este calor de muy baja temperatura puede ser empleado en sistemas de climatización para viviendas u otros de edificios de pequeño tamaño.

Como comentábamos, esta energía térmica tiene su origen en el núcleo terrestre, pero tiene mayor importancia la variación de la temperatura ambiente. Es un flujo que se desplaza de manera continua y en una sola dirección, ascendiendo por el resto de las capas intermedias hasta llegar a la superficie y dispersarse por el espacio. No obstante, este flujo puede sufrir variaciones térmicas como consecuencia de las interacciones entre el terreno y la atmósfera.

Las estimaciones dicen que en las cotas más cercanas a la superficie (hasta 0,5 m de profundidad) las variaciones tienen lugar a diario, comenzando a estabilizarse aproximadamente a partir de los 10 m (variaciones estacionales). Por debajo de esta profundidad, la temperatura ya se mantiene igual todo el año, con unos valores aproximados de entre 7-13 °C según sea la temperatura media anual del ambiente en la zona de estudio.

A partir de cierta profundidad es necesario establecer un nuevo principio debido al gradiente térmico: se supondrá un incremento de unos 3,3 °C por cada 100 m de descenso.



- **Yacimientos de baja temperatura.** Los yacimientos de esta categoría requieren de condiciones menos exclusivas para darse:
 - La principal diferencia con los anteriores es que se dan en zonas estables de la corteza terrestre. En estas zonas el gradiente geotérmico no presenta anomalías.
 - Se requieren materiales de naturaleza permeable que puedan retener y permitir la circulación de fluidos que extraigan el calor a la roca. Estos materiales deben situarse a una profundidad de aproximadamente 1,5-2,5 km.
 - En estos yacimientos influyen algunos términos económicos para su definición. El calor procedente de estos yacimientos debe emplearse directamente en la aplicación final, es decir, su aprovechamiento debe ser directo. Esto hace necesaria una inversión importante en las instalaciones de consumo que deben ubicarse en las zonas próximas a la fuente de calor.

FASE	FINALIDAD	ETAPAS	OBJETIVOS	TÉCNICAS EMPLEADAS
Documentación, Estudios geológicos e hidrogeológicos	Selección y Evaluación de objetivos de explotación	Documentación	Antecedentes	Geología, geofísica, hidrogeología
			Planificación etapas posteriores	
		Evaluación de información y selección de áreas	Definir los almacenes explotables	Geología, hidrodinámica, hidroquímica, evaluación de almacenes
Seleccionar puntos favorables				
Definir el modelo geotérmico				
Estudio de almacenes	Confirmar las hipótesis geológicas y definir condiciones de extracción del recurso	Perforación de sondeos profundos	Confirmar el modelo previsto	Sondeos profundos, diagráfias, pruebas de producción, ensayos sobre testigo
			Seleccionar almacenes	
		Evaluación del yacimiento	Establecer las características hidráulicas del almacén	Bombes de larga duración, diagráfias, evaluación de almacenes, hidroquímica
			Estimar el potencial térmico explotable	
Viabilidad Técnico-Económica	Definir las condiciones de utilización y estudiar la viabilidad económica de la explotación	Estudio térmico	Elegir los usuarios	Estudios de mercado, análisis energético de sistema de utilización
			Definir el aporte geotérmico y seleccionar el sistema	
		Balance energético, económico y financiero	Definir los parámetros económicos del sistema	Análisis energético, cálculo de inversiones y costes, estudios de financiación
			Montaje jurídico y administrativo	

Tabla 1. Recursos de baja T°. Fuente: Enrique Orche.



Estos yacimientos son muy típicos de valles sedimentarios. Los valles de este tipo son jóvenes y cuentan con unas composiciones de carácter químico que los hacen favorables como fuente de calor terrestre.

- **Yacimientos de media temperatura.** Con temperaturas entre 90 y 150 °C:

Al igual que los anteriores, los yacimientos de media temperatura también se pueden encontrar en valles de tipo sedimentario. Otros requisitos geológicos es que presenten discontinuidades y fallas con el fin de facilitar el ascenso del agua hacia la superficie. Un ejemplo de estos fenómenos son los yacimientos de aguas termales.

Los yacimientos de media temperatura no solo comparten rasgos con los yacimientos de baja temperatura, si no también con los de alta, ya que tienen en común los mismos medios geológicos. Esto quiere decir que necesitan dos requisitos: por un lado, una intrusión magmática para originar el calor y, por otro, un acuífero que ayude a mantenerlo.

- **Yacimientos de alta temperatura.** Con temperaturas por encima de los 150 °C. Las condiciones de tipo geológico que se deben de dar para originar un yacimiento de este tipo son:
 - Situarse en una zona considerada inestable. En esta ubicación podemos tener de forma asegurada un foco de calor activo que sea fuente a su vez de un flujo de calor.
 - Debe encontrarse a una profundidad de entre 1,5-2 km en capas de materiales permeables o capas que ejerzan de almacén permitiendo la circulación de los fluidos capaces de extraer el calor de la roca.
 - Para que esta energía en forma de calor no se disipe, es necesario que los fluidos permanezcan en profundidad. Esto se consigue con materiales o capas impermeables que sellen los almacenes.

En otras palabras, el lugar de ocupación de este tipo de yacimientos deberá contar con una actividad geológica intensa, sismicidad y vulcanismo en los límites de las



placas tectónicas, con acuíferos cuya agua procedente de las rocas calientes permeables avance juntamente con el calor hacia una zona de recarga superficial. En esta zona de recarga el agua de los pozos termales es reemplazada. La parte superior del acuífero cuenta además con una zona impermeable que retiene el agua para que no escape.

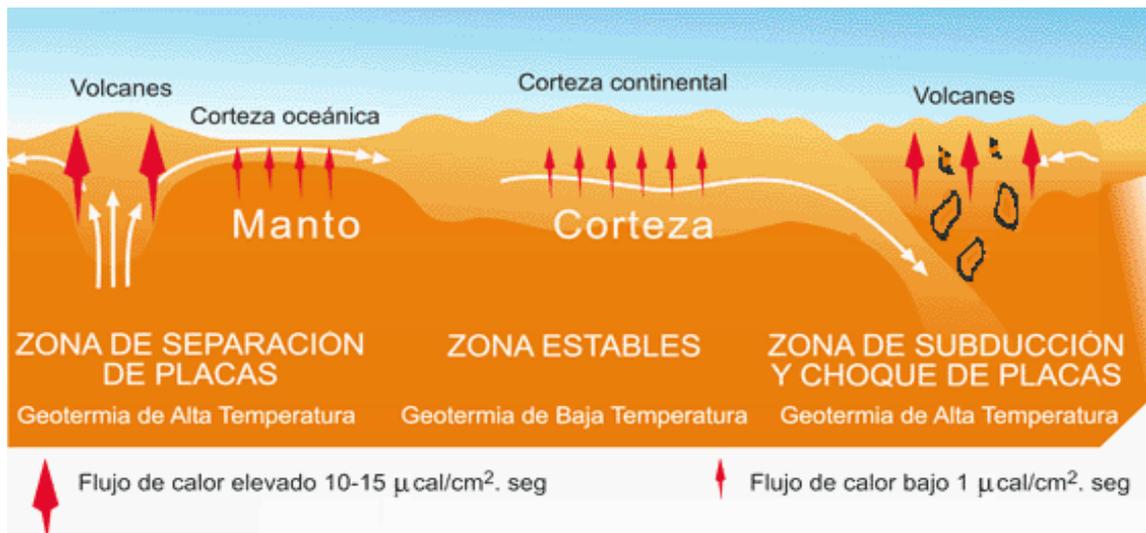


Figura 5. Yacimientos geotérmicos según T^a . Fuente: https://www.google.com/search?q=yacimientos+geotermicos+segun+su+temperatura&rlz=1C5CHFA_enES875ES875&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjFjMHgvM33AhXmz4UKHRFUAmQQ_AUoAXoECAEQAw&biw=806&bih=664&dpr=2#imgrc=Ht

6. APLICACIONES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.

Los usos que podemos dar a esta energía son muy variados y dependen de la cantidad de calor existente, concepto que denominamos antes como entalpía (energía intercambiada entre sistemas expresada en kcal/kg o en kJ/kg).

Es erróneo pensar que el calor se puede medir directamente del terreno, nos ayudamos de factores directamente relacionados con él, como son la entalpía y la temperatura. Con ayuda de sondas geotérmicas podemos medir dichos valores de forma precisa y así saber qué utilidades podemos asociar a los yacimientos. Una clasificación esquemática de las aplicaciones que pueden tener los fluidos hidrotermales en función de su temperatura podría ser la siguiente:

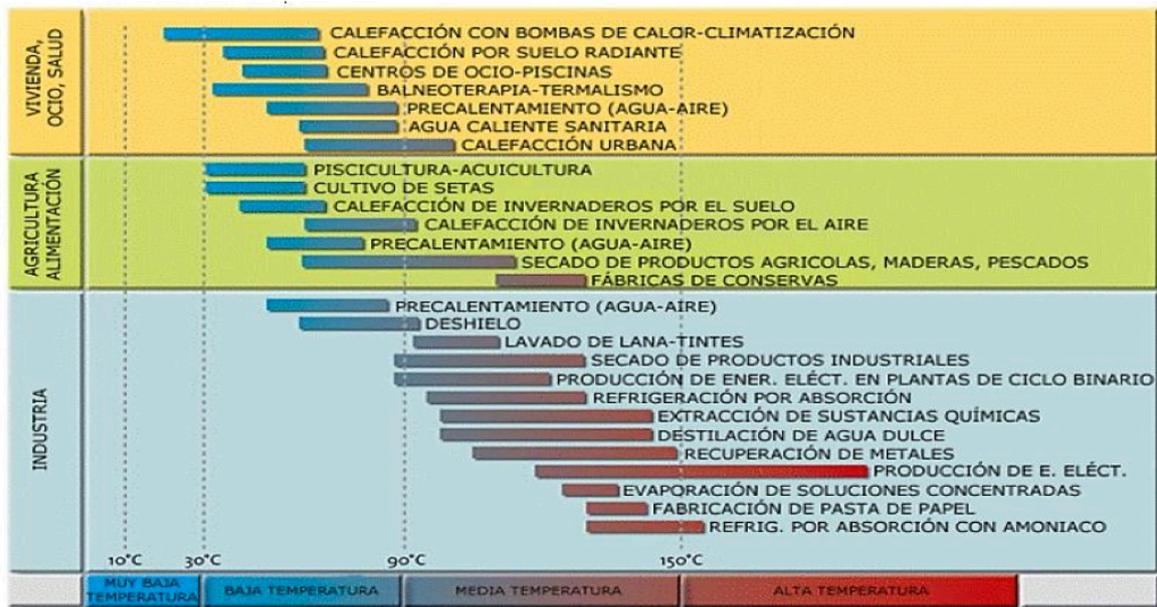


Figura 6. Diferentes aplicaciones para la energía geotérmica. Fuente: Enrique Orche.

Tal y como se ve en la imagen, se diferencian de forma clara dos posibles vías de aprovechamiento para esta energía: generación de energía eléctrica o fines térmicos

6.1. APLICACIONES INDUSTRIALES.

A este tipo de aplicaciones se destinan los yacimientos de alta/muy alta temperatura, con altas capacidades caloríficas.

El consumo específico de la planta crece conforme disminuyen los niveles térmicos de estos recursos. Esto se traduce a su vez en una disminución del rendimiento neto.

En cuanto al método de producción, se emplean tanto turbinas de vapor convencionales que siguen el principio de Rankine como plantas de ciclo binario, que se describirán más adelante con detalle, ya que dentro de cada una también hay más clasificaciones según diferentes propiedades y ubicaciones del fluido geotermal.



- PLANTAS DE CICLO BINARIO:

De partida este tipo de plantas exigen que el fluido cuente con unas características determinadas. Funcionan bien los yacimientos con buenas propiedades salinas y/o altas temperaturas (rango 120-180°C).

El método de explotación se basa en el aprovechamiento del poder calorífico del fluido principal de la corriente geotermal. Este poder calorífico es transportado al fluido secundario que contará con unas características orgánicas que faciliten y favorezcan el comportamiento termodinámico (alta presión de vapor y bajo punto de ebullición a temperaturas no muy altas). Siguiendo un principio común en la generación de energía, el vapor que se genera en este proceso se utiliza para accionar una turbina, luego se enfriará y se condensará.

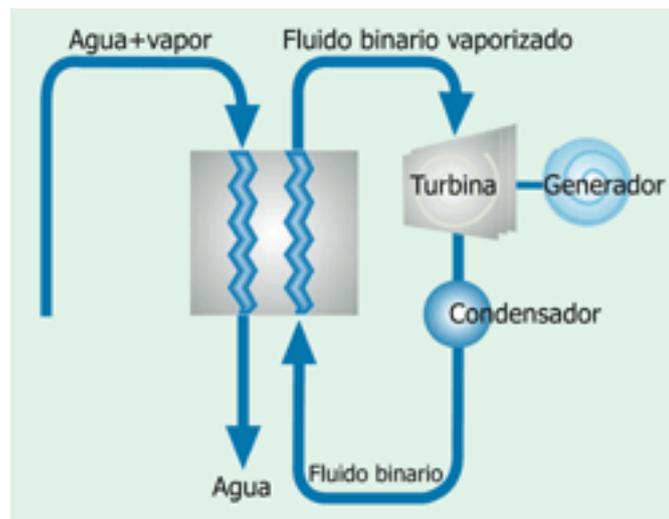


Figura 7. Planta de ciclo binario. Fuente: <https://www.igme.es/geotermia/yacimientos-produccionelectricidad.htm>

- PLANTAS DE VAPOR SECO:

Su concepto es más sencillo: simplemente se explota el vapor que emerge de las fracturas del terreno originadas de manera natural, sin intervención humana. Al igual que en el caso anterior, el vapor pasa a las turbinas para generar energía eléctrica.



La configuración es, por tanto, muy sencilla: se dispondrán unos sondeos o pozos de captación que recojan el agua mezclada con vapor hasta llevarla sobre el terreno. Allí le espera un separador vapor-agua que los separará conduciendo el vapor hacia la turbina que generará electricidad. Tras esto, el vapor se condensa y el fluido geotérmico se vuelve a introducir para reiniciar el proceso. Este sería el método más común, conocido como ciclo directo con condensación.

No obstante, existe otra alternativa de ciclo directo sin condensación en el que el vapor se libera directamente a la atmósfera tras dejar las turbinas. Tiene como inconveniente que la eficiencia disminuye respecto al otro proceso

- PLANTAS FLASH:

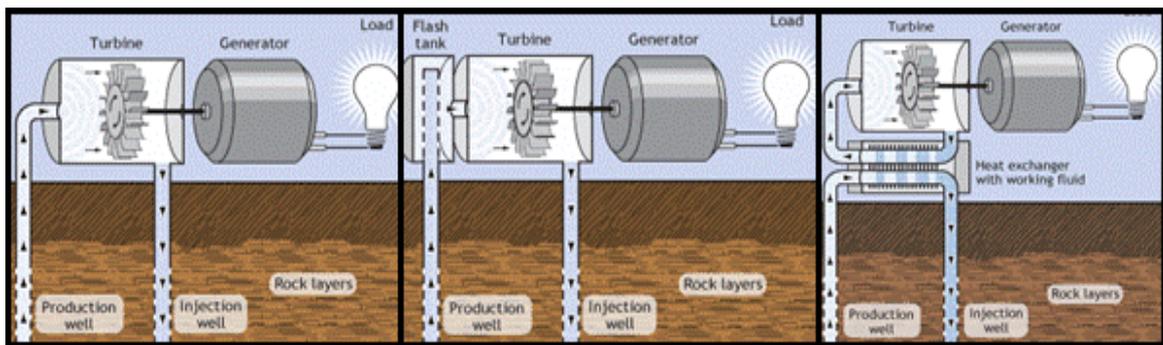


Figura 8. Configuración de una planta flash. Fuente:

<https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno13/geotermia/Introduccion.htm>

En este caso el fluido no tiene características similares a los casos anteriores, ya que se va a encontrar en estado líquido-vapor por el estado de saturación que tiene debido a la T^a . Como hemos visto en los casos anteriores, el estado idóneo para el aprovechamiento de energía es en estado de vapor, por lo que en este caso será necesaria una etapa adicional para segregar ambos estados con separadores de vapor/agua, de donde obtendremos el vapor con el que finalmente generaremos energía eléctrica.

6.2. APLICACIONES TÉRMICAS.

Para este caso nos vamos a centrar en los yacimientos de baja y media temperatura. Estos yacimientos cuentan con la ventaja de que se encuentran por toda la superficie terrestre (menos océanos y otras aguas continentales), de forma



que se pueden aprovechar de manera casi directa, al contrario de lo que ocurría en los yacimientos de alta o muy alta temperatura, que eran menos comunes y dificultaba por tanto su explotación.

Al estar extendidos por toda la superficie, esto ha facilitado su explotación desde la antigüedad hasta la actualidad de forma directa, por ejemplo: aguas domésticas, balnearios de aguas termales, acuicultura, industria, residencias...

Como sus aplicaciones tienen diferentes naturalezas, dentro de las aplicaciones térmicas existe a su vez otra clasificación en función de las áreas a las que se destinan: sector industrial y sector residencial.

- **Sector industrial:**

El campo industrial requiere la producción de grandes cantidades de energía que serán empleadas en diferentes procesos de producción.

Como sería desviarse de la temática principal del trabajo, no se entrará en detalles de su utilidad.

- **Sector residencial:**

Los sistemas geotérmicos cada vez ocupan más espacio a la hora de sustituir a los recursos fósiles (gas o derivados del petróleo), siendo una opción renovable y más respetuosa con el planeta.

Para el sector residencial se destinan yacimientos de baja temperatura, ya que la demanda de energía que requieren no es muy elevada y para servicios como ACS o climatización es suficiente. Para instalaciones de este tipo en las viviendas suelen instalarse radiadores, suelo radiante o sistemas de aire para climatización. Se detallan a continuación los sistemas más empleados en este sector, clasificados según la cantidad de energía que se demande y la disposición:



- **Calefacción de distrito o “District Heating”:**

Este sistema exige una curva de demanda más o menos constante a lo largo del año con el fin de maximizar el rendimiento de la instalación geotérmica. Aunque también serán determinantes otros aspectos como la ubicación y la temperatura media de esa zona. Todo este conjunto definirá la potencia térmica que va a ser requerida por los usuarios.

El sistema estará formado por una combinación de un sistema abierto (abastece de ACS) y un sistema cerrado (desplaza el fluido por el sistema de climatización).

Pueden instalarse en una sola vivienda o en un conjunto. Los más destacados son la bomba de calor, los colectores horizontales enterrados y las sondas geotérmicas, que se detallarán a continuación en el apartado 8.1. No obstante, dentro de esta instrumentación para calefacción de distrito también se encuentran:

- **Sondeos dobles:**

Se trata de un sistema abierto de dos sondeos, uno de inyección y otro de extracción, este último llevará además una cierta desviación para que el nivel térmico del fluido no cambie. Los sondeos se colocan normalmente a cierta profundidad en el terreno, aunque también pueden encontrarse en zonas más superficiales.

El funcionamiento es como sigue: una bomba introduce el fluido en el sondeo de inyección hacia el intercambiador de calor. Una vez aquí, el fluido residual sale con una temperatura menor y es expulsado por el sondeo de extracción.

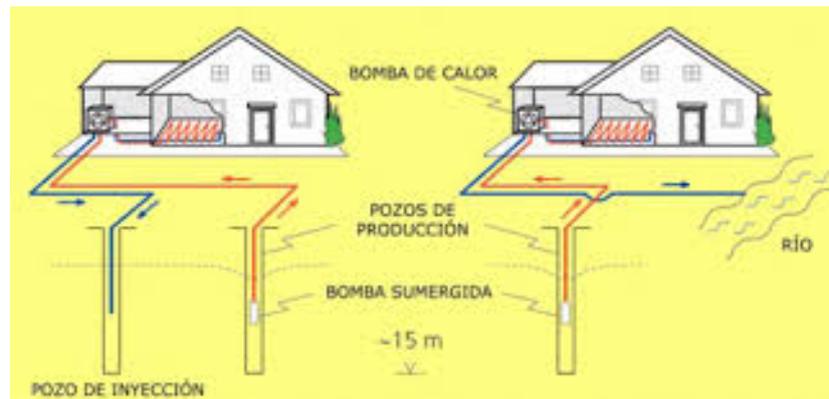


Figura 9. instalación geotérmica con sondeos dobles. Fuente: https://www.google.com/search?q=sondeos+dobles+geotermia&client=firefox-b-d&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj3reWp8uP3AhUFQBoKHUG8DpoQ_AUoAnoECAEQBA&biw=1314&bih=735#imgsrc=tlINsT6opk8g1M

- **Sondeos de captación de agua someros:**

El principal requisito para estos sistemas es la existencia de una capa permeable en el terreno. Esto facilitará la explotación de la capa freática con dos sondeos como en el caso anterior, uno de extracción y otro de inyección.

En cuanto a su configuración, se deben colocar aguas arriba y aguas abajo respectivamente, de forma que se evite que el agua de extracción se enfríe o influya en la capacidad de absorción si se encuentran muy próximos. El funcionamiento es muy sencillo y similar al caso anterior: nuevamente tendremos una bomba que extraerá la energía del agua de entrada para luego reenviarla (con su correspondiente descenso de la temperatura) al otro pozo de reinyección o, en su defecto, a una red fluvial cercana.

La potencia demandada marca el caudal necesario para el funcionamiento de los equipos. Se precisan de $6 \text{ m}^3/\text{h}$ para conseguir potencias de 20 kW. Para demandas superiores, de más de 75 kW, se deben localizar acuíferos someros debajo de la capa freática, suponiendo una mejora económica en la instalación del equipo.



- **Cimientos térmicos:**

Tienen unas similitudes con los cimientos estructurales por su ubicación y por estar fabricados con hormigón armado. Se emplean a 10-40 metros (hasta que se llegue a un estrato lo bastante resistente para soportar la carga del edificio) de profundidad como pilotes, pantallas, losas o muros de contención para mejorar las condiciones estructurales del terreno, aunque solo pueden usarse en aquellas zonas del terreno base con baja capacidad portante.

Estos cimientos suponen una ventaja a la hora de colocar en un futuro una instalación geotérmica. En el interior del hormigón se encuentran unos tubos de polietileno por los que circula el fluido caloportador (agua con anticongelante) conectado a un circuito cerrado con bomba de calor o un circuito de refrigeración.

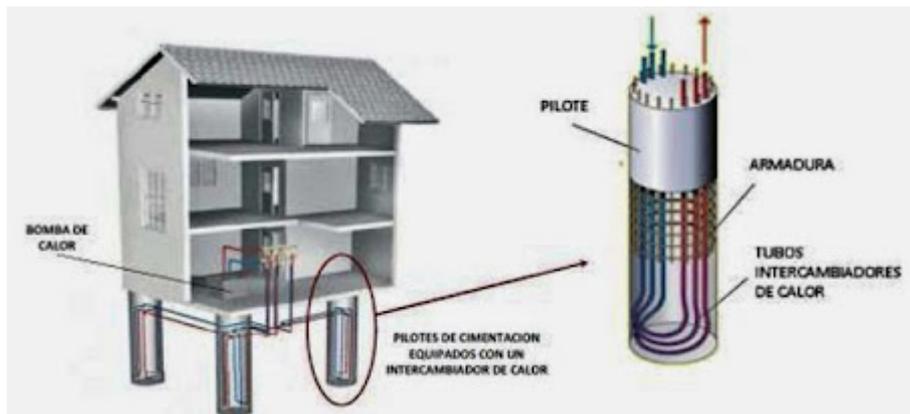


Figura 10. Cimientos geotérmicos. Fuente: <https://teoriadeconstruccion.net/blog/cimentacion-termoactiva/>

7. GEOTERMIA SOMERA.

La evolución en la valoración que ha experimentado la energía geotérmica somera es evidente en los últimos años. El aprovechamiento de la energía geotérmica era algo exclusivo de aquellas zonas, o lugares cercanos a ellas, que cumplían unos requisitos geológicos restrictivos que hacían favorable la transferencia de calor desde zonas calientes profundas hacia la superficie y su correspondiente aprovechamiento. Enfocando esto en España, el IGME inició sus primeras



investigaciones en el ámbito de los recursos geotérmicos en España en los años 70. Gracias a estas tareas de evaluación geológica y geoquímica de los rasgos termales del terreno, se pudo hacer una selección de las áreas de mayor interés en la geotermia y asignarles un potencial geotérmico. Las áreas más importantes que se sitúan en el sureste (Granada, Almería y Murcia), en el nordeste (Barcelona, Gerona y Tarragona), en el noroeste (Orense, Pontevedra y Lugo) y en el centro de la península ibérica (Madrid). Otras áreas de menor entidad situadas en Albacete, Lérida, León, Burgos y Mallorca también han sido investigadas.

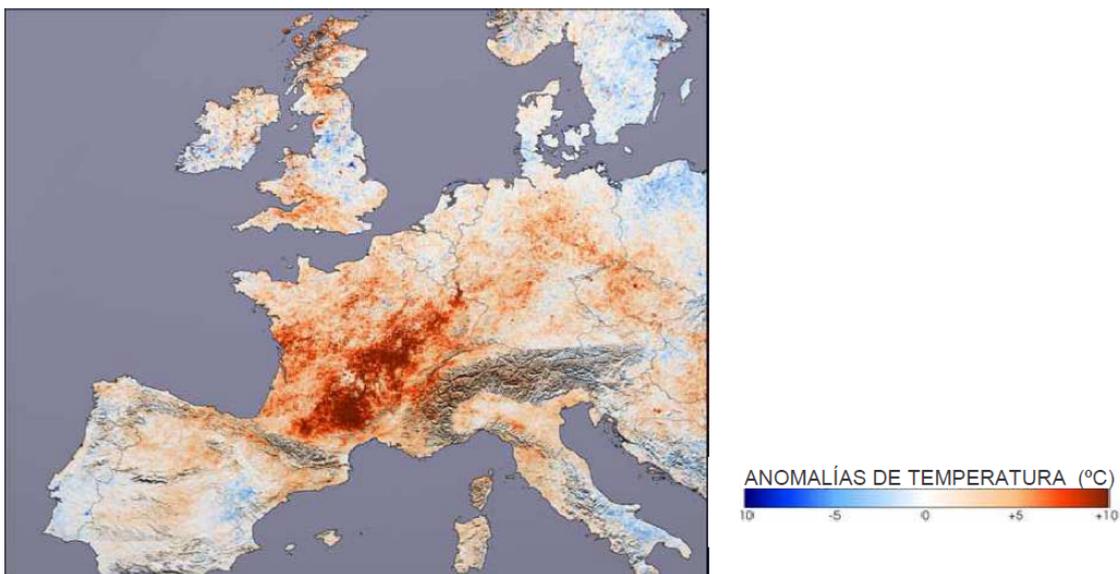


Figura 11. Diferentes niveles de calor superficial. Fuente: Enrique Orche.

La principal procedencia del calor somero es el calor del Sol. Este calor solar puede penetrar hasta 10 metros de profundidad. Por encima de éstos, la temperatura se mantiene normalmente sin variaciones entre unos 7-13°C. Además, la circulación de las aguas subterráneas puede ser escasa en el rango de los primeros 10-15 metros; esto facilita que el terreno sea capaz de almacenar calor y conservarlo sin sufrir variaciones. No obstante, con relación a este punto también es importante mencionar la influencia atmosférica. Los diferentes parámetros atmosféricos sí que pueden afectar a ciertas profundidades del terreno hasta los 0,5 metros, aunque de manera no brusca (variaciones de 7-13°C). También la inercia térmica es un parámetro importante en este proceso.



En la geotermia somera es muy importante tener en cuenta la influencia del calor solar, cuantificado en unos 2×10^{17} J, superando este valor en cuatro veces al del calor geotérmico. Gracias a esta energía la superficie terrestre se mantiene caliente a una temperatura de unos 15°C , sin afectar a los procesos internos del interior de la Tierra. (Llopis y Rodrigo, 2008. pp.16-17).

Parte de este éxito en su aprovechamiento se debe al desarrollo de la bomba de calor (en inglés, Geothermal Heat Pump), cuyo rango de trabajo oscila entre los $3-5^{\circ}\text{C}$. Gracias a la implementación de esta máquina las capas terrestres más superficiales (hasta los 200 primeros metros aproximadamente) pudieron ser explotadas, ya que, en cuanto a su temperatura, estos yacimientos se clasifican como yacimientos de muy baja temperatura, siendo éstas normalmente menores a 30°C , entrando así dentro del rango de trabajo de la bomba.

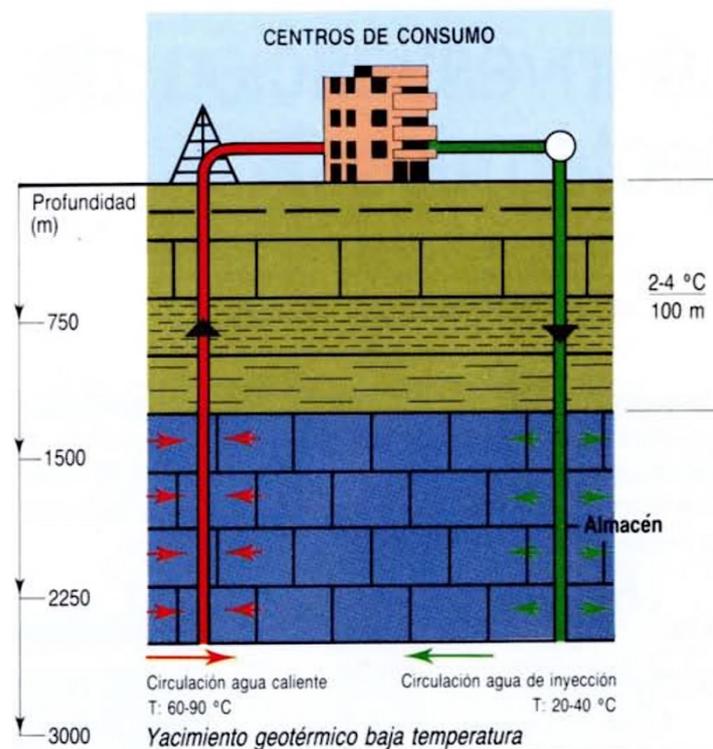


Figura 12. Esquema de yacimiento geotérmico de baja temperatura. (Fuente: IGME, 2019.)



8. INSTRUMENTOS PARA CAPTACIÓN DEL CALOR SOMERO DEL SUBSUELO.

8.1. SONDEOS DE CAPTACIÓN DE AGUA SOMEROS.

Se recurre a este sistema cuando el terreno cuenta con una permeabilidad elevada

8.2. BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA.

Un instrumento muy ligado a la geotermia somera es la bomba de calor geotérmica. Su invención ha hecho posible la explotación de los 200 primeros metros en forma de yacimientos de muy baja temperatura, es decir, menores de 30 °C. Su rango de trabajo se sitúa entre los 3-5 °C. Por todo ello la bomba de calor geotérmica o Geothermal Heat Pump (GHP) resulta fundamental para la geotermia somera.

En cuanto a su funcionamiento, se puede definir en palabras sencillas de la siguiente manera:

El objetivo de la bomba geotérmica es ser capaz de extraer el calor somero del subsuelo mediante el calentamiento de un fluido secundario de alta compresibilidad y bajo punto de vaporización, es decir, transporta el calor de un punto frío a otro caliente. Para que este calor pueda ser extraído, la temperatura de entrada debe ser mayor que la de retorno del circuito, para que así el sistema resulte rentable. No obstante, esta diferencia de temperaturas debe mantenerse dentro de un rango para que se considere que es aceptable, entre 4-6 °C aproximadamente. El salto térmico se sitúa en unos 10 °C.

Cuando la bomba de calor opera en modo de refrigeración, la transferencia de calor tiene lugar desde la zona que demanda frío hacia el ambiente que tiene una temperatura más elevada. Es decir, en verano extrae el calor de la vivienda y lo devuelve al terreno. En invierno ocurre el proceso inverso.



Esta temperatura vendrá definida, además, por la ubicación de la instalación (ya que será ésta la que determine la temperatura exterior) y el tipo de instalación con el que se trabaje).

La rápida extensión de las bombas de calor (sobre todo a nivel doméstico y comercial) también se debe a las virtudes que posee: no precisan instalación ni mantenimiento complicados o costosos, el personal que lo atiende no debe estar cualificado y, para el caso de la geotermia somera (nuestro caso de estudio) resulta más fácil de aplicar, ya que las áreas de terreno que cuentan con geotermia somera son más numerosas que las de baja y media temperatura. En resumen, es un aparato que hace posible transportar el calor de un foco frío a un foco caliente sin emplear una gran cantidad de trabajo. Además, en dichas instalaciones domésticas y comerciales su rendimiento se ve aumentado respecto a las convencionales, ya que la potencia de las mismas es más baja. Otra diferencia remarcable respecto a las convencionales es que las bombas geotérmicas trabajan con temperaturas constantes.

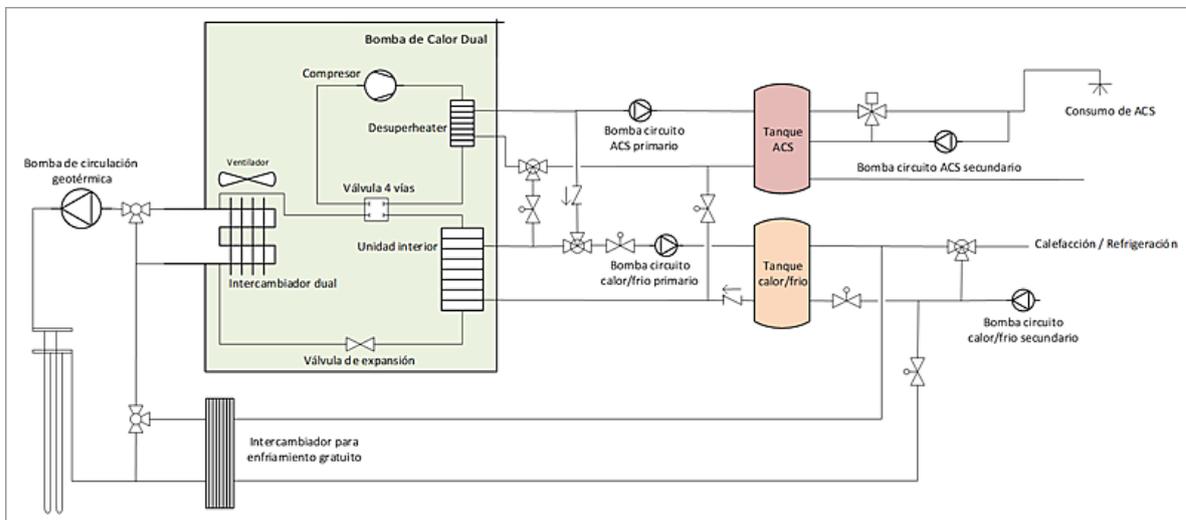


Figura 13. Esquema de una instalación con bomba geotérmica. Fuente: <https://www.construible.es/comunicaciones/comunicacion-diseno-bomba-calor-reversible-dual-refrigerante-natural-edificios-energia-casi-nula>

Estas diferencias pueden verse también reflejadas en el COP (Coefficient of Performance) que es la relación entre la potencia de la bomba (de calor o refrigeración) y lo que consume a nivel eléctrico:



$$\text{COP} = \frac{\text{Energía generada}}{\text{energía eléctrica consumida}}$$

Como ejemplo práctico para comprender esta fórmula: el COP de una caldera de gas convencional suele alcanzar el valor de 1, mientras que en una bomba geotérmica alcanza el valor de 3 o más. Por tanto, para producir la misma energía el consumo eléctrico de una bomba geotérmica se reduce considerablemente hasta la cuarta parte de la del gas.

En cuanto a sus partes, podemos enumerar: evaporador para la zona fría, condensador para el foco caliente, válvula de expansión y compresor. En el caso de que se requiera que las bombas sean reversibles (conseguir con el mismo equipo calefacción o refrigeración), contarán con una válvula adicional.

8.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR (BHE).

También se les conoce como sondas geotérmicas. Es el método más empleado para el intercambio de calor con el terreno.

Los intercambiadores de calor se sitúan a lo largo de todo el sondeo, en ellos el calor se transmite en una sola dirección, concretamente desde el fluido con una temperatura mayor hasta el fluido de menor temperatura. Este fluido suele ser, normalmente, la propia agua del pozo o en su defecto (según la temperatura del área de trabajo) agua con anticongelante, como el agua con etanol, muy utilizado en países nórdicos.

Su configuración puede ser, además, vertical u horizontal (más propio de viviendas debido a la gran superficie que ocupan).

Son especialmente conocidos los tubos en U. Los tubos en U se componen de dos tubos cilíndricos iguales y que se unen en su parte inferior, de ahí su nombre. El mecanismo de trabajo es el mismo que el comentado anteriormente: Se introduce por los tubos un líquido (comúnmente anticongelante a base de agua y etanol) que desciende por los mismos mientras transporta el calor. Durante este descenso se produce el intercambio de energía con el terreno.



Figura 14. Sonda geotérmica en U. Fuente: <https://www.ferroplast.es/>

No obstante, cabe remarcar que no todo en la geotermia reside en la instrumentación. De igual importancia, o más, es también escoger un método óptimo de explotación del recurso, principalmente aquel método con el que se consiga paliar al máximo posible las diferencias entre la temperatura del fluido que circula por la instalación y la roca que la “alberga”. Estos cambios de temperatura pueden suponer hasta un 2,3% de variación en el coeficiente de rendimiento de la bomba de calor. Esa cifra es el resultado de un cálculo para un ejemplo de una vivienda en Suecia teniendo en cuenta los siguientes parámetros: 40-60 °C para las temperaturas de distribución y 0 °C para los fluidos caloportadores. El rendimiento térmico es de especial importancia en este tipo de instalaciones de intercambiadores. Este rendimiento mejora conforme disminuye la distancia entre la pared del pozo y los tubos y, a su vez, cuanto más separados estén los tubos.

Otro factor importante a tener en cuenta en los intercambiadores de calor es la resistencia térmica del sondeo geotérmico, (R_b), cada BHE tendrá la suya propia. **Cuanto menor sea R_b mejor, pues querrá decir que la transferencia de calor con el subsuelo es más eficaz.** No obstante, esta condición no es aplicable a los tubos en U comentados antes, ya que sus tubos de derivación tienen una conductividad térmica baja y cuentan también con flujo térmico entre los canales.

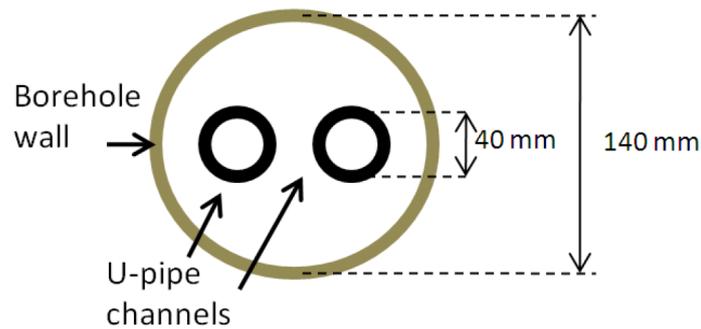


Figura 15. Sección transversal de la sonda geotérmica BHE con tubos en U (Fuente: J. Acuña y B. Palm, Proceedings World Geothermal Congress 2010)

Más adelante se realizarán simulaciones en el programa EED con diferentes valores de resistencia térmica del sondeo para comprobar su influencia.

La relación matemática por la que se define esta resistencia térmica es la siguiente, deducida de un desarrollo anterior realizado por Hellström:

$$R_b = \frac{T_f - T_w}{q'}$$

Donde:

- q' es la tasa de inyección de calor por unidad de longitud del pozo (W/m).
- T_f representa la temperatura media del fluido a la entrada y salida del sondeo.
- T_w es la temperatura de la pared del pozo.

Es interesante el estudio de la resistencia térmica por diversos motivos: influirá en la posición de los tubos y también en la posición general del conjunto del intercambiador respecto a la pared del pozo.

En relación a la imagen anterior resulta también interesante el grosor de la tubería y el principio que sigue: su influencia es inversamente proporcional al número de tubos. Este es el motivo de que los tubos utilizados sean dobles.

Si se quiere optimizar al máximo la instalación, podemos estudiar también el material de dichos tubos y la influencia que tiene. Diversos estudios han



corroborado que, por ejemplo, la resistencia térmica de los tubos no se altera ante un material con una conductividad alta, ya que tiene un comportamiento asintótico. También se ha encontrado destacable la ubicación de la tubería respecto al material de relleno, que busca a su vez la mejora térmica.

Cabe destacar que en función del país donde se trabaje los materiales deben atenerse a una serie de requisitos legales, aunque el material más extendido de relleno es la bentonita, cemento o arena de cuarzo.

La mayoría de los tubos están fabricados de polietileno (una clase de plástico).

Otros factores importantes de influencia son los fenómenos de convección y cómo tiene lugar la transmisión de calor en los canales de flujo.

El diseño de los intercambiadores no es único, ya que existen más configuraciones que la mostrada anteriormente con los tubos en paralelo, como, por ejemplo:

- Colectores con tres tubos iguales en los que dos de ellos se pueden colocar en paralelo.
- Intercambiador de calor de tipo coaxial.
- Tubo tradicional en U pero que lleve incorporado un sistema de separación para ayudar a mantener la distancia entre los tubos.
- Tubos en U con aletas inferiores.

8.4. COLECTORES HORIZONTALES ENTERRADOS.

Los colectores enterrados como su propio nombre indica se encuentran enterrados superficialmente en la capa suelo, no más allá de los 0,8 metros de profundidad. Esta ubicación tan superficial (los tubos están muy poco enterrados) hace que sean más susceptibles de los cambios climáticos y, además, convierte al terreno en un acumulador de calor solar principalmente, relegando la energía propiamente geotérmica a un segundo plano.

En cuanto a su disposición, están formados por tubos con unas dimensiones de entre 25 y 44 mm. El fluido caloportador es, una vez más, una mezcla de agua y anticongelante que se desplaza gracias a una bomba de calor. Respecto a la



configuración, se requiere de un terreno con un espacio disponible sin obstáculos (despejado) que sea 1,5 veces la superficie habitable que se necesita calentar.

Las potencias que pueden llegar a proporcionar oscilan entre los 20 y los 30 kW por m², aunque esta cifra se verá muy influida por la altitud de trabajo.

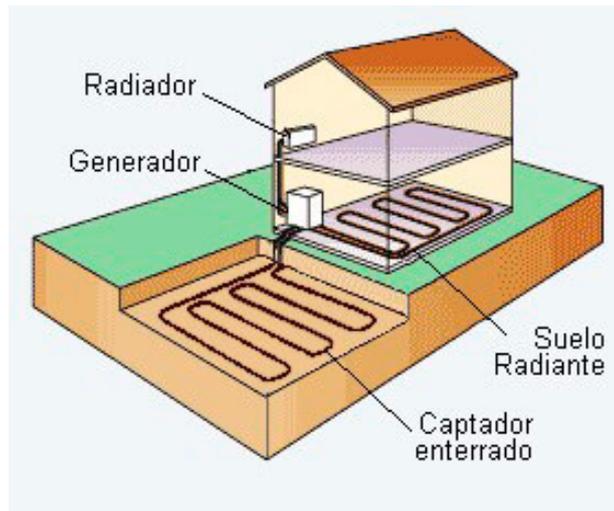


Figura 16. Colectores horizontales enterrados. Fuente: <https://feccjusa.es/geotermia/>

8.5. SONDAS GEOTÉRMICAS.

A diferencia de los anteriores, estos sistemas de tubos de plástico alcanzan profundidades mayores, entre los 20 y los 100 m. Los diámetros de los tubos también son mayores, de 10 a 15 cm.

Presentan muchas similitudes con los captadores horizontales, sin embargo, las sondas presentan la desventaja de ser más caros. Aunque, por otro lado, el estar enterrados a mayor profundidad hace que los cambios climáticos no les afecten tanto, pudiendo por esto dar mayores potencias. Además, deben cumplir unas especificaciones para que puedan utilizarse:

- El suelo cuenta con un espesor escaso o insuficiente para enterrar los colectores.
- Presencia de canalizaciones en el subsuelo.
- Demanda energética mayor que la que pueden dar los colectores horizontales.



En la imagen siguiente se muestra una de las configuraciones más habituales:

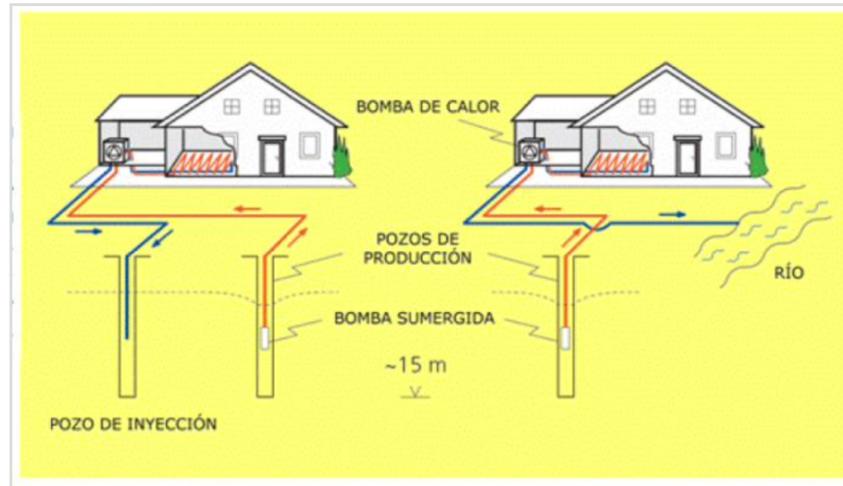


Figura 17. Sondas geotérmicas. Fuente: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calor_y_Frio_Renovables_Geotermia_30012012_global_196afed7.pdf

Uno de los parámetros fundamentales para el dimensionamiento de este tipo de sondas, es la potencia de extracción de calor por metro lineal de sonda, que varía entre 20-70 W/m. En el caso de que la potencia sea inferior a 30 kW, existe un modelo estándar para dimensionar la instalación, que normalmente son valores proporcionados por el fabricante o que están normalizados. En el caso opuesto, potencias mayores, se recurren a sondas geotérmicas que satisfarán las necesidades del grupo de viviendas oportuno. Suele tratarse de conjuntos de 4-50 sondas próximas a dichas viviendas y que alcanzan profundidades mayores que los otros casos tratados: hasta 300 metros.

Además de la potencia, también influyen en el dimensionamiento de la instalación geotérmica, los siguientes parámetros:

- Conductividad térmica del terreno.
- Humedad propia del suelo
- Posible influencia de las aguas subterráneas en el caso de que las haya.
- Tipo de instalación y su finalidad.



En suelos y rocas de naturaleza seca y en los materiales que revisten el sondeo el calor se disipa siguiendo el principio físico de conducción. En cambio, en el fluido que circula internamente en la sonda, el calor sigue el modelo de convección.

Todas estas instalaciones y el correspondiente modelado que requieren se realizan también con el apoyo de aplicaciones informáticas. Aunque, por ejemplo, las sondas geotérmicas que vayan con disposición vertical pueden determinarse experimentalmente con un TRT.

9. INVESTIGACIÓN DE RECURSOS DE MUY BAJA TEMPERATURA.

Como se comentaba al inicio de este trabajo, en una instalación geotérmica necesitamos conocer una serie de parámetros, principalmente la conductividad térmica, la resistencia térmica y la temperatura inalterada del terreno. Todo esto es necesario para poder determinar el aprovechamiento para calefacción/refrigeración y ACS.

Recordando todo lo definido anteriormente, lo que diferencia a los recursos de muy baja temperatura del resto es principalmente:

- La profundidad, que es menor de 200 m.
- Empleo de bombas de calor para la explotación.
- El calor no tiene solo origen geotérmico, si no también solar, ya que son las capas más superficiales.

Esto influye además en las técnicas de prospección empleadas, ya que pasan a centrarse en la mejor forma de explotación del yacimiento en cuestión (se busca su rentabilidad), cuando en otros casos predomina la localización del recurso en primer lugar. No obstante, esto resulta algo teórico, en la práctica el parámetro que suele mandar es la conductividad térmica (λ), en la que centraremos también nuestras simulaciones posteriores para determinar cuánta energía tenemos por unidad de tiempo. Resulta importante porque de ella dependerá tanto la dimensión final de la bomba como de la instalación que va a realizar la captación de energía. A la



conductividad térmica se le suma también la longitud final del sondeo, cuyas simulaciones también haremos a continuación. Estos dimensionamientos son muy importantes ya que no solo repercutirán en el rendimiento de la instalación si no también en los costes finales.

En este trabajo en concreto vamos a usar un programa de simulación para medir estos dos parámetros, pero en la práctica pueden usarse dos vías: por un lado estudiar en un laboratorio las diferentes capas del terreno para ver de qué materiales están compuestos. Este primer método es bastante caro y laborioso de realizar, además, se trata de muestras puntuales que pueden no ser realistas con el conjunto total del terreno en el que se va a trabajar. No tiene en cuenta tampoco la presencia de aguas subterráneas y por tanto los posibles fenómenos de advección.

Por ello, normalmente se recurre al segundo método, que es el TRT. El Test de Respuesta Térmica del Terrenos (TRT o Thermal Response Test) se lleva a cabo en sondeos de tipo vertical y, además de proporcionarnos el valor de la conductividad térmica, tiene en cuenta tanto la presencia de aguas subterráneas y es más sencillo. En resumen, es mucho más completo que el primer método.

El equipo básico de un TRT consta de:

- Una resistencia eléctrica.
- Un aparato que tome y registre los datos.
- Fuente de energía eléctrica para operar todo el conjunto.
- Bomba de circulación.

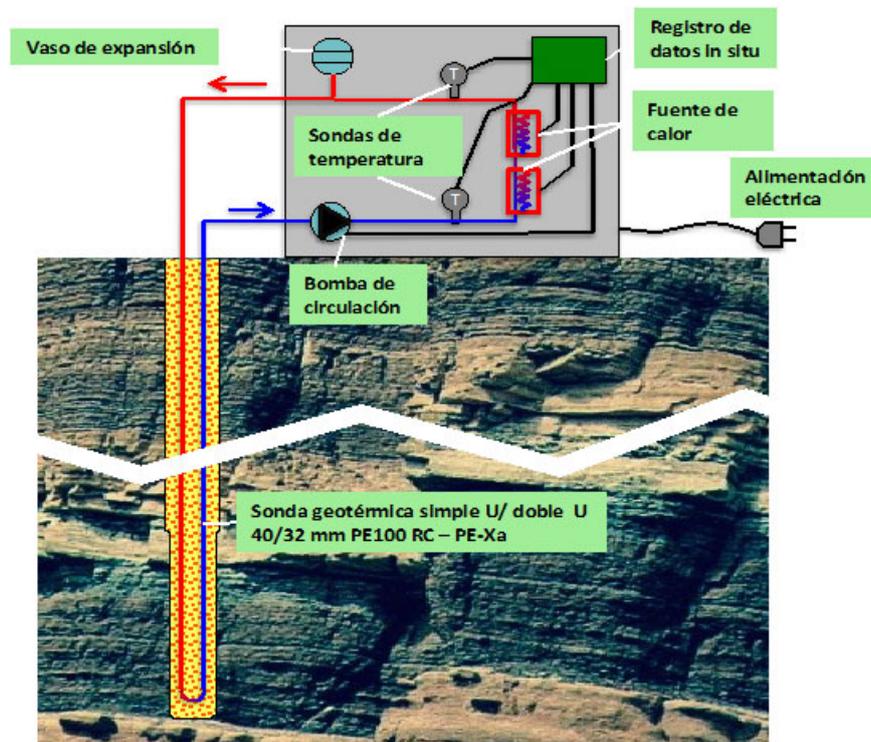


Figura 18. Esquema del equipo que forma un ensayo TRT. Fuente: <https://www.geotermiavertical.es/test-de-respuesta-termica/>

Para la extracción del calor de muy baja temperatura, se emplearán uno de los sistemas ya vistos anteriormente:

- Colectores horizontales enterrados.
- Sondeos de captación de aguas someras.
- Sondos geotérmicas.
- Cimientos geotérmicos.

Todos ellos son sistemas cerrados, menos el sondeo de captación de aguas someras, que es el único abierto.

9.1. ESTUDIOS PREVIOS Y SONDEOS.

Como se introdujo anteriormente, el aprovechamiento económico de un recurso geotérmico dependerá de su verificación como yacimiento geotérmico, su



localización en suelos, rocas o acuíferos, además de confirmar su viabilidad energética o no (potencial energético).

En función del tipo de recurso que se quiera explotar, mayor envergadura tendrán los estudios previos requeridos.

En el caso del tipo de recurso de este proyecto (geotermia somera), son recursos de tipo superficial destinados a viviendas pequeñas cuya explotación energética depende únicamente de las bombas de calor geotérmicas.

A excepción de las fuentes termales que afloran espontáneamente a la superficie, el resto de las explotaciones geotérmicas suelen requerir la planificación de sondeos que permitan extraer el agua o vapor caliente hasta la superficie.

En terrenos duros, la técnica convencional que se ha utilizado siempre por ser la más sencilla es la percusión por cable. Este método emplea un trépano macizo y pesado para romper la roca golpeándola al dejarse caer repetitivamente sobre la misma, se eleva y se deja caer. La altura de esta caída y la frecuencia de golpes dependerán de cuan duras sean las rocas. Los fragmentos de roca fracturada se extraerán con ayuda de una cuchara cilíndrica hueca con válvula de retención. Como comentamos, esta maquinaria y forma de extracción es la forma más común en España de realizar la captación de agua hasta los 600 metros de profundidad.

Para profundidades menores, de hasta 300 metros, y también terrenos duros y homogéneos existen otros procedimientos como es la perforación a rotopercusión con martillo en el fondo del sondeo. Este martillo tiene en su final una boca cortante que, fijada a un sistema de varillaje con rotación, es capaz de rotar desde el exterior del sondeo a la vez que envía aire comprimido a alta presión que acciona un martillo situado directamente sobre la herramienta de perforación en el fondo del sondeo. No obstante, la técnica más empleada es la perforación por rotación. Son equipos autónomos situados en ocasiones directamente sobre un camión que trabajan a poca profundidad. En el caso de que se precisen trabajos más profundos lo harán desde grandes plataformas, facilitando que lleguen a sondeos de incluso 5000 metros de profundidad.



La necesidad de utilizar uno u otro método y la complejidad que arrastre dependerá de la potencia que deba suministrar el sistema, el sistema de captación de calor que se utilice, las horas de funcionamiento al año y si el sistema final de destino requerirá calefacción o refrigeración.

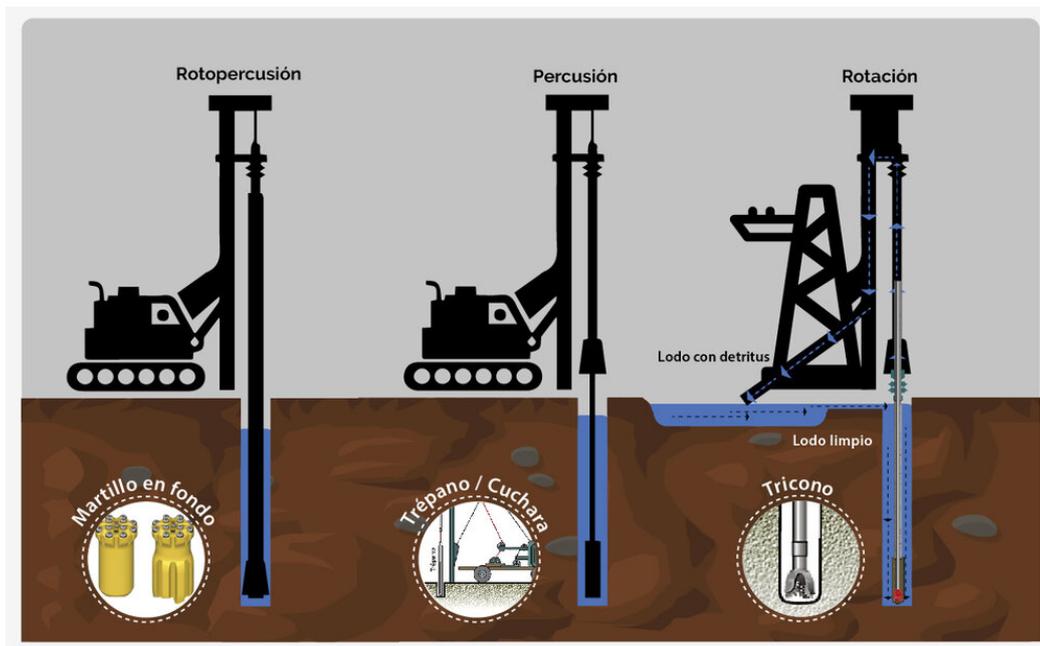


Figura 19. Diferentes métodos de perforación. fuente: <https://www.hidroambientecr.com/notas/metodos-de-perforacion>

10. PROGRAMA DE SIMULACIÓN EED.

El software EED (Earth Energy Designer) es un programa específico de diseño y estudio de sondeos intercambiadores de calor.

El calor es extraído del fluido caloportador que circula por el interior del sondeo, intercambiando calor con el terreno, a través de una bomba de calor geotérmica para ser luego consumido. Tras esto, el fluido comienza un nuevo ciclo en el que se vuelve a calentar conforme circula por el terreno. Si trabajásemos en modo de refrigeración, tendríamos el proceso inverso.

El programa utiliza estudios de parámetros junto con simulaciones numéricas que dan como resultado soluciones analíticas del flujo de calor según distintos



parámetros como la geometría del pozo. Esta geometría depende a su vez del espacio entre los pozos en la superficie o su propia profundidad. También para algunos casos se puede estudiar la influencia del ángulo de inclinación.

Por otro lado, la resistencia térmica del pozo es calculada en el programa a partir de dicha geometría, el material de relleno, el material de la tubería y la geometría de la misma. También nos permite escoger un patrón de perforación entre una base de más de 800 configuraciones básicas.

A continuación, se muestran una serie de capturas para la visualización del programa:

Menús desplegables (1ª parte)

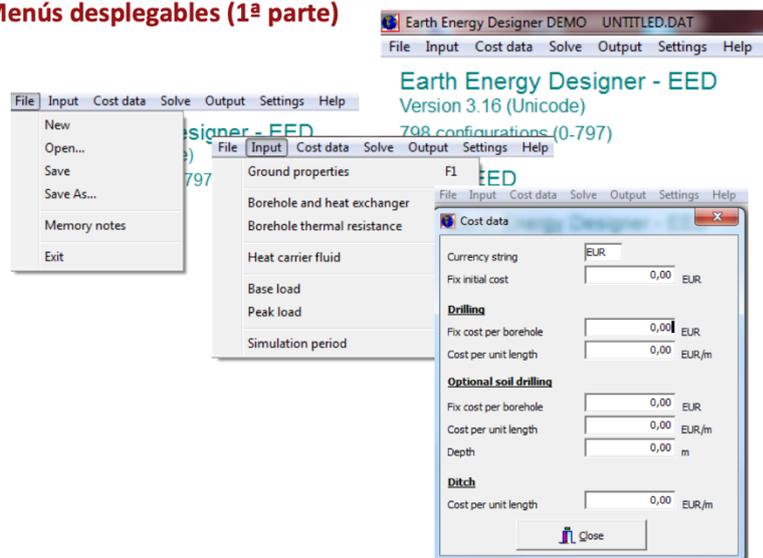


Figura 20. Menús "Input" y "Cost data" del programa EED.

Aunque en nuestro caso nos centremos en parámetros más teóricos, el programa está destinado al diseño de proyectos y también permite la planificación de costes de perforación, que en nuestro caso no aplica.



Menús desplegables (2ª parte)

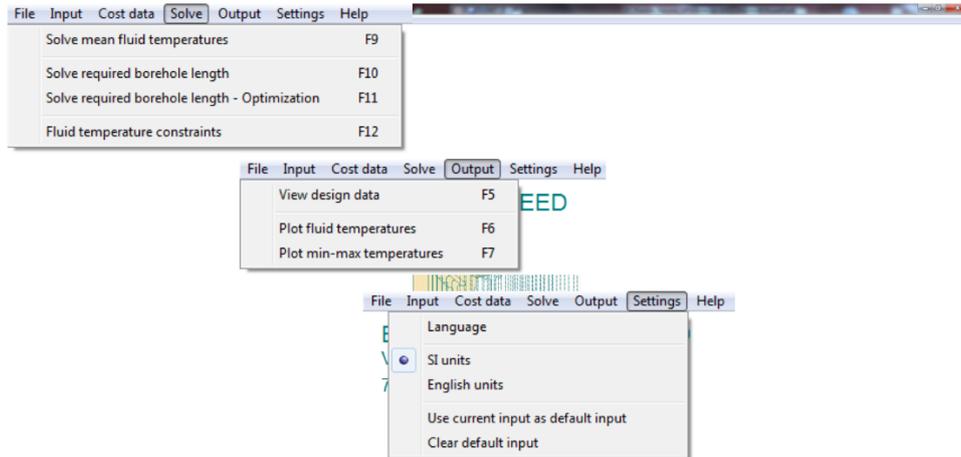


Figura 21. Menús para obtener soluciones y tipos de unidades en el programa EED.

Demanda base: Temperaturas medias del fluido (al final de mes) [°C]

Año	1	2	5	10	25
ENE	43,09	6,16	0,51	-2,1	-5
FEB	43,09	5,98	0,69	-1,88	-4,77
MAR	43,09	9,03	4,04	1,51	-1,36
ABR	43,09	13,2	8,47	5,98	3,13
MAY	43,09	19,33	14,84	12,39	9,56
JUN	43,09	30,9	26,63	24,21	21,4
JUL	43,09	32,49	28,41	26,03	23,23
AGO	43,09	33,32	29,4	27,06	24,28
SEP	28,76	23,44	19,68	17,37	14,61
OCT	22,55	18,1	14,48	12,21	9,46
NOV	15,92	12,03	8,54	6,29	3,56
DIC	9,69	6,22	2,86	0,64	-2,08

DEMANDA BASE: AÑO 25
Temperatura mínima media del fluido-5 °C al final de ENE
Temperatura máxima media del fluido24,28 °C al final de AGO

PICO DE DEMANDA DE CALOR: TEMPERATURA MEDIA DEL FLUIDO (AL FINAL DE MES) [°C]

Año	1	2	5	10	25
ENE	43,09	6,16	0,51	-2,1	-5
FEB	43,09	5,98	0,69	-1,88	-4,77
MAR	43,09	9,03	4,04	1,51	-1,36
ABR	43,09	13,2	8,47	5,98	3,13
MAY	43,09	19,33	14,84	12,39	9,56
JUN	43,09	30,9	26,63	24,21	21,4
JUL	43,09	32,49	28,41	26,03	23,23
AGO	43,09	33,32	29,4	27,06	24,28
SEP	28,76	23,44	19,68	17,37	14,61
OCT	22,55	18,1	14,48	12,21	9,46
NOV	15,92	12,03	8,54	6,29	3,56
DIC	9,69	6,22	2,86	0,64	-2,08

PICO DE DEMANDA DE CALOR : AÑO 25
Temperatura mínima media del fluido-5 °C al final de ENE
Temperatura máxima media del fluido24,28 °C al final de AGO

Figura 22. Extracto de una hoja de datos de los resultados de los cálculos. En este caso se observan las temperaturas en el año 25 que analizaremos posteriormente para cada material.

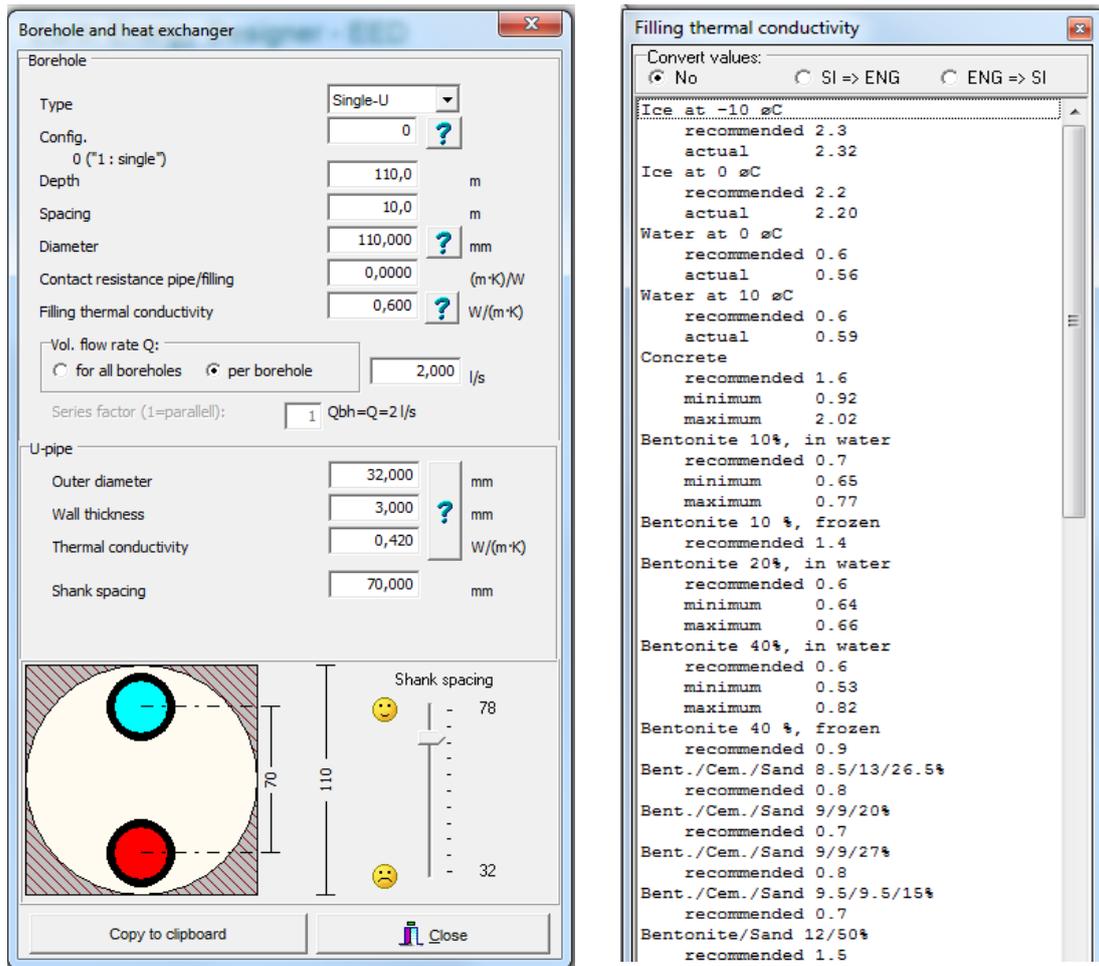


Figura 23. Opciones del sondeo (geometría) y de materiales que atraviesa el sondeo.

La figura anterior muestra el menú para adoptar diferentes configuraciones en el sondeo. En nuestro caso lo dejaremos constante con el que aparece por defecto en la imagen.

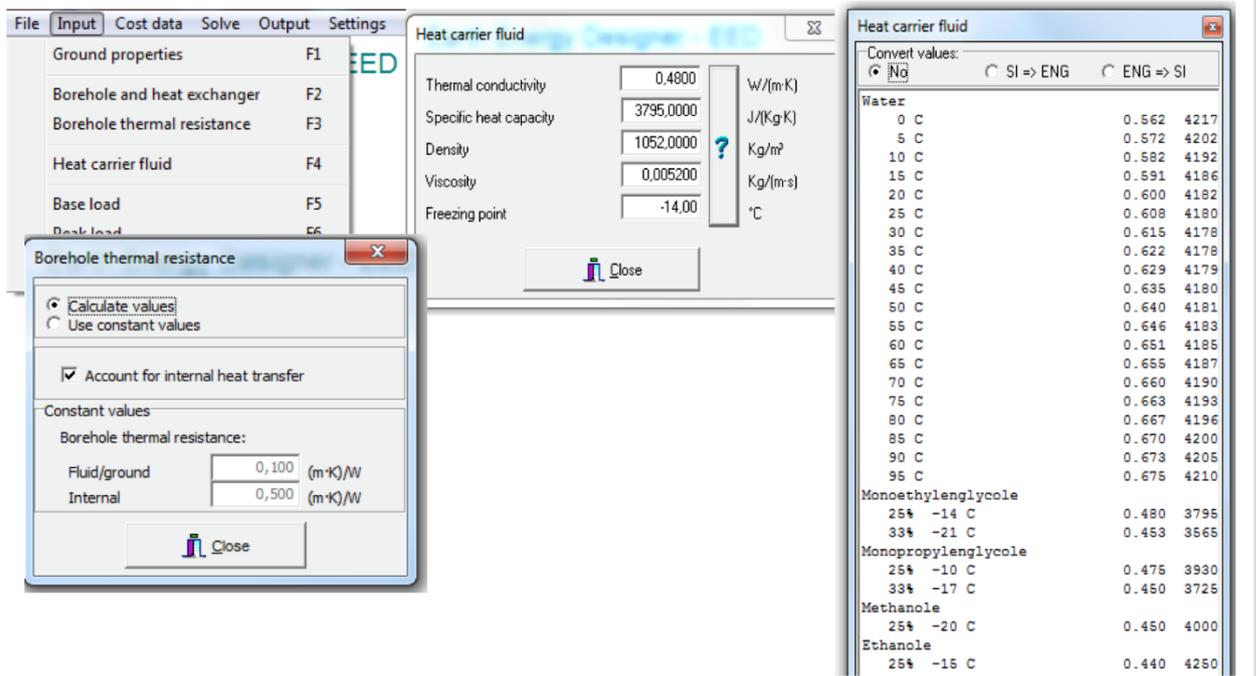


Figura 24. Resistencia térmica del sondeo y fluido caloportador.

Las ventanas más importantes del programa se muestran en la figura 23. Permiten la selección del tipo de fluido, la resistencia térmica del sondeo y otros inputs principales como la conductividad térmica y la capacidad calorífica, fundamentales en nuestras simulaciones.

En apartados sucesivos se detallarán los datos que se han empleado.

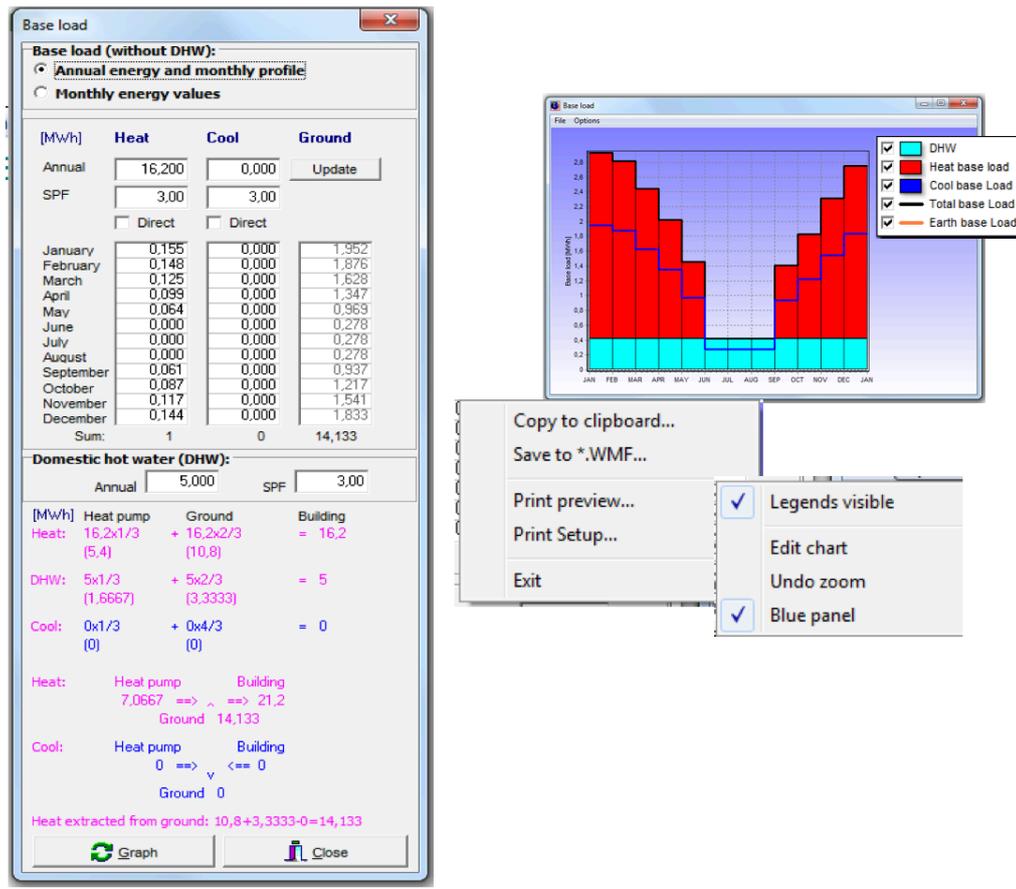


Figura 25. Demanda base.

La demanda base del que dependerá otro parámetro importante como es el COP, en este caso llamado SPF, de la bomba.



11. REALIZACIÓN EXPERIMENTAL.

Con el programa vamos a realizar dos tipos de simulaciones con el fin de obtener dos resultados principales: por un lado, la profundidad del sondeo y por otro las temperaturas máximas y mínimas del fluido al cabo de 25 años. Ambos cálculos los obtenemos a partir de los mismos datos:

- Conductividad térmica: se irá introduciendo en cada caso la del material correspondiente.
- Resistencia térmica del sondeo.
- Capacidad calorífica.

Introduciremos también los siguientes datos como constantes para todas las simulaciones:

- Las características del fluido caloportador: en nuestro caso emplearemos en todos los casos monoetilenglicol 25%.
- La temperatura inalterada del terreno, equivalente a la temperatura media anual del ambiente en ese punto: consideramos una temperatura media anual aproximada para Asturias de unos 14 °C.
- Las características del sondeo, siendo éste de tipo U-simple con una profundidad inicial de cálculo de 110m.

Propiedad	Valor	Unidad
Conductividad Térmica	0,4800	W/(m·K)
Capacidad calorífica másica	3795,0000	J/(Kg·K)
Densidad	1052,0000	Kg/m³
Viscosidad	0,005200	Kg/(m·s)
Punto de congelación	-14,00	°C

Figura 26. Características del fluido caloportador del sondeo.



Temperatura superficial del terreno	14,000	?	°C
Flujo de calor geotérmico	0,08500	?	W/m ²

Cerrar

Figura 27. Datos que se mantendrán ctes en la simulación: la T° superficial del terreno y el flujo geotérmico.

Comenzaremos a continuación con el primer cálculo para obtener la profundidad necesaria del sondeo para cada material:

11.1. ANÁLISIS EED PARA SIMULACIÓN DE PROFUNDIDADES DEL SONDEO.

Para los valores de conductividad y capacidad calorífica con los que simulamos se van a emplear los valores recomendados/ mínimo/ máximo que nos da el propio programa EED, para cada material del terreno. De esta manera, hemos empezado con los elementos más típicos que podemos encontrar en Asturias, para seguidamente introducir, por orden alfabético, los restantes elementos que vienen en el programa. Hay que mencionar que el EED al ser un producto de origen sueco, puede que los valores que utilicemos varíen alguna centésima con referencia a los valores estándar que nos podemos encontrar en nuestra región.

MATERIALES EMPLEADOS EN LAS SIMULACIONES Y LONGITUDES RESULTANTES PARA EL CASO DE ESTUDIO:

1) CARBÓN (COAL)

El Carbón tiene una conductividad térmica recomendada según el programa de 0,3 W/mK siendo la mínima de 0,26 y la máxima de 0,63 W/mK.

Su capacidad calorífica volumétrica es de 1,8 MJ/m³K.

Los resultados que hemos obtenido son unas profundidades que varían, según la conductividad térmica utilizada, entre 131,3m (0,68 W/mK) y 170,2m (0,26 W/mK).



2) DOLOMITA (DOLOMITE)

La dolomita tiene una conductividad entre 2,83-4,34 W/mK siendo la recomendada 3,2 W/mK y su capacidad calorífica volumétrica es de 2,5 MJ/m³K.

Con estos datos hemos obtenido una longitud que varía, según la conductividad térmica utilizada, de 45,97m (para una conductividad de 4,34 W/mK) y 59,2m (para una conductividad de 2,83 W/mK).

3) ARCILLA (CLAY)

Con este elemento se han distinguido entre arcilla seca y arcilla húmeda.

3.1 Arcilla seca (Clay dry).

La arcilla seca tiene una conductividad muy baja, su intervalo de conductividades se encuentra entre 0,4-0,9 W/mK, aunque se recomienda 0,4 W/mK y su capacidad calorífica volumétrica oscila entre 1,51-1,62 MJ/m³K, siendo la recomendada 1,6 MJ/m³K.

De forma que, una vez realizado los cálculos con varias conductividades y diferentes capacidades caloríficas se obtiene que las longitudes necesarias varían, según la conductividad térmica utilizada y la capacidad calorífica volumétrica, entre 117m (0,9 W/mK y 1,6 MJ/m³K) – 157,5m (0,4 W/mK y 1,51 MJ/m³K).

3.2 Arcilla húmeda (Clay moist)

En el caso de la arcilla húmeda la conductividad sube ligeramente encontrándonos con unos valores en el intervalo de 0,9-2,2 W/mK, aunque se recomienda 1,6 W/mK.

Ocurre lo mismo con la capacidad calorífica, aunque en este caso llega a doblarse ese aumento, ya que su rango se sitúa entre 1,6-3,4 MJ/m³K, siendo la recomendada de 2,4 MJ/m³K.

Con estos valores las longitudes necesarias bajan significativamente respecto a la arcilla seca resultando lo siguiente:



- 0,9 W/mK y 1,6 MJ/m³J: 117m.
- 2,2 W/mK y 3,4 MJ/m³J: 68,17m.

4) CALIZA (LIMESTONE)

En este apartado de las calizas nos encontramos con tres clasificaciones: maciza, margosa y oolítica:

4.1 Caliza maciza (Limestone massive)

Para la caliza maciza nos encontramos con unas conductividades mínimas y máximas de 2,46- 3,93 W/mK, siendo la recomendada de 2,8 W/mK.

La capacidad calorífica volumétrica se moverá en unos valores entre 2,09-2,42 MJ/m³J, siendo la recomendada 2,3 MJ/m³J.

De esta forma y después de las operaciones realizadas, se constata que las longitudes necesarias varían, según los parámetros térmicos utilizados entre:

- 48,66m para 3,93 W/mK y 2,42 MJ/m³J.
- 64,95m para 2,46 W/mK y 2,09 MJ/m³J.

4.1 Caliza Margosa (Limestone, marly)

Con la caliza margosa tenemos unas conductividades en un intervalo más reducido y compacto siendo este el comprendido entre 1,96-2,78 W/mK, aunque se recomienda 2,2 W/mK.

Su capacidad calorífica volumétrica tiene un valor único de 2,3 MJ/m³J. Las longitudes obtenidas son:

- 60,03m para 2,78 W/mK y 2,3 MJ/m³J.
- 74,46m para 1,96 W/mK y 2,3 MJ/m³J.



4.2 Caliza oolítica (Limestone, oolitic)

Esta caliza oolítica presenta, al igual que la margosa, una capacidad calorífica única de $2,3 \text{ MJ/m}^3\text{J}$, trabajando la conductividad con valores entre $2,12\text{-}3,36 \text{ W/mK}$ aunque se recomienda $2,4 \text{ W/mK}$.

Resulta que, respecto a la caliza margosa, en sus longitudes del sondeo necesarias si se aprecia algo más de diferencia:

- $53,49\text{m}$ para $3,36 \text{ W/mK}$ y $2,3 \text{ MJ/m}^3\text{J}$.
- $70,96\text{m}$ para $2,12 \text{ W/mK}$ y $2,3 \text{ MJ/m}^3$.

5) MÁRMOL (MARBLE)

El mármol tiene una conductividad de $1,28\text{-}3,08 \text{ W/mK}$ siendo la conductividad recomendada de $2,3 \text{ W/mK}$.

En cuanto a su capacidad calorífica, ésta varía entre $1,99\text{-}2,02 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, pero por defecto suele utilizarse $2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.

Apreciamos nuevamente gran diferencia en cuanto a las longitudes necesarias:

- $56,62 \text{ m}$ en el caso de $3,08 \text{ W/mK}$ y $2,02 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.
- $96,30 \text{ m}$ en el caso de $1,28 \text{ W/mK}$ y $1,99 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.

6) ARENISCAS (SANDSTONE)

Las areniscas sufren una gran variación de conductividad estableciendo el intervalo entre los valores $1,28\text{-}5,10 \text{ W/mK}$.

En cuanto a su capacidad calorífica esta varía entre $1,56\text{-}2,73 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, aunque por defecto suele utilizarse $2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.

Las longitudes obtenidas vuelven a ser muy distintas.

- $41,98 \text{ m}$ en el caso de $5,1 \text{ W/mK}$ y $2,78 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.
- $97,6 \text{ m}$ en el caso de $1,28 \text{ W/mK}$ y $1,56 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.



7) GRANITO (GRANITE)

El granito tiene una conductividad entre 2,1 y 4,07 W/mK aunque la conductividad recomendada es de 3,4 W/mK, con su capacidad calorífica volumétrica entre 2,05-2,96 MJ/m³K.

Con estos valores nos encontramos unas longitudes necesarias de:

- 47,23 m en el caso de 4,10 W/mK y 2,96 MJ/m³K.
- 71,73 m en el caso de 2,10 W/mK y 2,05 MJ/m³K.

8) CUARCITA (QUARTZITE)

La cuarcita se encuentra con un rango de conductividades entre 3,6 y 6,62 W/mK, aunque el valor que se recomienda es el de 6 W/mK y su capacidad calorífica volumétrica se mueve entre 2,08 y 2,16 MJ/m³K, pero su valor recomendado es de 2,1 MJ/m³K.

De esta forma, una vez realizados los diversos cálculos se obtiene que las longitudes necesarias están entre:

- 36,99 m en el caso de 6,62 W/mK y 2,16 MJ/m³K.
- 51,45 m en el caso de 3,6 W/mK y 2,08 MJ/m³K.

9) GRAVA (GRAVEL)

Con la grava se distingue entre grava seca y grava saturada:

9.1 GRAVA SECA (GRAVEL, DRY)

La grava seca tiene una conductividad muy baja moviéndose en unos valores entre 0,39 y 0,52 W/mK, aunque el valor recomendado es 0,4 W/mK y su capacidad calorífica volumétrica oscila entre 1,51-1,67 MJ/m³K siendo la recomendada 1,6 MJ/m³K.



Sus longitudes necesarias sí son mucho más profundas que la media del resto de los elementos estudiados, además de sobrepasar la longitud impuesta en nuestro sondeo de 110 m, se obtienen:

- 145,5 m en el caso de 0,52 W/mK y 1,62 MJ/m³K.
- 158,5 m en el caso de 0,39 W/mK y 1,51 MJ/m³K.

9.2 GRAVA SATURADA (GRAVEL, SATURATED)

Al trabajar con la grava saturada nos encontramos mucha diferencia en comparación con la grava seca porque aquí su conductividad no sufre variación y tiene un valor fijo estándar de 1,8 W/mK, pero sí encontramos un aumento en su capacidad calorífica volumétrica, ya que sus valores oscilan entre 1,6-3,4 MJ/m³K utilizándose como valor estándar 2,4 MJ/m³K.

Sus longitudes necesarias son:

- 76,9 m en el caso de 1,8 W/mK y 3,4 MJ/m³K.
- 79,74 m en el caso de 1,8 W/mK y 1,6 MJ/m³K.

10) MARGA (MARL)

Para la marga se tiene que distinguir entre: marga, marga arcillosa y marga dolomítica:

10.1 MARGA (MARL)

Este elemento trabaja a unas conductividades de 1,75-3,46 W/mK, aunque se recomienda 2,1 W/mK, y con unas capacidades caloríficas volumétricas de 2-2,57 MJ/m³K donde la recomendada es de 2,3 MJ/m³K.

Después de operar con estos datos, se obtienen unas longitudes necesarias de:

- 52,38 m en el caso de 3,46 W/mK y 2,57 MJ/m³K.
- 80,29 m en el caso de 1,75 W/mK y 2 MJ/m³K.



10.2 MARGA ARCILLOSA (CLAYEY/ ARGILLACEUS)

La marga arcillosa se mueve en unos valores de conductividades de 1,49-2,52 W/mK, pero se recomienda 2 W/mK y su capacidad calorífica volumétrica de 2,2 MJ/M³K.

En cuanto a las longitudes necesarias resultan que son más profundas y el rango más compacto:

- 63,47 m en el caso de 2,52 W/mK y 2,2 MJ/m³K.
- 87,92 m en el caso de 1,49 W/mK y 2,2 MJ/m³K.

10.3 MARGA DOLOMÍTICA (MARL, DOLOMITIC)

La marga dolomítica es la que tiene un rango de valores de conductividad más elevado dado que se encuentra entre 1,89-3,90 W/mK, aunque se usa como valor estándar 2,2 W/mK y su capacidad calorífica volumétrica se fija en 2,3 MJ/m³K.

De este modo, se obtienen unas longitudes comprendidas entre:

- 48,95 m en el caso de 3,90 W/mK y 2,3 MJ/m³K.
- 76,13 m en el caso de 1,89 W/mK y 2,3 MJ/m³K.

11) ARENA (SAND)

Con la arena se tienen cinco subdivisiones a tener en cuenta, que son: arena seca, arena seca compacta, arena húmeda, arena saturada y arena congelada:

11.1 ARENA SECA (SAND, DRY)

La arena seca tiene una conductividad muy baja trabajando en el intervalo de 0,27-0,75 W/mK, aunque se recomienda 0,4 W/mK.

Su capacidad calorífica volumétrica oscila entre 1,31-1,59 MJ/m³K, siendo la estándar 1,4 MJ/m³K.



Después de analizar los resultados se observa que las longitudes necesarias son también elevadas y exceden del máximo de profundidad de nuestro sondeo:

- 127 m en el caso de (0,75 W/mK y 1,59 MJ/m³K).
- 172,4 m en el caso de (0,27 W/mK y 1,31 MJ/m³K).

11.5 ARENA CONGELADA (SAND, FROZEN)

La arena congelada presenta unas conductividades entre 1,25-2,94 W/mK, aunque se recomienda 2 W/mK.

Para la capacidad calorífica volumétrica nos situamos ente 1,16-1,95 MJ/m³K, siendo el valor más usado de 1,5 MJ/m³K.

A vista de los resultados, se obtiene una temperatura máxima entre 9,8-10,62 °C y unas longitudes necesarias de:

- 58,33 m en el caso de (2,94 W/mK y 1,95 MJ/m³K).
- 100,4 m en el caso de (1,25 W/mK y 1,16 MJ/m³K).

12) BASALTO (BASALT)

El basalto trabaja con unas conductividades de 1,33-2,29 W/mK, se recomienda 1,7 W/mK y con unas capacidades caloríficas volumétricas de 2,29-2,58 MJ/m³K, se recomienda 2,4 MJ/mK.

Con estos datos y después de operar con ellos se registran unas longitudes de:

- 67,33 m en el caso de 2,29 W/mK y 2,58 MJ/m³K.
- 93,55 m en el caso de 1,33 W/mK y 2,21 MJ/m³K.



13) TURBA (PEAT)

La turba alberga una conductividad muy baja 0,2-0,7 W/mK resultando el valor más usado de 0,4 W/mK y una capacidad calorífica volumétrica de 0,5-3,8 MJ/m³K siendo la estándar de 2,2 MJ/m³K.

Con estos datos en cuanto a las longitudes necesarias, más profundas de la media saliéndose de nuestro tope de profundidad de sondeo:

- 123,8 m en el caso de 0,7 W/mK y 3,8 MJ/m³K.
- 189,7 m en el caso de 0,2 W/mK y 0,5 MJ/m³K.

14) TOBA (TUFF)

Esta roca ígnea volcánica tiene un rango de conductividades de 1,1-1,12 W/mK y su capacidad calorífica volumétrica de 1,1 MJ/m³K siendo los resultados obtenidos:

- 106,9 m en el caso de (1,12 W/mK y 1,1 MJ/m³K.
- 107,9 m en el caso de (1,1 W/mK y 1,1 MJ/m³K.

15) SERPENTINA (SERPENTINITE)

La serpentinita tiene una conductividad media-alta trabajando en un rango de 2,3-4,31 W/mK, pero su conductividad recomendada es de 3 W/mK y una capacidad calorífica volumétrica de 2,2 MJ/m³K. A la vista de estos datos resulta que se obtienen:

- 46,3 m en el caso de 4,31 W/mK y 2,2 MJ/m³K.
- 67,6 m en el caso de 2,3 W/mK y 2,2 MJ/m³K.

16) ESQUISTO (SHALE).

Este elemento trabaja con unas conductividades entre 1,5-2,6 W/mK aunque se recomienda 2,1 W/mK y unas capacidades caloríficas volumétricas de 2,24-2,51 MJ/m³K. Con estos datos se obtienen unas longitudes necesarias de:



- 62,34 m en el caso de 2,6 W/mK y 2,51 MJ/m³K.
- 87,49 m en el caso de 1,5 W/mK y 2,24 MJ/m³K.

17) LIMO (SILT).

Con el limo se debe discernir entre limo seco y limo húmedo:

17.1 LIMO SECO (SILT, DRY)

El limo seco, aun teniendo una conductividad baja, tiene un rango “amplio” en comparación con los otros elementos de baja conductividad, estando sus valores entre 0,38-1 W/mK. Entre ellos, el recomendado es 1 W/mK.

Su capacidad calorífica volumétrica oscila entre 1,51-1,62 MJ/m³K, recomendándose 1,6 MJ/m³K.

De esta forma, resultan unas longitudes necesarias de sondeo entre:

- 111 m en el caso de 1 W/mK y 1,62 MJ/m³K.
- 159,5 m en el caso de 0,38 W/mK y 1,51 MJ/m³K.

A la vista de estos resultados, las longitudes sobrepasan nuestra profundidad máxima de sondeo.

17.2 LIMO HÚMEDO (SILT, MOIST).

El limo húmedo aumenta ligeramente su conductividad respecto al seco 1-1,23 W/mK, aunque se recomienda utilizar el valor de 1,8 W/mK.

Para su capacidad calorífica volumétrica los valores aumentan y amplían su espectro a 1,6-2,78 MJ/m³K, siendo 2,2 MJ/m³K el valor recomendado.

En este caso las longitudes necesarias entre:

- 66,94 m en el caso de 2,3 W/mK y 2,42 MJ/m³K.
- 111,1 m en el caso de 1 W/mK y 2,1 MJ/m³K.



Habría que calcular bien lo que se necesita para no sobrepasar los 110 m, dado que puede llegar a los 111 m.

18) LIMOLITA (SILTSTONE).

La limolita baraja unas conductividades entre 1-2,3 W/mK, aunque se utiliza por regla general 1,8 W/mK.

Las capacidades caloríficas volumétricas están entre 2,13-2,42 MJ/m³K, pero generalmente se usa 2,3 MJ/m³K.

Después de operar con estos valores, se obtienen unos resultados donde el rango de longitudes necesarias es de:

- 67,34 m en el caso de 2,3 W/mK y 2,42 MJ/m³K.
- 109,5 m en el caso de 1 W/mK y 2,13 MJ/m³K.

19) BENTONITA 12% (BENTONITE 12%).

Se obtienen unos resultados donde el rango de longitudes necesarias es de:

- 123,6 m para 0,7 W/mK y 3,9 MJ/m³K.

NOTA: Valores únicos. La longitud excede de nuestra profundidad máxima.

20) BENTONITA 12%/ ARENA 15% (BENTONITE 12%/ SAND 15%).

Se obtienen los resultados para los datos:

- 85,49 m para 1,5 W/mK y 3,4 MJ/m³K.

NOTA: Valores únicos.

21) ARCOSA (ARKOSE).

Esta arenisca de grano mal graduado tiene una conductividad entre 2,54-3,73 W/mK, siendo la recomendada de 2,9 W/mK.



La capacidad calorífica volumétrica es de valor único, de $2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.

Así resulta que las longitudes necesarias oscilan entre:

- $50,44 \text{ m}$ en el caso de $3,73 \text{ W/mK}$ y $2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.
- $63,79 \text{ m}$ en el caso de $2,54 \text{ W/mK}$ y $2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.

22) BRECHA (BRECCIA).

Esta roca de fragmentos angulares tiene unas conductividades de $2,26-4,11 \text{ W/mK}$, recomendándose $2,8 \text{ W/mK}$ y un único valor para su capacidad calorífica volumétrica de $2,1 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.

Con estos datos, para las longitudes necesarias se obtiene:

- $47,63 \text{ m}$ en el caso de $4,11 \text{ W/mK}$ y $2,1 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.
- $68,79 \text{ m}$ en el caso de $2,26 \text{ W/mK}$ y $2,1 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.

23) APLITA (APLITE).

Esta roca ígnea formada de feldespato, alcalino, mica moscovita y cuarzo tiene una conductividad cuyos valores varían entre $2,64-3,94 \text{ W/mK}$, usándose generalmente $3,1 \text{ W/mK}$.

Su capacidad calorífica volumétrica es única, de $2,4 \text{ MJ/m}^3\text{K}$. De este modo, se calculan unas longitudes necesarias de sondeo de:

- $48,6 \text{ m}$ en el caso de $3,94 \text{ W/mK}$ y $2,4 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.
- $61,86 \text{ m}$ en el caso de $2,64 \text{ W/mK}$ y $2,4 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.

24) ANHIDRITA (ANHYDRITE).

Este mineral de sulfato de calcio (CaSO_4) deshidratado, muy común en los depósitos de sal, tiene un amplio intervalo de conductividad: $1,52-7,75 \text{ W/mK}$, aunque por regla general se usa el valor de $4,1 \text{ W/mK}$.

En cambio, posee una capacidad calorífica volumétrica única de $2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.



Analizando los resultados obtenidos, se observan las siguientes longitudes necesarias de sondeo, donde vemos una gran diferencia:

- 34,44 m en el caso de 7,75 W/mK y 2 MJ/m³K.
- 87,33 m en el caso de 1,52 W/mK y 2 MJ/m³K.

25) ANDESITA (ANDESITE).

Esta roca ígnea volcánica, usada como material de relleno en la construcción y como árido en carreteras, cuenta con unas conductividades de 1,73-2,22 W/mK, aunque se recomienda usar el valor de 2,2 W/mK.

Para la capacidad calorífica volumétrica, su valor es único, de 2,4 MJ/m³K.

Con estos datos se obtiene:

- 68,84 m en el caso de 2,22 W/mK y 2,4 MJ/m³K.
- 80,15 m en el caso de 1,73 W/mK y 2,4 MJ/m³K.

26) ANFIBOLITA (ANPHIBOLITE).

La anfibolita tiene unas conductividades entre 2,14-3,55 W/mK, recomendándose 2,9 W/mK y una capacidad calorífica volumétrica única de 2,6 MJ/m³K.

Con estos datos se obtiene lo siguiente:

- 51,57 m en el caso de 3,55 W/mK y 2,6 MJ/m³K.
- 70,19 m en el caso de 2,14 W/mK y 2,6 MJ/m³K.

27) HORMIGÓN (CONCRETE).

El hormigón posee unas conductividades entre 0,92-2,2 W/mK, aunque se recomienda usar el valor de 1,6 W/mK y una capacidad calorífica volumétrica única de 1,8 MJ/m³K.

De esta manera se obtiene:



- 73,88 m en el caso de 2,22 W/mK y 1,8 MJ/m³K.
- 115 m en el caso de 0,92 W/mK y 1,8 MJ/m³K.

NOTA: Se debe tener en cuenta la longitud máxima sobrepasa la profundidad marcada en nuestro sondeo de 110 m.

28) CONGLOMERADO (CONGLOMERATE).

El conglomerado trabaja dentro de un intervalo de conductividades de 1,35-3,70 W/mK, pero se recomienda usar 2,8 W/mK y una capacidad calorífica volumétrica única de 1,8 MJ/m³K.

En este elemento se aprecia que las longitudes necesarias de sondeo son:

- 50,85 m en el caso de 3,70 W/mK y 1,8 MJ/m³K.
- 94,01 m en el caso de 1,35 W/mK y 1,8 MJ/m³K.

29) DIORITA (DIORITE).

Esta roca plutónica compuesta de feldespatos (2/3) y minerales oscuros (1/3), alberga unas conductividades de 1,97-2,87 W/mK, donde se recomienda usar el valor de 2,6 W/mK, y una capacidad calorífica única de 2,9 MJ/m³K.

De esta manera los resultados son:

- 58,36 m en el caso de 2,87 W/mK y 2,9 MJ/m³K.
- 73,45 m en el caso de 1,97 W/mK y 2,9 MJ/m³K.

30) ECLOGITA (ECLOGITE).

Esta roca metamórfica de grano grueso y composición basáltica posee unas conductividades de 2,32-4,19 W/mK siendo 2,9 W/mK la recomendada y una capacidad calorífica única de 3,1 MJ/m³K.

Respecto a las longitudes necesarias de sondeo se obtiene.

- 46,59 m en el caso de 4,19 W/mK y 3,1 MJ/m³K.



- 66,29 m en el caso de 2,32 W/mK y 3,1 MJ/m³K.

31) GNEIS (GNEISS).

Esta roca similar al granito, aunque definida en bandas, presenta un abanico de conductividades entre los valores 1,89-3,96 W/mK y una capacidad calorífica entre 1,84-2,35 MJ/m³K, recomendándose el uso de 2,1 MJ/m³K.

Los resultados nos ofrecen:

- 48,49 m en el caso de 3,96 W/mK y 2,35 MJ/m³K.
- 76,92 m en el caso de 1,89 W/mK y 1,84 MJ/m³K.

32) GABRO (GABBRO).

Esta roca ígnea plutónica alberga unas conductividades entre 1,72-2,53 W/mK, pero se recomienda utilizar el valor de 1,9 W/mK. La capacidad calorífica volumétrica única es de 2,6 MJ/m³K.

A la vista de los resultados se observa:

- 63,31 m en el caso de (2,53 W/mK y 2,6 MJ/m³K).
- 80,11 m en el caso de (1,72 W/mK y 2,6 MJ/m³K).



12. RESULTADOS.

A continuación, se procede a la organización de los datos obtenidos para estudiar los dos resultados que buscábamos: profundidades del sondeo y temperaturas del fluido.

12.1. INFLUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA EN LA LONGITUD FINAL DEL SONDEO.

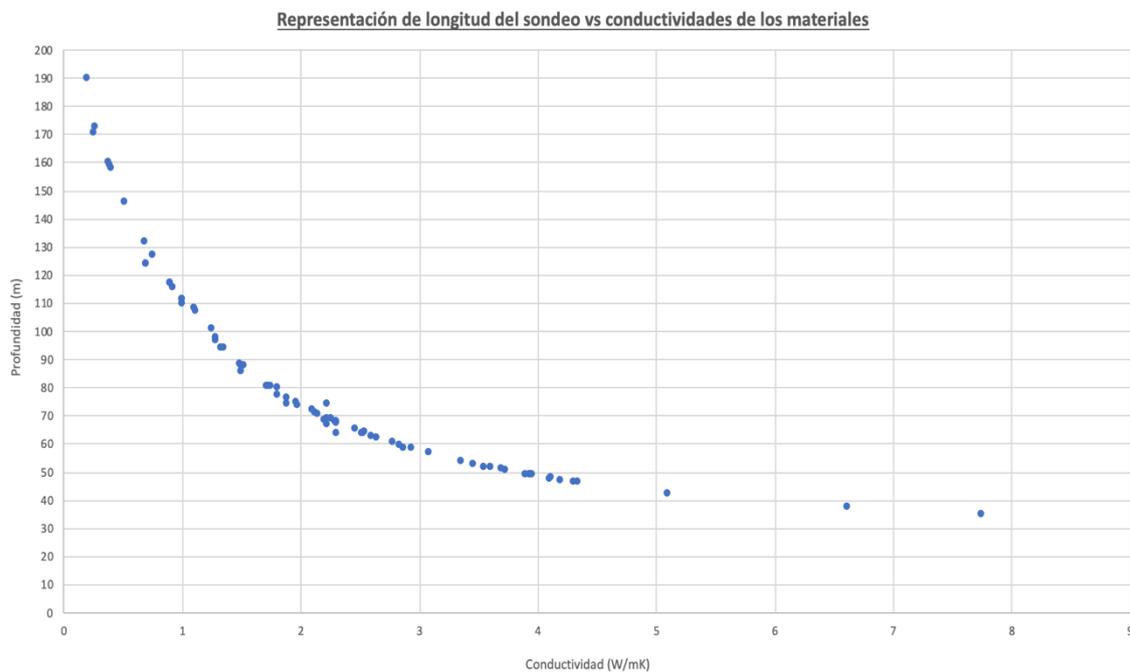


Figura 28. Representación de la influencia de la conductividad térmica de distintos materiales en la longitud final del sondeo.

A partir de los resultados, que se recogen en la tabla número 2, se representan los datos obtenidos dando la curva superior. Se puede observar una relación bastante clara entre la conductividad y la profundidad del sondeo, siendo inversamente proporcionales: cuanto menor es la conductividad, valores más altos de longitud del sondeo geotérmico se requieren, y viceversa.

Estos resultados tendrían sentido, ya que la conductividad mide la capacidad de conducción del calor, luego cuanto mayor sea más fácil lo conducirá y menos falta hará perforar el terreno en busca de temperaturas mayores para alcanzar el rendimiento buscado.



Estudio sobre el diseño y la evolución de un sistema geotérmico somero.
Influencia de los parámetros térmicos del terreno.



Tabla 2. Obtención de diferentes longitudes a partir de diferentes valores de conductividad según el material.

Material	Longitudes (m)	Conductividades (W/mK)
Carbón	131,3	0,68
Carbón	170,2	0,26
Dolomita	45,97	4,34
Dolomita	59,2	2,83
Arcilla seca	117	0,9
Arcilla seca	157,5	0,4
Arcilla húmeda	116,9	0,9
Arcilla húmeda	68,03	2,2
Caliza maciza	48,66	3,93
Caliza maciza	64,95	2,46
Caliza margosa	60,03	2,78
Caliza margosa	74,46	1,96
Caliza oolítica	53,49	3,36
Caliza oolítica	70,96	2,12
Mármol	56,62	3,08
Mármol	96,3	1,28
Areniscas	41,98	5,1
Areniscas	97,6	1,28
Granito	47,23	4,1
Granito	71,73	2,1
Cuarzita	36,99	6,62
Cuarzita	51,45	3,6
Grava seca	145,5	0,52
Grava seca	158,5	0,39
Grava saturada	76,9	1,8
Grava saturada	79,74	1,8
Marga	52,38	3,46
Marga	80,29	1,75
Marga arcillosa	63,47	2,52
Marga arcillosa	87,92	1,49
Marga dolomítica	48,95	3,9
Marga dolomítica	76,13	1,89
Arena seca	127	0,75
Arena seca	172,4	0,27
Arena congelada	58,33	2,94
Arena congelada	100,4	1,25
Basalto	67,33	2,29
Basalto	93,55	1,33
Turba	123,8	0,7
Turba	189,7	0,2
Toba	106,9	1,12
Toba	107,9	1,1
Serpentina	46,3	4,31
Serpentina	67,6	2,3
Esquisto	62,34	2,6
Esquisto	87,49	1,5
Limo seco	111	1
Limo seco	159,5	0,38
Limo húmedo	66,94	2,3
Limo húmedo	111,1	1
Limolita	63,34	2,3
Limolita	109,5	1
Bentonita	123,6	0,7
Bentonita 12 - Arena 15	85,49	1,5
Arcosa	50,44	3,73
Arcosa	63,79	2,54
Brecha	47,63	4,11
Brecha	68,79	2,26
	48,6	3,94
Aplita	61,86	2,64
	34,44	7,75
Anhidrita	87,33	1,52
	68,84	2,22
Andesita	80,15	1,73
	51,57	3,55
Anfibolita	70,19	2,14
	73,88	2,22
Hormigón	115	0,92
	50,85	3,7
Conglomerado	94,01	1,35
	58,36	2,87
Diorita	73,45	1,97
	46,59	4,19
Eclogita	66,29	2,22
	48,49	3,96
Gneis	73,92	1,89
	63,31	2,53
Gabro	80,11	1,72



Añadiendo a la gráfica anterior los parámetros de capacidad calorífica (puntos naranjas) vemos que se repite otro patrón:

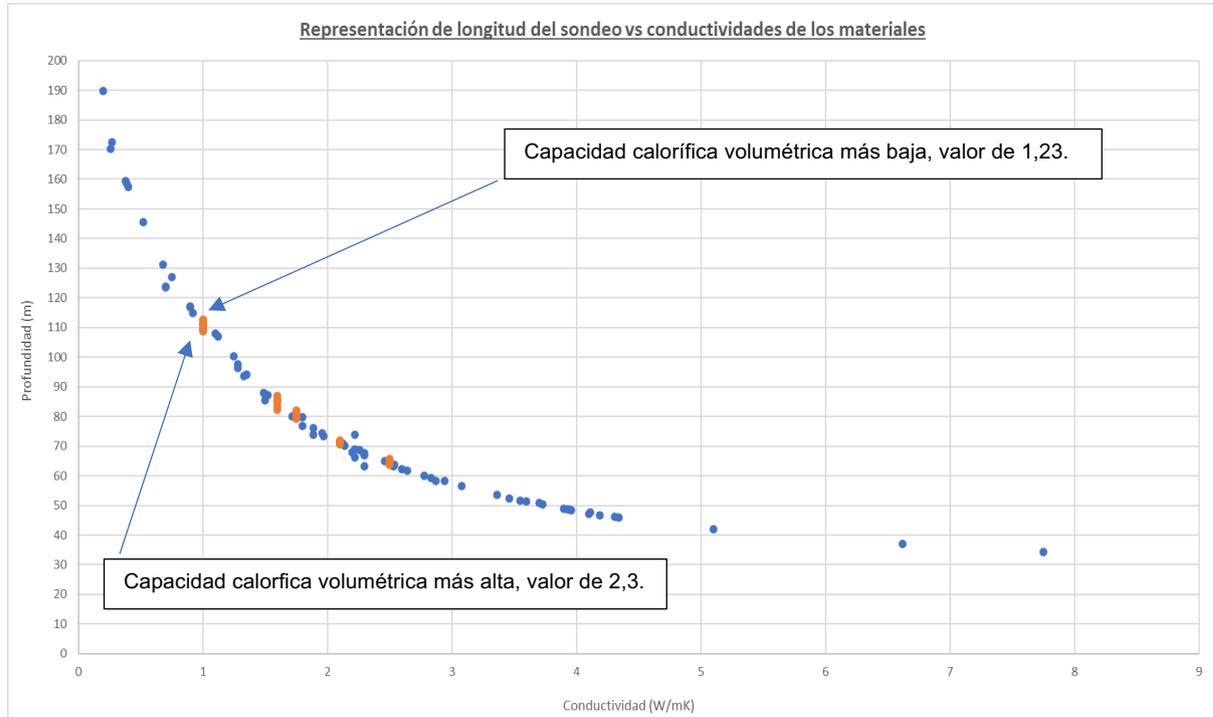


Figura 29. Conductividades y capacidades caloríficas vs longitudes del sondeo.

Vemos que, para un mismo valor de conductividad, los puntos que representan la capacidad calorífica siguen una relación lineal vertical. Con lo que podemos deducir que: Para un mismo material, a valores menores de capacidad calorífica, más aumenta la profundidad del sondeo.

Recordamos que la capacidad calorífica determinaba para un material “cuánto” puede soportar cambios de temperatura mientras se le aporta calor.

Los valores y materiales empleados para este análisis se recogen en la tabla siguiente:



Tabla 3. Relación entre las capacidades caloríficas de un mismo material y las longitudes alcanzadas.

Simulado programa	Datos		
	Longitudes (m)	Conductividades (W/mK)	
112,7	1	1,23	Arenas, limos y limolita
111,9	1	1,4	
111,5	1	1,5	
111,1	1	1,6	
110,4	1	1,8	
109,1	1	2,2	
108,8	1	2,3	
86,89	1,6	1,16	Arcilla y hormigón
85,9	1,6	1,5	
85,18	1,6	1,8	
84,73	1,6	2	
83,26	1,6	2,8	
82,36	1,6	3,4	
82,04	1,75	1,23	Arena, arenisca, mármol y marga
81,23	1,75	1,56	
80,29	1,75	2	
79,95	1,75	2,2	
79,7	1,75	2,35	
79,33	1,75	2,57	
71,81	2,1	2	Marga, granito y esquistos
71,38	2,1	2,3	
71,12	2,1	2,51	
70,99	2,1	2,6	
70,87	2,1	2,7	
70,57	2,1	2,96	
65,67	2,5	1,16	Arena, marga, anhidrita, caliza margosa
65,09	2,5	1,5	
64,47	2,5	1,96	
64,42	2,5	2	
64,08	2,5	2,3	
63,93	2,5	2,45	
63,78	2,5	2,6	

12.2. INFLUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN LA TEMPERATURA MEDIA DEL FLUIDO EN EL AÑO 25 DE SIMULACIÓN.

Análogo al apartado anterior, se recogen los resultados de las temperaturas mínimas y máximas del fluido en la tabla número 3 a continuación, donde se recogen también los demás inputs de entrada para los cálculos.

Al igual que antes, representando esos datos obtenemos la siguiente curva:

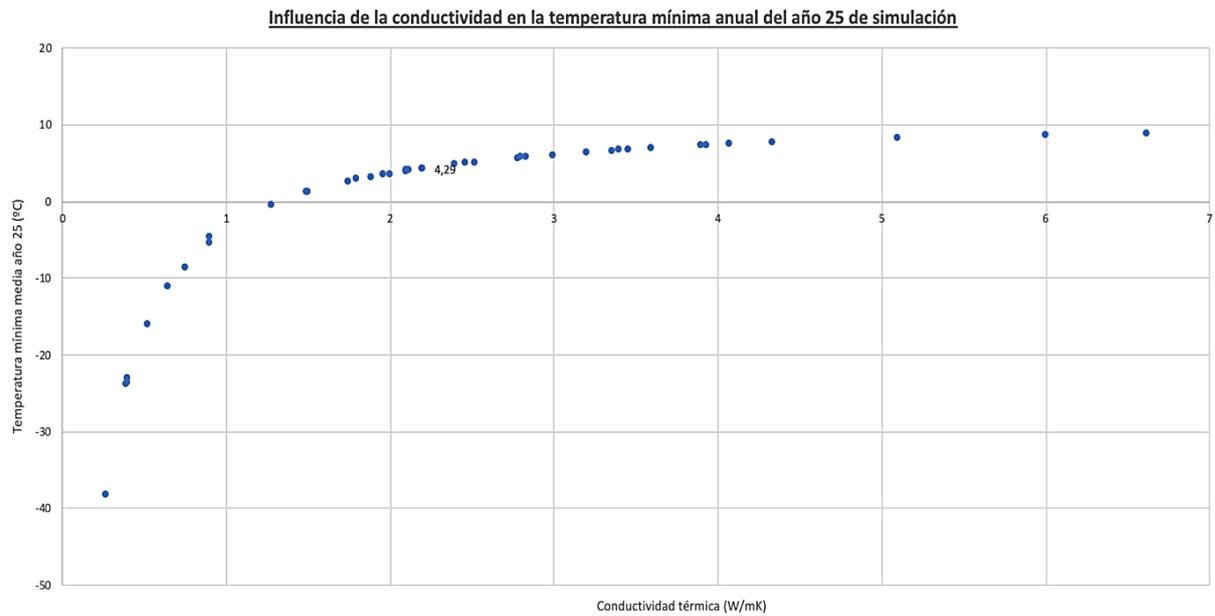


Figura 30. Influencia de la conductividad en la temperatura mínima anual en el año 25 de la simulación.

Como vemos, se obtiene de nuevo una relación matemática clara: a mayor conductividad térmica, más crece a su vez la temperatura mínima media del fluido en el año 25, son directamente proporcionales.



Estudio sobre el diseño y la evolución de un sistema geotérmico somero.
Influencia de los parámetros térmicos del terreno.



Tabla 4. Simulaciones para obtener las temperaturas medias del fluido.

Material	DATOS INTRODUCIDOS PARA SIMULAR			DATOS CALCULADOS	
	Conductividad térmica (W/mK)	Resistencia térmica sondeo	Capacidad calorífica volumétrica	Tº mín media del fluido año 25	Tº máx media del fluido año 25
DOLOMITA	2,83	0,166	2,5	5,82	12,78
	3,2			6,43	12,89
	4,34			7,68	13,11
ARCILLA SECA	0,4	0,166	1,6	-23,09	7,22
	0,65			-11	9,69
	0,9			-5,32	10,8
ARCILLA HÚMEDA	0,9	0,166	2,4	-4,59	10,8
	1,5			1,32	11,95
	2,2			4,32	12,52
CALIZA MACIZA	2,46	0,166	2,3	4,99	12,64
	2,8			5,72	12,78
	3,93			7,28	13,05
CALIZA MARGOSA	1,96	0,166	2,3	3,49	12,37
	2,2			4,29	12,52
	2,78			5,68	12,77
CALIZA OOLÍTICA	2,12	0,166	2,3	4,04	12,47
	2,4			4,84	12,62
	3,36			6,62	12,94
ARENISCAS	1,28	0,166	2	-0,46	11,66
	3			6,01	12,85
	5,1			8,17	13,22
GRANITO	2,1	0,166	2,4	4,01	12,46
	3,4			6,69	12,94
	4,07			7,43	13,07
CUARCITA	3,6	0,166	2,1	6,89	13
	6			8,65	13,29
	6,62			8,91	13,33
GRAVA SECA	0,39	0,166	1,6	-23,87	7,06
	0,4			-23,09	7,22
	0,52			-15,94	8,7
GRAVA SATURADA	1,8	0,166	2,4	2,87	12,25
MARGA	1,75	0,166	2,3	2,61	12,21
	2,1			3,98	12,46
	3,46			6,75	12,96
MARGA ARCILLOSA	1,49	0,166	2,2	1,17	11,95
	2			3,6	12,4
	2,52			5,1	12,68
MARGA DOLOMÍTICA	1,89	0,166	2,3	3,22	12,32
	2,2			4,29	12,52
	3,9			7,25	13,05
ARENA SECA	0,27	0,166	1,4	-38,13	4,21
	0,4			-23,65	7,21
	0,75			-8,6	10,22
LIMO SECO	0,38	0,166	1,6	-24,69	6,89
	0,5			-16,91	8,5
	1			-3,79	11,1
LIMO HÚMEDO	1	0,166	2,2	-3,29	11,08
	1,23			-0,79	11,56
	1,8			2,81	12,25
LIMOLITA	1	0,166	2,3	-3,22	11,08
	1,8			2,84	12,25
	2,3			4,58	12,57
ARCOSA	2,54	0,166	2	5,1	12,69
	2,9			5,84	12,82
	3,73			7,02	13,03
BRECHA	2,26	0,166	2,1	4,4	12,56
	2,8			5,67	12,78
	4,11			7,43	13,09
APLITA	2,64	0,166	2,4	5,42	12,72
	3,1			6,26	12,87
	3,94			7,31	13,05
ANHIDRITA	1,52	0,166	2	1,26	11,99
	4,1			7,4	13,09
	7,75			9,26	13,39
DIORITA	1,97	0,166	2,9	3,7	12,36
	2,6			5,45	12,69
	2,87			5,97	12,78
GABRO	1,72	0,166	2,6	2,58	12,17
	1,9			3,35	12,32
	2,53			5,23	12,67
MÁRMOL	1,28	0,166	2	-0,46	11,66
	2,3			4,48	12,58
	3,08			6,14	12,88



12.3. COP DE LA BOMBA.

Se procede a calcular un ejemplo del COP de la bomba. Lo aplicaremos a las calizas por ser un material más común en esta zona.

Parto de los siguientes inputs en el programa:

- Resistencia térmica del sondeo: 0,166 mK/W.
- Capacidad calorífica volumétrica: 2,3 MJ/m³K.

La expresión a aplicar sería la siguiente:

$$COP = 0,4 \times \frac{T^a \text{ foco caliente (K)}}{T^a \text{ foco caliente (}^\circ\text{C)} - T^a \text{ foco frío (}^\circ\text{C)}}$$

Donde:

- La temperatura del foco caliente corresponde al ACS y es un valor que estimo yo, supongo 40 °C (313 K).
- La temperatura del foco frío es la del terreno. Tomo la T^a mínima del fluido que me da el programa, ya que considero que el sistema trabaja en invierno para calefacción, no para refrigeración.

Resultados para un período de simulación de 5 años:

Tabla 5. Resultados para el COP de la bomba en calizas en el año 5.

Material	Conductividad térmica (W/mK)	T ^a mín media del fluido año 5	T ^a máx media del fluido año 5	T ^a foco caliente K	T ^a foco caliente °C	T ^a foco frío °C	COP °C
CALIZA MACIZA	2,46	5,65	13,25	313	40	5,65	3,644832606
	2,8	6,29	13,3	313	40	6,29	3,714031445
	3,93	7,66	13,39	313	40	7,66	3,871366729



Resultados para un período de simulación de 25 años:

Tabla 6. Resultados para el COP de la bomba en calizas en el año 25.

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Tª mín media del fluido año 25	Tª máx media del fluido año 25	Tª foco caliente K	Tª foco caliente º C	Tª foco frío º C	COP º C
CALIZA MACIZA	2,46	4,99	12,64	313	40	4,99	3,576121108
	2,8	5,72	12,78	313	40	5,72	3,652275379
	3,93	7,28	13,05	313	40	7,28	3,826405868

Vemos que la tendencia con el paso del tiempo es a disminuir. Esto se debe en parte a la disminución de la temperatura del foco frío; al extraer calor casi de forma continua, el terreno no es capaz de “recuperarse”, con lo que empieza a perder temperatura haciendo que el COP vaya disminuyendo.

12.4. OPTIMIZACIÓN DE LA LONGITUD DEL SONDEO.

Se ha hecho un estudio de optimización de la configuración de los sondeos y se ha llegado a una conclusión interesante que podemos ver en la siguiente imagen:

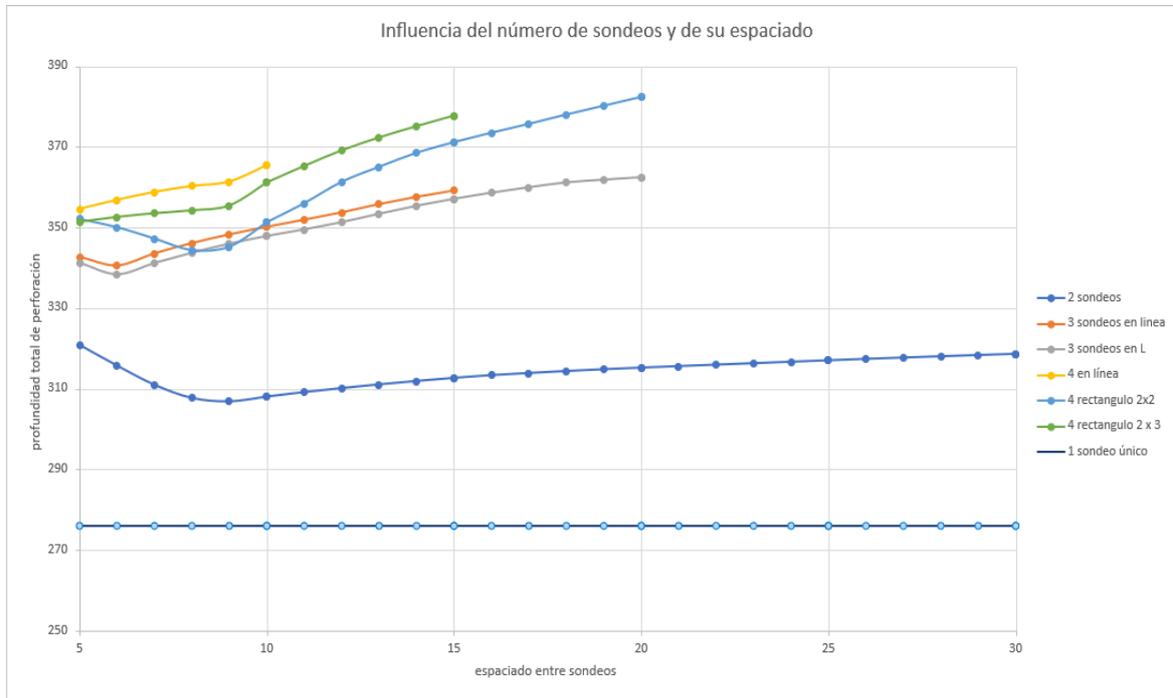


Figura 31. Influencia del espaciado entre sondeos y la profundidad que se necesita para los mismos.



Con un único sondeo vemos que se mantiene perfectamente constante. En cambio, con otros modelos se observan relaciones matemáticas diferentes: Se observa que cuando se construyen varios sondeos juntos se afectan y la cantidad también varía. Uno de los motivos puede ser el grosor de la tubería y el principio que sigue: su influencia es inversamente proporcional al número de tubos. Además, cuando se realiza un sondeo, no se cuenta como “bueno” o rentable a nivel de explotación el 100% del mismo, si no que existe una zona que es menos apta para la captación o una zona más mala. Cuanto mayor número de sondeos tengamos, mayor proporción de esta zona no deseada habrá y más profundo tendremos que diseñar.

13. CONCLUSIONES.

A partir de los datos de conductividades y capacidades caloríficas que proporciona el programa y las simulaciones obtenidas, como datos podemos acotar lo siguiente:

- ❖ En los materiales compactos se cumple de forma prácticamente mayoritaria que cuanto más crece la conductividad menor será la temperatura máxima y ésta disminuirá a medida que aumente la capacidad calorífica volumétrica. Respecto al sondeo se cumple que la longitud necesaria de sondeo disminuye. En cambio, cuanto menor sea la conductividad y la capacidad calorífica volumétrica, mayor será la temperatura máxima y la longitud necesaria de sondeo.
- ❖ Por el contrario, para materiales amalgamados, frágiles o sueltos (diferentes tamaños de grano que formen dicho material), la temperatura máxima corresponde con la conductividad máxima. La temperatura del fluido también presenta valores más altos. En este caso, además, cabe reseñar que las longitudes necesarias de sondeo sobrepasan el máximo de nuestro sondeo estipulado de 110 m.
- ❖ En materiales saturados donde el flujo de agua es continuo, se invierten las temperaturas máximas, es decir, la temperatura máxima corresponde a la



mayor conductividad y la temperatura máxima mínima a la mínima conductividad. Respecto a las longitudes necesarias de sondeo, éstas se siguen manteniendo bajo el mismo criterio que las anteriores: mayor longitud cuanto menor es la conductividad y menor longitud cuanto mayor es la conductividad.

- ❖ Con los resultados de la temperatura mínima del fluido al cabo de 25 años se observa que el fluido no recupera el calor del terreno. Al aumentar la resistividad del terreno/fluido la temperatura mínima del fluido disminuye hasta congelar, frenando su circulación por el sistema y, por tanto, provocando una disminución en el rendimiento.
- ❖ En la práctica de la vida real ese aumento de la resistividad podría deberse a un sondeo mal ejecutado. La disminución del rendimiento se observa a través del COP de la bomba de calor geotérmica.
- ❖ La profundidad del sondeo no se ve influida por cambios en la resistividad térmica, solo le afecta la conductividad.



14. BIBLIOGRAFÍA.

- Acuña, José, y Björn Palm. 2010 «A Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger: Description and First Distributed Thermal Response Test Measurements».
- Angie Tejada Quiroz. "Exp. generacion geotermica. Ciencias". Recuperado de <https://es.slideshare.net/angietejadaquiroz/exp-generacion-geotermica>
- Arias Penas, Desirée, 2011. "Estudio comparativo entre la perforación de sondeos geotécnicos y geotérmicos".
- Baorui Ji. " Disipación del calor en un sistema geotérmico de baja entalpía." 2015; pp.10-16. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/26098/baorui%20ji_final.pdf
- BniLam, N., & Al-Khoury, R. (2016). Transient heat conduction in an infinite medium subjected to multiple cylindrical heat sources: An application to shallow geothermal systems. *Renewable Energy*, 97, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.069>
- "Characterization of boreholes-Results from a u-pipe borehole heat exchanger installation", 9º International IEA Heat Pump Conference, 2008, Zürich, Switzerland. Acuña, José y Palm, Björn.
- "Comprehensive summary of borehole heat exchanger research at KTH", en Conference on Sustainable Refrigeration and Heat Pump Technology, 2009, Stockholm. Acuña, José y Palm, Björn.
- Coppen R. Jonás, 2009. "Procedimiento de Laboratorio para la Determinación de las Propiedades Térmicas del Suelo".
- EKLÖF, C., & Gehlin, S. E. A. (1996). *A Mobile Equipment for Thermal Response Test*.
- Funcionamiento de una bomba de calor geotérmica - Geotermia - Grupo Visiona. (s. f.). Recuperado 22 de mayo de 2022, de <http://www.grupovisiona.com/es/geotermia/funcionamiento-de-una-bomba-de-calor-geotermica>



- “Guía de la energía geotérmica”. Llopis Trillo, Guillermo y Rodrigo Angulo, Vicente. Consejería de Economía y Consumo y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2008.
- *Geotermia* | *Idae*. (s. f.). Recuperado 3 de abril de 2022, de <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/geotermia>
- *Geotermia* | *Idae: Mapa tecnológico, calor y frío renovables* (1 de febrero de 2012). Recuperado 3 de abril de 2022
- International Energy Agency. (s. f.). Recuperado 9 de mayo de 2022, de <https://www.iea.org/>
- KTH Royal Institute of Technology in Stockholm | KTH. (s. f.). Recuperado 9 de mayo de 2019, de <https://www.kth.se/en>
- Maxim integrated products. «DS18S20. High-Precision 1-Wire Digital Thermometer». s. f. Accedido 20 de mayo de 2022. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18S20.pdf>.
- Observatorio Tecnológico de la Energía.«Área Tecnológica: Geotermia. Mapa Tecnológico: Calor y Frío Renovables», 2012. Recuperado de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calor_y_Frio_Renovables_Geotermia_30012012_global_196afed7.pdf
- Orche Gracia, Enrique "Energía geotérmica." 2011. Editorial Carlos López Jimeno.
- Ortiz, A., Georgiev, A., & Roth, P. (2002, octubre 28). *Ground Thermal Properties Study for BTES Applications - World and Chilean Review*.
- *PFC_Pablo_Andres_Valle.pdf*. (s. f.). Recuperado de http://oa.upm.es/31032/1/PFC_Pablo_Andres_Valle.pdf
- Riesgo Bernardo, Vanessa, 2013. “*Estudio de la instrumentación para la medida de la temperatura en sondeos geotérmicos*”.
- Seward, A., & Prieto, A. (2018). Determining thermal rock properties of soils in Canterbury, New Zealand: Comparisons between long-term in-situ temperature profiles and divided bar measurements. *Renewable Energy*, 118, 546–554. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.050>
- Spitler, J. D., & Bernier, M. (2016). 2 - Vertical borehole ground heat exchanger design methods. En S. J. Rees (Ed.), *Advances in Ground-Source*



Heat Pump Systems (pp. 29-61). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100311-4.00002-9>

- *U12-006.pdf*. (s. f.). Recuperado de <https://www.onsetcomp.com/datasheet/U12-006>
- van Manen, S. M., & Wallin, E. (2012). Ground temperature profiles and thermal rock properties at Wairakei, New Zealand. *Renewable Energy*, 43, 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.032>