

6. Conclusiones.

En este Proyecto Fin de Carrera se ha analizado la respuesta de un terreno al ser excitado térmicamente mediante agua circulando por un sistema de tubos enterrados en el mismo. Dentro de las múltiples configuraciones de tubos enterrados existentes, se ha trabajado sobre configuración híbrida, consistente en una disposición en paralelo horizontal con retorno directo conectada a una torre de refrigeración.

El análisis se ha realizado a partir de un algoritmo, en código Matlab, que simula la respuesta térmica del terreno supuesta la inexistencia de gradiente térmico en el interior del subsuelo en primer lugar. A continuación, se ha realizado un análisis de sensibilidad de las principales variables en lo que a influencia sobre el almacenamiento térmico se refiere (Capítulo 4.1.1). Por último, en el Capítulo 5 se ha realizado un estudio comparativo entre un terreno considerado como Sistema de Capacidad, y bajo la hipótesis de gradiente térmico no nulo, en un dominio definido por las dos direcciones espaciales correspondientes a la profundidad y a la dirección transversal a los conductos.

La obtención de los resultados de las secciones detalladas en el párrafo anterior determinan los dos *objetivos* de este Proyecto Fin de Carrera. Estos son, *la caracterización de la respuesta del terreno al ser excitado térmicamente*, y *la determinación de la diferencia existente entre un terreno supuesto como sistema de capacidad y bajo la consideración de gradiente térmico en su interior*. Los cuales pueden ser resumidos en las conclusiones expuestas a continuación.

La longitud de los tubos es el parámetro más destacado en cuanto a influencia en el almacenamiento térmico se refiere. Por ello, es considerado un parámetro importante sobre todo para valores superiores a 30 metros. El cual combinado con secciones de paso reducidas, alrededor de 10 centímetros de diámetro, hace que la eficiencia resultante alcance valores elevados.

El diámetro de los tubos es la segunda variable que más influencia tiene sobre el almacenamiento térmico en terrenos, en lo que a geometría de conductos se refiere. Al reducirse ésta, la eficiencia de la transferencia aumenta de forma considerable. Los resultados de las simulaciones demuestran que tuberías con diámetros menores aceleran la pérdida de carga calórica permitiendo aumentar la velocidad del fluido dentro de los tubos e incrementar así el caudal volumétrico de salida. Por otra parte, la disminución de la sección de paso tiene un límite admisible de funcionamiento que es la pérdida de carga máxima asumible, con la consideración económica asociada, por el equipo de impulsión para mover el caudal requerido.

Se puede observar cómo el número de tubos causa un reducido efecto sobre la energía térmica transferida en el terreno, en contra de lo supuesto inicialmente. Este aspecto radica en el hecho de que al incrementar el número de tubos, el aumento del área de

transferencia calórica es contrarrestado por la reducción de la velocidad de paso del fluido de trabajo por el del banco de tubos.

En lo que a propiedades geométricas del banco de tubos se refiere, se puede concluir que el aumento de sus dimensiones conduce a la reducción del tiempo necesario para saturar térmicamente el terreno, debido al aumento de la transferencia de energía térmica.

De todas las variables analizadas, la que mayor efecto causa sobre el tiempo de saturación del terreno es el volumen del mismo, siendo la temperatura de entrada la que menos (Ver Tabla 3 y Tabla 4).

A efectos de manejo de variables para el diseño de sistemas geotérmicos, se puede afirmar que la eficiencia del intercambio calórico es mayor cuanto más elevado sea el gradiente térmico entre el fluido y el terreno, cuanto mayor sea la velocidad de circulación, o cuanto mayor sea el tiempo de residencia de las partículas fluidas en el interior del sistema, es decir:

- Al aumentar la profundidad.
- Al disminuir el diámetro de los tubos o aumentar el gasto másico.
- Al aumentar la longitud de los tubos.

El incremento de la eficiencia de intercambio es menor al decrementar el diámetro que al incrementar la longitud de las conducciones. Esto se explica de manera que el incremento de intercambio térmico producido por el aumento de la velocidad, se ve penalizado por el decremento del área de transferencia, que tiene lugar al reducirse el diámetro de los tubos enterrados.

Al comparar, en régimen de refrigeración, el almacenamiento térmico en el terreno, bajo la hipótesis de sistema de capacidad, respecto de la consideración de gradiente térmico en su interior se podrá valorar la bondad del algoritmo implementado, obteniéndose las siguientes conclusiones.

Como era de esperar, los resultados arrojan la más que significativa diferencia entre ambas situaciones. Esto es, en el caso de la consideración de gradiente térmico, el calor se propaga más lentamente a través del sólido, con lo que se requiere más tiempo para su saturación térmica que en el caso de sistema de capacidad, donde, en los instantes iniciales, la transferencia de energía térmica es muy elevada debido a la elevada conductividad y salto térmico existente, disminuyendo hasta anularse en las horas finales por encontrarse el terreno saturado térmicamente. En la conducción bidimensional, la densidad de flujo de calor no se anula para el tiempo considerado, ya que la temperatura del terreno se encuentra lejos de la saturación térmica.

En resumen, resultan más precisos y reales los resultados obtenidos en las simulaciones bajo la consideración de gradiente térmico en el interior del sólido, mientras que como

inconveniente cabe destacar que el tiempo de computación es considerablemente superior. Por lo anterior, el algoritmo implementado no predice con suficiente fiabilidad el comportamiento temporal de un terreno real, pero sí son válidos los resultados obtenidos en lo que a tendencias se refieren.

Si se atiende a consideraciones de carácter constructivo, es destacable que para zonas climáticas severas, la superficie exterior (a lo largo de donde se encuentran los tubos) puede ser tratada para modificar las condiciones naturales, incrementando así la diferencia de temperaturas entre el medio exterior y el suelo. El sombreado, sembrado y regado son estrategias favorables para reducir la temperatura de la tierra, y al mismo tiempo evitar la saturación del intercambio calórico del suelo alrededor de los tubos.

En definitiva, la elevada inercia térmica de la corteza terrestre es aprovechable durante todo el año, lo que avalándola como una fuente de enfriamiento eficiente del fluido caloportador, y de muy bajo impacto medioambiental. Con ello se consigue un aumento del rendimiento de la instalación de climatización, revelándose como una técnica con suficientes atributos como ser promovida en las zonas climáticas más calurosas del territorio nacional.