

De Pozos de Refrigeración a Almacenamiento de Energía

Autor(es) de la comunicación: M. Hendriks¹ y M.S. Godschalk²

1 IFTec GeoEnergía S.L., C/ Doctor Esquerdo 10, 4º centro, 28028 Madrid, España, m.hendriks@iftec.es

2 IF Technology BV, Velperweg 37, 6824 BE Arnhem, Países Bajos, b.godschalk@iftechnology.nl

Resumen: Existen diferentes tipos de tecnologías para intercambiar energía térmica con el subsuelo. Hay aplicaciones, como pozos de refrigeración y bombas de calor geotérmicas (BCG), que utilizan la temperatura natural del subsuelo, usando el subsuelo como vertedero o fuente de calor. Otro tipo de aplicación, que se denomina como ASET (Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica), se basa en la acumulación de calor y frío para uso posterior. En algunas regiones de España se está produciendo una proliferación de proyectos con pozos de refrigeración. Si se usa el agua subterránea sólo para disipar calor se calienta el acuífero. Un incremento de las temperaturas en el acuífero puede causar problemas técnicos y/o medioambientales. Por eso sería mejor equilibrar el calor añadido con una extracción de calor para calefacción. Otra opción es cargar frío en invierno para la refrigeración directa en verano. En ésta comunicación se estudian con más detalle las posibilidades para mejorar sistemas de pozos de refrigeración para una climatización eficiente y sostenible.

Palabras clave: Acuíferos, Agua subterránea, Pozos de refrigeración, Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica.

1. INTRODUCCION

Los Pozos de Refrigeración, las Bombas de Calor Geotérmicas (BCG) y el Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica (ASET) usan el subsuelo para intercambiar energía térmica (calor y “frío”) para calentar y refrigerar con eficacia edificios y procesos industriales. Las aplicaciones de los pozos de refrigeración y sistemas de BCG se basan en la temperatura natural del subsuelo, usando el subsuelo como fuente de calor o bien como vertedero de calor. Las aplicaciones de ASET se basan en un almacenamiento estacional de calor y “frío” para un uso posterior. La energía térmica almacenada se puede usar para calefacción o refrigeración directa o en combinación con una bomba de calor.

En algunas regiones de España se usa el agua subterránea para refrigerar, aplicando un sistema de pozos de refrigeración o un sistema abierto de BCG. En ambos casos el calor del edificio se disipa al agua subterránea. El agua calentada se re-inyecta en el acuífero o se vierte, por ejemplo a un río, produciendo un incremento de la temperatura del acuífero o del agua superficial. Las autoridades locales observan una proliferación en el empleo de aguas subterráneas para refrigerar y muestran preocupaciones sobre los impactos hidrodinámicos e hidrotérmicos de los acuíferos.

El uso del subsuelo para intercambiar energía térmica es una opción de ahorro energético para la climatización, sin embargo puede no ser sostenible si se calienta el subsuelo. El objetivo de esta comunicación es mostrar que existen posibilidades de mejora en los sistemas de pozos de refrigeración para un uso más sostenible de aguas subterráneas con el objetivo de obtener una climatización eficiente.

2. TECNOLOGIAS DE INTERCAMBIO DE GEO-ENERGIA

Existen diferentes tecnologías que se pueden usar para intercambiar energía térmica con el subsuelo. Algunas usan el subsuelo como fuente de calor o bien como vertedero de calor. Otras se

basan en el almacenamiento (estacional) de calor y frío. Otro punto de distinción es si el sistema es abierto o cerrado. Con un sistema abierto se extrae e inyecta agua subterránea. Con un sistema cerrado no se extrae agua subterránea.

Pozos de refrigeración (*Groundwater cooling*)

Un sistema de pozos de refrigeración requiere la presencia de un acuífero desde el que se puede extraer agua subterránea con un pozo de captación. El agua subterránea extraída se usa por medio de un intercambiador de calor para la refrigeración del edificio. El calor del edificio aumenta la temperatura del agua que es recargada al acuífero en otro sitio (pozo de inyección). La temperatura del agua que se recarga suele ser alta, hasta 15 K más alta que la temperatura de extracción. A veces el agua no se recarga pero se vierte a una alcantarilla o un río.

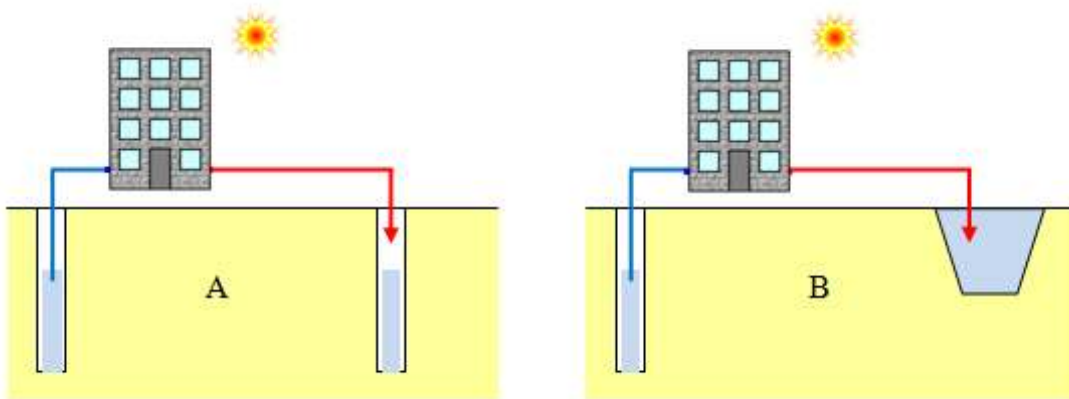


Figura 1. A; Pozo de refrigeración con recarga (bucle abierto) - B; Pozo de refrigeración con vertedero.

Bomba de Calor Geotérmica (*Ground Source Heat Pump - GSHP*)

Una bomba de calor geotérmica (BCG) es una bomba de calor que utiliza el subsuelo como fuente de calor, funcionando a modo de calefacción, o como disipador de calor a modo de refrigeración. Para el intercambio de energía térmica la bomba de calor está conectada con la tierra con un lazo. La aplicación de un sistema BCG se basa en la temperatura natural del subsuelo. La conexión más común es un bucle cerrado, existiendo tubos en forma de "U" de polietileno de alta densidad insertados en perforaciones de 50 a 200 metros de profundidad (figura 2). Otro diseño es el uso directo del agua de un acuífero (a menudo llamado sistema de bucle abierto), similar a un sistema de pozos de refrigeración (figura 1).

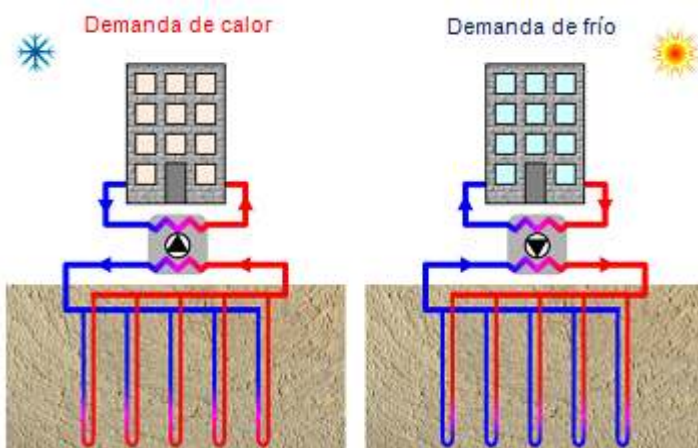


Figura 2. Sistema de BCG cerrado.

Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica (Underground Thermal Energy Storage - UTES)

Mientras que una BCG extrae o disipa calor, el Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica (ASET) se basa en el almacenamiento de calor y “frío” en el subsuelo para un uso posterior. En la mayoría de los casos se aplica ASET como un almacenamiento estacional. La energía almacenada se puede usar para calefacción o refrigeración directa o en combinación con una bomba de calor. En general pueden distinguirse dos tipos de sistemas:

- 1) ASET-A: Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica en Acuíferos
(*Aquifer Thermal Energy Storage - ATES*)
- 2) ASET-B: Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica en Sondeos
(*Borehole Thermal Energy Storage - BTES*)

El sistema ASET-A es un sistema de bucle abierto. Durante el verano se extrae agua del pozo frío usándola para refrigerar el edificio. El calor del edificio aumenta la temperatura del agua la cual es ahora inyectada en el pozo caliente. En invierno, el proceso se reinvierte. El agua es bombeada desde el pozo caliente y provee una fuente de calor, por ejemplo para bombas de calor. Las bombas de calor suministran total o parcialmente el requerimiento de calefacción, y como consecuencia la temperatura del agua subterránea desciende. El agua enfriada es re-inyectada en el subsuelo a través del pozo frío. Un sistema ASET-A no consume agua subterránea ni desecha el agua desde el acuífero. Toda el agua extraída desde un pozo es re-inyectada en el otro. Esto significa que la extracción neta de agua subterránea es cero, minimizando así el impacto ambiental.

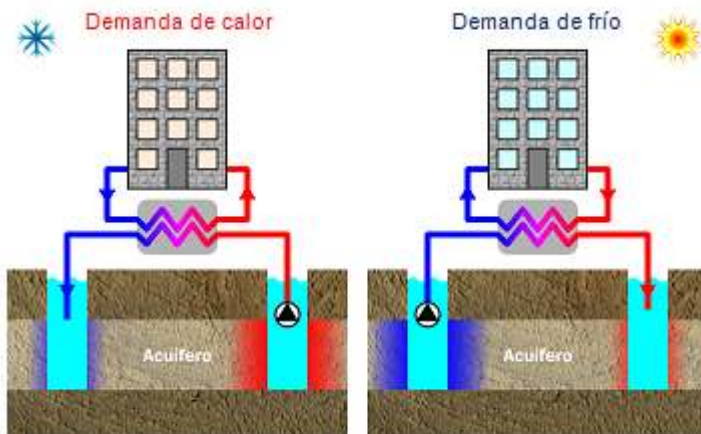


Figura 3. Sistema ASET-A.

Un sistema ASET-B es de bucle cerrado y consiste de una serie de sondeos con tubos en U, formando un intercambiador de calor terrestre. En invierno dicho intercambiador se utiliza para extraer calor del subsuelo; por ejemplo, para usarlo en una bomba de calor geotérmica. Cuando el fluido del circuito pasa a través de la bomba de calor, el fluido se enfría. El fluido enfriado regresa al intercambiador terrestre y la “energía fría” se almacena en el terreno alrededor de los sondeos. En verano, el flujo calorífico en el sistema ASET-B es al revés. La “energía fría” almacenada se extrae del subsuelo y pasa a través de un intercambiador de calor, suministrando así refrigeración al edificio, en modo directo (refrigeración pasiva) o con apoyo de la bomba de calor en modo inverso (refrigeración activa). Debido al transporte y la extracción de calor del edificio, la temperatura del fluido del circuito se eleva, Este fluido, con temperaturas superiores a la natural del subsuelo, es devuelto al intercambiador terrestre donde la “energía caliente” se almacena en el terreno circundante a los sondeos, para después ser usada en el siguiente ciclo de calefacción.

3. POSIBLES PROBLEMAS

Si se emplea el agua subterránea solo para refrigerar, el calor disipado provocará un gradual incremento de la temperatura en el acuífero. Esto puede causar problemas como:

- Perturbación del sistema de refrigeración por incremento de las temperaturas de extracción.
- Posibilidades limitadas de nuevos sistemas en la proximidad de sistemas existentes.
- Posibilidad de cambios en cualidades químicas, físico y biológicas del acuífero
- Legislación que limita la introducción y aplicación de este tipo de sistemas.

Un incremento de la temperatura causa una disminución del salto térmico (diferencia en temperatura entre el agua subterránea antes y después el intercambio de energía térmica con el edificio), resultando así una potencia menor del sistema de refrigeración. Es posible que el funcionamiento de sistemas existentes esté afectado por sistemas nuevos en la proximidad o, en el caso de un diseño malo, por un corto circuito térmico entre el pozo de inyección y el pozo de extracción.

Un cambio en la temperatura del agua subterránea puede cambiar el equilibrio químico y puede causar una aceleración en el crecimiento de micro-organismos. Existen investigaciones que muestran que la velocidad de procesos químicos y biológicos aumenta significativamente con el aumento de las temperaturas. Estos efectos pueden percibirse con cambios de temperaturas mayores a 20 K. Sin embargo, por debajo de los 40 °C el efecto no es significativo. Los ensayos de campo para observar el efecto que producen los cambios de temperatura sobre procesos químicos y microbiológicos muestran que el impacto es menor que la variación natural en la calidad del agua subterránea (IF Technology (2004)).

Un calentamiento del acuífero podría considerarse una contaminación térmica. Ésta puede ser una razón para las autoridades competentes a la hora de conceder o denegar los permisos requeridos.

4. SOLUCIÓN

En muchos países se usan el agua subterránea para refrigerar. En algunos países, como los Países Bajos, no está permitido disipar calor a un acuífero sin balance térmico. Por lo general, se exige sobre un periodo de uno a cinco años un equilibrio en la cantidad del calor disipado al acuífero y la cantidad de calor extraído del acuífero. Se puede cumplir esta condición si se usa el sistema tanto para refrigerar como para calentar o si se recarga “frío” durante el invierno.



Figura 4. Sistema geotérmico de bucle abierto en una dirección, para calefacción y refrigeración.

La figura 4 muestra el principio de un sistema mejorado para refrigeración y calefacción con un flujo invariable del pozo de extracción hacia el pozo de inyección. El concepto energético de estos tipos de sistemas se basa en la temperatura natural del agua subterránea (T_{nat}) que en España, dependiendo de la región, será de 12 a 20 °C. Para refrigerar sería mejor bajar la temperatura con la aplicación de un almacenamiento estacional con un sistema de ASET-A (figura 5).



Figura 5. Sistema de ASET-A con un flujo variable para el almacenamiento estacional de energía térmica.

Con ASET-A se almacena energía fría en invierno cargando el pozo frío. El uso de una bomba de calor para calefacción es una de las opciones. Otras opciones incluyen el uso de aero-refrigeradores (*dry-coolers*) o el uso de baterías de refrigeración (*cooling coils*) en la unidad de tratamiento de aire. En este último caso el calor almacenado se puede usar para precalentar el aire de ventilación.

Los sistemas geotérmicos de bucle abierto (figura 4) exigen siempre el uso de una enfriadora o bomba de calor para aportar la potencia de refrigeración necesaria y las temperaturas requeridas. En general, la bomba de calor suministra por completo la potencia de refrigeración, usando el agua subterránea solamente para enfriar el condensador. Con ASET-A la mayor parte de la potencia de refrigeración es aportada por el agua subterránea por refrigeración directa (SNIJDERS, A.L. (1992)). Desde el punto de vista energético, la refrigeración directa es mucho más eficiente que la aplicación de una enfriadora (ver tabla I). Por lo tanto, el ahorro energético durante la refrigeración en verano es mucho mayor con un sistema ASET-A que con un sistema geotérmico de bucle abierto (WILLEMSSEN, A. (1998)).

Tabla I. COP* total para diferentes sistemas

Sistema	COP aproximado
Enfriadora convencional	3 - 4
Bomba de calor geotérmica funcionando como enfriadora	5 - 6
Refrigeración directa usando almacenamiento de frío	
• Incluyendo consumición eléctrica para cargar el almacenamiento (sin reutilización del calor)	10 - 20
• Excluyendo consumición eléctrica para cargar el almacenamiento	20 - 40

* COP (Coefficient of Performance): cantidad de energía térmica suministrada, dividida por el total de la cantidad de electricidad requerida.

5. IMPACTO HIDROTÉRMICO E HIDROLÓGICO

Tanto los pozos de refrigeración con recarga como ASET, tendrán un impacto hidrotérmico e hidrológico en el acuífero. Para comparar los impactos de ambos tipos de sistemas se han hecho cálculos con los programas de ordenador HSTWin-2D y MLPU (Multi Layer Program Unsteady

state). HSTWin es un programa validado para transporte de calor y disolución sólida (BUIK N. et al. (2003)). MLPU es un modelo de acuíferos múltiples que puede usarse para cálculos de estado estable y estado inestable.

Los cálculos se han hecho para un caso simplificado. La hidrogeología supuesta se muestra en la figura 6. Los puntos de partida para los cálculos de modulación se basan en una carga de refrigeración de 500 kW y una demanda anual de refrigeración de 500 MWh. Los datos usados para los cálculos ejecutados se resumen en la figura 7.

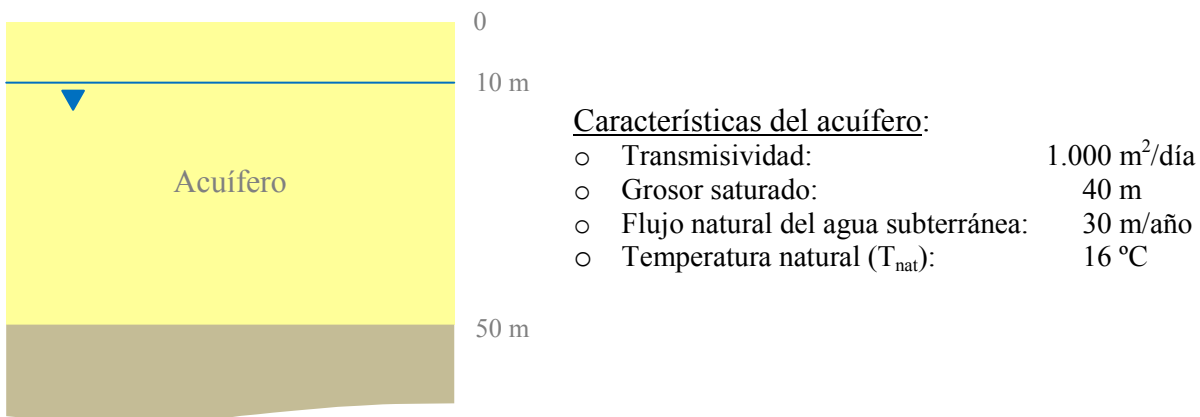


Figura 6. *Hidrogeología supuesta para la modelación*

En el caso de pozos de refrigeración, el calor del condensador de la bomba de calor (enfriadora) se disipa al agua subterránea. Se extrae el agua subterránea con la temperatura natural de 16 °C y lo reinyecta con una temperatura de 31 °C (delta T = 15 °C). Para suministrar 500 kW de refrigeración se disipan 600 kW de calor al agua subterránea. El caudal requerido del agua subterránea es de 35 m³/h y el transporte anual del pozo de extracción al pozo de inyección es aproximadamente de 30.000 m³.

El objetivo de ASET-A es suministrar refrigeración directa. Para ello la temperatura en el pozo frío se baja hasta aproximadamente 8 °C. Durante la época de refrigeración la temperatura de extracción del pozo frío aumentará gradualmente. La temperatura máxima del pozo frío para refrigeración directa depende de las temperaturas requeridas en la instalación de climatización del edificio. En el ejemplo se suponen 10 °C para esta temperatura. Para obtener la mayor parte posible de la capacidad de refrigeración directa (preferiblemente 100%) la temperatura de suministración del circuito de agua enfriada en el edificio debe de ser lo más alta posible. Una aplicación eficaz de ASET-A requiere temperaturas de refrigeración mayores a las instalaciones convencionales. En este caso se supone que la instalación de refrigeración del edificio funciona con una temperatura de suministración de 11 °C. El caudal requerido de agua subterránea es de 55 m³/h. El transporte neto anual de agua subterránea es nulo; 55.000 m³ desde el pozo frío hacia el pozo caliente en verano y 55.000 m³ desde el pozo caliente hacia el pozo frío en invierno.

En el ejemplo de esta comunicación la diferencia de temperatura (delta T) entre los pozos es de 15 °C en la variante del pozo de refrigeración y 8 °C en la variante de ASET-A. Debido a esta diferencia el caudal requerido es mayor para ASET-A que en el caso de los pozos de refrigeración.

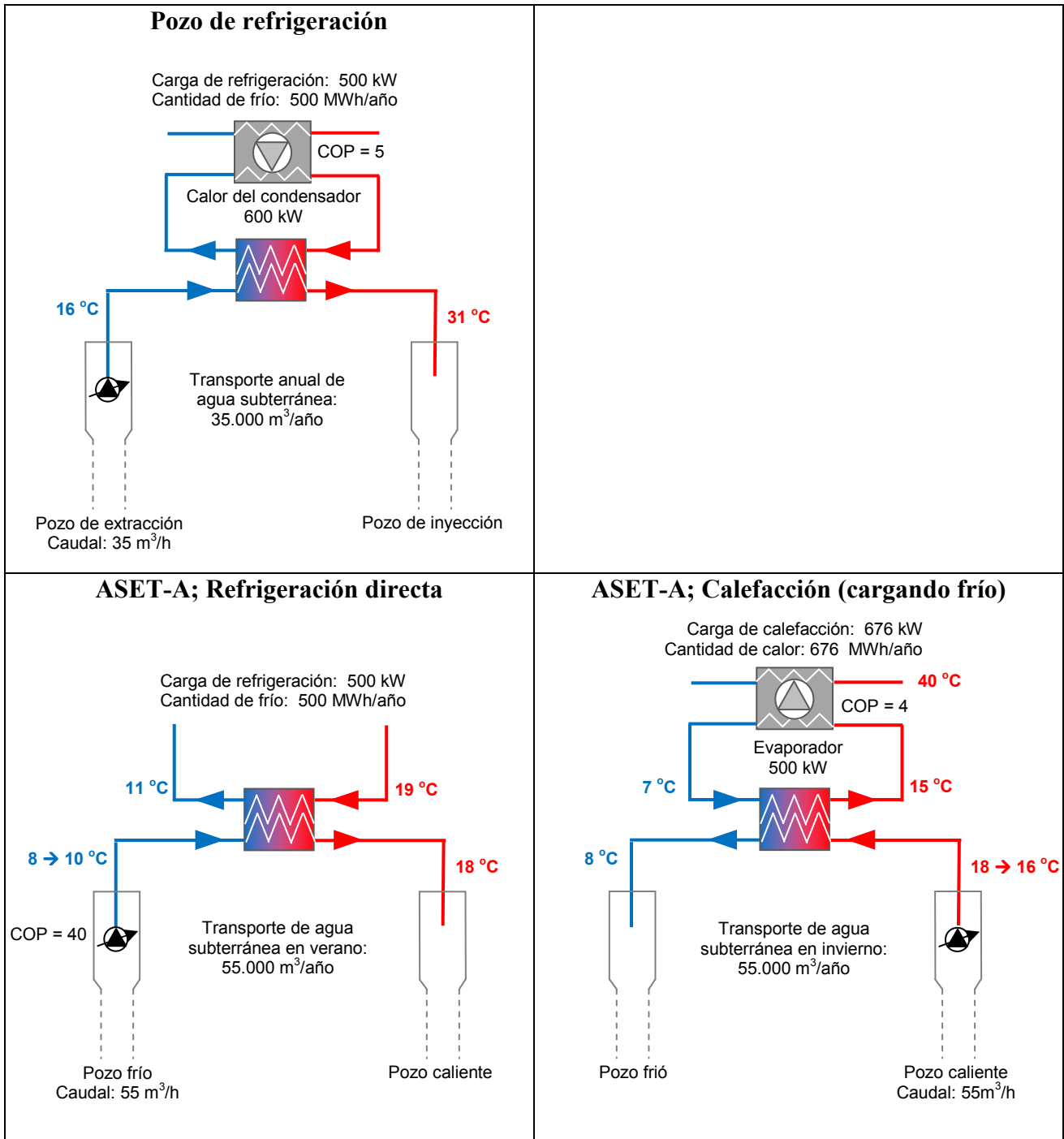


Figura 7. Puntos de partida para la modelación

Impacto hidrotérmico

El cálculo de las temperaturas después de 20 años se refleja en la figura 8. La temperatura natural del agua subterránea es de 16° C. En las burbujas calientes, indicadas en rojo, la temperatura es al menos de 0,5 °C mayor que la temperatura natural del agua subterránea y en las burbujas frías, señaladas en azul, es al menos 0,5 °C menor. El intervalo de contorno es de 0,5 °C.

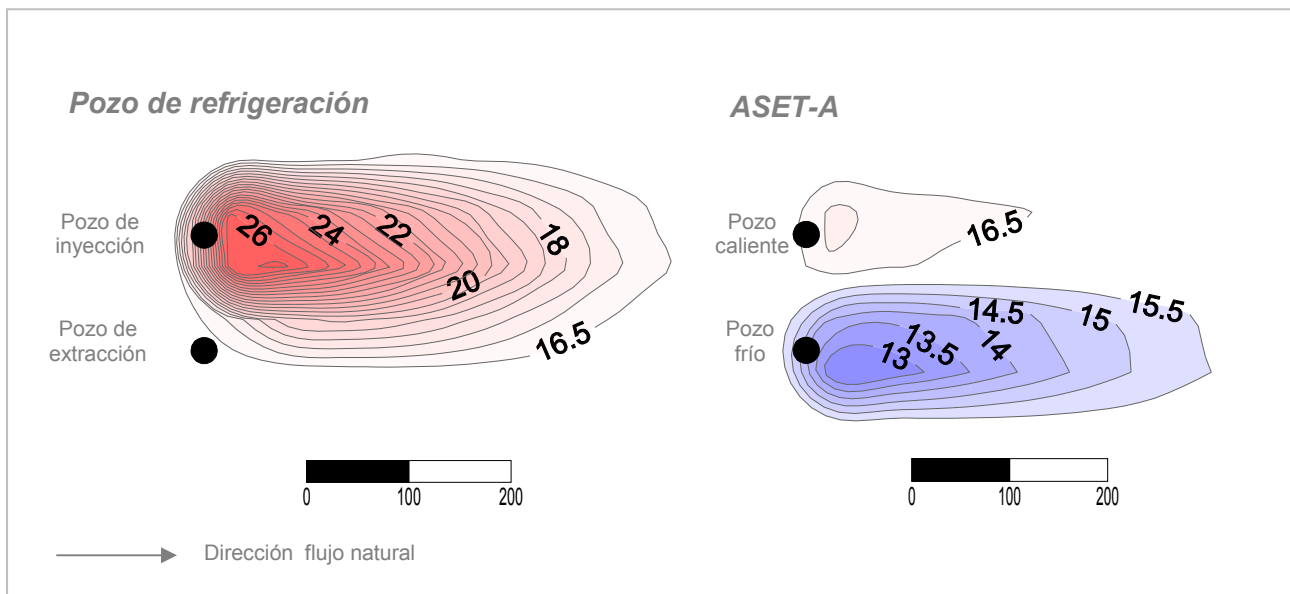


Figura 8. Impacto hidrotérmico; temperaturas calculadas después de 20 años al final del verano.

En el caso del pozo de refrigeración (parte izquierda de la figura 8) el acuífero aguas abajo (*downstream*) del pozo de inyección se calienta. Pasados 20 años el aumento de la temperatura puede presentarse hasta los 400 metros desde el pozo de inyección.

En el caso de ASET-A el acuífero se calienta alrededor del pozo caliente y se enfría alrededor del pozo frío. El aumento de la temperatura alrededor del pozo caliente está limitado en temperatura (máximo 18 °C) y dimensión. Alrededor del pozo frío la temperatura se baja hasta 8 °C para almacenar frío. La figura 8 refleja que pasados 20 años parte del frío almacenado se escapa debido al flujo natural del agua subterránea.

Para comparar ambos sistemas los pozos se han ubicado con la misma configuración. Debido a ello la posición de los pozos no es la óptima. El campo de pozos de ASET-A debe ser dimensionado para recuperar la mayor parte posible de energía fría en los niveles de temperatura más bajos posibles. Para ello, importantes factores son: la cantidad de energía fría que se quiere almacenar, el grosor del acuífero y la dirección del flujo de agua subterránea. La situación para un sistema geotérmico de bucle abierto es diferente, en el que prevenir un incidente de corto circuito térmico es el primer criterio. Por esta razón los pozos de inyección para sistemas geotérmicos de sistema abierto se localizarán preferentemente aguas abajo, con la mayor distancia posible entre los pozos de extracción e inyección.

Un sistema geotérmico de bucle abierto se beneficiará con un alto flujo natural de agua subterránea, sin embargo para un sistema ASET-A no es favorable. Se pueden prevenir grandes pérdidas térmicas de frío almacenado debido al flujo natural diseñando una configuración adecuada de los pozos. Por ejemplo:

- Elegir una ubicación aguas arriba para los pozos fríos para permitir una recogida de pérdidas de energía fría en los pozos calientes aguas abajo.
- En el caso de varios pozos fríos, situar los pozos en línea con el flujo natural e inyectar la mayor parte del frío en el pozo más arriba. De esta manera, una mayor parte de la energía fría se puede recuperar en el pozo aguas abajo.

Para realizar las optimizaciones mencionadas, se aplican programas de ordenador para calcular el comportamiento del agua y de la energía térmica en el subsuelo. IF Technology usa el modelo HST2D/3D para tales cálculos (Bakema G. et al. (1997)).

Impacto hidrológico

El resultado de los cálculos de MLPU se presenta en la Tabla II. Como se puede observar en ella, el impacto hidrológico de la variante ASET-A varía ligeramente en comparación con la variante del pozo de refrigeración. Ello se explicaría por el mayor caudal debido al menor delta T (mira figura 7). Sin embargo, la diferencia entre ambas variantes es mínima.

Tabla II. *Descenso calculado (en metros)*

Distancia desde el pozo	Pozo de refrigeración	ASET-A
0 m	2,2	2,6
50 m	0,15	0,3
100 m	0,1	0,2
200 m	0,05	0,1

6. CONCLUSIONES

En algunas regiones de España está proliferando el número de proyectos en los que se usa agua subterránea para refrigerar. En algunos casos esto puede producir un calentamiento del acuífero. El aumento de la temperatura en el acuífero puede causar problemas técnicos y/o ambientales. Debido a ello es preferible usar el agua subterránea no sólo para enfriar sino también para calentar. De esta manera la cantidad de calor disipado se compensa por extracción de calor. Otra opción aún más eficiente es la aplicación de un sistema ASET-A para almacenar frío en invierno y así poder enfriar en verano. Con ASET-A el frío puede almacenarse en el acuífero para refrigeración directa en verano sin necesidad de usar una enfriadora. La refrigeración con almacenamiento de frío suele producir un mayor ahorro de energía, y debido a ello menores emisiones de CO₂ que otros sistemas de intercambio de geo-energía.

El impacto hidrotérmico al acuífero de un desequilibrado sistema de pozos de refrigeración es considerable. Las temperaturas de inyección tienden a ser elevadas, hasta 15 K más elevadas que la temperatura natural del agua subterránea. Si sólo se disipa el calor, la temperatura del agua subterránea se incrementará sobre una amplia área aguas abajo del pozo de inyección. El área afectada por un sistema ASET-A es limitada. Además los cambios de temperatura alrededor del pozo frío y del pozo caliente son pequeños en comparación con la temperatura natural del acuífero. Por lo general los cambios no son mayores a un +/- 5 K.

Para prevenir el calentamiento de los acuíferos se recomienda aspirar a un equilibrio entre la cantidad de energía térmica disipada y la energía extraída desde el acuífero. Ésta puede obtenerse con un sistema geotérmico de bucle abierto equilibrado o un sistema ASET-A. La opción más favorable depende de las circunstancias específicas de la ubicación y del proyecto.

7. BIBLIOGRAFÍA

BAKEMA G. et al. (1997): "The HST3D program for solving 3-D problems related to ATEs". Megastock '97. Proceedings 7th international conference on thermal energy storage.

BUIK N. et al. (2003): “Impact of thermal storage systems - Measurements and calculations”. Stromingen 9, number 2 (article in Dutch)

IF TECHNOLOGY (2004): “Impact of temperature on groundwater quality. Summary of existing knowledge”. Report in Dutch for NOVEM (Nederlandse Organisatie Voor Energie en Milieu – Dutch Organisation for Energy and Environment).

SNIJDERS A.L. (1992): “Aquifer seasonal cold storage for space conditioning: some cost effective applications”. ASHRAE Transaction 1992 symposium.

WILLEMSSEN, A. (1998): “Open-loop Geothermal Heat Pump Systems in the USA and Aquifer Cold Storage in the Netherlands – Similarities and Differences”. The Second Stockton International Geothermal Conference.

“Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo a la Comunidad de Madrid una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros”.