

Aprovechamiento de la energía geotérmica superficial en la obra pública

CRISTINA DE SANTIAGO BUEY (*) y FERNANDO PARDO DE SANTAYANA CARRILLO (*)

RESUMEN La energía calorífica obtenida del interior de la tierra constituye una fuente de gran potencial de uso en diversos ámbitos. De especial interés para la ingeniería son las instalaciones de aprovechamiento térmico asociadas a cimentaciones y elementos estructurales mediante el uso de bombas de calor geotérmicas. Este tipo de instalaciones innovadoras, que aprovechan la elevada capacidad de almacenamiento térmico del hormigón, se han venido llevando a cabo desde principios de los años 80 del siglo XX en países como Austria y Suiza. Las cimentaciones termoactivas, al igual que otras estructuras insertadas en el terreno y activadas térmicamente consisten básicamente en elementos de hormigón (pantallas, losas, muros y revestimientos de túneles) que han sido diseñados para cubrir una función estructural y que funcionan simultáneamente como intercambiadores de calor con el terreno tras incluir en su seno conducciones hidráulicas rellenas con el fluido portador de calor. El objetivo de este artículo es ofrecer una panorámica de las posibilidades de las explotaciones geotérmicas asociadas a infraestructuras de transporte y otras obras públicas en general. Así, se destacan diferentes casos reales de instalaciones específicas en estaciones de tren, túneles y sistemas de fusión de hielo y nieve en carreteras, puentes, plataformas ferroviarias y pistas de aeropuertos. Por último se resumen brevemente dos posibilidades adicionales de aprovechamiento geotérmico: Sistemas de Almacenamiento Subterráneos de Energía Térmica (ASET) y plantas de desalinización de agua de mar alimentadas mediante energía geotérmica.

SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY USE IN PUBLIC WORKS

ABSTRACT *Geothermal resources represent a great potential of directly usable energy, especially in connection with foundations and heat pumps. Since the beginning of the 1980s geothermal energy has also been increasingly obtained through foundation elements in some countries as Austria and Switzerland. This innovation makes use of the high thermal storage capacity of concrete. Energy foundations and other thermo-active ground structures mainly consist of earth-contact concrete elements (diaphragm walls, basement slabs or walls, tunnel linings) that are already required for structural reasons, but which simultaneously work as heat exchangers after the installation of absorber pipes filled with a heat carrier fluid. This paper focuses in the current state of geothermal energy applications related to transport infrastructure and public works in general. Real cases on geothermal installations for heating systems in railway stations and tunnels, snow melting systems for roads, bridges, railways platforms and runways at airports are presented in this review. Finally, two additional possibilities are briefly explained: Underground Thermal Energy Storage systems (UTES) and geothermal desalination systems.*

Palabras clave: Energía geotérmica, Estaciones ferroviarias, Túneles, Fusión de nieve y hielo, Aeropuertos, Almacenamiento subterráneo de energía térmica (ASET), Desalinización.

Keywords: Geothermal energy, Railway stations, Tunnels, Snow melting systems, Airports, Underground Thermal Energy Storage systems (UTES), Desalination.

1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), siguiendo las líneas estratégicas del organismo en el ámbito de las actividades de I+D+i en la obra pública y el medio ambiente asociado, así como de apertura a la sociedad, ha realizado en los últimos años un esfuerzo por mantenerse alerta a las innovaciones científicas y tecnológicas en diversos campos cercanos a la ingeniería geotécnica. En este sentido, el creciente auge que está cobrando en España la investigación y aprovechamiento de energía geotérmica en el ámbito de la edificación y de las obras públicas no podía pasar inadvertido.

El actual escenario de precios de combustibles fósiles, junto con las implicaciones medioambientales del consumo de éstos, hace que todos los gobiernos dirijan sus esfuerzos al fomento de las energías alternativas o limpias con el fin de conseguir un desarrollo sostenible desde un punto de vista económico, social y ambiental y a su vez cumplir la reducción de gases de efecto invernadero según los compromisos adquiridos con la firma del protocolo de Kyoto. Paralelamente, la sociedad actual, en el contexto de un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles y de una mayor sensibilización ambiental, demanda cada vez más la utilización de las energías renovables y la eficiencia energética. En este contexto político-social, la energía geotérmica es una de las fuentes de energía renovable menos conocida, pero ofrece una amplia gama de posibles aplicaciones.

(*) Laboratorio de Geotecnia (CEDEX).

2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA EXPLOTACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

La presencia de volcanes y fuentes termales debieron haber inducido a nuestros ancestros a suponer que el interior de la Tierra estaba caliente. Sin embargo, no fue hasta los siglos XVI y XVII, cuando las primeras minas fueron excavadas a algunos cientos de metros de profundidad, que el hombre dedujo, por simples sensaciones físicas, que la temperatura de la Tierra se incrementaba con la profundidad. Probablemente las primeras mediciones mediante termómetros fueron realizadas en 1740, en una mina cerca de Belfort, en Francia (Bullard, 1965).

Por tanto, la energía geotérmica es conocida y viene siendo utilizada desde hace siglos con fines térmicos, pero la producción de electricidad a partir de calor de la tierra es mucho más reciente. El primero en hacerlo fue Piero Gino Conti en Lardello, Italia, en 1904. La generación de electricidad en Lardello no fue más que el primer paso. Pronto diversos países siguieron el ejemplo de Italia: en 1919 se perforaron los primeros sondeos geotérmicos en Beppu (Japón), seguidos en 1921 por la perforación en The Geysers, California (Estados Unidos) y el Tatio (Chile). En 1958 entra en operación una pequeña planta termoeléctrica en Nueva Zelanda, seguida de otra en México en 1959 y en Estados Unidos en 1960.

Sin embargo los usos directos (el empleo directo del calor) se desarrollaron más rápidamente. Islandia comenzó en los años 20 del siglo XX a usar la geotermia para calentar invernaderos, y una década después, se convirtió en el primer país en organizar un servicio de calefacción geotérmica a gran escala en la ciudad de Reikiavik. Posteriormente, en los años 50, se produjo la primera aplicación industrial del calor de la tierra en una fábrica de papel de Kawerau, en Nueva Zelanda. Apenas unos años después, en Islandia comienzan a emplear energía geotérmica en la industria textil, en el lavado de lanas.

Más allá de esos hitos concretos de la historia, es tras la crisis del petróleo cuando el interés por esta fuente limpia de energía se dispara en todo el mundo. Así, entre 1975 y 1995, el crecimiento medio de la electricidad geotérmica alcanza el 9% anual, mientras los usos directos crecen a razón de un 6% al año, tasas ambas altísimas en comparación con las registradas por otras fuentes de energía (Barrero, 2008).

A lo largo de los últimos años ese crecimiento se ha ralentizado ligeramente. No obstante, el uso de bombas de calor para aprovechar las fuentes geotérmicas hacen prever un relanzamiento de la geotermia.

En España, la energía geotérmica fue ampliamente estudiada en los años setenta y ochenta del siglo XX, época en la que se plantearon ambiciosos proyectos basados en el aprovechamiento térmico para calefacción (Hidalgo, 2008). Finalmente, estos proyectos no salieron adelante por distintos motivos, principalmente económicos, y el desarrollo de la geotermia acabó paralizándose. En cuanto a los aprovechamientos geotérmicos de muy baja temperatura mediante bomba de calor, muy habituales en otros países como Suiza, Alemania, Suecia, Austria, Estados Unidos o Canadá, están comenzando a desarrollarse en España pero son aun muy escasos, aunque se espera un importante auge para los próximos años.

3. APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO DE BAJA Y MUY BAJA TEMPERATURA EN OBRAS PÚBLICAS

Como ya se ha comentado en diversas ocasiones, la energía geotérmica constituye una fuente de energía con un gran potencial de usos directos. Las posibilidades de explotación de esta energía se multiplican si en lugar de limitarse a instalaciones en el interior de sondeos o zanjas en el suelo se aprovecha la existencia de elementos estructurales como pilotes, losas o pantallas. En tales casos, denominados específicamente "cimentaciones termo-activas" los elementos estructurales cumplen una doble función: por un lado deben ser capaces de soportar las cargas

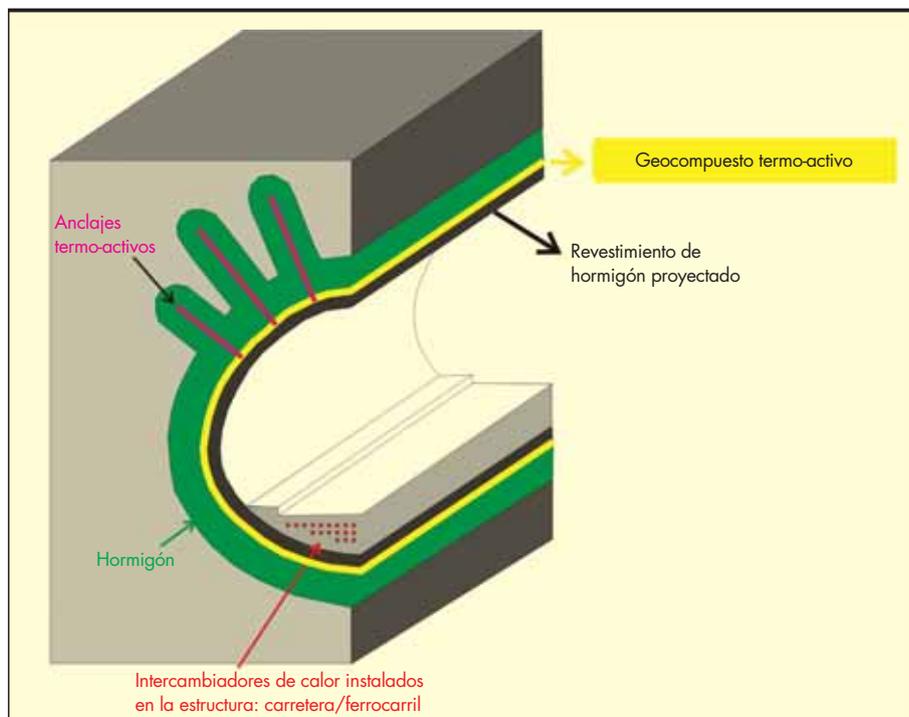


FIGURA 1. Esquema de un túnel con anclajes y geocompuestos termo-activos, además de intercambiadores instalados en la plataforma. (Basado en: Adam et al., 2001).

provenientes de la estructura y del terreno circundante y por otro lado constituyen el soporte material al que se anclan las conducciones hidráulicas que contienen el fluido intercambiador de calor con el terreno. Estas cimentaciones termo-activas están siendo gradualmente introducidas en la edificación en países con mayor tradición de aprovechamiento geotérmico como Estados Unidos, Suecia, Alemania, etc.

Aunque los pilotes y las pantallas son con diferencia los elementos de cimentación más frecuentemente utilizados, gracias a las continuas innovaciones científicas y tecnológicas existen en la actualidad otros tipos de elementos que pueden utilizarse para extracción y almacenamiento de energía geotérmica en una obra (Figura 1):

- Clavos, clavijas, bulones, anclajes, activados térmicamente.
- Geosintéticos, fundamentalmente geotextiles no tejidos y geocompuestos, aunque también pueden usarse algunas geomembranas.
- Revestimientos termo-activos de hormigón armado.

Ellos permiten incorporar una instalación de aprovechamiento geotérmico a la construcción de una obra pública como un túnel, un puente, una estación de tren o una carretera. No hay que perder de vista el hecho de que cualquier obra pública supone necesariamente la instalación de grandes cantidades y superficies de hormigón o cemento en contacto directo con el terreno. Activar térmicamente estas masas de hormigón o cemento mediante la instalación de cualquiera de los elementos anteriormente citados permite extraer energía del terreno circundante, dando con ello un valor añadido a la estructura construida.

Se analizarán a continuación los diferentes tipos de obras de ingeniería en las que ha sido posible incorporar instalaciones de aprovechamiento geotérmico como por ejemplo túneles, estaciones de tren y metro, y sistemas de fusión de nieve y deshielo. No se han considerado en este trabajo las cimentaciones termo-activas en la edificación ya que esta posibilidad es estudiada y explicada en profundidad por otros autores (Mazariegos et al.) en esta misma revista.

3.1. TÚNELES

Las grandes obras de túneles que atraviesan macizos rocosos drenan las aguas subterráneas que encuentran a su paso al objeto de estabilizar la estructura de las paredes del túnel y mantener saneado el interior de la obra. Estas obras son canalizadas al exterior y vertidas a las redes hidrográficas superficiales más próximas. Sin embargo, en función del espesor del macizo rocoso que recubre el túnel y del gradiente geotérmico de los terrenos atravesados, esas aguas subterráneas pueden constituir un potencial geotérmico importante, alcanzando, como en los grandes túneles de Suiza, temperaturas de hasta 30°C.

En este país y los adyacentes que comparten la cadena de los Alpes, existen hoy día más de 1.000 túneles ferroviarios y de carretera (Llopis & Rodrigo, 2008). Al realizar las labores de investigación geológica y geotécnica, está prácticamente asegurada la investigación geotérmica, sin sobrecoste alguno, lo cual permite adelantar la capacidad del recurso potencial y realizar las obras de captación de las aguas subterráneas y de su conducción, al tiempo que se realiza la construcción de la infraestructura existente del túnel.

El primer túnel termo-activo construido fue un proyecto piloto de investigación conocido como "Energy tunnel", ubicado en la línea de ferrocarril que une Viena con el Oeste de Europa, atravesando los bosques de Viena y unos terrenos de complicada geología consistentes en formaciones de Flysch y molasas. Como parte de esta línea, se ha construido el túnel Lainzer, que cuenta con intercambiadores de calor que permiten explotar una gran cantidad de energía geotérmica.

El túnel Lainzer tiene 12,8 Km de longitud y fue construido en diferentes secciones y siguiendo diferentes métodos, en falso túnel y según el nuevo método austriaco.

El revestimiento exterior del túnel consiste en una pantalla de pilotes de 120 cm de diámetro y 20 metros de longitud, uno de cada tres equipado con captadores geotérmicos. En total el túnel cuenta con 59 pilotes termo-activos con una capacidad calorífica de 100 KW. La extracción anual es de 144 MWh que se utiliza para calentar Hadesdorf Sports Junior High School.

La figura 2 muestra la sección longitudinal del mismo donde los pilotes perforados se unen mediante columnas de

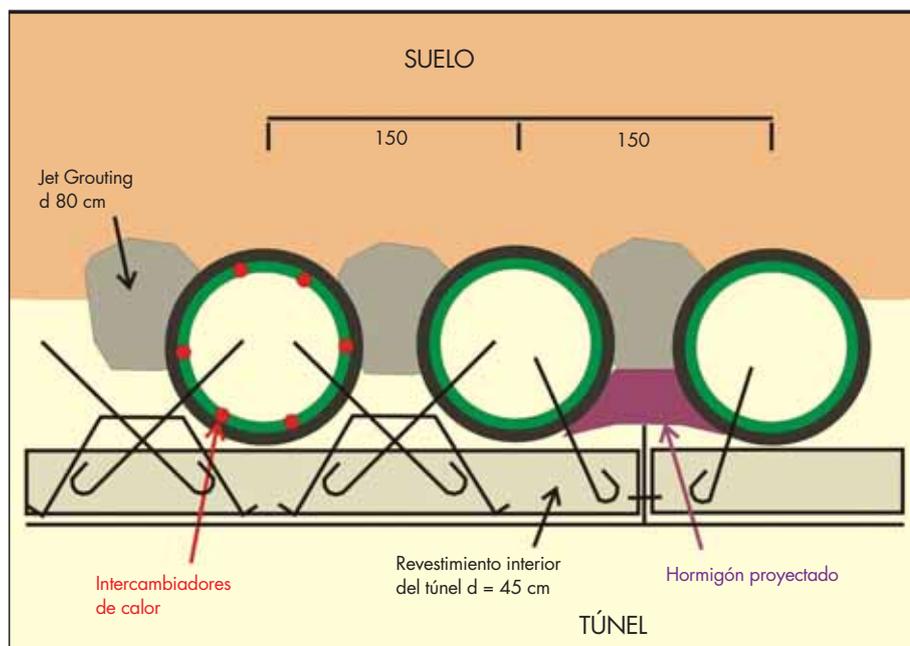


FIGURA 2. Sección longitudinal del túnel Lainzer (Basado en: Brandl, 2006).

Nombre	Tipo	Caudal agua (l/min)	T°C del agua (°C)	Capacidad calorífica (kW)
Ascona	Carretera	360	12	150
Furia	Ferrovial	5.400	16	3.758
Frutigen	Investigación	800	17	612
Gothard	Carretera	7.200	15	4.510
Grenchenberg	Ferrovial	18.000	10	11.693
Hauenstein	Ferrovial	2.500	19	2.262
Isla Bella	Carretera	800	15	501
Lötschberg	Ferrovial	731	12	305
Mappo-Moretina	Carretera	983	16	684
Mauvoisin	Investigación	600	20	584
Polmengo	Investigación	600	20	584
Rawyl	Investigación	1.200	24	1.503
Ricken	Ferrovial	1.200	12	501
Simplon	Ferrovial	1.380	13	672
Vereina	Ferrovial	2.100	17	1.608

TABLA 1. Túneles suizos a través de los Alpes con aprovechamiento geotérmico. (Fuente: Wilhelm & Rybach, 2003).

jet-grouting. Uno de cada tres pilotes es activado térmicamente instalando en el interior las conducciones hidráulicas con el fluido portador de calor. Estas conducciones quedan protegidas por las barras que conforman la armadura del pilote. Se observa también la capa de hormigón proyectado y los paneles de hormigón armado que conforman el revestimiento interior del túnel.

Pero en el campo de aprovechamiento geotérmico en túneles, el caso más destacable es sin lugar a dudas Suiza. La Oficina Federal de la Energía inició en los años 90 del siglo XX un estudio del potencial geotérmico de los túneles que atraviesan los Alpes, estimando un potencial de extracción de calor de 30 MW. Se recogen en la tabla 1 los más destacados (Wilhelm & Rybach, 2003).

Así, por ejemplo, la aguas del túnel de Furia, aunadas en una sola tubería a la salida de dicho túnel y transportadas por gravedad hasta la ciudad de Oberwald, son capaces de climatizar 177 apartamentos y un centro deportivo. Los 5.400 l/min de su caudal, a 16°C son distribuidos a las diversas bombas de calor que atienden a cada sector.

Cabe destacar la actividad de investigación llevada a cabo desde el año 2000 en el *Institute for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering of the Viena University of Technology* en el campo de la instalación de captadores de calor en el seno del hormigón proyectado en las paredes del túnel, construido mediante el nuevo método austriaco. Dentro de este estudio, Brandl et al. (2006) defienden en su artículo las posibilidades de los geosintéticos como material soporte en la instalación de captadores. En concreto, los autores describen geocompuestos formados por dos geotextiles no tejidos entre los cuales se instala el sistema de tubos de polietileno de alta densidad conectados, en cuyo interior circula el fluido que transportan el calor hasta la bomba. Estos geocompuestos cumplen una

función múltiple ya que además de la función de refuerzo y drenaje, trabajan como sistema de explotación geotérmica, ya sea en modo de extracción o de acumulación. La instalación de estos geocompuestos es similar a la de cualquier geotextil no tejido, ya que vienen de fábrica con los tubos colectores embebidos entre las dos capas de geotextil. Únicamente ha de tenerse especial precaución durante la proyección del hormigón y garantizar finalmente la ausencia de cualquier fuga en el sistema.

3.2. ESTACIONES DE TREN Y METRO

La climatización geotérmica de estaciones de metro y tren subterráneas es muy similar a la explotación geotérmica en túneles, desde el punto de vista del diseño, instalación y funcionamiento, dado que comparten elementos estructurales que pueden ser activados térmicamente. Como ejemplo de instalaciones geotérmicas en estaciones, cabe destacar el caso de Viena.

En la ciudad de Viena, las obras de ampliación de la línea de metro U2 ofrecieron la posibilidad de incluir en cuatro estaciones de metro instalaciones de obtención de energía geotérmica aprovechando las estructuras en contacto con el terreno. Este proyecto supone la primera aplicación geotérmica en instalaciones de metro en el mundo. Las estaciones fueron construidas mediante falso túnel. Los intercambiadores de calor se instalaron en el interior de las pantallas, losas de cimentación y entre el recubrimiento primario y secundario de las paredes del túnel. Por esta razón, se instaló un gran número de sensores con el fin de tener completamente monitorizadas las estaciones, incluyendo la temperatura y deformación en las pantallas, en los túneles y 5 metros por debajo de las losas de cimentación.

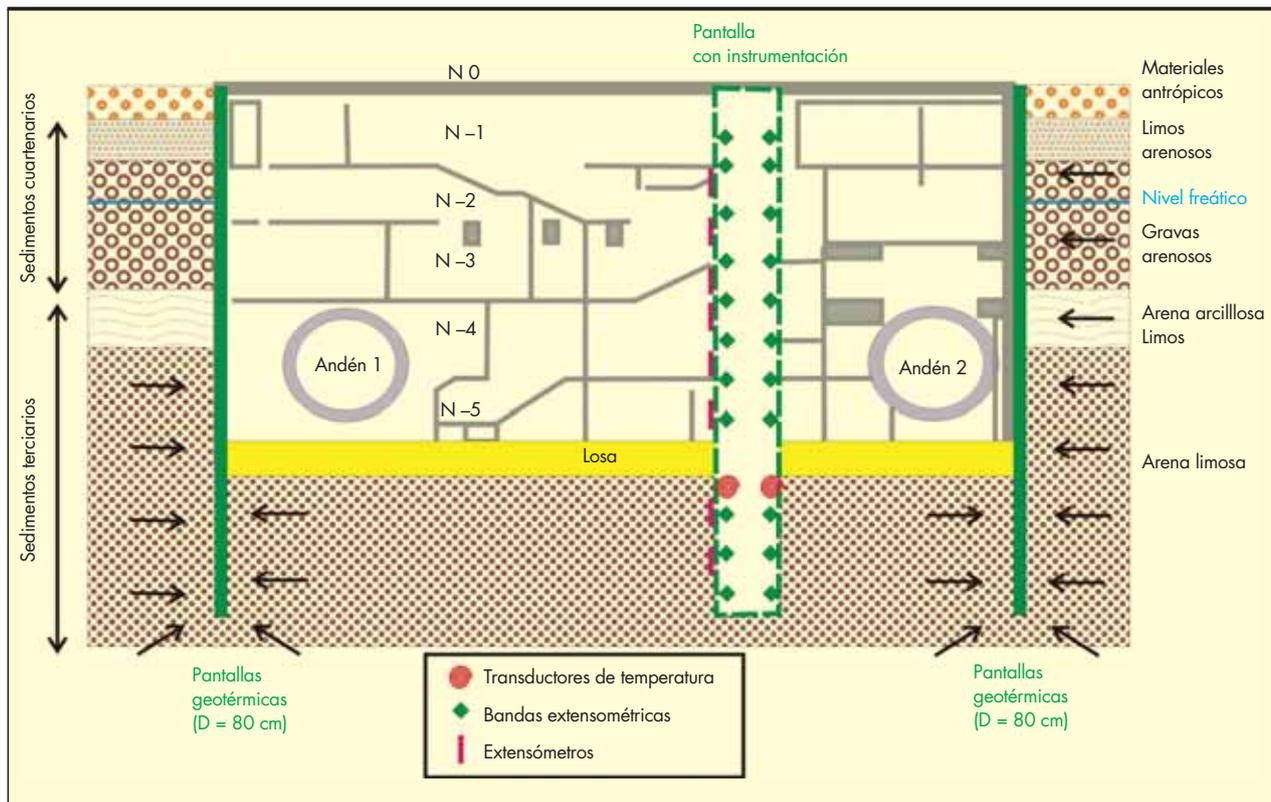


FIGURA 3. Sección transversal de la estación de metro U2/2-Taborstraße con pantallas termoactivas. Ubicación de los sensores instalados (Basado en: Brandl, 2006).

Como ejemplo de estación de tren geotérmica, valgan los datos de la estación U2/2-Taborstraße (Figura 3): refrigerada mediante intercambiadores de calor instalados en 1.865 m² de pantallas y 1.640 m² en la losa de cimentación. Fue necesario un volumen de fluido de intercambio de calor (agua con glicol) de 10 m³ cuya temperatura varía entre 10°C y 28°C permitiendo una refrigeración máxima de 81 kW. Se instalaron bandas extensométricas y extensómetros de cadena en las pantallas y debajo de la losa de cimentación así como sensores de temperatura en ambos lados de las pantallas así como en el fluido de extracción y retorno con el fin de investigar la influencia de la explotación térmica en la deformación del terreno y de la estructura.

Markiewicz et al. (2005) describen con todo detalle en su artículo la construcción de estas estaciones de tren geotérmicas, la instalación de los colectores en el interior de las estructuras de cimentación (losas y pantallas), la instrumentación colocada con el fin de controlar en todo momento el comportamiento estructural y térmico del conjunto, así como la puesta en marcha de la instalación.

3.3. FUSIÓN DE HIELO O NIEVE EN ACERAS, ANDENES, PUENTES Y CARRETERAS

Durante el invierno, en función de las condiciones climatológicas de la zona, los puentes y carreteras pueden verse cubiertos de nieve lo que puede dificultar o incluso imposibilitar el tráfico. Para evitar situaciones de peligro, es fundamental realizar una cuidadosa labor de mantenimiento. La técnica más generalizada de lucha contra la presencia de nieve o hielo en los pavimentos de carreteras o puentes es la adición de sales. Se calcula que 30 millones de toneladas de sal se utilizan anualmente con este fin (Wang et al, 2008). Sin embargo, este

método produce una serie de impactos negativos como la corrosión del hormigón o la contaminación del terreno o agua subterránea (Hutchinson, 1970).

La energía geotérmica, incluso de baja temperatura, puede aportar esta labor de mantenimiento desde abajo hacia arriba, utilizando una energía renovable y siempre accesible. En los casos de energía geotérmica de baja y muy baja entalpía, ésta puede ser explotada en un sistema mixto de intercambiadores de calor alimentados mediante energía solar o simplemente mediante bombas geotérmicas (Spitler & Hogue, 1995). Este tipo de instalaciones permiten cumplir los siguientes objetivos (Brandl, 2006):

- Mantener las carreteras o puentes libres de nieve o hielo, reduciendo con ello los posibles riesgos de tráfico para los usuarios.
- Reducir la necesidad de limpieza del pavimento.
- Reducir la aparición y desarrollo de roderas en pavimentos de asfalto inducidas por el tráfico pesado y la temperatura.
- Evitar el uso de sales o gravilla para fundir el hielo o la nieve. Ello a su vez reduce el impacto ambiental y los costes de mantenimiento.
- Evitar el uso de cadenas en invierno, que erosionan el pavimento por abrasión y aumentan la frecuencia de operaciones de mantenimiento de carreteras. En este sentido valga el ejemplo del cálculo realizado en las carreteras que atraviesan los Alpes. Se estima que es posible un ahorro de hasta un 50% en gastos de mantenimiento en estas carreteras si se evitara el uso de las cadenas. Ello sería posible si se instalaran conducciones geotérmicas bajo el pavimento.

Teniendo en cuenta que estas instalaciones deben, en primer lugar fundir la nieve, y en segundo lugar evaporar el agua resultante, los requisitos de calefacción para fundir nieve dependen de cuatro factores atmosféricos: frecuencia de nevadas, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. Teniendo en cuenta estos factores ambientales la "American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers" (ASHRAE) propone un método de diseño de instalaciones de fusión de hielo ampliamente aceptado y utilizado en todo el mundo (ASHRAE Handbook, 1995).

Se han desarrollado en todo el mundo numerosos experimentos piloto con el fin de evaluar el potencial de este sistema, en ocasiones ayudados por la instalación de bombas de calor:

- 1948: La instalación más antigua del mundo, en Estados Unidos (Lund, 2000).
- 1990: Numerosas plantas piloto en Japón (Morita & Tago, 2000, 2005).
- 1994: Planta piloto SERSO en Suiza. Considerada la madre de la aplicación geotérmica al deshielo de puentes y carreteras. Desde su creación, todavía sigue funcionando. Este sistema recoge calor en verano de la propia carretera y la almacena en las rocas adyacentes, en un campo de almacenamiento subterráneo de energía térmica (ASET) de 55.000 m³ compuesto por 91 sondeos con intercambiadores de calor, de 65 m de profundidad cada uno. En invierno, este calor almacenado sirve para mantener la temperatura de la carretera por encima de los 3°C. Expertos aseguran que utilizar la misma instalación hidráulica para enfriar en verano la carretera, podría prolongar la vida útil de la misma. La superficie calentada con esta instalación es de 1.300 m². (Eugster, 2007). Los costes de instalación fueron 2.500 €/m² y un mantenimiento de 4 €/m²/año.
- En 2002 se construyeron sistemas de calefacción geotérmicos para fundir nieve en dos aceras en Aomori City, en Japón, considerada la ciudad de más de 300.000 habitantes con mayor tasa de nevadas, llegando a superar en ocasiones los 10 metros de altura. Parte del calor se obtenía de agua de mar a 6°C mediante bombas geotérmicas, extrayendo el resto directamente de sondeos donde el agua subterránea se encuentra a 14°C.
- En 2005 se construyó en la región de Harz (Alemania) una instalación geotérmica para descongelar los andenes de usuarios de una parada de tren local. Ello suponía descongelar 200 m de longitud con 9 sondeos de 200 metros de profundidad cada uno. Esta instalación se realizó siguiendo el proyecto SERSO de Suiza, funcionando mediante almacenamiento estacional del calor en el terreno.
- En 2006 se habilita un sistema de calentamiento bajo un carril de la carretera sobre el puente de la felicidad "Happiness Bridge" en Fukui (Japón). Durante el año siguiente se amplía a dos carriles. En total más de 3.900 m² de superficie de carretera calentados mediante 378 pilas de acero de 140 mm de diámetro y 23 metros de profundidad.

Santer (2007) realiza una magnífica recopilación de todas las experiencias de fusión de nieve y hielo mediante aprovechamiento de energía geotérmica en todo el mundo. En su presentación describe un amplio rango de aplicaciones como carreteras, aparcamientos, aceras, pistas de aeropuertos, andenes de estaciones de tren e instalaciones deportivas.



FIGURA 4. Tubos embebidos en aceras para fundir la nieve en Klamath Falls, Oregon. (Fuente: USGS, 2003).

En la actualidad, se está llevando a cabo en Austria un proyecto a largo plazo cuyo objetivo es determinar la posición óptima de los intercambiadores de calor en los pavimentos desde el punto de vista térmico, energético y estructural. Las exigencias del sistema desde cada punto de vista son diferentes y enfrentadas, por lo que es necesario llegar a una solución de compromiso.

Los costes de este tipo de instalaciones no son muy elevados: desde algunos cientos de € hasta 1.200 €/m² (www.EGEC.org).



FIGURA 5. Tablero de puente en Oklahoma State University, Stillwater, E.E.U.U. (Fuente: Llopis y Rodrigo, 2008).

Las canalizaciones pueden ser de metal (acero, hierro o cobre) o plástico. Sin embargo, dado que se utilizan sales como fundentes de nieve o hielo, con el fin de evitar corrosión, es preferible usar materiales derivados del polietileno de alta densidad (PEAD). Las tuberías se pueden llenar simplemente de agua pero es mucho más eficaz usar una solución anticongelante de glicol. Ello es debido a que este tipo de instalaciones suelen diseñarse para zonas con climas muy fríos.

Por encima del sistema de tuberías se podrá instalar un pavimento de hormigón de cemento Portland o asfáltico. La conductividad térmica del asfalto es menor que la del cemento Portland, lo cual afecta y ha de tenerse en cuenta en el diseño del sistema.

Es recomendable que las tuberías no atraviesen juntas de expansión o contracción del pavimento, ya que pueden resultar dañadas por los movimientos repetidos de las losas. Finalmente, se debe proteger el pavimento de un posible hinchamiento del terreno por congelación, diseñando un drenaje apropiado y una capa de base y subbase con suficiente espesor.

Este tipo de instalaciones, con todas las características descritas hasta el momento, son también aptas para pistas de aeropuertos. En este sentido Senser (1982) realiza en su tesis un estudio teórico, desarrollando un modelo de fusión de hielo apropiado para calentar pavimentos mediante tuberías de calor.

Se han realizado numerosos estudios teóricos para la aplicación de sistemas geotérmicos de calentamiento de pistas de despegue y aterrizaje en aeropuertos. Posiblemente el primero de ellos, el aeropuerto de Chicago, data de 1982. Posteriormente le siguieron el aeropuerto de Wien-Schwechat en Viena (Austria), Eindhoven (Holanda), Kallax en Luleå (Suecia), Stuttgart (Alemania) y recientemente se ha analizado la posibilidad de calentar la entrada del aeropuerto de Arlanda en Estocolmo (Suecia).

3.4. ALMACENAMIENTOS SUBTERRÁNEOS DE ENERGÍA TÉRMICA (ASET)

En los almacenamientos subterráneos de energía térmica (Underground Thermal Energy Storage UTES) se almacena frío, calor o ambos bajo tierra.

Durante el invierno se extrae calor del terreno inyectando agua fría que servirá durante el verano para refrigerar. Durante el verano, se inyecta agua caliente que queda almacenada para ser utilizada en invierno con fines de calefacción. El funcionamiento es fundamentalmente el mismo que el de las bombas de calor, pudiendo ser sistemas abiertos (Aquifer Thermal Energy Storage: ATES) o cerrados (Borehole Thermal Energy Storage: BTES) (Tabla II). Esta tecnología sólo funciona en grandes instalaciones, donde el volumen de suelo que es calentado o enfriado mediante este sistema es grande comparado con su superficie.

Además de estas dos tipologías bien conocidas y utilizadas, Gehlin (1998) menciona en su tesis de licenciatura un tercer grupo: Almacenamiento de energía geotérmica en cuevas (Rock Cavern Thermal Energy Storage: CTES).

El primer almacenamiento subterráneo de frío fue construido en 1987 para refrigerar las instalaciones de una compañía de pinturas en Holanda (Kooiman & van Loon, 1991). A partir de entonces, este tipo de instalaciones se desarrollan rápidamente, sobre todo en Holanda, Bélgica y los países escandinavos.

El almacenamiento subterráneo de calor puede llegar a ser de temperaturas muy elevadas. Algunos experimentos llevados a cabo en Francia y Estados Unidos durante los años 80 llegaron a superar los 100°C aunque sin éxito. En Holanda, el almacenamiento subterráneo de calor de la Universidad de Utrecht se encuentra operativo desde 1991 llegando a tempe-

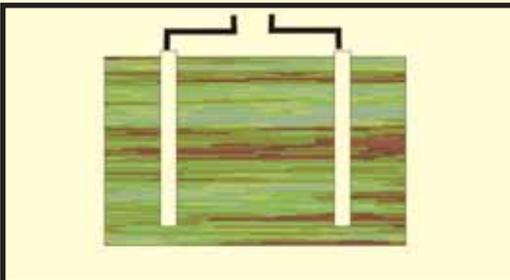
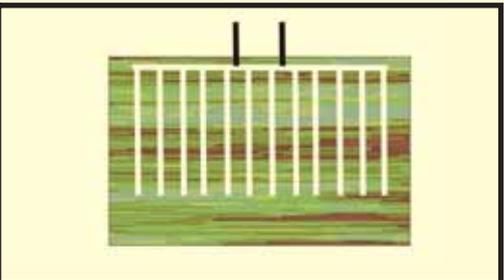
	
ATES: Aquifer Storage Almacenamiento en acuífero	BTES: Borehole Storage Almacenamiento en sondeos
Agua subterránea como medio de almacenamiento y transporte de calor	Sistema de sondeos y tuberías
Terrenos de media a alta conductividad hidráulica y transmisividad	Elevado calor específico
Elevada porosidad	Conductividad térmica media
Flujo de agua bajo o nulo	Flujo de agua subterránea nulo
Ejemplos	
Acuíferos en arenas o gravas porosas	Depósitos sedimentarios como margas, arcillas, etc
Acuíferos en rocas fracturadas: carbonatos, areniscas o rocas metamórficas o ígneas	Rocas ígneas como granito, gabro, etc. Rocas metamórficas (gneiss...)

TABLA 2. Almacenamiento térmico subterráneo en acuíferos y en sondeos. Basado en Eugster & Sanner, 2007.

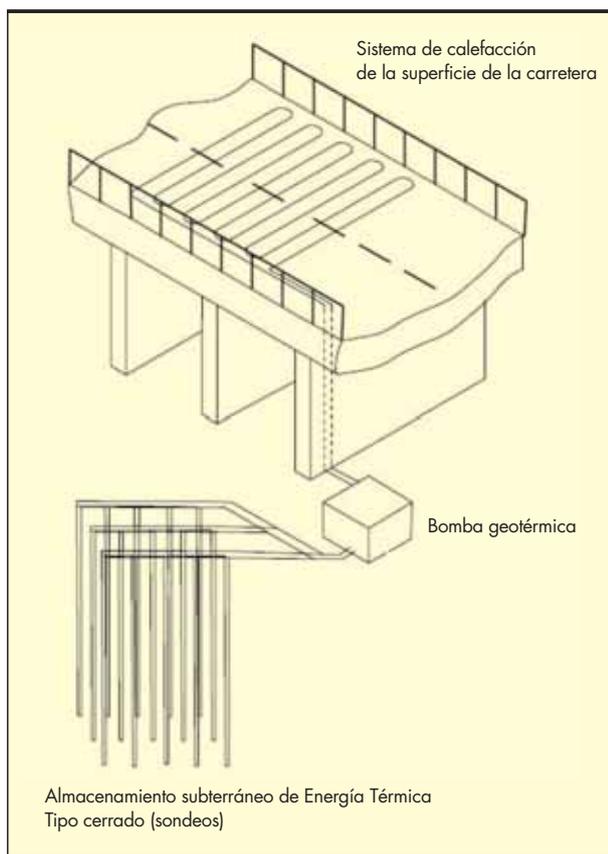


FIGURA 6. Almacenamiento subterráneo de energía térmica de tipo cerrado. Aplicación para fusión de nieve y hielo en puentes o carreteras. (Fuente: Mands & Sanner www.UBeG.de).

raturas de hasta 90°C, aunque finalmente fue eliminado y sustituido por otro sistema.

Sin embargo, los conocimientos y la tecnología relacionados con el almacenamiento subterráneo de frío y calor han ido mejorando y hoy en día existen numerosas instalaciones con diferentes aplicaciones.

Un buen ejemplo de combinación de almacenamiento de calor y frío es la conexión de superficies de calles y carreteras a un sistema de almacenamiento subterráneo de energía geotérmica (Figura 6).

El calor proveniente de la radiación solar sobre la superficie se puede almacenar y utilizar en invierno para descongelar y derretir la nieve en la misma superficie. Este sistema se usa principalmente en puentes, aunque también se puede utilizar en cualquier otra superficie como carreteras, pistas de aterrizaje, etc.

Cabe destacar el ejemplo del Parlamento Alemán de Berlín, donde el calor residual proveniente de un cogenerador de calor y energía se almacena durante el verano en un almacén subterráneo de energía térmica para calefactor en invierno (Figura 7).

Este edificio de Berlín incorpora por primera vez dos sistemas de almacenamiento a distintos niveles separados por un estrato acuitardo: el superior, a 60 metros de profundidad para almacenamiento de frío y el inferior, a más de 300 metros de profundidad, para almacenamiento de calor (hasta 70°C). Así, todo el exceso de calor proveniente de la generación de energía se almacena en el sistema inferior, mientras que gran parte de la refrigeración proviene del sistema superior.

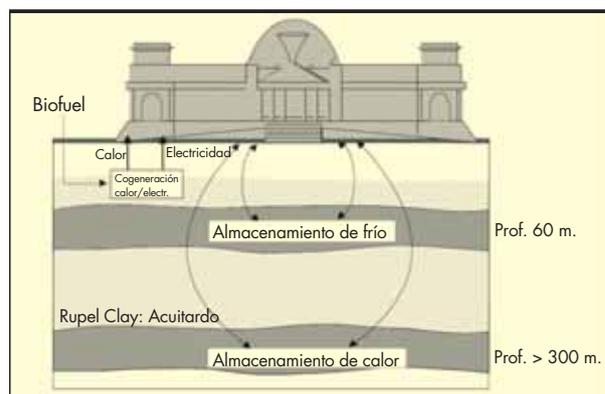


FIGURA 7. Almacenamiento subterráneo de energía térmica de tipo cerrado. El Parlamento Alemán de Berlín. (Fuente: Mands & Sanner www.UBeG.de).

En la figura 8 se puede observar una sección de la mayor instalación de almacén subterráneo de calor y frío de Suiza, ubicado en Lucerna y consistente en un sistema cerrado formado por 49 sondas geotérmicas de 160 m de profundidad.

Durante el verano, los captadores centrales recogen el retorno de agua más caliente que los de la periferia y transmiten el calor al terreno, convirtiéndolo en un foco de captación para el invierno. Durante el invierno, la captación se realiza en esta zona del terreno calentado en verano, devolviendo el agua más fría a los sondeos exteriores, que enfrían el terreno y lo convierten en el foco adecuado de captación para el siguiente verano, repitiéndose el ciclo anual.

Unas placas solares refuerzan la producción de calor para alimentar las bombas geotérmicas y la producción de agua caliente sanitaria.

En resumen, los almacenamientos subterráneos de energía térmica, aunque más costosos, presentan una serie de ventajas que los hacen muy interesantes en los casos en los que se disponga del espacio necesario y se cumplan unas determinadas cualidades del terreno, como la inercia térmica que le permita almacenar el calor o el frío. Algunas de sus ventajas más destacables son (Llopis y Rodrigo, 2008):

- Mejora el rendimiento de la instalación.
- Ahorro de energía eléctrica, con la consecuente disminución de costes.
- Mantenimiento del medio geotérmico, impidiendo un eventual agotamiento estacional.
- Mayor durabilidad de la maquinaria, al funcionar con menores diferencias térmicas.

Sin embargo, es necesario tener precaución con una serie de problemas técnicos relacionados con los cambios de temperatura en los acuíferos. Sanner (1999) describe en su estudio las complicaciones que pueden surgir en los almacenamientos de calor subterráneo derivados de la alteración de las propiedades químicas del agua subterránea como consecuencia de la variación de temperatura. Esta modificación de las propiedades del agua puede llevar a fenómenos no deseados como la obstrucción y colmatación de la red porosa, oxidación, corrosión y lixiviación o percolación del agua a niveles más profundos.

Teniendo estas consideraciones en cuenta, es posible diseñar y construir buenos y fiables almacenamientos térmicos como medio de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Para más información sobre este tipo de instalaciones se recomienda visitar la página web de la Agencia Internacional de la Energía (IEA): <http://iea-ec.es.org>

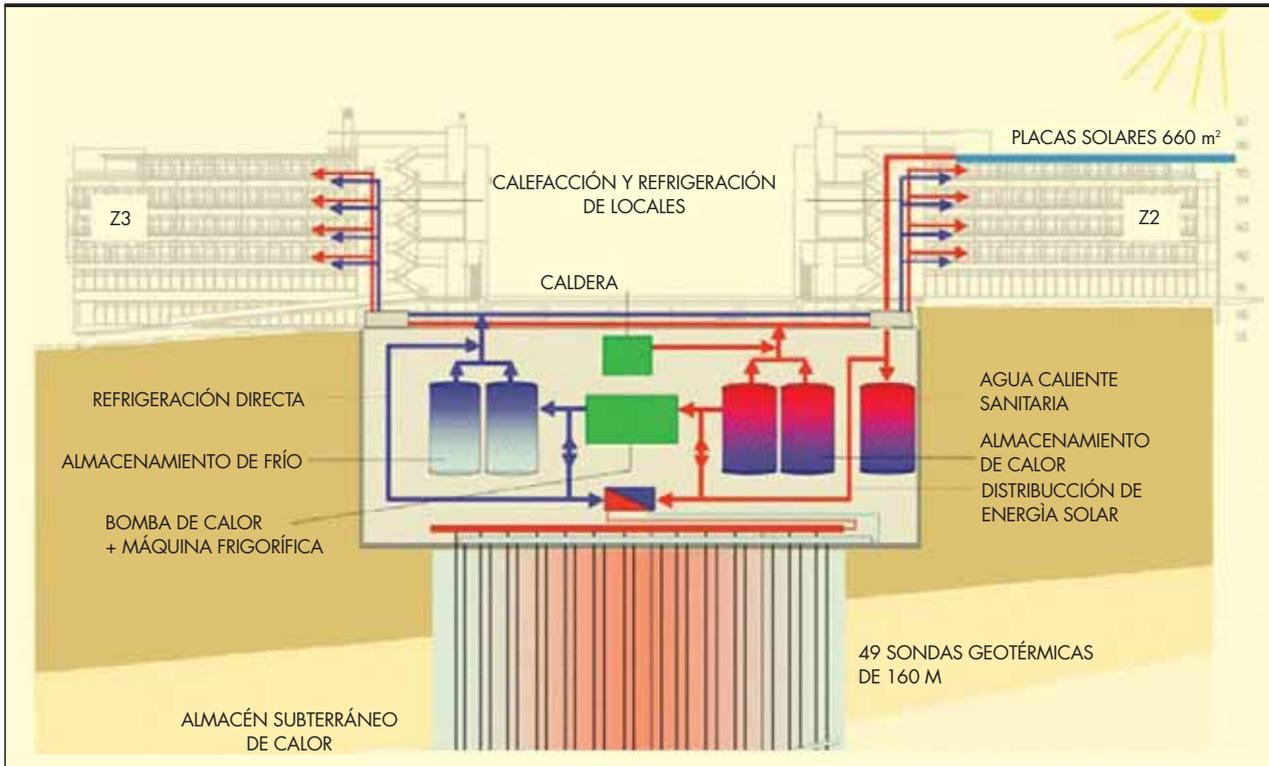


FIGURA 8. Esquema del mayor almacenamiento de calor subterráneo de Suiza. Centre D4 en Root. (Fuente: La géothermie. Une technologie efficace. Suisse énergie).

3.5. OTRAS APLICACIONES: DESALINIZACIÓN GEOTÉRMICA

El proyecto europeo “Key Issues for Renewable Heat in Europe” (K4RES-H) nació en 2004 con el objetivo de fomentar la discusión e interacción a escala europea en materia de energías renovables (geotérmica, solar y biomasa). Este proyecto estaba articulado en 5 capítulos fundamentales que a su vez

abarcaban los tres tipos de energías renovables estudiados (Figura 9). Los cinco capítulos eran: Objetivos verificables, Cuantificación de la distribución de energía, Normativa, Incentivos económicos y Aplicaciones innovadoras de las energías renovables. Para más información se recomienda visitar la página web de “European Renewable Energy Council (EREC)”: <http://www.erec-renewables.org/>

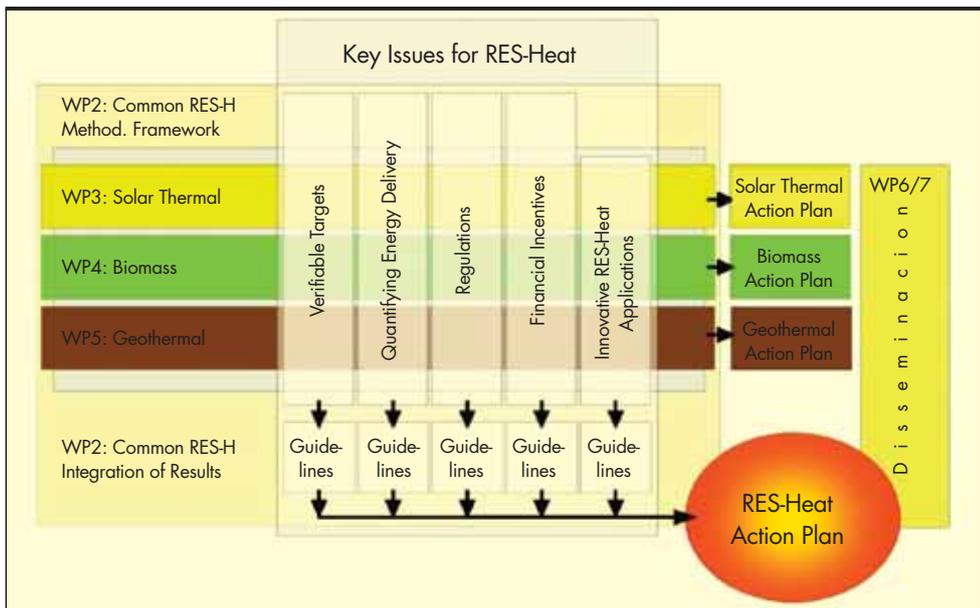


FIGURA 9. Esquema de la estructura del proyecto K4RES-H en capítulos y paquetes de trabajo. <http://www.erec-renewables.org/>.

Dentro del capítulo de aplicaciones innovadoras de la energía geotérmica, ya se menciona en este proyecto la posibilidad de aprovechar la energía del interior de la tierra para abastecer las necesidades del proceso de desalinización de agua de mar. La información que se resume a continuación ha sido extraída de la memoria de este proyecto y de la página web del European Geothermal Energy Council (EGEC).

El 97,5% del agua del planeta es marina. Del 2,5% de agua restante dulce, el 70% se encuentra en los polos formando los casquetes polares y la mayor parte del 30% restante se encuentra en acuíferos de variable accesibilidad. Un minúsculo porcentaje de agua dulce (menos del 1% del agua dulce, menos del 0,007% del total de agua del planeta) se encuentra accesible al consumo humano en ríos, lagos y acuíferos poco profundos. Por lo tanto, los océanos son una fuente alternativa de agua para el hombre, aunque la extracción de agua dulce a partir de ésta es un proceso que consume grandes cantidades de energía. Por ello, la combinación del aprovechamiento geotérmico para extraer energía y aplicarla en una planta desalinizadora abre nuevas posibilidades al desarrollo de esta tecnología.

Hasta el momento no existen muchas experiencias en este campo. Cabe destacar el caso de la isla de Milos, en Grecia (Fytikas et al., 2005; Karytsas et al. 2002, 2004; Manologlou et al. 2004). Esta isla se encuentra en un arco volcánico y, debido a la intensa actividad magmática, presenta un elevado potencial de aprovechamiento geotérmico de alta, media y baja temperatura. En este contexto geológico se ha llevado a cabo un proyecto de construcción de una planta de desalinización de agua de mar totalmente alimentada por energía geotérmica. La capacidad de producción es de 75-80 m³/h de agua potable, a un precio realmente bajo (1,5 €/m³). Esta cantidad es suficiente para abastecer de agua potable a la totalidad de la isla. La explotación geotérmica que alimenta la planta desalinizadora está compuesta por 10 pozos de profundidad comprendida entre 70 y 185 metros, que producen un caudal total de 550 m³/h, de agua a una temperatura de 55-100°C.

Existen otros proyectos similares de plantas desalinizadoras de agua de mar potenciadas por explotaciones geotérmicas, como la de Sousaki Korinthos. Para más información se recomienda visitar la página web de EGEC (European Geothermal Energy Council): www.EGEC.org

4. CONCLUSIONES

La energía geotérmica es una de las fuentes de energía renovable menos conocida pero ofrece una amplia gama de posibles aplicaciones. Esta energía presenta la ventaja adicional de que aunque la instalación de sistemas de intercambio geotérmico implica necesariamente una inversión económica considerable, los ahorros documentados en comparación con las tecnologías convencionales, permiten obtener unos periodos de amortización razonables que la convierten en económicamente interesante a medio plazo. Aunque las aplicaciones más obvias e inmediatas son instalaciones para calefacción y refrigeración de edificios mediante intercambiadores de calor geotérmicos instalados directamente en el terreno o en cimentaciones termo-activas, existe también la posibilidad de aplicar esta tecnología en la construcción de elementos estructurales de hormigón de grandes infraestructuras. En el presente trabajo se han expuesto algunas de las posibles aplicaciones de aprovechamiento geotérmico asociadas a obras públicas, mencionando en cada tipología algunos casos prácticos ya construidos y en funcionamiento existentes en el mundo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Adam, D., Hofinger, J., Ostermann, N. (2001): "Utilisation of Geothermal Energy from Railway Tunnels" Proceedings of XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 27-31 August, (Istanbul, Turkey), Vol. 3, pp. 2029-2034.
- Adam, D. & Markiewicz, R. (2006): "Energy geocomposites for tunnels" Proceedings 8th International Conference on Geosynthetics, pp. 677-682.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE): "ASHRAE Handbook of fundamentals", Atlanta, USA (1953).
- Barrero, A. (2008): "Energía Geotérmica y del mar" Energías renovables para todos. Haya Comunicación Ed. www.energias-renovables.com, Patrocinio Iberdrola.
- Brandl, H (2006): "Energy foundations and other thermo-active ground structures" Geotechnique, Vol. 56 (2), pp. 81-122.
- Brandl, H., Adam, D. & Markiewicz, R. (2006): "Energy geocomposites for tunnels" Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki (eds.), Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 044 7, pp. 677-682.
- Bullard, E.C. (1965): "Historical introduction to terrestrial heat flow" In: Lee, W.H.K., ed. *Terrestrial Heat Flow*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., Vol. 8, pp. 1-6.
- Chapman, W.P. (1952): "Design of snow melting systems" Heating and ventilating, Vol. 95.
- Chapman, W.P. & Katunich (1956): "Heat requirements of snow melting systems" ASHRAE Transactions, Vol. 62, pp. 359-.
- European Geothermal Energy Council: www.egec.org.
- EGEC (2007): "Geothermal snow melting and de-icing" European Geothermal Energy Council website. www.egec.org.
- Eugster, W.J. (2007): "Road and bridge heating using geothermal energy. Overview and examples" Proceedings European Geothermal Congress Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007.
- Eugster, W.J. & Sanner, B. (2007): "Technological status of shallow geothermal energy in Europe" Proceedings of the European Geothermal Congress, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007.
- Ewen, J. & Thomas, H.R. (1987): "The thermal probe – a new method and its use on an unsaturated sand" Geotechnique, Vol. 37 (1), pp.91-105.
- Fytikas, M., Radoglou, G., Karytsas, C., Mendrinou, D., Vasalakis, A. And Andritsos, N. (2005): "Geothermal Research in Vounalia Area, Milos Island (Greece) for Seawater desalination and power production" World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 25-29 April.
- Gehlin, S. (1998): "Thermal response test – In situ measurements of thermal properties in hard rock" Lic. Thesis. Technical University of Luleå.
- Hidalgo, R. (2008): "Investigación de recursos geotérmicos de la Comunidad de Madrid" Jornada "Geotermia: La energía renovable de la Tierra", IDAE, 20 de mayo de 2008.
- Hutchinson, FE (1970): "Environmental pollution from highway de-icing compounds" Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 25, pp. 144-146.
- Iwamoto, K. & Nagasaka, S (2000): "Prospects of snow melting systems using underground thermal energy storage in Japan" Proceedings of the Annual Conference of the Society of Heating, Japan.

International Energy Agency (IEA): Energy conservation through energy storage (ECES): <http://iea-ecses.org/>.

Karytsas, C., Alexandrou, V. and Boukis, I. (2002): "The Kimolos Geothermal desalination Project" International Workshop on "possibilities of geothermal energy development in the Aegean Islands Regions" Geotherm 2002, pp. 206-219, September 5-8, 2002, Milos Island, Greece.

Karytsas, C., Mendrinou, D. and Radoglou, G. (2004): "The current geothermal exploration and development of the geothermal field of Milos island in Greece" Geo-Heat Center Bulletin June 2004.

Kooiman, L. & van Loon, L.J.M. (1991): "Demonstration project perscombinatie NV, Amsterdam; cold storage in aquifer" Proc. 5th Int. Conf. Energy Storage THERMASTOCK 91, 2.6.1-2.6.6.

Lund, J.W. (1976): "Geothermal De-Icing of a highway pavement" Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, January, Vol. 1 (3), pp.4-9.

Lund, J.W. (1999): "Reconstruction of a pavement geothermal deicing system" Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Vol. 20 (1), Klamath Falls, OR, pp. 14-17.

Lund, J.W. (2000): "Pavement snow melting" Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Vol. 21 (2), Klamath Falls, OR, pp. 14-17.

Llopis, G. y Rodrigo, V. (2008): "Guía de la energía geotérmica" Comunidad de Madrid.

Mands, E. & Sanner, B.: "Energía Geotérmica a poca profundidad" www.UBeG.de.

Manologlou, E., Tsartas, P. and Markou, A. (2004): "Geothermal energy sources for water production socio-economic effects and people's wishes on Milos island: a case study" Energy Policy, Vol. 32 (5), pp. 623-633.

Markiewicz, R., Adam, D., Hofinger, J. & Unterberger, W. (2005): "Extraction of geothermal energy from tunnels" Proceedings of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Osaka, Japan), Vol. 3, pp. 1629-1632.

Morita, K. & Tago, M. (2000): "Operational characteristics of the Gaia Snow-melting system in Ninohe, Iwate, Japan" Proceedings of the World Geothermal Congress, Kyushu, Japan.

Morita, K. & Tago, M. (2005): "Snow-melting on sidewalks with ground-coupled heat pumps in heavy snowfall city" Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya.

Nydahl, J.K., Pell, K., Lee, R., and Sackos, J. (1984): "Evaluation of an Earth Heated Bridge Deck" USDOT Contact N°. DTFH61-80-C-00053, University of Wyoming, Laramie.

Rauber, M. (1995): "Energy from Road Surfaces" Caddet Renewable Energy Newsletter, Issue 1/95, Harwell, UK, pp. 25-27.

Rybach, L. & Wilhelm (2003): "The geothermal potential of Swiss Alpine tunnels" Geothermics, Vol. 32, pp. 557-568.

Sanner, B., editor (1999): "High temperature underground thermal energy storage. State-of-the-art and prospects. Lesener Geologische Schriften Vol. 67, 1-158.

Sanner, B. (2007): "Experiences with geothermal snow melting world-wide (USA, Japan- and Europe!)" EGEN RESTMAC workshop on geothermal snow melting, Malmö, Sweden, 2nd October.

Sato, M. & Sekioka, M (1979): "Geothermal snow melting at Sapporo, Japan" Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Vol. 3, Klamath Falls, OR, pp. 16-18.

Scholz, M. & Grabowiecki (2008): "Combined permeable pavement and ground source heat pump systems to treat urban runoff" Journal of Chemical Technology & Biotechnology.

Spitler, J.D. & Hogue, T.D. (1995): "Prevention of bridge deck icing using geothermal heat". Oklahoma State University.

Thurston, R.E., Culver, G. & Lund, J.W. (1995): "Pavement snow melting in Klamath Falls -Rehabilitation of the ODOT Well" Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, February, Vol. 16 (2), pp. 23-28.

USGS (2003): United States Geological Survey: "Geothermal Energy - Clean Power from the Earth's heat", Circular 1249 <http://geopubs.wr.usgs.gov/circular/c1249>.

Wang, H., Zhao, J. & Chen, Z. (2008): "Experimental investigation of ice and snow melting process on pavement utilizing geothermal tail water" Energy conversion and management, Vol. 49, pp. 1538-1546.

Wilhelm, J. & Rybach, L. (2003): "The geothermal potential of Swiss Alpine tunnels" Geothermics, Vol. 32, pp. 557-568.