



# Acumulación estacional de energía solar en acuífero para acondicionamiento térmico

Federico González <sup>a</sup>, Pedro Galione <sup>a</sup>, Alfonso Flaquer <sup>b</sup>, Lidio Braga <sup>a</sup>, Pedro Curto <sup>a</sup>

<sup>a</sup> IIMPI – Fing – UdelaR, Uruguay, [fgonzalez@fing.edu.uy](mailto:fgonzalez@fing.edu.uy).

<sup>b</sup> IMFIA – Fing – UdelaR, Uruguay, [aflaquer@fing.edu.uy](mailto:aflaquer@fing.edu.uy).

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene como objetivo analizar la acumulación de energía térmica en acuíferos, utilizando la temporada de verano para calentar agua mediante colectores solar e inyectar agua caliente en el acuífero, para utilizarla en la calefacción de edificios durante la estación fría. El primer enfoque para modelar el comportamiento del acuífero se realiza mediante un modelo analítico, luego se diseña y construye un arreglo experimental para medir en campo el comportamiento de esta instalación. Los parámetros térmicos e hidráulicos del acuífero deben ser conocidos con precisión para aplicar modelos analíticos y numéricos. En el sitio de estudio, se estudia el comportamiento del acuífero ante una inyección de agua caliente, calentada por colectores solares. Estas medidas se utilizan para comparar, y como entradas a los modelos analíticos y numéricos.

**PALABRAS CLAVE:** UTES, ATES, almacenamiento de energía, energía geotérmica, energía solar.

## 1 INTRODUCCIÓN

A medida que aumenta la demanda de energía, la conservación y utilización eficiente de la energía se vuelve crucial. En todo el mundo, las aplicaciones del sistema de almacenamiento de energía térmica (TES – Thermal Energy Storage) han demostrado proporcionar soluciones económicas y ecológicas a los problemas de energía y se ha prestado cada vez más atención a su utilización (Paksy et al., 2004), (Dincer and Rosen, 2007). A su vez, la utilización de energía térmica suministrada por fuentes renovables ha estado siempre relacionada con el problema de que la mayoría de estas fuentes suministran energía cuando la demanda del usuario es baja, por ejemplo la energía solar térmica para calefacción, tiene la mayor disponibilidad en la temporada de verano, cuando la demanda de calefacción es pequeña.

Las tecnologías de energía solar térmica ofrecen un buen potencial para la calefacción de viviendas y producción de agua caliente sanitaria. De acuerdo con (Cruickshank, 2009), los sistemas térmicos son típicamente de dos a cuatro veces más eficientes que los sistemas fotovoltaicos (PV). Por otra parte, la calefacción de viviendas y el calentamiento de agua son responsables de una gran parte de las necesidades energéticas de los edificios residenciales: alrededor del 80% en Canadá (NRCan, 2011) y el 82% en Europa (Linder and Bahr, 2007). Por tanto, existe un gran potencial en el uso de tecnologías de energía solar térmica para convertir la radiación solar en calor sensible utilizable.

Varias tecnologías de almacenamiento de energía térmica subterránea (UTES – Underground Thermal Energy Storage) se han desarrollado en los años recientes para encontrar nuevas soluciones que garanticen criterios de eficiencia y sostenibilidad económica de forma de poder utilizar con mayor eficacia las nuevas fuentes de energía renovables (solar, geotérmica, ambientales, etc.). (Nielsen, 2003)

Los sistemas UTES se suelen dividir en dos grupos. Por un lado, el almacenamiento de energía térmica mediante sondeos (BTES), llamados sistemas "cerrados". Cuando el almacenamiento de energía se realiza en un medio acuífero se denomina (ATES) o sistemas "abierto", donde el agua subterránea (Novo et al., 2010) se extrae o se inyecta en el acuífero mediante el uso de pozos para llevar la energía térmica dentro y fuera del acuífero.

Estos sistemas se han utilizado con éxito en todo el mundo para el almacenamiento temporal de calor y energía fría con el propósito de calefacción y / o refrigeración en invernaderos, residencias e industrias. Numerosas instalaciones se encuentran en operación en Suecia, Alemania, Holanda, Bélgica y otros países europeos.

(Hooper, 1955) indicó que un sistema de calefacción solar con una fracción solar del 100% (la fracción solar es la relación entre el calor usado para calefacción y el calor usado para calentar agua de usos domésticos en base a un sistema a base de energía solar respecto de los requerimientos totales de calefacción) para un hogar canadiense usando un almacenamiento estacional requeriría 25% de la superficie del colector necesaria para el mismo tipo de sistema equipado con el almacenamiento a corto plazo.

En Uruguay no existen experiencias de este tipo a la fecha, por lo que el potencial de desarrollo y aplicación de estas tecnologías de amplio uso a nivel mundial es enorme.

## 2 MODELO ANALÍTICO

Stauffer et al. (2014), analiza varios modelos para el uso térmico de sistemas de agua subterránea. Aplicando la teoría de la fuente en movimiento a un modelo bidimensional que considera la advección y la conducción, se obtiene la solución analítica para la respuesta de una fuente, de longitud infinita a lo largo de la dirección vertical, con un flujo de calor uniforme por unidad de longitud del pozo (pozo de inyección). Este modelo es llamado MILS y permite calcular la temperatura en un plano perpendicular a la línea infinita de inyección/extracción de calor luego de transcurrido un tiempo  $t$  :

$$T(x, y, z) = T_0 + \frac{q_{ib}}{4\pi C_m \sqrt{D_{t,L} D_{t,T}}} \int_0^t \exp \left[ \frac{-[x - u_L(t-t')]^2}{4D_{t,L}(t-t')} - \frac{y^2}{4D_{t,T}(t-t')} \right] \frac{dt'}{(t-t')}$$

donde  $D_{t,L}$  y  $D_{t,T}$  son los coeficientes de difusividad térmica longitudinal y transversal, respectivamente, los cuales incluyen los efectos de la dispersión térmica ( $\beta_L$  y  $\beta_T$ ) y la velocidad térmica del acuífero  $u_t$

$$D_{t,L} = D_t + \beta_L u_t$$

$$D_{t,T} = D_t + \beta_T u_t$$

Luego,  $C_m$  es la capacidad térmica volumétrica del mismo.

El modelo es utilizado para predecir el comportamiento del acuífero frente a la inyección de agua caliente, y así dimensionar el arreglo experimental que se construye para realizar las medidas en campo. La temperatura del agua se fija en un máximo de 40°C, límite recomendado por aspectos ambientales en el acuífero. Luego, se plantean varios escenarios con distintos caudales y cantidad de colectores solares, buscando que el acuífero logre una variación en la temperatura razonable en las inmediaciones del pozo de inyección. Asimismo, con estos resultados se determinan la disposición de los pozos de control para medir las temperaturas de acuífero en la instalación.

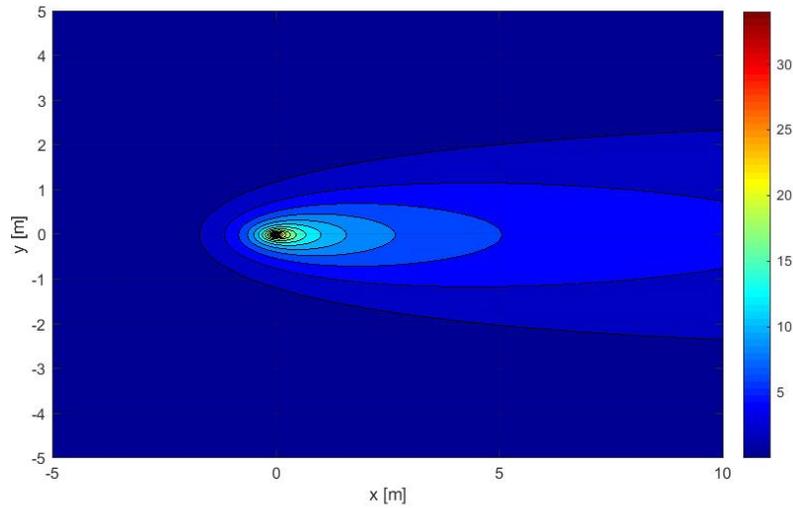


Figura 1. Perfil de temperatura del acuífero luego de la inyección de agua caliente.

### 3 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El modelo analítico fue utilizado para analizar la respuesta del acuífero frente a la inyección de agua caliente y dimensionar la instalación. La figura 2 muestra esquemáticamente el arreglo de la instalación experimental.



Figura 2. Esquema de la instalación.

El pozo de extracción se encuentra a 70 metros del pozo de inyección, distancia suficiente para mantener el área inalterada y evitar efectos de recirculación en el acuífero. El caudal de agua nominal es establecido en  $1\text{m}^3/\text{h}$  y pasa por colectores solares de plástico sin cobertura que ocupan un área de  $35\text{m}^2$ , para lograr una temperatura de aproximadamente  $40^\circ\text{C}$  cuando la radiación solar es máxima.

Del análisis previo también se determina la distribución de los pozos monitores que donde se mide la temperatura del acuífero. Se perforaron 5 pozos, rodeando el pozo de inyección. En todos se coloca un sensor de nivel y temperatura para monitorear las variaciones.

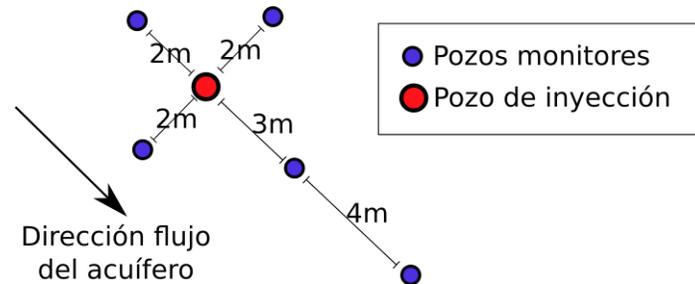


Figura 3. Diagrama de los pozos de inyección y monitoreo del acuífero.

La instalación es monitoreada y controlada con un sistema de telemetría, el cual permite ver las medidas en tiempo real, guardar el histórico de medidas y modificar la lógica de control que opera sobre el sistema, el cual es ajustado para modificar el caudal de inyección buscando que el agua caliente de inyección sea lo más próximo posible a los 40°C.

Además de las medidas de nivel y temperatura en los 6 pozos, también se mide la temperatura de entrada y salida de los colectores, la radiación solar y el caudal de agua bombeado.

#### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La instalación experimental está en la etapa final de mejora y ajuste. Durante parte de la temporada de verano estuvo operativa y ya es apreciable el aumento de las temperaturas en el acuífero. En algunos de los puntos medidos se observan aumentos de temperatura de hasta 5°C, mientras que la temperatura en el pozo de inyección es muy sensible a los caudales y temperaturas inyectadas en cada momento.

La figura 4 muestra el comportamiento de las temperaturas en un día de funcionamiento. Se observa que al comienzo del día las temperaturas oscilan, lo cual se debe al comportamiento del sistema que al iniciar busca que la temperatura de salida, *tempout*, logre un valor mínimo aceptable y de no hacerlo, el sistema se detiene para volver a comenzar un tiempo después. La diferencia entre *tempin* y *tempout* es el resultado de la energía solar captada por los calentadores. Luego, la temperatura en el pozo de inyección es representada por *t3* en el gráfico. Se observa cómo responde casi inmediatamente al agua inyectada, y cuando el sistema se detiene, decrece lentamente indicando que la energía se dispersa, calentando el acuífero en la zona circundante. Las temperaturas de los pozos monitores se encuentran entre 20 y 22°C, siendo que la temperatura normal del acuífero es de 17°C.

Los datos presentados en la figura 4 corresponden a un día de Mayo, donde, utilizando los valores de caudal medido, se calcula una energía total inyectada igual a 16,4 kWh y un rendimiento de los colectores solares de alrededor de 18%. Es de esperar que la energía inyectada en un día de verano supere ampliamente el valor calculado para este día de invierno. Por un lado, se tiene que el rendimiento de los colectores aumenta notoriamente cuando la temperatura ambiente es mayor, habiéndose registrado un rendimiento de 58% para un día de verano. Por otro lado, como se observa en los datos de radiación presentados en la figura 5, obtenidos de Laboratorio de Energía Solar (LES), la radiación en el mes de Mayo es de dos a tres veces menor que la radiación en verano. Con esto se proyecta que la energía a inyectar por el sistema será cercana a 100 kWh por día en la temporada de calor.

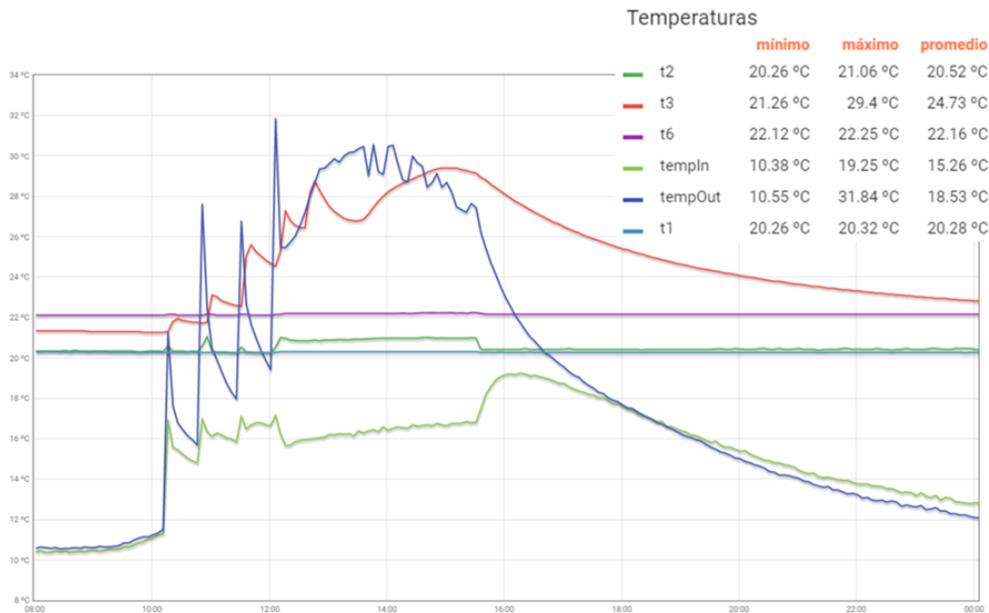


Figura 4. Medida de temperaturas para día de otoño.

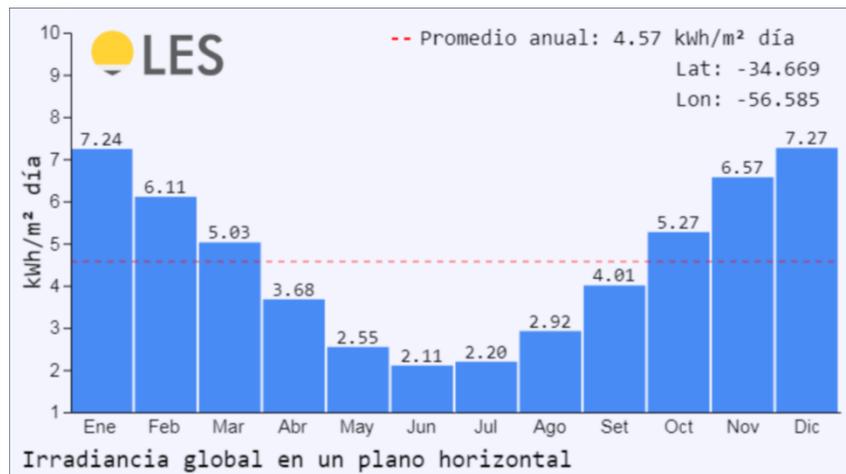


Figura 5. Radiación mensual en el lugar de la instalación experimental.

El sistema funcionó intermitentemente en el periodo de verano, debido que todavía se encontraba en periodo de puesta a punto y resolución de imprevistos en el sistema. El arreglo no es convencional desde el punto de vista hidráulico, ni eléctrico y de registro de datos, resultando repetidas instancias de solución de inconvenientes, imprevistos, y demoras en la puesta a punto respecto al cronograma inicial. Para determinar efectivamente el funcionamiento y la capacidad de acumulación durante el periodo de verano, se deberá operar el sistema en la próxima temporada de formar de lograr una evaluación completa del sistema. Luego, en la temporada de invierno se debe extraer agua desde la zona caliente del acuífero para finalmente determinar la capacidad de acumulación y el rendimiento de la acumulación estacional de energía solar en este acuífero.

## 5 REFERENCIAS

Paksoy, H.O.; Gurbuz, Z.; Turgut, B.; Dikici, D.; Evliya, H. Aquifer thermal storage (ATES) for air-conditioning of supermarket in Turkey. *Renew. Energy* 2004, 29, 1991-1996.

Dincer, I.; Rosen, M.A. Energetic, exergetic, environmental and sustainability aspects of thermal energy storage systems. In *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*; Paksoy, H.O., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2007; pp. 23-46.

Nielsen, K. (2003). Thermal energy storage: A state-of-the-art. A report within the research program Smart Energy-Efficient Buildings at the Norwegian University of Science and Technology and SINTEF.

Novo, A. V., Bayon, J. R., Castro-Fresno, D., & Rodriguez-Hernandez, J. (2010). Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. *Applied Energy*, 87(2), 390-397.

Hooper, F. C. (1955). Possibility of complete solar heating of Canadian buildings. *Eng. J.(NY);(United States)*, 38(11).

Cruikshank CA. Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications. PhD Thesis. Queen's University; 2009.

Natural resources Canada (NRCan). Survey of household energy use—summary report. Available from: <http://oee.nrcan.gc.ca/Publications/statistics/sheu-summary/pdf/sheusummary.pdf> [accessed January 2011].

Linder S, Bhar R. Space conditioning in the residential sector in Europe. Deliverable 1—Ground Reach EU project. Ecofys; 2007.

Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Molina-Giraldo, N., and Kinzelbach, W.. *Thermal Use of Shallow Groundwater*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.