

OPTIMIZACIÓN DEL DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE UNA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA SEGÚN LA ZONA CLIMÁTICA

ÁLVAREZ PARDIÑAS, Ángel ⁽¹⁾; FERNÁNDEZ SEARA, José ⁽¹⁾

DIZ MONTERO, Rubén ⁽¹⁾; FERNÁNDEZ CID, Diego ⁽¹⁾

jseara@uvigo.es

⁽¹⁾ Universidad de Vigo, Escuela de Ingeniería Industrial, Área de Máquinas y Motores Térmicos

RESUMEN

Las bombas de calor geotérmicas pueden implicar ahorros energéticos importantes en comparación con sistemas de climatización clásicos, gracias al aprovechamiento del terreno, cuyas temperaturas son muy estables a lo largo del año, como foco térmico. El tamaño de los sistemas de captación va a influir notablemente en la eficiencia de las bombas de calor, por lo que es fundamental obtener una solución de compromiso entre las prestaciones de las bombas de calor y la inversión necesaria.

Este artículo parte de un trabajo previo en el que se estudió el comportamiento de una bomba de calor geotérmica con inversión de ciclo al variar la superficie de intercambio (el número de pozos activos) del sistema de captación. Basándose en los datos experimentales obtenidos en dicho trabajo, y teniendo en cuenta los costes de este tipo de instalaciones, se ha realizado un análisis económico de la instalación, para analizar el impacto que tiene el número de perforaciones y la superficie de intercambio en el coste de la instalación y en el ahorro obtenido debido al aumento de la eficiencia, con el objetivo de alcanzar un dimensionado óptimo. Este análisis se ha realizado teniendo en cuenta las condiciones climáticas de capitales de provincia representativas de las zonas climáticas definidas según el Apéndice B de la Sección HE 1 del Documento Básico HE del Código Técnico de la Edificación. Se han obtenido diferentes soluciones y tiempos de retorno de la inversión según las condiciones ambientales consideradas.

Palabras clave: Bomba de calor, captación geotérmica, análisis económico.

1. Introducción

La energía geotérmica tiene muy diferentes aplicaciones en función de la temperatura del yacimiento. Cuando esta temperatura es inferior a 30 °C la energía geotérmica se considera de muy baja temperatura, y es aprovechable mediante sistemas de bomba de calor [1]. La combinación de bombas de calor y energía geotérmica puede implicar ahorros energéticos importantes, en comparación con sistemas de climatización clásicos, debido a la gran estabilidad de las temperaturas del terreno.

El intercambio térmico en este tipo de equipos se realiza mediante captadores geotérmicos, los cuales se suelen clasificar en colectores horizontales enterrados, sondas geotérmicas (captadores verticales), sondeos de captación de aguas someros y cimientos geotérmicos [2]. Los captadores verticales están muy extendidos y aventajan a otros en la estabilidad de temperaturas y en el espacio necesario para su instalación, aunque resultan más costosos.

El tamaño de los sistemas de captación influye notablemente en la eficiencia de las bombas de calor, pero es fundamental obtener una solución de compromiso entre las prestaciones de las bombas de calor y la inversión necesaria. Un incorrecto dimensionado del sistema de captación lleva a un comportamiento ineficiente de la bomba de calor, si bien también puede existir congelación del terreno debido a las bajas temperaturas de trabajo [3] o temperaturas excesivamente elevadas en los captadores en sistemas con inversión de ciclo.

2. Objetivos

El objetivo principal de este artículo ha sido analizar la viabilidad económica de una instalación de bomba de calor geotérmica para determinar el impacto que tiene la superficie de intercambio con el terreno sobre el coste de la misma y sobre el ahorro obtenido debido al aumento de la eficiencia de funcionamiento de la bomba de calor. Para ello nos hemos basado en los resultados de un estudio experimental en el que se caracterizó el comportamiento de una bomba de calor geotérmica con inversión de ciclo y sistema inverter al variar la superficie de intercambio del sistema de captación (de 1 a 4 perforaciones verticales activas de 100 metros cada una) [4].

3. Método de trabajo

3.1. Cálculo de la demanda de calefacción y consumos

Los resultados experimentales en los que nos hemos basado para la realización del estudio se centran en el análisis del sistema de captación trabajando como sumidero de calor (bomba de calor en modo refrigeración), por lo que las demandas que se han tenido en cuenta para este estudio son las de refrigeración. Estas dependen de la propia vivienda (características constructivas y dimensiones) y de las condiciones climáticas. Se ha considerado para este estudio una vivienda unifamiliar tipo de 150 m² y dos plantas, con orientación Este-Oeste. Las cargas térmicas de refrigeración de la vivienda se han calculado según el Capítulo 17 del ASHRAE Handbook-Fundamentals [5].

En cuanto a las condiciones climáticas, el análisis se ha realizado siguiendo el Apéndice B de la sección HE1 del Documento Básico HE del CTE [6]. Según este texto, las localidades del Estado español se clasifican, en cuanto a condiciones climáticas para aplicaciones de refrigeración, en 4 zonas. Estas zonas se denotan por números del 1 al 4. El número 1 se aplica a zonas con clima más suave, y el número 4 para zonas de clima más extremo. Para el estudio se hanseleccionado las ciudades de Pontevedra, Barcelona, Madrid y Sevilla como representativas de las zonas climáticas 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

A través de la página web de la Agencia Estatal de Meteorología [7] se han obtenido los valores normales de temperaturas máximas y mínimas registradas en cada mes del año y para cada localidad. Estos valores máximos y mínimos no resultan suficientes para realizar un estudio detallado de la demanda a lo largo del día. Apoyándonos en el método descrito en el Capítulo 14 del ASHRAE

Handbook-Fundamentals [8], se ha calculado la temperatura en función de la hora del día (hora solar), a partir de los valores de la temperatura máxima y mínima de dicho día. En la Figura 2 se recoge la evolución de las temperaturas a lo largo de un día normal de cada mes para la localidad de Pontevedra.

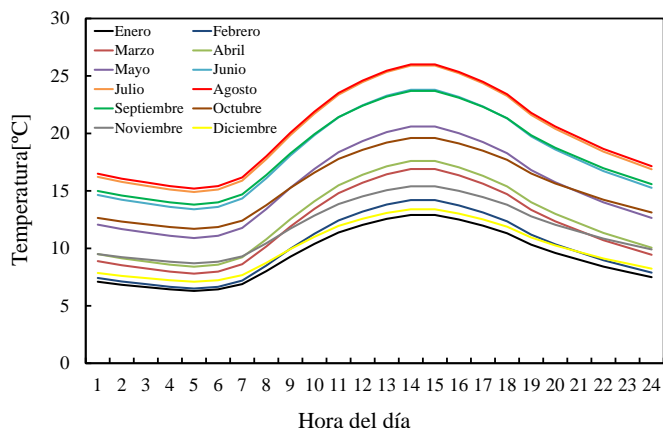


Figura 1: Temperaturas de la ciudad de Pontevedra para un día medio en función del mes del año y de la hora del día

Con la evolución de la temperatura para cada zona climática y las cargas térmicas de la vivienda se ha calculado la demanda de refrigeración fijando una temperatura interior de diseño de 23 °C (R.I.T.E. [9]). Las demandas de refrigeración aumentan conforme avanzamos de una localidad de la zona climática 1, con una demanda pico de 3,52 kW, a una localidad de la zona climática 4, que presenta una demanda máxima de 8,28 kW. Estas potencias máximas podrían cubrirse con la bomba de calor con la que se realizaron los ensayos que sirvieron de base para este estudio, que podía absorber hasta 14 kW de potencia en modo refrigeración [4].

El cálculo de la potencia eléctrica consumida en cada momento se ha realizado a partir de los datos experimentales con los que se contaba del estudio previo [4], siguiendo una serie de suposiciones para permitir este cálculo. La primera es que la recuperación del pozo es completa entre un día y el siguiente. En segundo lugar se ha considerado que el sistema de climatización tiene la misma temperatura de impulsión independientemente de la zona climática estudiada. También se estima que la temperatura de impulsión a captación es constante, lo que supone que el EER es constante. Como resultado de aplicar estas hipótesis, se ha llegado a correlaciones con las que obtener la potencia eléctrica consumida para satisfacer la demanda de refrigeración en función del número de perforaciones del sistema de captación. En la Figura 2 se representa la energía eléctrica consumida en un día medio de cada mes, que es igual a la suma de las potencias eléctricas consumidas durante cada hora de funcionamiento de la bomba de calor, en función de la zona climática y del número de pozos.

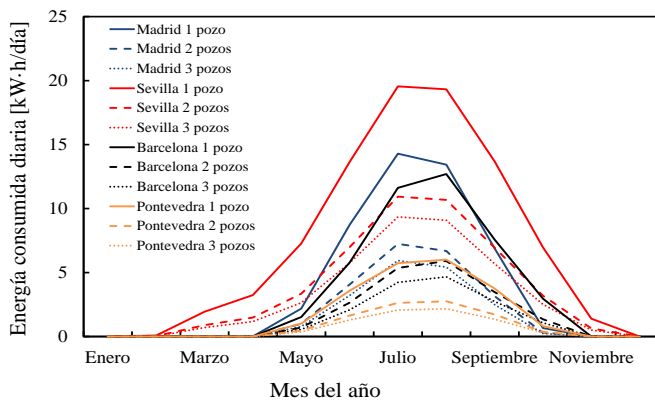


Figura 2: Evolución anual de la energía eléctrica consumida diariamente en las diferentes zonas climáticas y en función del número de pozos

Los valores máximos de energía consumida se dan en los meses de Julio y Agosto, coincidiendo con los meses de máxima demanda de refrigeración, independientemente de la zona climática y del número de pozos. Como cabía esperar, estos consumos son mayores cuanto mayor es la temperatura de la localidad. Además, conforme aumenta el número de pozos disminuye de forma importante la energía eléctrica que requiere la bomba de calor para satisfacer la demanda de refrigeración. Esto se debe a que disminuye la temperatura de impulsión del circuito que va a captación, con lo que es menor la relación entre las presiones de alta y de baja de la bomba de calor y mejora el EER. En la Tabla 1 se recogen los porcentajes medios de reducción de la energía eléctrica consumida diariamente al pasar de uno a dos pozos y de dos a tres pozos para cada una de las localidades estudiadas. Se observa que la diferencia es mucho más importante en valores relativos al pasar de 1 a 2 pozos que al pasar de 2 a 3 pozos.

Tabla 1: Porcentaje medio de reducción de la energía eléctrica consumida por la bomba de calor al pasar de 1 a 2 pozos y de 2 a 3 pozos para cada una de las localidades analizadas

Localidad	% medio de reducción de energía eléctrica consumida	
	1 a 2 pozos	2 a 3 pozos
Pontevedra	54,13%	21,15%
Barcelona	53,87%	21,09%
Madrid	51,37%	19,45%
Sevilla	47,70%	16,7%

En la Figura 2 también se observa que el presente estudio se ha realizado para un máximo de 3 pozos, pese a que los datos experimentales de partida eran para hasta 4 perforaciones geotérmicas (ver referencia [4]), debido a que la diferencia en potencias, EERs y temperaturas es muy pequeña al pasar de 3 a 4 pozos.

En la Figura 3 se recoge la energía eléctrica consumida anualmente por la bomba de calor en función de la localidad y del número de pozos. Se observa claramente la gran diferencia que existe entre el consumo de Sevilla (zona climática 4) y el resto de localidades, independientemente del número de pozos. En valor promedio, Sevilla (zona 4) requiere un 98% más de energía eléctrica anual que Madrid (zona 3). Esta diferencia se reduce a un 14% entre Madrid (zona 3) y Barcelona (zona 2), pero aumenta hasta el 102% al comparar Barcelona (zona 2) y Pontevedra (zona 1).

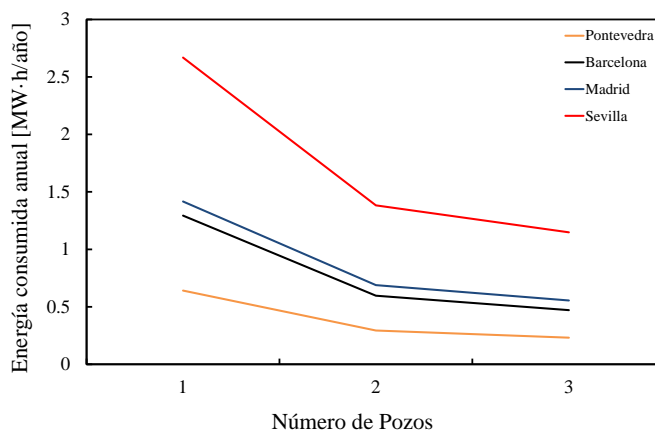


Figura 3: Energía eléctrica consumida anualmente por la bomba de calor para satisfacer la demanda de la vivienda en función del número de sondas geotérmicas instaladas y de la localidad

3.2. Desarrollo del análisis económico

Para realizar las diferentes evaluaciones económicas se deben conocer cuáles son las posibilidades que se pueden comparar. En este caso, para cada zona climática la bomba de calor se podrá instalar con uno, dos o tres pozos, por lo que se han realizado tres estudios de viabilidad económica: paso de una captación con 1 pozo a otra con 2 pozos, en adelante Proyecto 1; paso de una captación de 1 pozo a 3 pozos, en adelante Proyecto 2; y paso de una captación de 2 pozos a 3 pozos, en adelante Proyecto 3.

La diferencia de inversión inicial entre las soluciones de cada proyecto se ha determinado considerando únicamente los costes de cada perforación adicional. Se ha estimado un coste de perforación e instalación de la sonda de 35 €m y perforaciones de 100 m cada una (como las del estudio experimental de referencia [4]), por lo que cada pozo geotérmico supone 3500 €. Este coste se ha aplicado en los análisis económicos suponiendo que su pago se realiza con capital propio y disponible al comienzo de los proyectos (año 0).

Para un determinado análisis económico, en la zona climática z , el número de pozos de la primera posibilidad es j y el número de pozos de la segunda posibilidad es k , tomando j valores de 1 o 2, y k valores de 2 o 3 y siendo siempre $k > j$. Siguiendo la ecuación (1) se calcula el coste del consumo de la electricidad de cada opción durante una hora determinada h de un día medio de un mes m y con un determinado número de sondas de captación, c . p_h representa el precio de la electricidad a dicha hora y $E_{h,m,z,c}$ el consumo de energía eléctrica para satisfacer la demanda de refrigeración durante esa hora de un día medio del mes en cuestión, para dicha zona climática y con ese número de sondas de captación. El precio horario de la electricidad se ha basado en los datos obtenidos de la web de Red Eléctrica de España [10] para el día 30 de Enero de 2015. El coste anual de electricidad para dicha zona climática y número de pozos, $C_{z,c}$, se obtiene según la ecuación (2), siendo d_m el número de días del mes m .

$$C_{h,m,z,c} = p_h \cdot E_{h,m,z,c} \quad (1)$$

$$C_{z,c} = \sum_{m=1}^{12} \left(d_m \cdot \sum_{h=1}^{24} C_{h,m,z,c} \right) \quad (2)$$

El ahorro base en electricidad debido a pasar de la opción con j perforaciones a la opción con k perforaciones en la zona climática z , $A_{base,z,j \rightarrow k}$ se calcula según la ecuación (3). Este ahorro no será igual para toda la duración del proyecto, ya que el precio de la electricidad varía con el paso de los años. La variación del precio de la electricidad en cada año se ha estimado con los datos de variación del IPC Armonizado de la Electricidad durante el período 2005 – 2014 [11]. El promedio de variación

de este índice, i_{elec} , ha sido de 5,41%, y se ha tomado en la ecuación (4) para el cálculo del ahorro en electricidad en función del año de evaluación del ahorro, t .

$$A_{base,z,j \rightarrow k} = C_{z,j} - C_{z,k} \quad (3)$$

$$A_{t,z,j \rightarrow k} = A_{base,z,j \rightarrow k} \cdot (1 + i_{elec})^{t-1} \quad (4)$$

Los flujos de caja de cada año, $FC_{t,z,j \rightarrow k}$, se calculan al restar el coste de inversión en cada año al ahorro conseguido en dicho año. En nuestro caso sólo existe inversión al inicio ($t = 0$) y no consideramos sobrecostes por mantenimiento u otras cuestiones. Con estos flujos de caja se calcula el payback simple de la inversión, que es el tiempo necesario para recuperar dicha inversión, y que se calcula sumando los flujos de caja de cada año hasta que se alcanza un acumulado igual a 0.

Los flujos de caja de un proyecto en los años siguientes al inicio del mismo deben actualizarse para evaluar de forma correcta la viabilidad de la solución. Estos flujos de caja actualizados o descontados, $FCD_{t,z,j \rightarrow k}$, se calculan al multiplicar el flujo de caja de cada año por un factor de descuento, FD , según la ecuación (5). FD depende del año del flujo de caja y de una tasa de descuento, i_d , calculada basándose en el artículo [12]. Según este texto la tasa de descuento es la suma de la tasa libre de riesgo (bonos del Tesoro) y un diferencial por riesgo. Teniendo en cuenta que la vida útil de la instalación de la geotermia se estima en 25 años, se ha optado por escoger el tipo de las Obligaciones del Estado a 30 años [13], el cual a día 30/01/2015 era de 4.043%. El diferencial por riesgo se ha estimado en el 2%.

$$FCD_{t,z,j \rightarrow k} = FC_{t,z,j \rightarrow k} \cdot FD = FC_{t,z,j \rightarrow k} \cdot \frac{1}{(1 + i_d)^t} \quad (5)$$

Con los flujos de caja descontados se ha determinado el período de retorno descontado de la inversión, que es el tiempo necesario para recuperar la inversión realizada actualizando los flujos de caja de los años de duración de los proyectos. Se obtiene sumando dichos flujos de caja descontados hasta que se alcanza un acumulado igual a 0. También se ha calculado el VAN (valor actual neto) de cada uno de los análisis económicos realizados, tal y como se indica en la ecuación (6). En caso de que este parámetro sea positivo después de un determinado número de años (por ejemplo los 25 años de vida útil de la instalación) el proyecto será viable desde un punto de vista económico. Además, permite comparar los diferentes proyectos para cada zona climática, siendo mejor económicamente aquel que tenga un VAN más positivo.

$$VAN_{25,z,j \rightarrow k} = \sum_{t=0}^{25} FCD_{t,z,j \rightarrow k} \quad (6)$$

4. Resultados alcanzados

En la Figura 4a se muestra el período de retorno simple de los Proyectos 1 y 2 para cada una de las zonas climáticas. Este es significativamente menor para el Proyecto 1 que para el Proyecto 2, siendo la diferencia de 5 años o superior independientemente de la zona climática. Esto se debe a que su coste de inversión inicial es la mitad, mientras que se consigue un ahorro en consumo eléctrico de la bomba de calor al pasar del 2 a 3 pozos que no es tan importante. Además, el período de retorno simple disminuye considerablemente al aumentar la demanda de refrigeración de la localidad. De este modo, mientras que los períodos de retorno simple para Pontevedra de los Proyectos 1 y 2 son de 23,1 y 30,7 años, respectivamente; para Sevilla se reducen a 9,5 y 14 años, respectivamente. También se han calculado los períodos de retorno descontados, que dan una imagen más realista del tiempo de recuperación de la inversión. Las tendencias son muy similares a las descritas para el caso anterior, pero los valores son superior a los anteriores (ver Figura 4b). Se observa que para Pontevedra o

Barcelona en ninguno de los proyectos se recupera la inversión en el tiempo de vida útil de la instalación (25 años). En cambio, en Madrid el paso de un pozo a dos pozos sí presenta un período de retorno descontado inferior a los 25 años. En Sevilla cualquiera de estos dos proyectos tiene un retorno de la inversión tras actualización de los flujos de caja menor que 25 años.

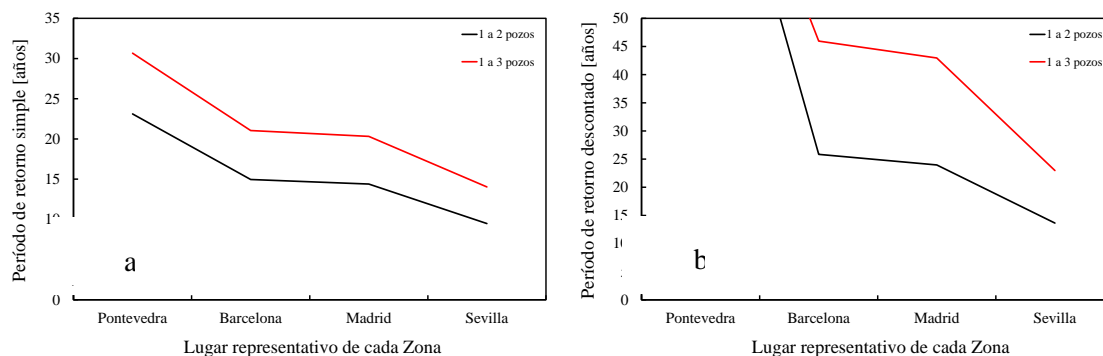


Figura 4: a) Payback simple del Proyecto 1 y Proyecto 2 para la localidad de cada zona climática. b) Payback descontado del Proyecto 1 y Proyecto 2 para la localidad de cada zona climática

Los períodos de retorno para el proyecto 3, consistente en aumentar el número de pozos de 2 a 3, no se muestran en la Figura 4, ya que son demasiado elevados (28,7 años en el caso más favorable). Esto ocurre porque el ahorro en consumo eléctrico es insignificante en comparación con el desembolso de realizar una perforación adicional. En las gráficas de la Figura 5 se muestra la evolución del acumulado del flujo de caja descontado para los diferentes proyectos y zonas climáticas. Este acumulado al finalizar la vida útil de la instalación es el VAN del proyecto, y de ser positivo implicaría que el proyecto es viable desde un punto de vista económico. Esto ocurre solo ocurre para el Proyecto 1 aplicado a la zona climática 3, y para los Proyectos 1 y 2 aplicados a la zona climática 4, por lo que solo estos caso implican un ahorro real al finalizar la vida útil de la instalación, bajo estas condiciones de incremento del precio de la electricidad y tasa de descuento.

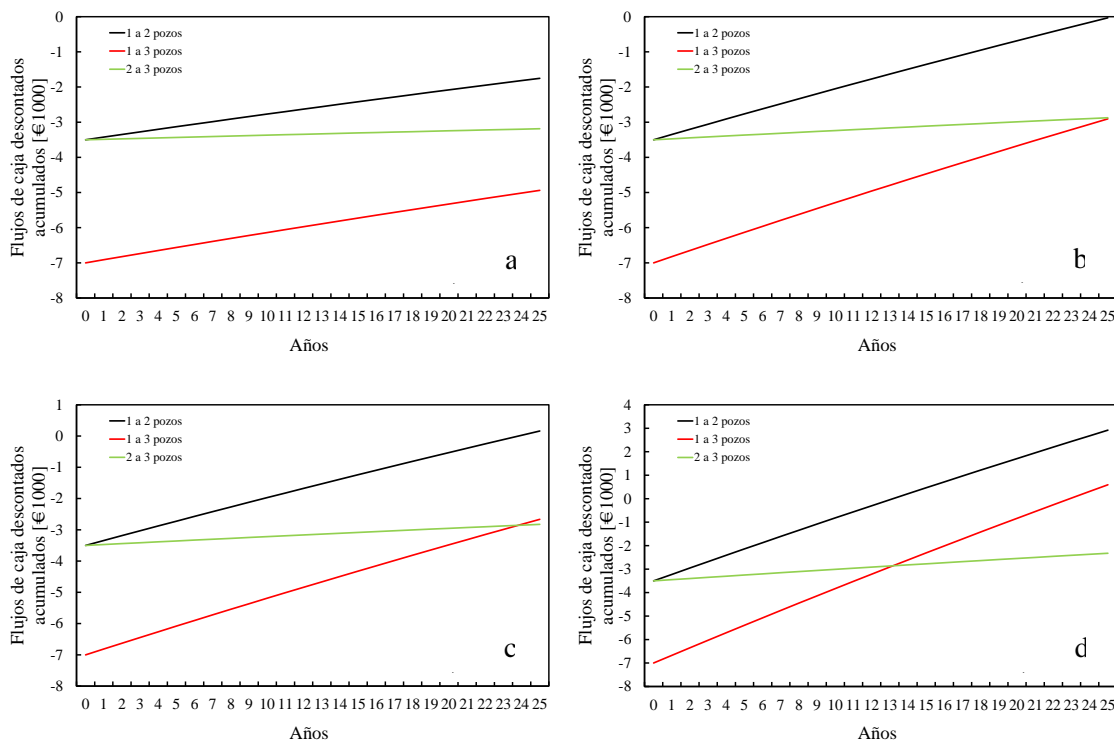


Figura 5: Acumulado de los flujos de caja descontados de los proyectos, durante la vida útil de la instalación. a) Pontevedra (Zona 1). b) Barcelona (Zona 2). c) Madrid (Zona 3). d) Sevilla (Zona 4)

Es importante tener en cuenta que estos análisis económicos se han realizado con la bomba de calor cubriendo solo las demandas de refrigeración, al disponer únicamente de datos experimentales de funcionamiento de la misma con el sistema de captación geotérmico en inversión de ciclo. Al ampliar el estudio a la producción de calefacción y agua caliente sanitaria aumentarán los ahorros anuales de electricidad, habrá flujos de caja más positivos y se incrementará el VAN de la instalación.

5. Conclusiones y consideraciones finales

Se ha estudiado la viabilidad económica de aumentar el número de perforaciones geotérmicas para cubrir demandas de refrigeración en función de la zona climática, basándonos en datos experimentales de funcionamiento obtenidos previamente. Se han determinado las cargas térmicas de una vivienda unifamiliar tipo y se ha calculado la demanda de refrigeración para 4 localidades representativas de las 4 zonas climáticas de verano existentes en el Estado español. A continuación se ha calculado el consumo eléctrico de la bomba de calor para satisfacer estas demandas en función del número de pozos disponibles, de forma que ha sido posible determinar el ahorro en electricidad que supone el aumento del número de sondas geotérmicas.

Se han establecido los diferentes proyectos para cada zona climática, que consisten en diferentes combinaciones de número de pozos para atender las mismas demandas de refrigeración, y se han evaluado económicamente. También se han realizado las consideraciones necesarias de incremento del precio de la electricidad y de la tasa de descuento para calcular los períodos de retorno, simple y descontado, y el VAN del proyecto en su vida útil, que se ha estimado en 25 años.

Los resultados indican que el período de retorno, simple y descontado, es menor en aquellos lugares con mayor demanda de refrigeración, debido a que el ahorro por consumo eléctrico anual también se incrementa. Esto hace que el payback de localidades de la zona climática 4 sea inferior a las de las zonas climáticas 3, 2 y 1, haciendo que la inversión sea más segura. También se observa que el período de retorno es inferior para el aumento de 1 a 2 pozos, que para el paso de 1 a 3 pozos, independientemente de la zona climática. Esto se debe a que el 3^{er} pozo tiene un mayor impacto sobre el coste de inversión inicial que sobre el ahorro energético.

El VAN a 25 años solo alcanza valores positivos para el Proyecto 1 en las localidades de las zonas climáticas 3y 4, y para el Proyecto 2 en la zona 4. Estos análisis económicos solo contemplan demandas de refrigeración, pero de ampliar el estudio a la producción de calefacción y agua caliente sanitaria aumentarán los ahorros anuales de electricidad, será más positivo el VAN y se reducirán los períodos de retorno.

6. Referencias

- [1] ORCHEGARCÍA, E. Energía Geotérmica. 2011. 286 p. (Ed. Carlos López Jimeno).
- [2] LLOPIS TRILLO, G. RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. 2008. 186 p.
- [3] ESLAMI-NEJAD, P. BERNIER, M. Freezing of geothermal boreholes surroundings: A numerical and experimental assessment with applications. Applied Energy, 2012, vol. 98, pp. 333-345.
- [4] UHÍA VIZOSO, F. J. FERNÁNDEZ SEARA, J. PEREIRO MELÓN, A. DIZ MONTERO, R. "Efecto del dimensionado del sistema de captación en el comportamiento de una bomba geotérmica". En Actas VII Congreso Ibérico y V Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del frío (Tarragona, 18,19 y 20 de junio de 2014). Universitat de Rovira i Virgili. Servicio de Publicaciones, 2014. p. 657-664.
- [5] Chapter 17: Residential Cooling and Heating Load Calculations, ASHRAE Fundamentals. 2009. 16 p.
- [6] Documento Básico HE Ahorro de Energía. 2013. 71 p.
- [7] <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>
- [8] Chapter 14: Climatic Design Information, ASHRAE Fundamentals. 2009. 46 p.
- [9] Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (R.I.T.E.). 2007.
- [10] <http://www.esios.ree.es/web-publica/pvpc/>
- [11] www.ine.es

- [12] HERRERA GARCÍA, B. Acerca de la tasa de descuento en proyectos. Quipukamayoc, 2006, vol. 14, pp. 101-108.
- [13] www.tesoro.es