

Influència del context geològic i hidrogeològic en l'eficiència energètica dels sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia

Autor:

Albert Gomà i Roca

Director:

Dr. Albert Folch i Sancho

Resum

L'elevat consum energètic de les societats actuals, així com la impossibilitat de sostenir-lo a llarg termini implica la cerca de noves fonts d'energia. D'aquesta manera, en el camp de la climatització residencial, l'energia geotèrmica de molt baixa entalpia es posiciona com una alternativa als recursos energètics actuals. Així, els primers metres de subsòl presenten una temperatura adequada per al seu aprofitament calorífic, mitjançant els sistemes geotèrmics de bomba de calor.

Si bé a nivell energètic, són sistemes, intrínsecament, molt eficients, el seu rendiment pot patir importants variacions davant dels canvis en les condicions del medi geològic i hidrogeològic. Especialment, els col·lectors de calor verticals, treballen, amb freqüència, en el si de les formacions hidrogeològiques. En aquest sentit, els canvis del nivell hidràulic i de la temperatura de l'aigua de l'aquífer es manifesten amb variacions de la conductivitat tèrmica equivalent i del flux subterrani d'aigua, que alhora, aquestes, es tradueixen en alteracions del flux subterrani de calor. Davant d'aquest fet, l'avaluació quantitativa de l'efecte d'aquestes fluctuacions que es presenta en aquest treball mostra petites variacions del nivell hidràulic i de la temperatura de l'aigua comporten canvis molt notables en l'eficiència dels sistemes verticals de bomba de calor geotèrmica.

Paraules clau

Bomba de calor geotèrmica, context geològic i hidrogeològic, eficiència energètica.

Resumen

El importante consumo energético de las sociedades actuales, así como la imposibilidad de sostenerlo a largo plazo conlleva la búsqueda de nuevas fuentes de energía. De este modo, en el campo de la climatización residencial, la energía geotérmica de muy baja entalpia se desvela como una alternativa a los recursos energéticos actuales. Así los primeros metros de subsuelo presentan una temperatura adecuada para su aprovechamiento calorífico, mediante los sistemas geotérmicos de bomba de calor.

Si bien a nivel energético, son sistemas, intrínsecamente, muy eficientes, su rendimiento tan privilegiado puede sufrir variaciones importantes frente los cambios de las condiciones del medio geológico e hidrogeológico. Especialmente los colectores verticales de calor trabajan, con frecuencia, dentro de formaciones hidrogeológicas. En este sentido los cambios del nivel hidráulico y de la temperatura del agua del acuífero se manifiestan con variaciones de la conductividad térmica equivalente y del flujo subterráneo de agua, que al mismo tiempo, estas se traducen en alteraciones del flujo subterráneo de calor. En frente de tal hecho, la evaluación cuantitativa del efecto de las fluctuaciones citadas, que se presenta en el presente trabajo muestra que pequeñas variaciones de nivel hidráulico y de la temperatura del agua inducen cambios muy notables en la eficiencia de los sistemas verticales de bomba de calor geotérmica.

Palabras clave:

Bomba de calor geotérmica, contexto geológico i hidrogeológico, eficiencia energética.

Abstract

The high energy consumption of current populations and the impossibility of keeping it on the time involve the search for new energy sources. In this way, low enthalpy geothermal energy is revealed as a good alternative to cooling and heating houses. Thus, the first meters of subsoil have a suitable temperature for a thermal use by geothermal heat pump systems

If these systems are, inherently, very efficient, this performance so privileged may suffer significant changes caused by geological and hydrogeological alterations. Especially, vertical heat collectors, often work on hydrogeological formations. So, the changes at hydraulic level and at aquifer temperature, implies thermal conductivity and underground water flow variations, and these, at the same time, induce alterations on the underground heat flow. The quantitative effect evaluation of those fluctuations, which is presented in this paper shows that small variations in hydraulic level and water temperature induce notable changes in the efficiency of pump systems, vertical geothermal heat.

Keywords:

Ground source heat pump, geologic and hydrogeological context, power efficiency

Introducció

Davant la creixent dificultat per mantenir el consum energètic de la societat, i tenint en compte el caràcter finit dels recursos que sustenten les activitats antròpiques actuals, queda palesa la necessitat de moderar els patrons de consum de les poblacions, així com l'obligació de buscar noves formes d'abastament energètic.

En aquest sentit, amb la Directiva Europea 2002/91/CE com a referència legal, les energies renovables es posicionen, de mica en mica, al capdamunt de la llista referent al subministrament energètic alternatiu als combustibles fòssils.

Entre els recursos alternatius, apareix l'energia geotèrmica, que tot i gaudir d'un grau d'implantació menor que altres energies homòlogues, com la

hidràulica, la solar o l'eòlica, acapara un gran potencial en el seu aprofitament. Més concretament, l'energia geotèrmica engloba un extens ventall d'usos, tots en funció del grau de concentració de la calor emmagatzemada a la terra.

Un dels múltiples aprofitaments que se'n deriven és la climatització d'habitatges, a través de l'extracció de calor del subsòl a molt baixa temperatura (5°C-25°C). Per les seves característiques, aquesta calor no és directament aprofitable i necessita ser concentrada mitjançant sistemes de bomba de calor geotèrmica (GSHP) [2]. Teòricament la potència despresa per la bomba de calor (H) és la suma de la calor extreta del subsòl (G) i la potència addicional subministrada a la bomba de calor (E).

$$H \approx G + E \quad (\text{expressió 1})$$

Les bombes de calor en general, són dispositius que gaudeixen d'una elevada eficiència energètica, pel fet que tenen la capacitat de generar més energia que la subministrada pel seu propi funcionament [4]. Així doncs, l'eficiència d'aquests mecanismes electromecànics (COP) es defineix com el quocient entre la potència generada (H) i la potència subministrada (E).

$$COP_H = \frac{H}{E} \quad (\text{expressió 2})$$

En l'extracció de la calor del subsòl s'utilitzen uns col·lectors que, en funció de les característiques del substrat, adopten diferents configuracions. En aquest sentit, existeixen els col·lectors verticals (tancats i oberts) i els col·lectors horitzontals. Si bé el segon tipus de configuració no acostuma a treballar en medis saturats, els col·lectors verticals, degut a la seva fondària, funcionen, habitualment, en el si de les formacions hidrogeològiques, en aquest cas els aqüífers. Per tant, donat el considerable grau d'explotació

que pateixen els aqüífers catalans, així com moltes altres zones arreu del món, les alteracions estacionals del nivell hidràulic i de la temperatura de l'aigua es veuen magnificades per les activitats antròpiques.

La calor emmagatzemada en el subsòl flueix a través de dos fenòmens físics. El primer d'ells és la conducció. Aquest, és un tipus de transport que es dona per contacte intermolecular directe, seguint un gradient tèrmic decreixent. D'aquí deriva directament la Llei de Fourier, que avalua el flux de calor que passa a través d'un cos amb una conductivitat tèrmica determinada (λ), per una secció de pas (A) i seguint un gradient tèrmic decreixent ($\Delta T/\Delta x$) [5].

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (\text{expressió 3})$$

Si bé la conducció domina en les situacions d'absència d'un fluid en moviment, l'advecció pren protagonisme quan existeix tal flux, en aquest cas d'aigua subterrània. En aquest sentit, de la llei de refredament de Newton deriva l'expressió que permet avaluar l'energia calorífica transportada pel flux subterrani d'aigua. Així, es descriu l'energia calorífica (Q) del flux subterrani com el producte de la capacitat calorífica de l'aigua (Sc_{fluid}), la diferència de temperatures entre l'entorn i el fluid transportador (ΔT) i el flux subterrani d'aigua (Z)

$$Q = Sc_{fluid} \cdot \Delta T \cdot Z \quad (\text{expressió 4})$$

Per quantificar el flux subterrani d'aigua (Z) que travessa un material en concret, cal emprar la Llei de Darcy [8], que considera el producte de la permeabilitat (K) del material en qüestió, la secció de pas (A) per on passa l'aigua i el gradient hidràulic entre dos punts ($\Delta h/\Delta x$).

$$Z = K \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta h}{\Delta x} \right)$$

(expressió 5)

Així doncs, L'objectiu principal del treball és avaluar, quantitativament, l'efecte del context geològic i hidrogeològic en l'eficiència energètica dels sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia. Més concretament, s'analitza l'efecte de les variacions del nivell hidràulic i de la temperatura de l'aigua subterrània en l'eficiència de l'intercanvi calorífic entre el medi i el col·lector de calor del complex geotèrmic. Alhora, les alteracions en les variables d'estudi es relacionen amb les característiques geològiques i hidrogeològiques i amb les precipitacions del mateix període.

Metodologia

Després de la recerca bibliogràfica pertinent, el desenvolupament del treball s'ha basat en l'estudi de les variacions del nivell hidràulic i de la temperatura de l'aigua en diferents aquífers, tots ells, situats a les comarques gironines de La Selva, tret de l'últim cas que es troba a La Garrotxa. A més, tots compten amb característiques geològiques i hidrogeològiques diferents (Taula 1).

Material geològic	Permeabilitat (m·dia ⁻¹)	Porositat (%)	Potència dels materials (m)
Al·luvial d'origen granític	2,6	20	7
Sauló	1,8	15	10
Arcoses	6,9	3	30
Basalts fracturats	100	27,5	11

Taula 1: Característiques geològiques i hidrogeològiques de les unitats d'estudi.
Adaptat d'ACA 2004.

El primer pas ha estat quantificar una demanda tèrmica per calefacció i una altra per refrigeració comunes per tots els casos d'estudi, a partir de les temperatures diàries de l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar (La Selva) i dels paràmetres tèrmics mínims exigits pel "Código Técnico de la Edificación" [6 i 7]. S'ha considerat que

aquestes dades són representatives del clima mediterrani.

Donat que els sistemes de GSHP s'acostumen a dissenyar per cobrir un determinat percentatge de la demanda tèrmica màxima, al llarg dels casos d'estudi es treballa amb la demanda tèrmica mitjana màxima mensual.

Acte seguit, tenint en compte que s'ha utilitzat un valor de COP per a cada tipus de col·lector (obert i tancat) es calcula la potència requerida del subsòl a partir de les expressions 1 i 2.

Finalment s'avaluen els canvis en l'eficiència de l'intercanvi calorífic medi – col·lector enfront de les variacions del nivell hidràulic i de la temperatura de l'aigua. Aquí el procés difereix segons la configuració considerada. Així doncs, l'efecte de la temperatura s'avalua amb el procediment següent (Figura 1).

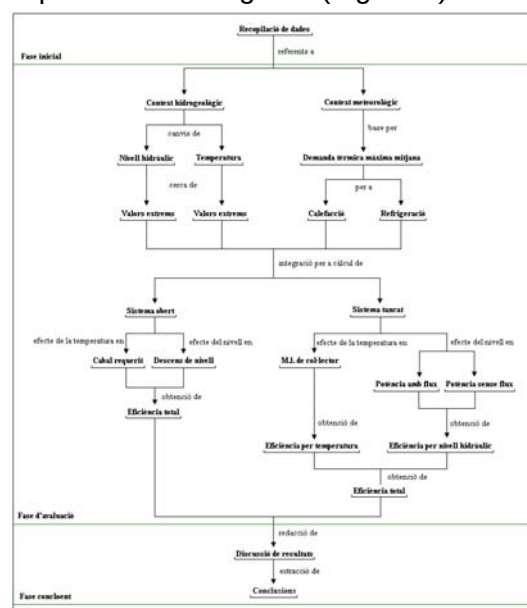


Figura 1: Diagrama de flux del desenvolupament dels casos d'estudi.
Elaboració pròpia.

Pel que fa als sistemes oberts, l'eficiència s'avalua en funció del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica calculada. Per tant, cal considerar la temperatura de l'aigua extreta i aplicar l'expressió 4.

D'altra banda pels sistemes tancats l'eficiència s'expressa en termes dels metres lineals de col·lector necessaris mitjançant la Llei de Fourier (expressió 3). Per contra, en els sistemes oberts es pren com a referència el cabal d'aigua requerit.

Quant a l'efecte del nivell hidràulic, en els sistemes tancats es calcula, la variació de la conductivitat tèrmica del medi geològic, davant d'una disminució del gruix saturat. D'aquesta manera s'obté la variació del flux de calor per conducció.

Pel que fa a l'advecció, s'avalua, a través de la piezometria regional i de les variacions de nivell hidràulic, el flux subterrani en un moment donat (expressió 5). A continuació s'obté el flux de calor que transporta l'aigua mitjançant l'expressió 4.

Per facilitar la interpretació dels casos d'estudi, tots els resultats s'expressen en termes relatius.

Resultats i discussió

Donat que en tots els casos es corrobora la mateixa relació entre les variacions de l'eficiència i els canvis de nivell i de temperatura de l'aigua, tot seguit es discuteixen els resultats del cas d'estudi que presenta els valors més extrems (aquífer al·luvial lliure d'origen granític).

El DIVER instal·lat des del 30 de gener del 2009 fins al 22 de maig del mateix any mostra alteracions importants tant en la temperatura, com en el nivell hidràulic de l'aquífer (Figura 2). En la seva justificació cal establir una certa relació amb els episodis de precipitació referits en aquest mateix període (Figura 3).

Si bé durant els mesos de març – maig es dona, tot i que amb un cert retràs una

relació coherent pel que fa a la temperatura de l'aigua i les precipitacions, al principi del període de mostreig s'aprecia una relació inversa.

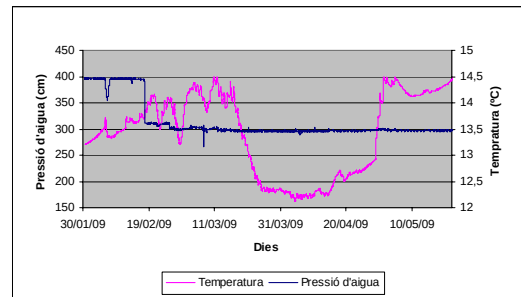


Figura 2: Evolució del nivell hidràulic i de la temperatura de l'aigua durant els mesos de gener - maig a l'aquífer al·luvial d'origen granític. Adaptat de ACA, 2009

En general, després d'un episodi plujós apareix un augment del nivell hidràulic i una disminució de la temperatura. El lapse temporal entre la causa (precipitació) i l'efecte (alteració de les variables) és funció dels paràmetres geològics i hidrogeològics de l'aquífer.

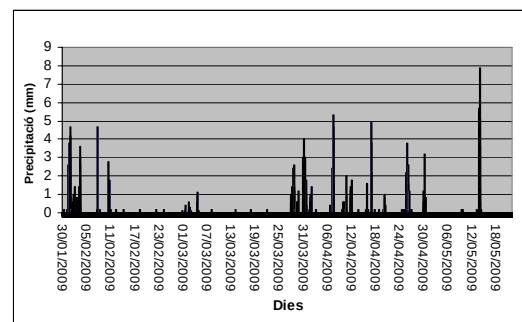


Figura 3: Evolució de les precipitacions durant el període de mostreig a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar. Adaptat del Servei Meteorològic de Catalunya.

Cal tenir en compte que els resultats que es presenten a continuació fan referència a un sistema de GSHP que treballa en mode calefactor. Això es deu al fet que el període de mostreig engloba bona part de l'hivern i els inicis de la primavera. Durant aquest temps la demanda tèrmica per refrigeració és insignificant.

La figura 4 mostra com un increment de

la temperatura implica una millora de l'eficiència en l'intercanvi calorífic medi – col·lector en mode calefactor. En aquest sentit seguint la segona llei de la termodinàmica i tenint en compte que l'aqüífer ($T \approx 14^{\circ}\text{C}$) es troba a una temperatura menor que l'habitatge ($T = 20^{\circ}\text{C}$), com més petit sigui el gradient tèrmic entre l'aigua i el punt a climatitzar, més fàcil resulta extreure l'energia de l'aigua.

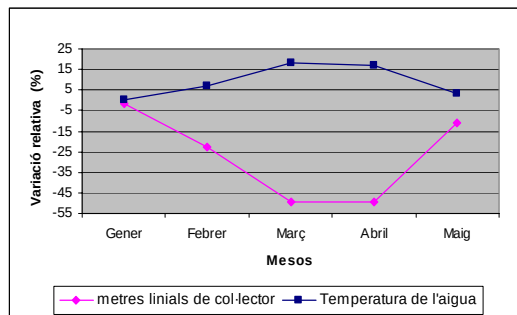


Figura 4: Evolució dels metres lineals de col·lector necessaris durant els mesos de gener – maig. Elaboració pròpia.

Així doncs es pot observar com un increment del 16% en la temperatura de l'aigua comporta una disminució de vora el 50% en els metres lineals de col·lector. Això en termes d'eficiència representa una millora del 50% en l'intercanvi calorífic.

Val a dir que els resultats en un sistema obert es manifesten de la mateixa manera. Donat que a les expressions 4 i 5 l'única variable que varia és la temperatura, així, una alteració d'aquest paràmetre representa, en termes relatius, el mateix efecte, tant en els sistemes oberts com en els tancats.

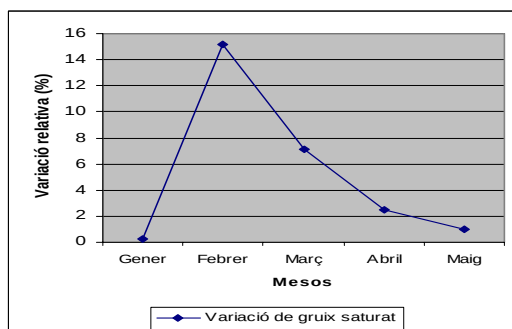


Figura 5: Evolució de les variacions màximes de nivell hidràulic durant el període de mostreig. Elaboració pròpia.

Les figures 5 i 6 expressen, respectivament, la variació del nivell hidràulic i l'evolució de l'eficiència del col·lector enfront alteracions màximes mensuals del gruix saturat. S'observen grans diferències en funció de si es considera o no el flux subterrani.

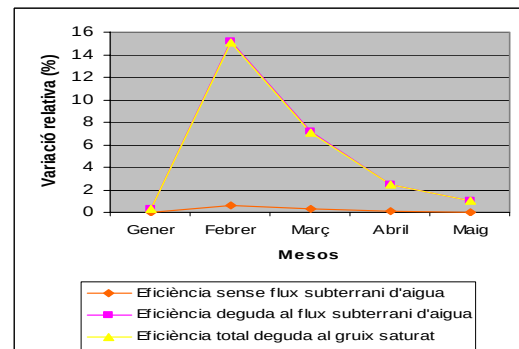


Figura 6: Evolució de les variacions de l'eficiència amb i sense flux, i de l'eficiència total del col·lector, com a conseqüència de les alteracions en el nivell hidràulic. Elaboració pròpia.

A la figura 6 es constata el fet que, en presència de flux d'aigua subterrània, el transport de calor per advecció pren tot el protagonisme en detriment del transport per conducció. Es pot apreciar que increments del 15% en el nivell hidràulic comporten augments del 15% de l'eficiència deguda al flux (línia porpra de la figura 6). Per contra, el mateix augment del nivell hidràulic indueixen millores del 1% en l'eficiència al transport per conducció (línia taronja de la figura 6). Aquesta diferència entre ambdós fenòmens s'explica a través de l'efecte de l'augment del nivell hidràulic que pateix cadascun.

Per a una situació sense flux subterrani d'aigua, és a dir, només considerant l'estat de saturació, la quantitat d'aigua afecta a la conductivitat tèrmica del medi, i per tant influeix en la seva capacitat de transmetre la calor. Ara bé, cal tenir en compte que l'aigua només ocupa, en aquest cas, el 20% del volum de la formació geològica. A banda d'això, en general, la conductivitat tèrmica dels materials que formen la matriu de l'aqüífer sol ser de l'ordre de 4

a 6 vegades superior a la referent a l'aigua. Aquí, donat que es treballa amb materials d'origen granítics, la conductivitat tèrmica dels materials de la formació hidrogeològica és 5,5 vegades superior a la de l'aigua. Tot plegat implica que, davant d'una disminució del nivell hidràulic, la conseqüent substitució en els porus de l'aigua per aire, comporta una variació molt poc sensible de la conductivitat tèrmica equivalent de l'aqüífer.

D'altra banda, en una situació de flux subterrani significatiu, la Llei de Darcy expressa que una davallada d'una unitat en el gruix saturat indueix una disminució del mateix valor en el cabal que transcorre a través de l'aqüífer. Així doncs si el flux d'aigua subterrània disminueix, el transport de calor per advecció també experimenta un decreixement de la mateixa proporció.

Donat que en un aqüífer l'aigua es troba en moviment, a fi de considerar l'efecte global de les variacions de nivell hidràulic, és necessari, tal i com es mostra la figura 6, comptabilitzar conjuntament el transport de calor per conducció i per advecció.

Finalment, pel que fa a l'efecte conjunt de les variacions del nivell hidràulic i de la temperatura, s'observa com l'increment total de l'eficiència és la suma de la influència de les dues variables d'estudi.

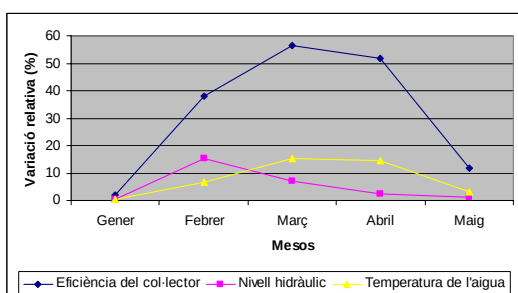


Figura 7: Evolució de la variació de l'eficiència com a conseqüència dels canvis de nivell hidràulic i de temperatura entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a Cultius Myrtus superficial. Elaboració pròpia.

La figura 7 mostra com un increment combinat del 15% en la temperatura i del 7% en el nivell hidràulic implica una millora del 56% en l'eficiència dels col·lectors subterranis tancats. Observant aquests resultats, cal remarcar que la participació de cada paràmetre en aquesta millora de l'intercanvi calorífic no és equitativa. Així, en aquest cas, l'efecte de la temperatura es comptabilitza en un 60-90% de la variació d'eficiència total. Aquest fenomen és degut a la diferència que existeix entre la variació de l'eficiència i l'evolució de cada paràmetre. Això es pot observar amb més claredat a les figures 8 i 9, les quals són el resultat d'un exercici paral·lel, que és realitza per obtenir els patrons de comportament de l'eficiència en mode calefactor enfront a disminucions successives de les dues variables d'estudi.

La figura 8 expressa una relació exponencial entre les disminucions de temperatura de l'aigua i l'augment del cabal requerit per a subministrar la determinada demanda tèrmica per calefacció. Així doncs, en referència a la temperatura, una disminució de poc menys del 25% comporta duplicar el cabal extret per mantenir la mateixa demanda tèrmica. Tanmateix, el cabal es torna a duplicar si la disminució de la temperatura és del 31%.

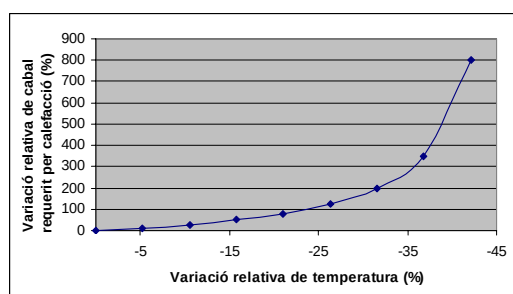


Figura 8: Variació relativa del cabal requerit en mode calefactor en funció de successives disminucions de la temperatura de l'aigua. Elaboració pròpia.

Quant a l'efecte del context geològic en la temperatura de treball, aquest es

limita a que els materials permetin una infiltració més o menys ràpida de l'aigua a través del subsòl. Com més important sigui la permeabilitat, menys temps tardarà l'aigua a arribar a l'aquífer. Per tant, quan l'aigua arribi a l'aquífer, no haurà tingut temps a assolir la temperatura de la formació hidrogeològica i en conseqüència més grans seran les variacions de la temperatura de l'aigua degudes a les precipitacions.

La figura 9 expressa la relació que existeix entre la disminució del gruix saturat i la davallada de l'eficiència dels col·lectors de calor. En aquest sentit, es corroboren les grans diferències que apareixen en presència o absència de flux subterrani (Figura 6). Val a dir que aquí l'eficiència considerant, únicament, la situació de saturació no és zero sinó que, en relació a l'eficiència que proporciona un context amb flux subterrani, aquesta és gairebé insignificant.

Tot i que en presència de flux subterrani d'aigua, l'advecció sempre pren protagonisme, en detriment de la conducció, s'observa que com més modest és el nivell hidràulic, menor és la és la importància relativa entre ambdós tipus de transport d'energia.

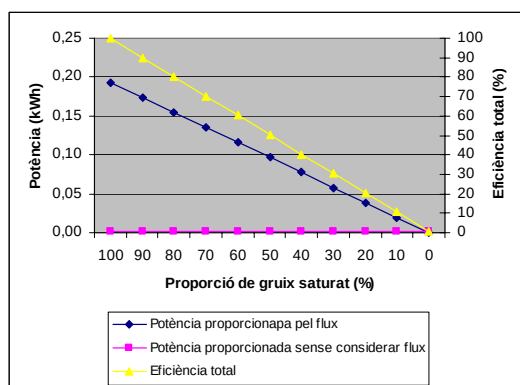


Figura 9: Evolució de l'eficiència i potència proporcionada en relació a successives disminucions del nivell freàtic en l'aquífer al·luvial granític. Elaboració pròpia.

En comparació amb la figura 8, aquí s'observa una relació lineal, i

pràcticament 1 a 1, entre la davallada del nivell hidràulic i la disminució de l'eficiència dels col·lectors de calor subterranis.

Aquesta diferència en l'efecte del nivell hidràulic i de la temperatura comporta que en determinades situacions prengui més importància la variabilitat del nivell hidràulic, mentre que en altres contextos, apareix una importància major de la temperatura. D'aquesta manera, el punt on la influència de la temperatura esdevé superior a la referent al nivell hidràulic, és aquell on el creixement exponencial de la temperatura supera el creixement lineal del nivell hidràulic.

En darrer lloc, es presenten els resultats del cas d'estudi emmarcat en basalts fracturats. Són dos els punts que el diferencien de la situació anterior (aquífer al·luvial d'origen granític). D'una banda, que els següents resultats es refereixen a un aquífer confinat, i de l'altra, aquí es disposa de dades de tot l'any 2008, fet que permet avaluar el funcionament del mode refrigerador durant els mesos d'estiu (juny, juliol i agost).

La figura 10 expressa les variacions de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrades pel sensor. Si bé les variacions de nivell són importants (4 m), les alteracions de la temperatura de l'aigua assoleixen valors de 0,6°C en el global de l'any.

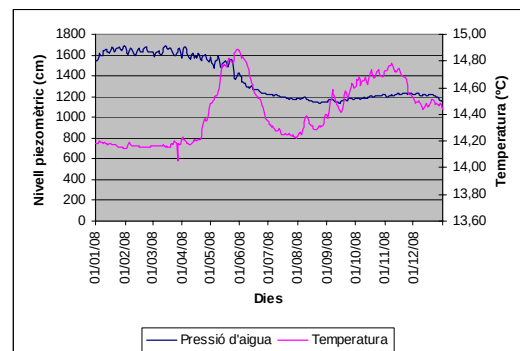


Figura 10: Evolució de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrat pel DIVER durant l'any 2008 a l'aquífer al·luvial volcànic. Adaptat de ACA, 2009.

Si aquests resultats es comparen amb els que apareixen la figura 11, s'aprecia com és difícil establir una relació clara entre els episodis de pluja i les alteracions en la temperatura de l'aigua. El fet de tractar-se d'un aqüífer confinat implica que la recàrrega no és dona a la zona on afloren els materials volcànics sinó que aquesta més aviat prové dels punts on afloren els materials al·luvials.

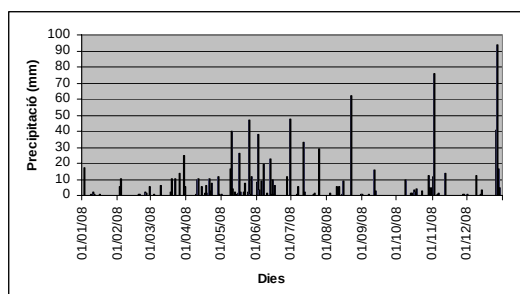


Figura 11: Evolució de la precipitació a l'estació meteorològica d'Olot durant l'any 2008. Elaboració pròpia.

Aquest fet comporta un temps de trànsit més llarg abans que l'aigua arribi al punt de mostreig. Així, l'aigua té més temps per assolir la temperatura de l'aqüífer i conseqüentment, les alteracions de la temperatura de la formació, a causa de les precipitacions, no són tant importants [10].

Finalment, la figura 12 mostra l'evolució de les variacions de cabal requerit per calefacció i per refrigeració en un

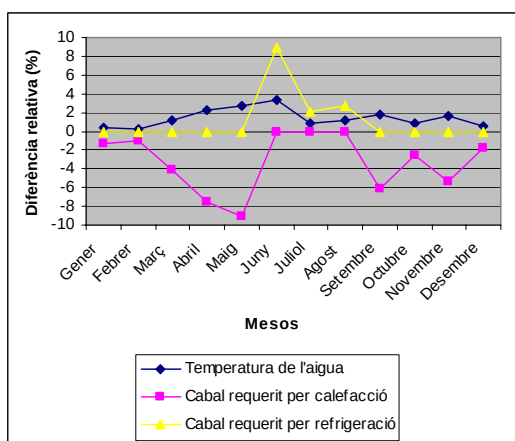


Figura 12: Evolució de la temperatura de l'aigua i del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica de calefacció i de refrigeració de l'any 2008 a l'aqüífer al·luvial volcànic. Elaboració pròpia.

sistema obert. Els resultats referents al mode calefacció corroboren els de la figura 4, és a dir, un augment de la temperatura de l'aigua comporta una disminució del cabal requerit i per tant, un increment de l'eficiència energètica. En canvi pel que fa al mode refrigerador (mesos de juny, juliol i agost) s'observa com un increment de la temperatura de l'aqüífer implica un augment del cabal extret. Això es deu a que en el mode refrigerador, es millora el rendiment del col·lector quan es treballa amb salts tèrmics grans. El fet de percebre un increment de la temperatura de l'aigua implica, respecte de la temperatura del punt a climatitzar (habitatge) una disminució del gradient tèrmic de treball. Donat que la temperatura de la formació hidrogeològica ($T \approx 14^{\circ}\text{C}$) és més baixa que la que es vol mantenir a l'edifici ($T=20$), en el mode refrigerador l'energia flueix de forma espontània des d'un punt "calent" (habitatge) a un altre de més fred (aqüífer). Així doncs, en compliment de la segona llei de la termodinàmica, com més gran sigui la diferència tèrmica entre ambdós punts, més important i serà el flux d'energia.

De forma anàloga al cas anterior (aqüífer al·luvial d'origen granític) els resultats de l'efecte de la temperatura en l'eficiència del sistema, es poden transportar al sistema tancat.

Aquí no ha estat possible avaluar l'efecte del nivell piezomètric en sistema tancat a causa de l'absència de la piezometria regional. Tot i així, es pot fer una aproximació qualitativa d'aquesta influència. En aquest sentit, en l'efecte del nivell piezomètric existeix una gran diferència en funció del tipus de formació hidrogeològica considerada. En un aqüífer confinat l'efecte de les alteracions d'aquest paràmetre és mínim sempre i quan es mantingui la situació de confinament. El fet de tenir sempre el mateix gruix saturat comporta un valor constant de la conductivitat tèrmica equivalent. Així doncs en presència d'un gradient tèrmic invariant el transport de calor per conducció es

manté inalterable amb el temps. Tot i així, potencials diferències en el nivell hidràulic poden, també en aquest tipus d'aqüífer, donar lloc a canvis importants degut al transport de calor per advecció. Per al present cas d'estudi, aquests canvis potencials no han estat considerats degut a la manca de dades.

Ara bé en el moment que s'elimina l'excés de pressió, és a dir, es passa a una situació d'aqüífer lliure, les variacions de nivell hidràulic afecten, tal i com han mostrat els casos precedents, de manera considerable a l'intercanvi calorífic medi – col·lector.

Conclusions

Gràcies a la bomba de calor geotèrmica, els sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia són energèticament molt eficients, tot i que alhora es veuen altament condicionats pel context geològic i hidrogeològic del seu emplaçament.

En aquest sentit, la quantitat i qualitat de la informació geològica i hidrogeològica es manifesta com un punt crític. A més d'això, és important tenir un bon grau de coneixença de les activitats antròpiques, ja que aquestes acostumen a magnificar les alteracions estacionals de les dues variables d'estudi.

D'aquesta manera, increments combinats i relativament petits de la temperatura i del nivell hidràulic s'associen a variacions molt notables de l'intercanvi geotèrmic. Pel que fa, únicament, al nivell hidràulic es constaten grans diferències en funció de si es considera o no el flux subterrani d'aigua. En el cas de negligir el moviment de l'aigua en el si de l'aqüífer el transport de calor per conducció resulta ser el més important. Tanmateix la millora de la conductivitat tèrmica equivalent, derivada d'un increment del nivell hidràulic, sempre afavoreix als

entorns geològics que compten amb uns valors de conductivitat tèrmica i de porositat més alts i més baixos respectivament.

Ara bé, en presència de flux subterrani el transport per advecció pren tot el protagonisme en detriment de la conducció. Els sistemes de GSHP instal·lats als aquífers que tenen valors permeabilitats i gradients hidràulics elevats, són els que perceben una millora més notable de l'eficiència energètica enfront d'un increment del nivell hidràulic.

Donat que es considera que el compartiment geològic subministra tota la potència requerida, l'efecte del nivell en els sistemes de GSHP oberts es limita, a causa del descens del gruix induït per la captació, a determinar el nombre de pous que cal implementar.

Pel que fa a l'efecte de la temperatura en els dos tipus de funcionament (calefacció i refrigeració), si bé en mode calefactor una davallada de la temperatura de l'aqüífer es manifesta com una disminució de l'eficiència, la mateixa alteració en mode refrigerador és tradueix en un increment de l'eficiència.

En relació a les variacions de nivell hidràulic i de temperatura de l'aigua subterrània, s'observa, en aquífers lliures, una certa relació amb el règim de precipitacions de la zona d'estudi. Per contra, en aquífers confinats, degut al seu aïllament del compartiment atmosfèric, aquesta relació es veu més difosa. En aquest sentit l'amplitud de les variacions dels paràmetres d'estudi depèn de la intensitat i la durada de la precipitació, així com de les característiques geològiques i hidrogeològiques del subsòl. En aquest sentit, valors alts de permeabilitat afavoreixen una ràpida infiltració de l'aigua i conseqüentment una alteració "ràpida" i important de la temperatura de l'aigua.

Tant els col·lectors oberts com els tancats, es dissenyen en general per ser implementats, en cada cas, en unes context geològic i hidrogeològic determinades i “constants”. Com s’ha pogut veure en els diferents casos d’estudi, aquest context no és invariable podent afectar de forma significativa a l’eficiència de les GSHP. Per tant, a l’hora d’implementar aquest tipus de sistemes amb màxim rendiment i amb mínim cost econòmic, és necessari conèixer i considerar les variacions que es produeixen en el medi geològic al llarg de les diferents estacions.

Básico HE, Código Técnico de la Edificación.

[8] MARTÍNEZ, P.E., et al, (2005). *Fundamentos de hidrogeología*. Madrid. Ed. Mundi-Prensa.

[9] SÁNCHEZ, F.J. (2004). “Medidas puntuales de permeabilidad”, Universidad de Salamanca, (Disponible a <http://web.usal.es/~javisan/hidro/>).

[10] WINTER, T.C. et al., (1998). *Ground Water and Surface Water: A Single Resource*. Colorado, USA. U.S. Geological Survey. ISBN 0-607-89339-7.

Bibliografia

[1] Agència Catalana de l'Aigua, (2004). “Informe dels Treballs de Base per desenvolupar el programa de Gestió de l'aquífer de la riera de Santa Coloma”.

[2] BANKS, D., (2008). *An Introduction to Thermogeology Ground Source Heating and Cooling*, Oxford. Ed. Blackwell.

[3] ENGINY Biorem, (2009). *Recopilació de dades i treballs de camp per definir el model conceptual dels aquífer principals del sector Nord-Est del Subsistema Tordera. Informe Final*. Agència Catalana de l'Aigua.

[4] ^a CANADA. Natural Resources Canada, (2002). *Commercial Earth Energy Systems: A buyer's Guide*. Office of Energy Efficiency. ISBN 0-662-32808-6. (disponible a <http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/M92-251-2002E.pdf>).

[5] CLAUSER, C, (2006). *Geothermal Energy*, In: K. Heinloth (Ed), *Landolt-Börnstein – Numerical Data and Functional Relationships, New Series, Energy Technologies*. Vol 8. Subvolume 3: *Renewable Energies*, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin.

[6] ^a ESPAÑA, Ministerio de Fomento, (2009). *Salubridad, Documento Básico HS, Código Técnico de la Edificación*.

[7] ^b ESPAÑA, Ministerio de Fomento, (2009). *Ahorro de energía, Documento*