

Resum

El projecte tracta del disseny i la construcció d'un aqüífer a escala pilot sobre el que es plasmarà l'activitat d'un sistema de refrigeració geotèrmic per realitzar estudis de viabilitat.

Un cop construït l'aqüífer es vol analitzar l'impacte en la variació de temperatura del subsòl quan hi ha instal·lat un sistema geotèrmic. D'aquesta manera es poden determinar les característiques que ha de tenir la instal·lació i les condicions de treball per què l'impacte no sobrepassi els límits que, segons estudis tècnics, podrien suposar un perill pel medi ambient. A més, es vol saber sota quins paràmetres és viable la construcció d'un sistema geotèrmic de tipus obert situat en sòls catalans i, d'aquesta manera, determinar quines són les dificultats que es plantegen a l'hora d'aplicar-lo. Tot això es duu a terme utilitzant un aqüífer construït a escala pilot capaç de reproduir un sistema de refrigeració geotèrmic real. La realització de proves a petita escala facilita la feina en termes econòmics, de temps i d'espai.

L'aqüífer treballarà en condicions de puresa (en quant a sòl, aigua i ambient extern) per poder extrapolar els resultats dels estudis amb facilitat per l'aplicació en sistemes a escala real. L'aqüífer està compost per tres dipòsits: un central que està ple de sorra saturada d'aigua i emula el subsòl i dos laterals plens d'aigua destil·lada encarregats de que existeixi un transport del líquid des d'un extrem de l'aqüífer fins l'altre per representar el pas de fluid que hi ha a la realitat a través del terreny. A l'aqüífer s'extreu aigua verticalment des d'un punt de la sorra i s'escalfa, simulant el pas per un radiador en un edifici; un cop escalfada (i havent refrigerat l'edifici imaginari) és retornada a un altre punt de l'aqüífer. L'extracció i l'abocament d'aigua es fa mitjançant uns pous. El pou d'extracció estarà situat pròxim a un dels dipòsits laterals, que anomenarem dipòsit d'entrada i l'altre pou a prop de l'altre dipòsit (de sortida). Des del dipòsit de sortida es recircula l'aigua cap el d'entrada passant abans per un refrigerador per adequar el sistema a la temperatura real i evitar, així, que l'aqüífer s'escalfi descontroladament.

S'han realitzat quatre proves que pretenen donar unes dades representatives sobre l'efecte del sistema de refrigeració treballant en condicions crítiques. S'han fet mesures de temperatura en dos dimensions sobre el pla horitzontal que coincideix amb la base dels pous. En la primera de les proves es fa una aportació de calor molt elevada a l'aigua extreta per un dels pous per observar com respon el sistema i en les altres tres l'aportació de calor és també elevada però simula amb més encert el que succeiria en un sistema real. Les tres últimes proves es diferencien entre sí pels punts en els que s'ha mesurat la temperatura.



Els resultats per la primera prova mostren un augment de la temperatura de fins a 4,2 °C en el punt més crític (just on s'aboca l'aigua calenta) respecte de l'ambiental. L'augment de temperatura es fa seguint una distribució circular i la transferència de calor no arriba fins el pou d'extracció. Es produeix un efecte paret en els límits de l'aqüífer més propers a l'abocament d'aigua calenta.

En les altres tres proves es demostra que, arribat l'estat estacionari, la distribució de temperatures es fa de manera circular però lleugerament allargada en la direcció i el sentit del flux d'aigua intern a l'aqüífer. A més, si dividim l'aqüífer en dos hemisferis (quedant en el centre el pla que uniria els dos pous), la calor tendeix a desplaçar-se cap a una d'aquestes dos meitats. Les temperatures màximes trobades a l'aqüífer per aquestes proves no supera els límits que les convertarien en perilloses pel medi ambient.



Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. PREFACI	5
1.1. Motivació de l'estudi	5
1.2. Origen de les investigacions	5
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1.1. Estudis de viabilitat:	11
2.1.2. Estudis d'impacte:	13
2.2. Objectius del projecte	14
2.2.1. Necessitat inicial:	14
2.2.2. Objectius	14
2.3. Abast del projecte	15
3. TIPUS DE REFRIGERACIÓ: FUNCIONAMENT PER COMPRESSIÓ, ABSORCIÓ I EFECTE PELTIER	16
3.1. Refrigeració per compressió	16
3.2. Refrigeració per absorció	20
3.3. Efecte Peltier	21
4. SISTEMES GEOTÈRMICS	24
5. SIMULACIÓ D'UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓ GEOTÈRMIC	30
6. LIMITACIONS EN L'APLICACIÓ	34
7. VIABILITAT DEL PROJECTE	39
7.1. Costos	39
7.2. Impacte ambiental	41
8. DISSENY I CONSTRUCCIÓ	43
8.1. Mecanisme de treball	44
8.2. Flux	45
8.2.1. Sòls parcialment saturats	50
8.2.2. Densitat i porositat de la sorra	55
8.3. Disseny i dimensionat de la unitat	59
8.4. Obtenció de dades	75



9. PROVES I RESULTATS	77
9.1. Primera prova	77
9.2. Segona prova	83
9.3. Tercera prova.....	87
9.4. Quarta prova	92
CONCLUSIONS	96
AGRAÏMENTS	97
BIBLIOGRAFIA	98
Referències bibliogràfiques	98
Bibliografia complementària	98



1. Prefaci

El consum d'energia degut a l'ús d'aparells que la necessiten pel seu funcionament ha augmentat de manera vertiginosa en els últims 50 anys. Aquest increment ha provocat també un empitjorament del medi ambient com a conseqüència de l'emissió de contaminants resultants. Un contaminant és aquella substància que es troba en una quantitat més elevada de la que li pertoca de manera natural per a una zona determinada. D'aquesta manera, s'entén que l'abús de producció de contaminants és un fet real.

1.1. Motivació de l'estudi

Les elevades emissions de contaminants y el desgast de la Terra com a resultat del de l'esgotament de recursos que s'està efectuant són una causa de preocupació per a governs i, a la llarga, per l'empresa privada. Actualment, i cada vegada més, s'investiga sobre mecanismes que tinguin un consum energètic menor que els que tenim avui dia. D'aquesta manera no només s'intenta reduir la pol·lució global, sinó que també es busca un consum més baix dels recursos.

Aquesta via que s'obre per investigar l'augment del rendiment de l'energia a més de començar a ser una obligatorietat per a molts països, també pot comportar, si es fa un bon plantejament, una millora econòmica substancial.

1.2. Origen de les investigacions

L'onze de desembre de 1997, la majoria dels països industrialitzats es van comprometre, a la ciutat de Kyoto, a posar en marxa una sèrie de mesures per reduir els gasos d'efecte hivernacle. Els governs que hi participaren van pactar una reducció d'un 5% de mitja en les emissions d'una sèrie de gasos contaminants entre els anys 2008 i 2012, respecte l'any 1990 [1]. El 16 de febrer de 2005 va entrar en vigor aquest acord.

En la última dècada s'ha parlat d'un fenomen que està succeint: és l'anomenat canvi climàtic. La Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic defineix aquest fenomen com un canvi en el clima atribuït directa o indirectament a l'activitat humana que altera la composició de l'atmosfera mundial i que es suma a la variabilitat natural del clima observada durant períodes de temps comparables.

D'aquesta manera, l'objectiu plantejat al protocol de Kyoto va ser el de reduir la concentració de gasos d'efecte hivernacle. Aquestes substàncies són diòxid de carboni



(CO₂), gas metà (CH₄) i òxid nitrós (N₂O), a més de tres gasos industrials fluorats: hidrofluorcarbonis (HFC), perfluorcarbonis (PFC) i hexafluorur de sofre (SF₆). Els gasos comentats són la causa d'un augment de temperatura a la Terra.

Segons les xifres de la ONU, es preveu una pujada global de la temperatura mitja de la superfície del planeta d'entre 1,4 i 5,8 °C des d'ara fins el 2100 (tercer informe d'avaluació del Panell Intergovernamental sobre el Canvi Climàtic- TAR del IPCC). Això es coneix com escalfament global. La Comissió Europea a Kyoto va assegurar que "aquests canvis repercutiran greument a l'ecosistema i a les economies dels països europeus".

Així doncs, a més de l'acord al que van arribar els països que hi participaren en quant a l'emissió de gasos d'efecte hivernacle, es va promoure també la generació d'un desenvolupament sostenible per disminuir l'escalfament global. La Unió Europea va ser un agent especialment actiu en la concreció del Protocol, de manera que es va comprometre a reduir les seves emissions totals mitjanes durant el període 2008-2012 en un 8%, un 3% més del que exigia el Protocol de Kyoto. Tot i així, a cada país se li va donar un marge diferent en funció de diferents variables econòmiques i de medi ambient. L'Estat espanyol va poder gaudir del privilegi de poder augmentar les seves emissions fins a un 15%. Malgrat això, la situació és complicada per Espanya ja que l'evolució que ha seguit en els últims anys ha sigut la d'augmentar de manera radical les seves emissions: 1996: +7%; 1997: +15%; 1998: +18%; 1999: +28%; 2000: +33%; 2001: +33%; 2002: +39%; 2003: +41%; 2004: +47%; 2005: +52%; 2006: +52%; 2007: +48%. Per tal de reduir aquesta pol·lució s'estudia, com a principal solució, la disminució del consum energètic del país. Pel moment, Espanya és el cinquè estat membre que més energia consumeix (dada provinent del mateix Protocol de Kyoto del Conveni Marc sobre Canvi Climàtic de la ONU; UNFCCC). A més, Espanya té una dependència energètica del 75% (IWD, Institut de l'Economia Alemanya de Colonia).

Les emissions espanyoles de gasos d'efecte hivernacle en 2001, segons l'Oficina Espanyola de Canvi Climàtic, van superar els 383 milions de tones, el que suposa 93 milions de tones més (un increment d'un 32%) que en 1990.

L'any 2005 es va realitzar la primera revisió del document inicial del Protocol de Kyoto, a tenor del que dicta l'article 9, per tal d'observar la situació més recent dels països en referència a les limitacions que estableix el protocol i per actualitzar aquestes en funció de l'evolució del canvi climàtic. Aquesta revisió, realitzada a Nairobi, ratificà la vigència dels preceptes del tractat com una manra adequada d'enfrontar el canvi climàtic.

L'article 9 del que s'ha parlat declara que "la Conferència de les Parts en qualitat de reunió de les Parts i en el present protocol examinarà periòdicament el present protocol a la llum de les informacions i estudis més exactes de que es disposi sobre el canvi climàtic i les



seves repercussions i de la informació tècnica, social i econòmica pertinent”.

També es va establir una data **[2]** per fer una segona revisió del protocol, de manera que serà aquest mateix any 2008 quan es durà a terme. A més, es reconeix que l'acord de Kyoto també impulsa la cooperació entre nacions en vies de desenvolupament i les industrialitzades, gràcies a una iniciativa portada a terme per part d'aquests i que s'anomena Mecanisme de Desenvolupament Net. En aquesta revisió s'ha fet més restrictiva la limitació imposada a les nacions signants ja que s'obliga a reduir un 5,2% les emissions de gasos culpables de l'efecte hivernacle entre 2008 i 2012, al compararles amb les existents al 1990 (a la primera versió del protocol s'obligava a reduir-les un 5%).

El novembre 2007 es va publicar el quart informe (“Informe de Síntesi”) del Panell Intergovernamental de Canvi Climàtic (IPCC) que, entre altres motius, es va celebrar per donar recolzament a la informació científica tractada a la primera revisió del protocol i per donar fonament tècnic per la realització de la segona revisió del tractat **[3]**. L'IPCC es una comissió formada per més de 450 especialistes que es reuneix periòdicament i que té com a objectiu exposar dades científiques relacionades amb l'evolució del canvi climàtic, per tal de tenir-les en compte a l'hora de realitzar les revisions pertinents sobre el Protocol de Kyoto. En l'evaluació realitzada en la darrera reunió sobre l'estat actual s'ha demostrat una tendència creixent en els events naturals extrems observats en els últims 50 anys i es creu provable que les elevades temperatures, onades de calor i fortes precipitacions creixeran en freqüència en el futur. Així doncs, els científics de l'IPCC afirmaren que els fenòmens climàtic extrems estan, actualment, darrera del 90% de les catàstrofes naturals.

Continuant amb la mateixa línia, el secretari general de l'Organització Mundial de Meteorologia, Yang Hong, va assegurar que la pau mundial es veu també afectada per l'escalfament global, ja que els seus efectes limitaran els recursos de menjar, aigua i energia. L'Acadèmia de Noruega ha corroborat aquesta teoria amb la concessió del premi Nobel al ex vicepresident dels Estats Units, Al Gore (gràcies a un documental que reflexa les possibles conseqüències del canvi climàtic) i al propi IPCC. L'actual president de l'IPCC, Rajendra Pachauri, aboga pel treball en comú entre científics i polítics per tal de donar contundència a les conclusions extretes en les reunions del mateix IPCC.

El mateix any 2007 ja s'havien publicat tres informes més. El primer, anomenat “La base científica física”, publicat el mes de febrer a París assegurava que l'escalfament és irreversible degut a les emissions d'efecte hivernacle durant l'era industrial i que la pujada se situarà entre 1,8 i 4 graus, tot i que podria arribar a un màxim de 6,4 graus. El segon informe (“Impactes, Adaptació i Vulnerabilitat”, Brusseles) afirma que la pujada de dos graus de la temperatura mitja del planeta suposarà l'extinció del 30% de les espècies i una important caiguda de la producció agrícola. Finalment, el tercer informe (“Mitigació del



canvi climàtic”, Bangkok) tracta la importància d'aplicar mesures i d'invertir en tecnologies per combatre el canvi climàtic i reduir els seus efectes.



2. Introducció

Una gran part del consum energètic que es fa al món (i a Espanya especialment) és degut a l'electricitat utilitzada a l'habitatge i a centres de treball. De fet, aquests últims representen el 15% del consum total d'energia del país. Així doncs, cada família gasta, de mitjana, uns 650 euros l'any pel que fa a l'energia consumida a l'habitatge [4]. Com s'observa, les dades econòmiques també juguen a favor de la investigació per trobar nous mètodes de reducció de consum.

El consum produït a l'interior dels habitatges és degut, doncs, a diferents causes. Entre aquestes, hi ha una que ha crescut de manera trepidant en els últims anys. Es tracta dels sistemes de climatització per refrigeració. Les elevades temperatures de l'estiu i l'augment de la població estiuenca, degut al turisme, fan que cada vegada siguin més edificis els que disposen de sistemes de refrigeració i que es consumeixi més potència per aparell de refrigeració. Segons la "Guía práctica de la energía" elaborada pel Ministeri d'Economia i l'Institut per la Diversificació i Estalvi de l'Energia (IDEA) si continuem amb el ritme de consum que es manté avui dia, només passaran 35 anys perquè es dupliqui el consum mundial d'energia i menys de 55 anys en triplicar-ho.

Actualment, un 15% de l'habitatge (i casi un 60% dels edificis que actuen com a centres de treball) té algun sistema d'aire condicionat i el percentatge augmenta dia a dia (*Guía práctica de la Energía*). Aquest fet és encara més exagerat a Catalunya, on la punta de demanda elèctrica s'ha desplaçat de l'hivern a l'estiu.

Pel que fa als aspectes de contaminació, s'observa que cada família provoca l'emissió de 5 tones de CO₂ a l'atmosfera l'any, 2 tones de les quals són degudes al consum elèctric a l'habitatge, segons el director de l'Oficina Espanyola de Canvi Climàtic, Javier Rubio [5]. Aquestes dades van ser exposades al III Seminari Internacional sobre Canvi Climàtic que organitza el Ministeri de Medi Ambient i la Fundació Gas Natural.

Una de les solucions proposades pel Ministeri de Medi Ambient és la de millorar l'aïllament tèrmic, ja que col·locar dobles portes estalvia entre un 5 i un 10 per cent d'energia i fer el mateix amb dobles finestres estalvia fins a un 20% de consum d'energia.

Una altra proposta que es fa des del Govern de l'Estat es basa en la conscienciació social, incidint en "l'ús racional dels aparells de refrigeració". Això és fent que la temperatura a fixar en els aparells d'aire condicionat sigui la d'aproximadament 25°C. Cada grau de temperatura que es disminueix a l'aparell d'aire condicionat fa que augmenti el consum entre un 5 i un 7 per cent d'energia.



Des de la Generalitat de Catalunya també es contempla promoure un ús moderat dels aires condicionats. El 31 de maig de 2007 va posar en marxa una campanya anomenada "Aquest estiu no passis fred" que tenia com a objectiu que tots els centres de treball i vivendes de Catalunya amb sistema de refrigeració regulessin la temperatura a 25°C a l'estiu [6]. En cas de que tothom hagués complert amb el que el departament d'Economia i Finances pretenia, s'hagués evitat l'emissió de 63.540 tones de CO₂ a l'atmosfera. Aquest declara que, a Catalunya, la climatització representa el 47% del consum energètic domèstic i el 40% en el sector serveis.

Un exemple clar del resultat que s'hagués obtingut en cas de seguir-se les indicacions donades és que per un aparell que està regulat a 19°C, si es regula a 25°C, es redueix el consum de 1.600 kWh a 900 kWh en tres mesos, aproximadament. Si aquesta regulació es produís a tota Catalunya, aquesta podria estalviar fins a l'1,1% del consum elèctric en l'àmbit domèstic i en el sector de serveis.

A Catalunya, el consum d'electricitat destinat a la refrigeració durant l'any 2006, segons dades de la Generalitat, és el següent:

Sector	Consum energia (GWh)	Cost (milions d'euros)
Domèstic:	310,5	42,23
- Oficines	663,6	90,25
- Comerços	625,6	85,08
- Hotels i restaurants	586,9	79,82
- Altres	483,9	65,81
Serveis	2.360,0	320,96
Total	2.670,5	363,19

El consum energètic s'ha convertit en un dels grans reptes per a la societat actual i també per al món de l'empresa. El consum mundial energètic en sistemes de refrigeració només per a centres de dades de processos representa un valor aproximat a 61.000 milions de Kwh l'any. Si existissin solucions d'eficiència energètica no només s'aconseguiria un estalvi anual de més de 4.000 milions d'euros, sinó que, a més, només en els Estats Units



d'Amèrica, la reducció d'emissions de CO₂ seria equiparable a retirar cinc milions de cotxes de les carreteres [7].

La solució proposada en aquest projecte és la d'analitzar l'impacte que tindria la implantació d'un sistema de refrigeració diferent als utilitzats actualment. Per realitzar l'estudi d'impacte es pot fer una anàlisi a partir de càlculs matemàtics realitzant un model teòric o, fins i tot, es pot simular el procés.

Aquest treball forma part d'un projecte anomenat Sostaqua, que a la vegada engloba altres projectes relacionats amb el medi ambient. El projecte Sostaqua és un treball que pertany al programa Consorcis Estratègics Nacionals en Investigació Tècnica (CENIT). El CENIT és un instrument per finançar grans projectes integrats d'investigació industrial i que compta amb pressupostos elevats gràcies a l'important aportació que té de recursos privats i l'alta intensitat de l'ajut públic. L'empresa líder participant d'aquest projecte és el Grup Agbar. Entre d'altres, Sostaqua vol aconseguir realitzar estudis importants sobre la instal·lació de sistemes de refrigeració geotèrmics oberts (sense recirculació d'aigua) per a grans edificis, com poden ser hotels d'important tamany.

Una de les 10 activitats que té encomanades el projecte Sostaqua és la que ve titulada com "Eficiència energètica, energies renovables i acumulació d'energia". Aquesta activitat està composta per 5 tasques, una de les quals és la dedicada a la climatització d'edificis mitjançant recursos d'aigua subterrània [8]. L'empresa responsable de dur a terme aquesta tasca és Amphos XXI Consulting S.L.

La implantació d'un sistema d'aquesta magnitud requereix de l'estudi previ del consum energètic per a cada cas, els materials a fer servir, la localització, el tipus de terreny, tipus d'edifici a refrigerar o escalfar, l'economia d'inversió, el temps de retorn i, cada vegada més, l'impacte sobre l'ambient que suposa. És important aquest estudi previ ja que serveix per detectar les diferents adversitats que poden sorgir en la construcció i, així, evitar-les amb previsió.

2.1.1. Estudis de viabilitat:

El projecte Sostaqua té en el seu punt de mira la realització d'estudis de viabilitat. Per tal de complir amb aquest objectiu es centra en una sèrie d'anàlisis treballant en diferents camps:

-Camp legal: segurament, el primer a tenir en compte en una construcció és el marc legal sobre el que és possible treballar. Les lleis són sovint les línies que marquen el camí a seguir en la consecució d'un projecte. En aquest cas es toca un tema, si més no, delicat. Es tracta dels aspectes medi ambientals. L'aplicació d'aquet projecte implicaria el treball



sobre un terreny, l'ús d'aigües subterrànies naturals i la modificació de temperatures d'aquestes i de l'aire propers; de manera que s'ha de tenir especial cura amb les modificacions que es realitzin a curt i llarg termini sobre el medi. La llei és especialment estricta en els aspectes ambientals i més, com s'ha pogut observar anteriorment, després de la celebració del Protocol de Kyoto. Fent cas a aquest últim punt, s'han d'estudiar les possibles emissions que es donin en la instal·lació i, sobretot, en el funcionament del sistema de climatització.

La contaminació a estudiar que queda possiblement implicada amb aquests sistemes no és només de l'aire o l'aigua. S'han d'analitzar les lleis referides a la contaminació acústica, en funció de la zona a construir el sistema de climatització.

A part de les variacions ambientals que es poden donar, també hi té molt a dir el fet de que la implantació d'un sistema geotèrmic implica una construcció. S'ha de tenir en compte el tipus de terreny i la zona on es vulguin col·locar les canonades.

-Camp tècnic: un cop es coneix el marc legal en el que es pot moure el projecte és bàsic fer un estudi de la part tècnica implicada en el sistema. Això és, en termes generals fer l'anàlisi de com construir el sistema. En aquest estudi s'han d'extreure resultats dels materials a fer servir, els aparells útils en el sistema, les diferents possibilitats de construcció, etc.

L'estudi de viabilitat tècnica per aquest projecte té, doncs, per objectiu, la determinació de quina serà l'estructura del projecte, de quin material estarà fet, quin personal hi haurà de treballar, quines previsions s'han de fer en cas de cometre algun error, quina maquinària hi treballarà i, sobretot, sota quines condicions es desenvoluparà el treball del projecte. Tot això ha de ser desenvolupat en base a uns objectius i, en conseqüència, unes necessitats plantejats pel projecte.

Per realitzar aquesta part de l'estudi del projecte és sovint una bona idea plantejar un model que simuli el procés real que s'ha de donar. Aquesta és una bona tècnica per trobar els punts febles del projecte i poder estudiar-los minuciosament. La inversió dedicada a aquest model és menor que la de la construcció total, de manera que un error no suposa un cost econòmic elevat.

-Camp econòmic: com s'ha comentat, la part tècnica permet conèixer quin és el consum de recursos que s'haurà d'efectuar per dur a terme el projecte. Conegudes aquestes dades, és necessari fer un càlcul del cost total del projecte, a partir de la suma de costos individuals de cada part del treball.

Aquest camp del projecte és de gran importància ja que pot ser, com els altres dos



camp, un punt limitant. Si el cost sobrepassa les possibilitats econòmiques de les que es disposa, s'ha de replantejar la part tècnica i fer variacions o retalls.

En el projecte Sostaqua s'ha partit d'un pressupost fent un estudi previ sobre els costos econòmics. Això és abans de fer les anàlisis tècniques a fons. El pressupost del que es disposa per la tasca de "Climatització d'edificis mitjançant recursos d'aigua subterrània" és de 89.950 euros. Com s'ha comentat amb anterioritat, aquest projecte es dedicarà al treball d'una part d'aquesta tasca.

No només són importants els estudis de viabilitat. El projecte Sostaqua també té en compte altres estudis per tal d'aconseguir un treball acurat i complet:

2.1.2. Estudis d'impacte:

El projecte que es planteja Sostaqua requereix un treball fent servir recursos naturals i incideix sobre el medi ambient. Aquest efecte ha de ser estudiat i, d'aquesta manera, poder determinar de quina manera aquest efecte és negatiu.

-Estudi tèrmic: els sistemes de refrigeració geotèrmics, per tal de poder refredar l'aire en un receptacle, han d'incidir sobre la temperatura del subsòl. Aprofiten l'aigua del subsòl quan està a una temperatura més baixa que l'ambient i la fan passar per uns radiadors que hi ha al receptacle i que actuen com intercanviadors de calor. Així doncs, l'aigua de sortida torna al subsòl. Donat que aquesta està més calenta que l'aigua del subsòl perquè s'ha escalfat al seu pas pels intercanviadors de calor, té un impacte sobre la temperatura de l'aigua subterrània.

Aquest projecte en concret té una relació molt estreta amb l'estudi de l'impacte tèrmic que es dona sobre el medi ambient i, més en concret, sobre les aigües presents al subsòl.

-Estudi hidràulic: els sistemes de refrigeració més comuns, al igual que els geotèrmics, treballen gràcies a la circulació d'aigua. En els que aquí ens ocupen (els geotèrmics) aquesta aigua prové del subsòl. Així doncs, és important conèixer de quina manera s'ha d'aprofitar aquesta font i saber quines modificacions es provocaran sobre aquesta aigua. Tots els canvis que es donin han de ser estudiats i s'han de plantejar solucions en els casos en els que aquest efecte sobre l'aigua sigui perjudicial pel curs natural d'aquesta.

També és important conèixer, mitjançant estudis previs, quines són les fonts d'aigua i en quina manera es presenten per poder adaptar el nostre sistema a les condicions reals.

-Estudi ambiental: l'impacte que representa la vida d'un sistema de refrigeració geotèrmic en totes les seves fases (disseny, construcció, explotació, desmantellament) sobre el medi ambient és un punt que ha de ser estudiat amb deteniment. Un dels



avantatges que representen els sistemes geotèrmics respecte els utilitzats actualment és la reducció en la contaminació de l'aire. Però per saber a quin nivell es contamina menys s'ha de fer un estudi teòric i, possiblement, pràctic. En aquest estudi s'ha de realitzar una anàlisi per cada fase del projecte i, en cadascuna de les fases, veure quines són les emissions que es donen i com es modifiquen els recursos que es fan servir.

En la posta en marxa d'aquest projecte, la fase de disseny no suposarà emissions de cap contaminant. En quant a la construcció i el desmantellament, només el material no aprofitable es convertirà en deixalla, però no existirà cap contaminant de l'aire ni del sòl que intervingui directament en el procés (en aquesta sentència no es té en compte la contaminació en la producció d'energia que es farà servir per construir i eliminar el sistema geotèrmic). La fase d'explotació podria semblar que implica unes emissions importants de contaminant, però al no produir-se cap reacció química i al treballar només amb aigua (i anticongelant) com a líquid refrigerant no es cedeix cap residu contaminant a l'aire. Pel que fa al subsòl, el punt d'estudi al que es dedicarà en part aquest projecte és la contaminació tèrmica de les aigües. S'ha de veure quin és l'efecte sobre la temperatura de l'aigua subterrània i observar si en l'aplicació d'aquest sistema ens trobaríem en una situació de compliment de la llei.

2.2. Objectius del projecte

2.2.1. Necessitat inicial

Com s'ha comentat existeix una necessitat a nivell privat i públic de millorar les condicions de treball dels sistemes de refrigeració actuals. Aquest desig prové tant des del punt energètic, com ambiental i econòmic. Actualment el canvi climàtic constitueix un dels temes que més preocupa la societat catalana, és per això que s'estudia la reducció de consum de recursos (tant materials com energètics) i d'emissió de contaminants en molts camps de la vida diària. Els climatitzadors són uns dels grans consumidors d'energia en edificis. Moguts per això i tenint com a model altres països europeus, nord-americans i asiàtics amb una tecnologia avançada pel que fa als sistemes de refrigeració s'ha proposat l'estudi de mecanismes hidrogeotèrmics en sòls neutres i, així, poder extrapolar els resultats obtinguts a qualsevol terreny de Catalunya en el que es pretengui instal·lar un circuit de climatització que funcioni amb una bomba de calor.

2.2.2. Objectius

Aquesta necessitat motiva la investigació en aquest camp i planteja uns objectius a assolir per tal de satisfer-la:



Estudi de viabilitat d'un circuit hidrogeotèrmic. Aquest projecte pretén conèixer fins quin punt és possible, tèrmicament i estructuralment, la construcció d'un circuit de les característiques especificades, a gran escala. Al construir una maqueta que simuli el procés és fàcil observar quines són algunes de les dificultats que poden sorgir a l'hora de portar a terme el procés real. A més, també facilita dades de gran importància com quina ha de ser la localització dels pous, com es pot filtrar l'aigua, quina ha de ser la potència de treball de les bombes, etc.

Estudi d'impacte tèrmic. Tal i com s'ha explicat aquest projecte pretén conèixer les variacions de temperatura en el subsòl al injectar aigua a una temperatura més calenta. L'aigua calenta injectada es propaga pel subsòl de manera tridimensional, de manera que cal fer la mesura de la diferència de temperatura (ΔT) en punts situats a diferents distàncies horitzontals i verticals respecte a la zona d'injecció. L'estudi que es fa és per a un rang de temperatures (diferència entre l'aigua extreta i la injectada), independentment de si la temperatura inicial del subsòl és molt o poc freda. L'estudi d'impacte tèrmic a realitzar ha de tenir la capacitat de poder ser analitzada mitjançant un ordinador ja que s'enviaran les dades de temperatura a temps real per ser analitzades des d'un software informàtic.

Construcció d'un aqüífer a escala pilot. L'estudi d'impacte tèrmic es pot fer utilitzant diferents eines. Tot i així, s'ha escollit l'ús d'un sistema reduït per simular un sistema real per la comoditat que representa, les facilitats que proporciona per conèixer resultats donades diferents situacions amb condicions inicials diferents, per la dificultat que representa la posta a punt dels sistemes de refrigeració hidrogeotèrmics i perquè té en compte molts petits factors que afecten el comportament però que són difícils d'apreciar fent servir altres models (diàmetre de partícula de la sorra, naturalesa d'aquesta, composició de l'aigua, etc).

2.3. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte és dissenyar i construir un aqüífer a escala reduïda per poder realitzar estudis d'impacte tèrmic sobre un terreny homogeni en el que es simula l'efecte provocat per un sistema de refrigeració geotèrmic obert.



3. Tipus de refrigeració: funcionament per compressió, absorció i efecte Peltier

Així doncs, i tal com s'ha comentat anteriorment, el consum energètic a l'interior dels habitatges és important en magnitud. Un dels motius que fa que això sigui així és l'ús dels aparells de refrigeració. El seu consum d'energia ajuda a l'esgotament de recursos i a l'augment de la contaminació global. És per això que és important la proposta d'alternatives als sistemes actuals.

En aquest projecte s'estudia la viabilitat d'una alternativa i les conseqüències que comporta sobre el medi. Per plantejar alternatives és important conèixer quins són els tipus de sistemes de refrigeració amb els que es treballa a l'actualitat i com són els aparells utilitzats per posar en marxa aquests sistemes. També ajudar a comprendre la situació actual el fet de saber quins d'aquests sistemes són els més comuns i quin consum energètic se'n deriva. A continuació es detallen, doncs, els tipus de sistemes de refrigeració en funció del seu cicle termodinàmic.

3.1. Refrigeració per compressió

És un sistema que es basa en la circulació d'un fluid a través d'un circuit tancat i que es mou impulsada per una força aplicada. El funcionament d'aquest sistema es basa en la creació de zones de baixa i d'alta pressió. Aquesta diferència de pressions facilita que el fluid pugui absorbir calor en una part del circuit i refredar-se en una altra.

Els sistemes de refrigeració per compressió s'apliquen a diferents aparells entre els que estan els d'aire condicionat. També fan servir aquests mecanismes alguns refrigeradors domèstics, les càmeres de refrigeració o els aires condicionats automotors, entre altres.

Una màquina de refrigeració per compressió treballa com a la figura 3.1.: aconseguix l'evaporació d'un fluid dins un recipient tancat, que pot transmetre temperatura al seu entorn (la paret permet aquesta transferència). El fluid, que ha canviat d'estat augmenta la seva pressió al passar per un compressor i d'aquesta manera s'escalfa. En aquest estat d'alta pressió el fluid transmetrà calor a l'exterior condensant-se de nou. Aquest sistema s'anomena de compressió perquè és el compressor l'encarregat de donar la pressió suficient al fluid perquè pugui transferir calor amb facilitat i aconseguir una bona eficiència tèrmica.



$$h = - \frac{Q_C}{L} \Rightarrow h = \frac{-Q_C}{(Q_C - Q_H)} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$Q_H = Q_C - L \Rightarrow L = Q_C - Q_H \quad (\text{Ec. 3.1})$$

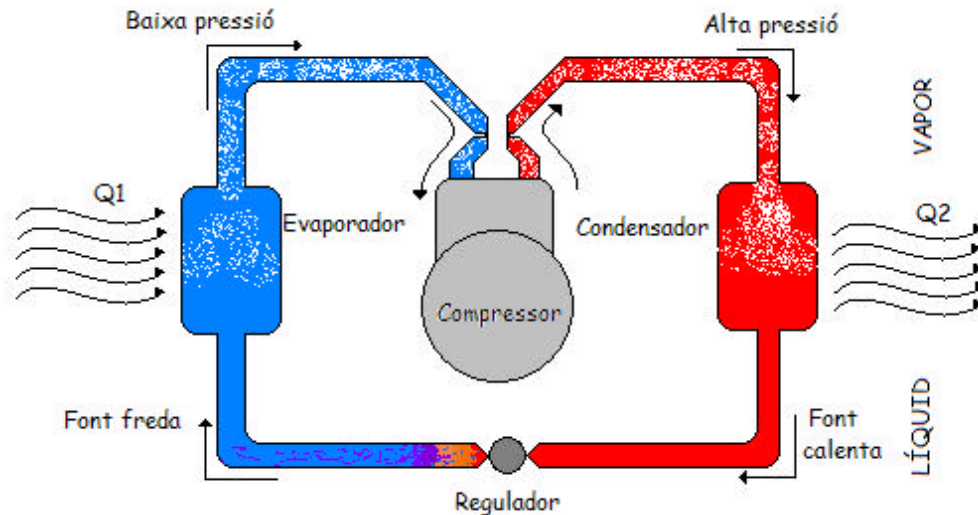


Fig. 3.1. Esquema termodinàmic d'un sistema de refrigeració per compressió

En aquests sistemes de refrigeració és un fluid de refrigeració el que refreda aire. Aquest aire és posteriorment impulsat al receptacle o habitació objectiu.

El principi bàsic de la producció de fred mitjançant aquests sistemes es basa en absorbir la calor d'un medi, anomenat font calenta, que s'ha de refredar (ja sigui aigua o aire) i transferir-la a un medi, anomenat font freda, extern (que també és aigua o aire) i s'escalfa.

Aquesta transferència es produeix gràcies a l'acció d'un fluid refrigerant sotmès a un cicle termodinàmic en el que se succeeixen canvis d'estat d'aquest.

Al cicle existeixen les fases comentades als sistemes de refrigeració per compressió:

1-2.- **Compressió:** El fluid de treball, que és vapor saturat a baixa pressió, eleva la seva pressió i temperatura, patint una compressió reversible i adiabàtica.



2-3.- Condensació: El fluid passa per un intercanviador on cedeix calor, a pressió constant, a un medi extern que està a una temperatura més baixa. El fluid surt del condensador com a líquid saturat.

3-4.- Expansió: Baixa la temperatura i la pressió del fluid mitjançant un procés adiabàtic d'estrangulament.

4-1.- Evaporació: El fluid passa per un intercanviador de calor i absorbeix energia d'un altre fluid que es troba més calent. El fluid intern del cicle s'evapora a pressió constant.

Existeix una similitud evident entre aquest cicle i el cicle Rankine, ja que es tracta del mateix cicle però invertit, excepte que una vàlvula d'expansió substitueix la bomba. Aquest procés d'estrangulament és irreversible, mentre que el procés que es dona al Rankine de bombeig és reversible. En quant a la diferència d'aquest cicle de refrigeració amb l'ideal de Carnot es fa evident a l'observar el diagrama T-S (veure a la pàgina següent). Al cicle de Carnot, en el procés 1-2 de compressió, es treballa amb una barreja de líquid i vapor.

La divergència entre el cicle de refrigeració real per compressió de vapor i el cicle ideal es fa evident en el descens de pressió associada al flux i la transmissió de calor al medi extern.

El vapor que entra al compressor al sistema real estarà, en la majoria dels casos, sobreescalfat. Durant el procés 1-2 de compressió hi ha irreversibilitats i transmissió de calor al medi extern o provinent d'aquest, en funció de la temperatura del refrigerant i del medi extern. Per tant, l'entropia podria augmentar o disminuir durant aquest procés. El fet de que tingui irreversibilitats i es transfereixi calor al refrigerant pot provocar un increment de l'entropia. En canvi, si és el refrigerant el que transfereix calor al medi, disminuirà l'entropia. La pressió del líquid que surt del condensador serà menor, doncs, que la pressió de vapor que entra i la temperatura del refrigerant en el condensador serà una mica superior que la del medi extern. Generalment, la temperatura del líquid que surt del condensador és més baixa que la temperatura de saturació i baixa una mica més en la canonada entre el condensador i la vàlvula d'expansió. Això representa un benefici ja que com a resultat d'aquesta transmissió de calor, el refrigerant entra a l'evaporador amb una entalpia baixa i això permet una major transmissió de calor al refrigerant en l'evaporador.



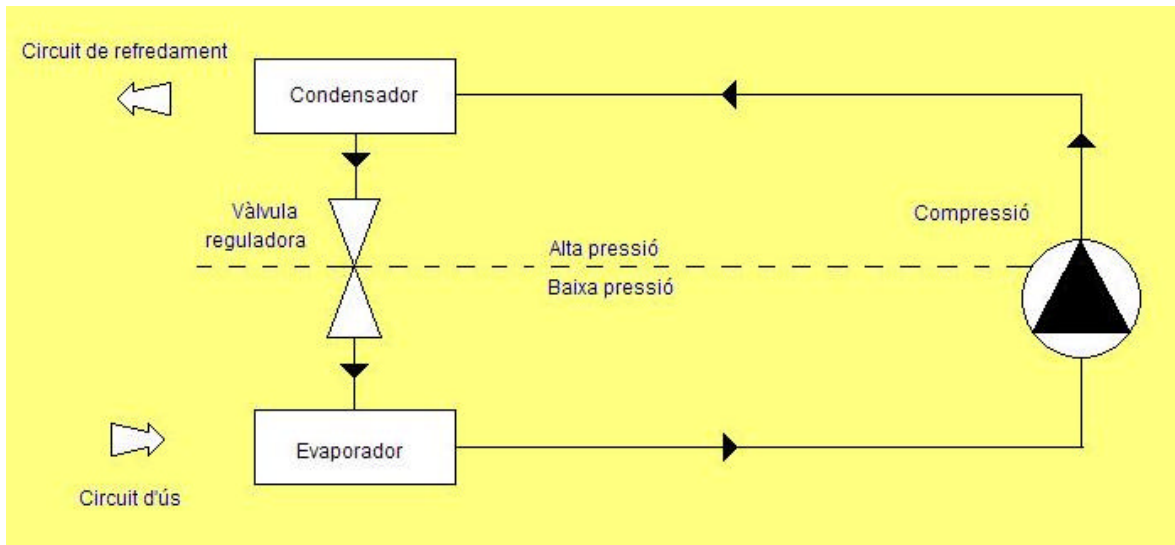


Fig. 3.2. Esquema reduït d'un ciclo Brayton utilitzat en sistemes de refrigeració per compressió

Aquest ciclo termodinàmic és l'anomenat ciclo Brayton i es veu representat a la figura 3.2. El ciclo Brayton ideal depèn de la relació de compressió, de manera que un augment en la relació de compressió en el ciclo (Fig. 3.3.) implica la necessitat d'un subministrament d'energia en forma de calor major degut a que les línies de pressió constant divergeixen cap a dalt i cap a la dreta en un diagrama T-S i, per tant, la temperatura màxima augmenta. Si augmentem, doncs, la calor aportada, l'eficiència tèrmica augmentarà amb el radi de compressió.

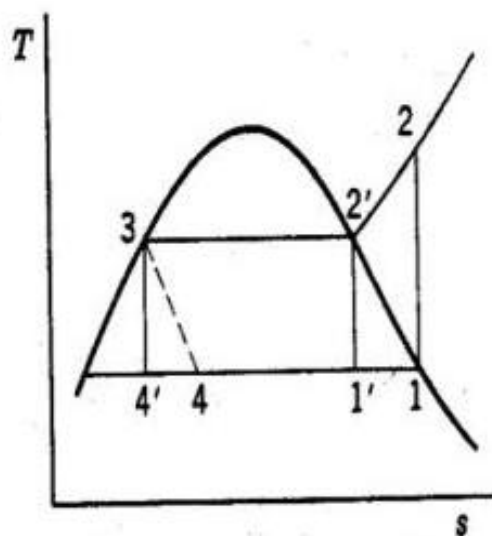


Fig. 3.3. Diagrama temperatura-entropia en un ciclo Brayton



Moltes vegades, els equips de refrigeració poden actuar com a sistemes de calefacció. Per aconseguir això no cal donar la volta físicament al procés, tot i que això ens donaria el resultat que es busca, ja que si s'inverteix el procés de compressió i expansió, el procés dóna calor a l'interior del receptacle en qüestió agafant la calor de l'aire exterior.

Els equips actuals estan, generalment, dotats d'una vàlvula de 4 vies que permet canviar, de forma mecànica, el sentit de circulació del gas lleuger que hi circula, de manera que on dóna en un principi calor, es pot donar fred.

Un equip de Cicle Reversible o Bomba de Calor que agafa de la xarxa elèctrica 1 kW, pot duplicar o triplicar el treball. Aquesta energia de diferència entre l'inicial (més petita) i la final prové de l'entalpia que hi ha a l'aire extern.

Pel que fa al rendiment, és millor parlar del COP (*coefficient of performance*) ja que la paraula eficiència pot tenir diferents significats. El COP defineix el coeficient entre la producció de calor i el consum d'energia. Una bomba de calor típica té un COP d'aproximadament 3. Aquest COP és elevat si el comparem amb el que s'obté en un sistema d'un calentador elèctric.

3.2. Refrigeració per absorció

Els sistemes de refrigeració per absorció refreden un gas aprofitant, també, que determinades substàncies, al canviar d'estat líquid a gas, absorbeixen energia calorífica. Aquest sistema, en comptes de basar el seu funcionament en el treball d'un compressor, es basa en la capacitat que té el fluid de treball (generalment bromur de liti) en absorbir vapor d'aigua. També es pot utilitzar l'aigua com la substància que dissol per absorbir amoniac.

En el primer cicle comentat (el que bromur de liti absorbeix aigua), l'aigua, que actua com a refrigerant d'un circuit de baixa pressió, canvia de fase a un evaporador, refredant a la vegada un fluid secundari que s'encarregarà de refrigerar la cambra o habitació objectiu. El vapor s'absorbeix a continuació pel bromur de liti. Es produeix així una solució concentrada, que s'escalfa mitjançant una font externa permetent així separar aigua de bromur de liti. L'aigua torna a l'evaporador i el bromur a la càmera d'absorció per iniciar el cicle un altre cop.

Al igual que en sistema de refrigeració per compressió, el circuit per absorció requereix d'una torre de refrigeració per dissipar la calor que sobra.



3.3. Efecte Peltier

L'efecte termo-Peltier consisteix en la creació d'una diferència de temperatura arran d'una diferència de potencial elèctric. Es dona si un corrent elèctric travessa dos metalls diferents o semiconductors (tipus n i tipus p) que romanen connectats entre sí mitjançant dues soldadures (anomenades unions Peltier). Es produeix una transferència de calor des d'una de les unions fins l'altra per efecte del corrent. Per tant, una de les unions es refreda i l'altra s'escalfa.

Al passar un corrent I a través d'un circuit, es produeix un despreniment de calor en la unió superior que s'absorbeix a la unió inferior. La calor que absorbeix aquesta unió per unitat de temps és igual a:

$$\dot{Q} = \Pi_{AB} \cdot I = (\Pi_B - \Pi_A) \cdot I \quad (\text{Ec. 3.3})$$

on Π és el coeficient de Peltier, Π_{AB} és el coeficient de Peltier del termoparell complet i Π_B i Π_A són els coeficients de cada material.

Els materials conductors intenten tornar a l'equilibri electrònic que existia abans d'aplicar el corrent. És per aquest motiu que absorbeixen l'energia d'un focus i la desprenen a un altre. Les parelles individuals es poden connectar en sèrie si es vol incrementar l'efecte.

La polaritat del corrent controla la direcció de la transferència d'electrons. Quan s'inverteix la polaritat es canvia la direcció de la transferència i d'aquesta manera la unió que abans es refredava s'escalfarà.

Els sistemes de refrigeració que s'estan fent servir avui dia tenen un consum relativament elevat d'energia. Això és, bàsicament, pel cicle termodinàmic que segueix el fluid de refrigeració. Actualment els sistemes de refrigeració ambientals més usats (per ambients habitables), en funció de la seva estructura i distribució de l'aire fred, són els coneguts com d'aire condicionat. Dins d'aquest grup podem fer una subdivisió en funció del tipus d'instal·lació dels aparells que els constitueixen. Existeixen els següents tipus:

- Aparells unitaris (o de finestra) que serveixen per un únic local. Tracta d'uns aparells consistents en un únic bloc que s'inserten a una finestra o paret, tot i que també n'hi ha mòbils.
- Aparells partits (split), en els que hi ha un aparell que conté el compressor, el condensador i la vàlvula, i que se situa en un lloc on el soroll del compressor no molesti i es pugui dissipar fàcilment la calor i un o més aparells amb un



evaporador i un ventilador, situat en els espais a refredar.

- Refrigeració centralitzada, en els que una màquina refrigeradora produeix aigua freda que es porta, mitjançant uns conductes aïllats a uns aparells terminals, on es refreda i es tracta l'aire. Aquests aparells terminals són aquells en els que es cedeix la calor per distribuïr-la a l'ambient. Poden ser o un climatitzador (segons normativa espanyola: Unitat de Tractament d'Aire, UTA) o un ventiloconvectòr (fan-coil). Per una altra banda, el propi evaporador de la màquina de producció de fred pot fer les funcions de climatitzador (cas en el qual és conegut com d'expansió directa). Els aparells terminals tenen com a funció condicionar l'aire en quant a temperatura, neteja i contingut en aigua.

Aquests sistemes per compressió i absorció, com es pot deduir, tenen un consum d'energia de treball que resulta certament elevat. De fet, el consum d'un sistema de refrigeració per aire condicionat es troba, de mitja en habitatges, entre 2 i 3 kW/h. Aquest elevat consum ha sigut l'impulsor d'estudis per la recerca i el desenvolupament de nous sistemes de refrigeració que facin un menor ús dels recursos energètics. Això és, no només pel cost econòmic que suposa l'elevat consum d'electricitat, sino per la contaminació i les irregularitats en el medi ambient causats pel consum de matèries primeres i les emissions de productes nocius a l'atmosfera.

Les estadístiques de consum es veuen multiplicades a mesura que el volum a refrigerar augmenta. És per això que les primeres investigacions s'han fet dedicades a edificis de gran tamany, com són edificis de l'administració pública, hotels, museus, etc. Els estudis en aquest camp han proliferat més al nord d'Europa, E.E.U.U, Canadà i Japó.

A banda dels sistemes de compressió i absorció i, en un intent de reduir aquest consum desmesurat d'energia, s'ha proposat la construcció d'un sistema de refrigeració per a edificis amb una sèrie de característiques que el fan diferent als més comuns actualment a Catalunya. La característica bàsica que han de complir aquests edificis és la presència d'humitat elevada en les capes del subsòl properes a la superfície. Així doncs, el tret diferenciador principal del sistema que es proposa és la zona d'obtenció del líquid de refrigeració. Aquest líquid és aigua provinent del mateix subsòl. L'aigua s'extreu de la terra humida que hi ha a una certa profunditat (en funció del tipus de terreny) mitjançant unes canonades complementades amb unes bombes de succió. El líquid es troba, generalment, entre 15 i 17°C per la zona costanera de Catalunya [9], de manera que no necessita ser refredat per actuar com a líquid refrigerador. De fet, la temperatura de les aigües subterrànies és, generalment, la temperatura mitja anual més el gradient geotèrmic regional (normalment la temperatura del subsòl augmenta 3°C cada 100m de profunditat). Es fa passar l'aigua per uns radiadors situats a l'interior de l'edifici, actuant així d'intercanviadors de calor. L'aigua s'escalfa al passar a través dels radiadors com a motiu



de l'intercanvi de calor amb el medi ambient (l'aire de l'ambient cedeix calor a l'aigua de l'interior dels radiadors i aquesta arriba a una temperatura propera a l'ambiental) i és retornat al mateix subsòl, de manera que creem un sistema semi-obert. El gran benefici d'aquest mecanisme és degut a que l'únic treball que s'ha de realitzar és el de bombeig, de manera que no només es redueix el consum sino que, a més, s'augmenta el rendiment. El sistema de refrigeració del que s'està parlant es tracta d'un circuit geotèrmic.



4. Sistemes geotèrmics

Els sistemes habituals de climatització de molts edificis es basa en la utilització d'unitats de refrigeració/calefacció o bombes de calor, situades freqüentment en els sostres, que són capaces d'escalfar o refredar l'aigua d'un sistema de distribució centralitzat. Una bomba de calor és una màquina que permet transferir o bombejar calor d'un medi fred (que, per tant, es refreda encara més) fins a un medi més calent; és a dir a una temperatura més elvada (i que, aleshores, s'escalfa encara més). Per aconseguir això és necessari un aport d'energia donat que, per la segona llei de la termodinàmica, de manera espontània la calor va d'un focus més calent a un altre menys calent, fins que s'igualen les temperatures. Existeixen diferents efectes físics utilitzats per crear bombes tèrmiques. Els més comuns són la compressió de gas, el canvi de fase gas/líquid (absorció) i l'efecte termo-peltier, ja comentats anteriorment.

Així doncs, aquestes bombes de calor funcionen mitjançant cessió o extracció de calor del propi aire ambient. Contràriament, el que succeeix als sistemes geotèrmics és ben diferent: la bomba de calor permet l'extracció o cessió de calor al subsòl a través d'un circuit d'aigua soterrat horitzontalment o verticalment. És a dir, el que existeix és un intercanviador d'energia soterrat.

A la Fig. 4.1. s'observa el pas de les canonades en un sistema de refrigeració geotèrmic. Si ens fixem en el subsòl, la canonada de la dreta té la funció, mitjançant una bomba de calor, d'extreure l'aigua de la terra saturada i la de l'esquerra la retorna. L'aigua que arriba a la canonada de l'esquerra té una temperatura superior a la d'entrada degut a l'absorció de calor al seu pas per l'interior dels radiadors provocant, d'aquesta manera, un refredament de l'aire de les habitacions de l'edifici.





Fig. 4.1. Representació d'un edifici en el que hi entra, a través d'una canonada, aigua provinent del subsòl i, després de passar per uns radiadors, és retornada a la zona d'origen

La inversió inicial per aquest tipus de bombes de calor és, generalment, més elevada que el cost de les instal·lacions habituals de les que s'ha parlat en el punt anterior. Això és degut, fonamentalment, als costos resultants de les perforacions del sòl per soterrar les canonades. Aleshores, els temps de retorn de la inversió pot ser optimitzat mitjançant un disseny ben estudiat del sistema que tingui en consideració els diferents factors tècnics i econòmics que hi intervenen.

Aquest tipus de tecnologia és molt atractiva ambientalment i econòmicament, si es compara amb les altres fonts d'energia renovables i el temps de retorn econòmic que tenen. Com s'havia comentat, un dels grans avantatges dels que gaudeix aquesta tecnologia és el gran estalvi elèctric que presenta respecte els sistemes de climatització habituals. Així doncs, els sistemes de climatització geotèrmics funcionen de forma similar als tradicionals però intercanvien calor amb el subsòl, en comptes de fer-ho amb l'aire. Per exemple, si imaginem que a l'estiu volem refrigerar una habitació i mantindre-la a 24 graus, es poden presentar dos escenaris energèticament molt diferents: el sistema



tradicional, que elimina la calor excendent a l'aire que es troba, per exemple, a 40 graus; i el cas geotèrmic, en el que la calor excendent es transmet al subsòl que es troba a menys de 20 graus (si parlem de Catalunya). El diferent salt tèrmic que ha de vèncer la bomba de calor en ambdós casos és la raó per la que el sistema geotèrmic requereix molt menys aport elèctric per climatitzar un edifici. Això implica un estalvi elèctric del 50% aproximadament per períodes de 25 anys (Sostaqua). A més, si es donés el cas de l'existència d'un nombre significatiu d'instal·lacions d'aquest tipus, pel fet de tenir un rendiment tan alt, es disminuiria el risc de fallades elèctriques en situacions de pics de demanda elèctrica.

Així doncs, per tal d'intercanviar calor amb el subsòl s'ha d'instal·lar un conjunt de tubs situats al subsòl per permetre el contacte tèrmic entre el líquid, generalment aigua o aigua amb un anticongelant, que flueix per aquests tubs i pel terreny. La bomba de calor consumeix una determinada energia per transferir energia tèrmica entre la canonada soterrada i l'edifici.

El sistema es basa en el següent principi: a l'hivern l'intercanviador absorbeix la calor del terra proporcionant calefacció a l'interior i a l'estiu, l'intercanviador cedeix calor al subsòl proporcionant refrigeració.

Els sistemes hidrogeotèrmics poden ser oberts o tancats. A continuació es detallaran les diferències entre ambdós:

Els sistemes oberts es caracteritzen perquè l'aigua s'extreu del subsòl fent ús d'unes bombes submergibles que es col·loquen en un o més pous i on l'aigua té una temperatura pràcticament constant. Aquesta aigua passa per uns radiadors situats a l'habitació que es vol escalfar i l'aigua, amb una temperatura una mica superior (donat l'intercanvi de temperatura amb l'aire de l'ambient) s'injecta a altres punts de l'aqüífer. D'aquesta manera, com que es retorna tot l'aigua que s'agafa, podem dir que hi ha un consum global nul.

En els sistemes tancats és el subsòl el que intercanvia la calor, i no pas l'aigua. Els circuits tancats es poden disposar verticalment o horitzontalment a una profunditat d'entre 1 i 3 metres sota la superfície. La figura 4.2. mostra un esquema de les tres possibilitats plantejades:



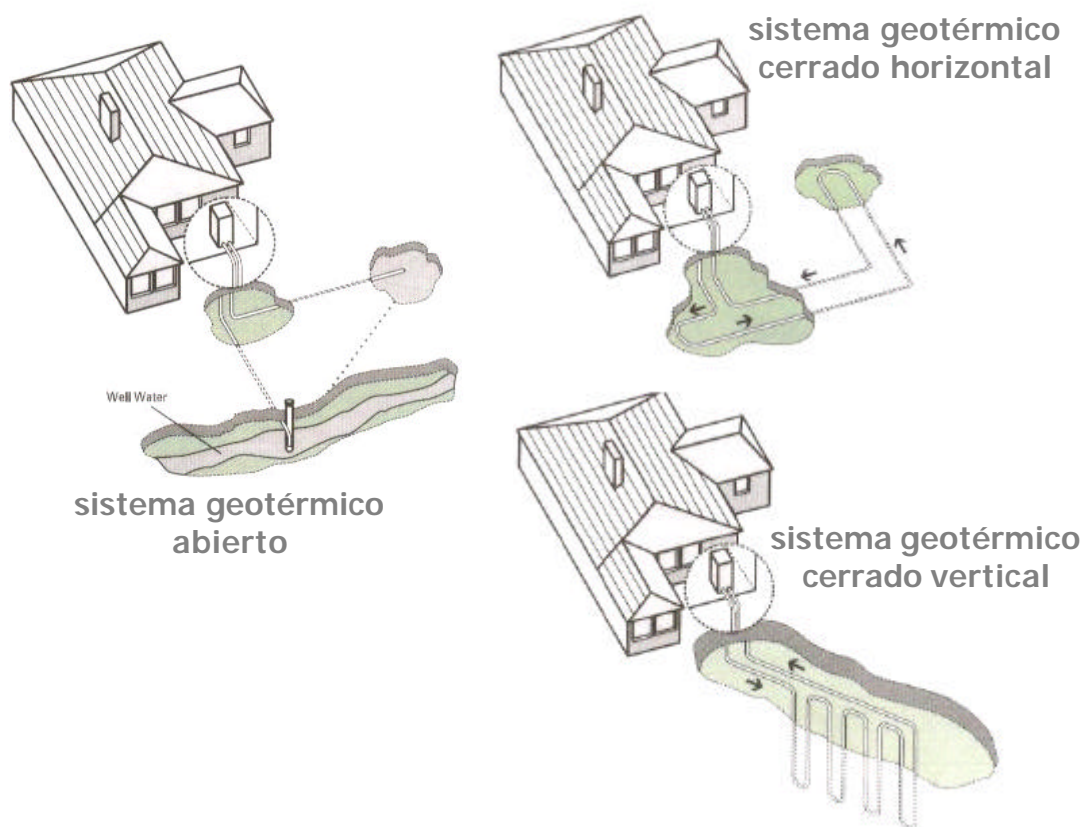


Fig. 4.2. Tres tipus de sistemes hidrogeotèrmics possibles: a l'esquerra el sistema obert i a la dreta els dos tancats (horitzontal i vertical)

Tant pel sistema obert com pel tancat es dóna el principal avantatge de l'estalvi econòmic i energètic. A part, els sistemes oberts que fan servir aigua subterrània són a nivell global més econòmics que els sistemes tancats a mesura que augmenten les necessitats energètiques (generalment es dóna a partir de consums de 175 kW). Per això és una bona opció per edificis que necessiten refrigerar o escalfar grans volums d'aire. La inversió inicial per sistemes oberts és menor degut a que s'han de fer menys perforacions al sòl. Les perforacions representen, generalment, al voltant del 60% del capital d'inversió. Per exemple, un edifici que tingui una demanda energètica de 160 kW i tingués instal·lat un circuit tancat necessitaria al voltant de 28 pous a uns 100 metres de profunditat cadascun aproximadament, mentre que si tingués un circuit tancat només necessitaria 4 pous.

Malgrat això, la utilització de sistemes oberts requereix d'un elevat coneixement de la



hidrodinàmica del sistema i de la quantitat d'aigua de la que es disposa. A més és considerablement complicat realitzar un disseny correcte dels pous d'extracció d'aigua i injecció d'aquesta si volem que no s'interfereixi l'aigua de treball de cada pou ja que això reduiria l'eficiència del sistema. També s'ha de vigilar que els pous no afectin a infraestructures properes.

A més, tant el sistema obert com el tancat, no utilitzen les torres de refrigeració convencionals dels sistemes aire-aire. D'aquesta manera s'eviten problemes sanitaris deguts a bacteries com la Legionella, així com emissions importants de CO₂ i contaminació acústica. A més la integració arquitectònica en edificis no afecta l'impacte visual ja que no necessita de l'instal·lació d'aparells en sostres ni parets.

La problemàtica que presenten aquests sistemes està relacionada amb la temperatura de les aigües subterrànies. A algunes ciutats europees com Berlín o Lyon s'ha fet un ús important d'aquests sistemes, el que ha provocat que es registressin temperatures considerablement més elevades en aquelles zones on s'havien implantat sistemes de refrigeració hidrogeotèrmics.

La implantació d'un sistema de climatització geotèrmic suposa, en general, unes millors prestacions i un menor consum d'energia respecte els sistemes tradicionals. Un sistema basat en la combustió de productes petrolífers com pot ser una caldera de gasoil o de gas natural implica, per una vivenda de 90 m², un cost d'uns 100 euros al mes en la factura energètica (preu abans d'impostos segons l'Institut de l'Enginyeria d'Espanya), proporcionant únicament calefacció i aigua calenta sanitària. L'ús cada vegada més extès de les bombes de calor per climatitzar vivendes, tant per fred com per calor, disminueix aquests costos energètics per vivenda, fent possible un descens del 40% en el consum d'energia. Tanmateix, el sistema que proporciona un estalvi més important i que, a més, és capaç de generar totes les necessitats tèrmiques de la vivenda (calefacció, refrigeració i aigua sanitària calenta) és la bomba de calor geotèrmica, ja que redueix els consums energètics un 50% respecte una bomba de calor convencional, i un 70% respecte els sistemes de combustió tradicionals.

La nova legislació en el sector de la construcció afavoreix la implementació de sistemes de generació energètica mitjançant energies renovables. Cada vegada més, en les noves construccions, un elevat percentatge del consum d'aigua calenta sanitària quedarà cobert mitjançant energia solar tèrmica. Malgrat això, l'augment en la demanda tèrmica en els edificis es deu a la calefacció i, en els últims anys i pels països mediterranis, a la refrigeració. La realització d'una instal·lació solar tèrmica que proporcionï, a més d'aigua calenta sanitària, calefacció i refrigeració és, actualment, costosa, a més que necessita sempre una aportació complementària d'energia convencional (gasoil, gas natural, GLP o electricitat) per satisfer la demanda completa.



Les bombes de calor geotèrmiques representen també una font d'energia renovable, que tot i tenir poc exit, actualment a Espanya, està àmpliament desenvolupada a altres països. La reducció que es dona en el consum d'energia implica, doncs, un consum econòmic menor a la llarga i, en conseqüència una disminució de la contaminació que és resultat de la producció d'electricitat. És per això que té un elevat interès per l'empresa privada: la llei és cada vegada més estricta en aspectes ambientals, dona una imatge positiva i, sobretot, redueix el consum elèctric, cosa que es veu reflexada a l'economia.



5. Simulació d'un sistema de refrigeració geotèrmic

S'entén per simulació l'experimentació amb un model d'una hipòtesi o conjunt d'hipòtesis de treball. Això vol dir que és, al cap i a la fi, una tècnica (generalment basada en dades numèriques) per conduir i portar a terme experiments. Aquests experiments són analitzats moltes vegades en un ordinador digital. Comprenen diferents tipus de relacions matemàtiques i lògiques, que són necessàries per analitzar i descriure el comportament i l'estructura de sistemes complexos del món real a través de períodes de temps relativament llargs.

Si no tenim tant en comte l'aspecte matemàtic de la simulació podem aferrar-nos a la definició que va realitzar R.E. Shannon que diu el següent: "La simulació és el procés de dissenyar un model d'un sistema real i portar a terme experiències amb ell, amb la finalitat de comprendre el comportament del sistema o evaluar noves estratègies (dins dels límits imposats per un cert criteri o un conjunt d'aquests) pel funcionament del sistema".

Tenint en compte aquesta última definició podem pensar en els beneficis que pot comportar realitzar la simulació d'un procés com és el d'un sistema de refrigeració geotèrmic.

Així doncs, és important pel bon desenvolupament del treball realitzar una sèrie d'estudis teòrics que ens donin una idea aproximada de quines són les limitacions amb les que ens podem trobar en el disseny, la construcció, l'explotació i el desmantellament del projecte.

La manera més fiable de saber si el projecte pot ser portat a terme és estudiant el procés en una construcció real amb les mateixes característiques que el que es pretén construir. En el cas en que l'obra a realitzar és completament innovadora o no existeix cap amb característiques molt similars, aquest procés es fa complicat. És per això que una bona opció per realitzar una anàlisi del comportament del sistema, estudiant un altre de similar, és creant un artificial que simuli el procés que volem portar a terme.

En el cas dels sistemes geotèrmics de refrigeració, és ben cert que existeixen, actualment, sistemes reals que funcionen avui dia. Si més no, països com Suïssa, Alemanya, Japó, Canadà i Estats Units ja fa anys que van introduir aquests sistemes en edificis per tal d'aconseguir un alt rendiment energètic, un baix consum en recursos i una disminució en la contaminació. Malgrat això, les condicions de terreny, clima, etcètera dificulten la realització d'anàlisis que siguin comparables a uns mateixos sistemes aplicats al terreny de Catalunya. A més, és costós (tant a nivell de treball com econòmicament) fer



un estudi sobre un sistema de gran tamany.

Contràriament, es pot recórrer a l'ús de simuladors. És a dir, una bona opció és construir un sistema a petita escala que pugui copiar el funcionament del sistema real. D'aquesta manera el benefici obtingut és doble:

- Es poden preveure les dificultats que poden sorgir en la construcció. En la mateixa construcció del sistema a petita escala apareixen dificultats que són més fàcils de solucionar degut a que el cost del material és menor (hi ha menys quantitat) i el treball en sí és més manipulable.
- Permet saber com treballarà el sistema i quin serà l'impacte en el terreny. Una vegada construït el sistema a petita escala és fàcil observar el comportament del fluid des del seu inici al subsòl fins que retorna després d'haver passat pels intercanviadors de calor. Es poden recollir les dades que siguin interessants per l'estudi (temperatura, pressió de les bombes, cabal, etc) en un ordinador i així poder modificar el simulador en funció dels nostres interessos.

Aquest projecte té com a principal objectiu la construcció d'un aqüífer que simuli, doncs, el procés real de refrigeració per a edificis de gran tamany fent servir un sistema geotèrmic. Ens centrarem més en el que succeeix en el subsòl una vegada està en funcionament aquest sistema més que no pas en el que succeirà a l'edifici a refrigerar.

Per arribar a realitzar una simulació de qualsevol procés és convenient dividir el treball en les següents etapes:

Definició del sistema. Per tenir una definició exacta del sistema que es desitja simular és necessari fer primerament una anàlisi preliminar. Això es fa per tal de determinar la interacció amb altres sistemes, les restriccions del sistema, les variables que interactuen dins el sistema i les seves interrelacions, les mesures d'efectivitat que s'utilitzaran per definir i estudiar el sistema i els resultats que s'esperen obtenir de l'estudi.

Formulació d'un model. Una vegada s'ha definit amb exactitud tots els ja comentats resultats que s'esperen obtenir de l'estudi, es deïneix i es construeix el model amb el que s'obtinran els resultats desitjats. En la formulació del model és absolutament necessari definir totes les variables que directa o indirectament formen part d'ell, les seves relacions lògiques i els diagrames de flux que descriguin el model en forma completa.

Col·lecció de dades. Les dades de les que som coneixedors han de ser definides amb claredat i exactitud. És important el coneixement precís de les dades que el model necessitarà perquè sinó es complica l'obtenció dels resultats desitjats.



Implementació del model a l'ordinador. Una vegada es té el model definit, el següent pas és decidir si s'ha de fer servir algun altre llenguatge com per exemple el *algol*, *fortran*, *lisp*, etc., o es fa servir algun paquet com *GPSS*, *simsript*, etc., per processar-lo en l'ordinador i obtenir els resultats desitjats.

Validació. Aquesta etapa facilita la detecció de deficiències en la formulació del model o en les dades que alimenten el sistema. Les formes que més comunament s'utilitzen per validar un model són:

- 1.- Observar l'exactitud amb la que es prediuen dades històriques.
- 2.- L'opinió d'experts sobre els resultats obtinguts.
- 3.- Comprovació d'error del model de simulació al fer servir dades que fan fallar el sistema real.
- 4.- L'exactitud en la predicció del futur.
- 5.- La confiança en el model de la persona que ha de fer ús dels resultats.

Experimentació. L'experimentació amb el model es realitza després de que aquest s'hagi validat. L'experimentació consisteix en generar les dades desitjades i en realitzar una anàlisi de sensibilitat dels índexs requerits.

Interpretació. En aquesta etapa de l'estudi, s'interpreten els resultats que s'obtenen de la simulació i es pren una decisió tenint en compte aquesta interpretació. Com es pot suposar, els resultats que s'obtenen a partir d'un estudi ajudat amb la simulació d'un model donen consistència a les decisions que s'han de prendre en la construcció del sistema real.

Documentació. Es necessiten dos tipus de documentació per fer un millor ús del model de simulació. La primera ve referida a la documentació del tipus tècnic i la segona té relació amb el manual de l'usuari, amb el qual es facilita la interacció i l'ús del model desenvolupat.

La realització d'experiments pot ser un treball de camp o de laboratori. En qualsevol dels dos casos, el model de mètode utilitzat per la simulació d'un procés pot ser teòric, conceptual o sistèmic. A continuació es detallara cada model.

Model teòric. El model teòric ha de contenir els elements que siguin necessaris per la simulació. Un exemple de model teòric en un treball de laboratori és el d'un programa



d'estadística amb ordinador que generi nombres aleatoris i que contingui els estadístics de la mitja i les seves diferents versions (quadràtica-aritmètica-geomètrica-armònica). Per una altra banda també ha de ser capaç de determinar la normalitat en termes de probabilitat de les sèries generades. La hipòtesi de treball es que la mitja i les seves versions també determinen la normalitat de les sèries. Es tracta d'un treball experimental de laboratori. Si és certa la hipòtesi podem establir la seqüència teorema, teoria o llei.

Model conceptual. En l'exemple proposat sobre el simulador estadístic, el model conceptual desitja establir amb un qüestionari i amb treball de camp, la importància de la discriminació o rebuig en una col·lectivitat. Això s'ha de fer, doncs, mitjançant un qüestionari en forma de simulació amb una escala d'actitud. Després de veure si la població és representativa o adequada, ara la simulació és la aplicació del qüestionari i el model és el qüestionari per confirmar o rebutjar la hipòtesi de si existeix discriminació en la població i cap a quin grup de persones i en quines qüestions. Gran part de les simulacions són d'aquest tipus amb models conceptuals.

Model sistèmic. El model sistèmic és un treball a nivell de laboratori. Es tracta d'una simulació d'un sistema a partir d'una representació total d'aquest. L'anàlisi de sistemes és una representació total.

Els tres models representen perfectes simulacions de la realitat i modelitzen tots els elements en les seves respectives hipòtesis de treball. Són també l'escenari en els processos de simulació d'un experiment.

Un altre aspecte important de la simulació és que s'ha de poder repetir indefinidament.



6. Limitacions en l'aplicació

La implantació d'un sistema de refrigeració hidrogeotèrmic fent servir recursos naturals (recirculació d'aigua) suposa una variació en les propietats d'aquests. És indispensable no sortir dels límits que marca la llei en la construcció i la posta en marxa del sistema. Per això és important conèixer què diu la llei en referència al projecte al que ens referim en aquest estudi.

La situació a Catalunya és, actualment, ben curiosa. S'han fet diversos estudis tècnics que donen uns resultats suficientment clars. Els criteris d'aquests estudis determinen com a negatiu pel medi ambient un augment local en la temperatura del subsòl de 3°C o superior [10]. Malgrat això, no existeix cap norma al respecte. Pel que fa referència a l'extracció d'aigua, és necessària, segons la mateixa Agència Catalana de l'Aigua i en referència a les Lleis d'Intervenció Integral de l'Administració Ambiental (L.I.I.A.A), la reinjecció dels recursos captats. És a dir, s'han de retornar els mateixos cabals que s'extreuen.

A Catalunya és responsabilitat de l'Agència Catalana de l'Aigua exercir un control sobre l'ús de l'aigua. D'aquesta manera és l'encarregada de cedir concessions per al dret d'ús de l'aigua (pel que fa a l'extracció) i d'autoritzar l'abocament de l'aigua escalfada al medi (en referència a l'injecció). En resum, la seva tasca principal és la d'assegurar que aquests sistemes afectin en la menor mesura possible al medi i als altres usuaris.

Per una altra banda, l'Agència Catalana de l'Aigua ha de garantir la sostenibilitat de tots els aqüífers destinats a la refrigeració. Això ho pot aconseguir elaborant textos jurídics basant-se en uns criteris tècnics fiables. La figura 6.1 mostra l'evolució tèrmica en les rodalies d'un sistema de refrigeració geotèrmica.



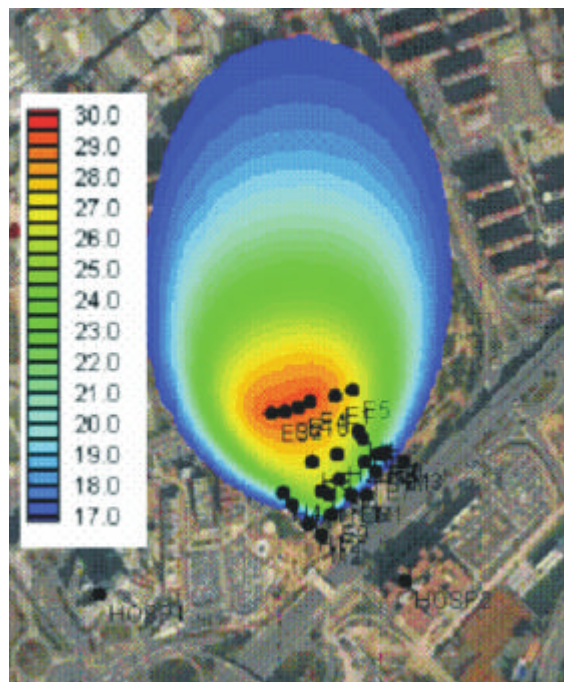


Fig. 6.1. Simulació de l'impacte tèrmic a un aqüífer en el que s'extreu aigua a 15°C i s'injecta a 30°C

A nivell de l'Estat espanyol, la llei en aquests termes es troba també en un estat d'assentament de criteris. De fet, és a Catalunya on s'ha començat a estudiar el tema amb més insistència, a través del Departament de Concessions de l'Àrea de Domini Públic Hidràulic, departament que pertany a la ja citada Agència Catalana de l'Aigua. De moment no existeix cap altre comunitat autònoma que promogui la realització d'estudis d'impacte sobre el medi ni de l'ús de recursos hídrics.

Donat que la normativa sobre l'impacte en aqüífers a Catalunya i, sobretot, a Espanya està en un estat incipient, s'ha realitzat una anàlisi d'aquesta en altres països que tenen un bon desenvolupament en el mercat de les bombes geotèrmiques per a cicles oberts. L'estudi s'ha fet sobre els següents països: Canadà, Estats Units, Suècia, Noruega, Finlàndia, Dinamarca, Holanda, Alemanya, Àustria, Suïssa, Romania, Grècia, Gran Bretanya, França i Portugal. Japó no està inclòs degut a que els sistemes geotèrmics que utilitza són bàsicament de cicle tancat, donada la prohibició pels problemes de subsidència del terreny associats als sistemes oberts.

Entre les necessitats i criteris seleccionats per redactar les lleis vigents relacionades amb la instal·lació de bombes de calor mitjançant sistemes oberts es troben, per exemple: la realització de models, la determinació del màxim rang de temperatura admissible entre



l'aigua que s'agafa de l'aqüífer i la de retorn, l'ús d'aditius i la realització de concessions pel posterior seguiment de la instal·lació que permeti preservar la qualitat i la quantitat del mateix.

D'entre els països comentats hi ha pocs que disposin d'una documentació robusta en referència als sistemes oberts de refrigeració amb bomba de calor geotèrmica. Només a França, Holanda Suïssa, Suècia i alguns estats de E.E.U.U. existeix un marc legal inclòs en el context de les lleis de gestió d'aigües subterrànies. Es preveu que, en un període curt de temps, Àustria implementi un marc legal similar. Per una altra banda, en la majoria de països les lleis es refereixen a les bombes de calor per a cicles tancats, l'ús dels quals està més extès, com a Grècia, Alemanya i Romania. Pels casos en els que no existeix un marc legal, com a Gran Bretanya, l'estudi tècnic de l'impacte ambiental en l'ús de l'aqüífer es tracta com un cas específic.

En el cas dels Estats Units, cada estat poseeix una part de la legislació que es refereix a la concessió de pous CLASS V per injecció de temperatura. La normativa Normbrunn'97 de Suècia inclou alguns criteris al respecte. En França existeix una llei que determina les temperatures màximes a les que es pot injectar aigua al subsòl (Llei de l'aigua de 1992). A més, l'Estat francès ha desenvolupat un sistema de garantia, anomenat AQUAPAC, per instal·lacions de bombes geotèrmiques i que té per objectiu que els estudis previs a la instal·lació compleixin els requisits de qualitat adequats. Pel que respecta a Suïssa i Àustria, s'està implementant legislació específica sobre l'ús de l'aigua com a font d'energia. A Alemanya s'han establert i recollit una sèrie de criteris que es basen en els mateixos resultats que els estudis tècnics de Suïssa i Àustria amb l'objectiu de realitzar un bon disseny i que es respecti de la millor manera el medi ambient.

Actualment és menys comú la instal·lació de sistemes oberts que no pas la de sistemes tancats. Això fa que la legislació existent associada als primers sigui més escassa. En altres països com són Grècia o Romania, no existeix cap mena de legislació relacionada amb els sistemes oberts ja que les bombes hidrogeotèrmiques són molt noves a aquests països i gairebé treballen totes en cicle tancat.

Les bombes geotèrmiques en sistemes oberts són sotmeses a estudi cas per cas en aquells països on no existeixen recomanacions i/o legislació per evaluar impactes i viabilitat. Això succeeix a Gran Bretanya, Països Baixos, Noruega i Catalunya.

En tots els països estudiats s'han comparat uns criteris presents a les diferents legislacions de cadascun d'aquests:



Rang de temperatura. És a dir, la diferència màxima de temperatura permesa entre l'aigua que s'extreu i la que s'injecta.

A França, el rang de temperatura màxim permès ve limitat per una llei que el declara com 11°C. En canvi, el seu país veí, Alemanya, tolera una diferència de temperatura de 6°C; a Suïssa i Dinamarca es permet només 3 i 0,5°C, respectivament. En molts països es fa servir el valor de 5°C per determinar el rang de temperatura màxim, com és el cas de Canadà i Àustria. Un cas curiós és el de Suècia ja que ha redactat una legislació pròpia a les bombes de calor, però no aplica cap limitació de rang de temperatura. A Holanda i Idaho (estat dels E.E.U.U situat al nord-oest) tampoc es recomana cap límit de temperatura però s'exigeix un estudi de viabilitat per cada cas concret per garantir que la incidència sobre l'aqüífer sigui mínima.

Ús d'additius en les aigües injectades. Aquesta pràctica es duu a terme per garantir el correcte funcionament intern dels circuits o per evitar les colònies de bacteries com a producte dels increments de temperatura (fet que es dona amb més facilitat en els sistemes de refrigeració).

A tots els països està prohibit injectar cap additiu. Maltgrat això, existeixen alguns casos en els que es pot concedir un permís per aplicar-hi additius si es demostra mitjançant un estudi una necessitat absoluta de fer-ho, a més de provar que l'impacte és mínim sobre la qualitat de l'aigua. Els països que comprenen aquest punt són Dinamarca, França, Canadà i E.E.U.U a l'estat d'Idaho. En altres estats com Suècia, Alemanya i Holanda es recomanen algunes accions preventives en l'aplicació d'additius.

Nombre d'aqüífers involucrats. Algunes legislacions prohibeixen que els pous d'extracció d'aigua estiguin situats a un aqüífer diferent a on se situen els pous d'injecció. El països regits per aquesta normativa són Alemanya, Suïssa, Dinamarca, França, Canadà i els estats de Delaware i Missouri. En alguns casos no existeix la obligació però sí la recomanació de la preservació de la qualitat i la quantitat de les aigües subterrànies. És el cas d'Idaho i Holanda.

Zones protegides en sistemes oberts. Alguns països defineixen unes zones en les que es prohibeix la instal·lació de bombes de calor amb sistema obert.

A Alemanya i Holanda, les zones de subministrament d'aigua potable i/o mineral estan protegides i es prohibeix la instal·lació de bombes de calor. A França, a més, es protegeixen les zones de parcs naturals. Existeixen altres casos més delicats com són Suècia i els Estats Units. Aquests dos països tenen la característica de que en el seu territori existeixen moltes fosses sèptiques subterrànies, de manera que es delimita un perímetre de protecció en el qual no es pot instal·lar un sistema de bomba de calor que



pugui afavorir el creixement bacterià.

En el cas de França es requereix, a més, un seguiment de certes variables i constants com són la pressió, la temperatura, el nivell freàtic i una anàlisi química i de microorganismes dels pous d'injecció. És a dir, s'exigeix un estudi de viabilitat, tant hidràulic com tèrmic, com està especificat en la legislació de l'Estat de Colorado. En els casos en els que la instal·lació requereix uns volums de terreny i aigua baixos es pot fer una simplificació de la legislació. Això és el que succeeix a França. A Alemanya es dona també una simplificació de la llei quan el sistema s'utilitza com a calefactor i no refrigerador, ja que té un impacte associat molt menor.



7. Viabilitat del projecte

En aquest apartat es comentaran aquells factors que poden dificultar la realització d'un projecte com aquest, així com poden ser els costos en la construcció de l'aqüífer. Tanmateix es detallaran les conseqüències negatives pel medi ambient que suposa la construcció de l'aqüífer i el seu funcionament.

7.1. Costos

Els costos del projecte s'han de dividir en dos seccions. Una es refereix als costos de construcció i de muntatge de l'aqüífer mentre que l'altra té a veure amb la posta en marxa i el funcionament d'aquest.

Pel que fa a la construcció, bàsicament, els gastos realitzats són els relacionats amb la compra de material, tot i que també s'inclou la mà d'obra per tallar les planxes d'acer i de l'enginyer que ha de dissenyar i construir l'aqüífer. El cost de la mà d'obra per tallar l'acer és el real que s'ha pagat i el de l'enginyer és teòric suposant un sou per a un titulat amb quatre anys d'experiència. A continuació es mostra un quadre en el que apareixen els costos de cada component del projecte:

Aparell	Quantitat	Cost unitat	Cost total (euros)
Refrigerador	1	1282	1282
Bomba peristàtica	1	1238	1238
Termòstat	1	498	498
Agitador	1	175	175
Targes adquisició dades	5	350	1750
Termoresistències Pt100	10	46	460
Software	1	680	680
PC	1	899	899
Palet	1	139	139
Altres (paper, tubs, gomes, etc)			100
Sorra	700 kg		2486
Aigua destil·lada	220 kg		440
Planxes acer 4mm	5,34 m ²		1108
Cost abans d'impostos			11255
IVA			0,16
TOTAL			13056



Mà d'obra	Hores	Preu hora	Cost (euros)	Seguretat social	Total (euros)
Mecànics	4	25	100		100
Enginyer	270	12	3240	0,22	3952,8
SUMA					4052,8

En referència al funcionament s'ha de dir que més que el cost de la matèria adquirida durant aquest, és important el càlcul econòmic que suposa tenir el projecte en marxa per unitat de temps. El cost de funcionament engloba el consum elèctric de la maquinària i la supervisió i manteniment de la instal·lació (donat que les connexions entre tubs són delicades s'ha de fer ús de silicona, teflón, PVC líquid i altres materials reforçants periòdicament; a part de la reposició d'aigua perduda per evaporació i en altres tasques, com els canvis de tubs). Per supervisar el treball de l'aquífer es contracta el mateix enginyer del disseny, que té un sou de 1920 euros al mes nets, en 14 pagues anuals. Donat que el cost de funcionament es basa en una predicció (a partir de l'experiència viscuda en la construcció) es farà una anàlisi suposant que el consum sigui elevat.

Consum elèctric	W	Temps de funcionament anual (h)	kWh	Cost anual (euros)
PC	33	5520	182,2	16,9
Bomba	230	5520	1269,6	117,9
Refrigerador	285	460	131,1	12,2
Termòstat	290	5520	1600,8	148,6
Agitador	230	5520	1269,6	117,9
TOTAL			4453	413

Manteniment	Preu unitat	Unitats l'any	Cost anual (euros)
Silicona	4,5	0,3	1,5
Teflon	1,5	1,0	1,5
PVC líquid	4	0,1	0,3
Cola de contacte	3	0,5	1,5
Tubs PVC	0,2	0,5	0,1
Aigua desionitzada	2	60,0	120,0
TOTAL			125

Mà d'obra	Sou mensual	Seguretat social	Sou, impostos inclosos	Sou anual (euros)
Enginyer	1920	0,22	2342,4	32793,6



El cost total que suposa tenir en funcionament l'aqüífer durant 230 dies l'any, 24 hores al dia és de 33332 euros.

7.2. Impacte ambiental

Un altre aspecte important a analitzar en la viabilitat del projecte és l'impacte que suposa la seva realització sobre el medi ambient. Aquest projecte en sí té com a finalitat aportar coneixements sobre la construcció d'un sistema de refrigeració que el diferencia dels actuals perquè redueix l'impacte ambiental. Malgrat això, l'elaboració de l'aqüífer a petita escala suposa també un consum de recursos i una producció de residus que, tot i ser pocs, és important tenir-los en consideració.

El consum de recursos que incideix sobre el medi ambient és bàsicament el de l'electricitat utilitzada (la producció d'electricitat és una font de contaminació) ja que els materials que s'han utilitzat o bé no suposen un consum de recursos perjudicials pel medi ambient (per exemple, la sorra de platja) o bé es molt difícil comptabilitzar en quin grau el perjudiquen (per exemple, la fabricació d'un termòstat). Així, doncs, suposant que es treballa 24 hores al dia, durant 230 dies l'any (5 dies a la setmana descansant 30 dels dies totals), el consum elèctric anual correspon a 4453 kWh.

La producció d'1 kWh d'electricitat a partir de carbó genera unes emissions de 977 g de CO₂ mentre que si aquest kWh es produeix a partir de gas natural, es generen 394 g de CO₂. A Espanya es genera de mitja 400 g de CO₂ per cada kWh produït (dades del *Plan de Energias Renovables de la Asociación de la Industria Fotovoltaica*). Sabent que la densitat del diòxid de carboni és de 1,6 kg/m³, aquests 400g impliquen un volum de 0,25 m³. Per tant, tenint en compte el consum mencionat anteriorment, es generen anualment amb l'energia emprada a l'aqüífer 1113,25 m³ de CO₂.

Per una altra banda, hi ha d'haver una persona treballant amb l'aqüífer i vigilant que no hi hagi cap problema. Aquesta persona produeix CO₂ cada vegada que respira. Comptabilitzarem aquesta quantitat per saber fins a quin punt contamina la construcció i el funcionament del projecte. Suposem que la persona que hi treballa ho fa 8 hores diàries. Les persones, de mitja fem 17 respiracions per minut, i cada vegada expulsem 0,5 litres de CO₂. Així doncs, aquesta persona produirà 938,4 m³ de CO₂ l'any, treballant amb l'aqüífer. Sumant aquesta dada a la que teniem per consum elèctric, veiem que es generen anualment 2051,65 m³ de CO₂.

Finalment, els residus del projecte són producte de la construcció i no pas del funcionament, ja que aquests últims són negligibles. Els residus generats són: acer, tubs de PVC, perfils de cautxú, trossos de tub de PVC rígid, paper, tapa de dipòsit de polietilè,



tires de ferro, bosses de plàstic. El total generat és escàs; a continuació es detalla com es distribueixen per volum:

	Volum m3	Volum L
Tubs PVC	0,00041	0,41
Acer	0,0002136	0,2136
Perfils de cautxú	0,00006	0,06
Tub de PVC rígid	0,00015	0,15
Paper	0,0015	1,5
Tapa de HDPE	0,000009	0,009
Ferro	0,00016	0,16
Bosses LDPE	0,000009	0,009
	0,0025116	2,5116



8. Disseny i construcció

Aquest projecte pretén, en definitiva, analitzar la variació de temperatura al voltant de la zona d'injecció d'aigua calenta en un sistema de refrigeració hidrogeotèrmic. I per realitzar aquesta tasca s'estudiarà el procés mitjançant una maqueta que representi un sistema real fent un control de les dades des d'un ordinador. La maqueta serà un aqüífer que escenificarà el que succeeix al subsòl, sense fer cap estudi sobre el que succeiria a l'interior de l'edifici a refrigerar.

Així doncs, el treball consisteix en el disseny i la construcció d'un aqüífer amb unes dimensions de 1400x500x800 mm dividit en tres dipòsits. El dipòsit central (el més gran) està ple de sorra saturada d'aigua i simula el propi subsòl. Un dels dipòsits laterals té com a funció proveir d'aigua la sorra del dipòsit interior per tal de que quedi sempre saturada; i l'altre dipòsit lateral recull l'aigua que surt del bloc de sorra. Exposat això queda clar que l'aigua realitza un recorregut en el que va d'un dels dipòsits laterals fins l'altre, passant pel dipòsit ple de sorra. Per dur a terme aquest moviment és necessari crear un gradient que, mitjançant la gravetat, afavoreixi la circulació del fluid. Aquest gradient s'aconsegueix fent que al dipòsit d'entrada hi hagi un nivell d'aigua més gran que a l'últim.

L'aigua que queda al dipòsit de sortida és recirculada cap al primer dipòsit mitjançant l'ús d'una bomba. Tot això constitueix el circuit tancat que realitza l'aigua i que pretén simular el pas de l'aigua a través del subsòl en sistemes reals. Ara bé, cal simular també, en aquest dipòsit de terra, l'aplicació d'un sistema de refrigeració geotèrmic, per poder fer l'estudi de l'impacte tèrmic del que s'ha parlat. Per aconseguir-ho es col·loquen dos tubs que actuen com a pous. Un d'aquests pous (situat a prop del dipòsit d'entrada) recull, per filtració, aigua provinent de la sorra saturada. Aquesta aigua és succionada cap a un altre circuit obert i és escalfada fins una certa temperatura. Un cop l'aigua aconsegueix la temperatura addient és enviada a l'altre pou i l'aigua calenta torna als intersticis de la sorra. La temperatura es propaga per conducció, convecció i per radiació i pel propi transport d'aigua. Mitjançant unes sondes de temperatura s'estudia l'evolució dels gradients de temperatura a l'interior del cos de sorra. Aquestes sondes transmeten unes dades de temperatura a unes targetes d'adquisició de dades que permeten que un software instal·lat a un PC faci un estudi a temps real de l'evolució de la temperatura a diferents punts de la sorra.

Per arribar a construir un simulador s'ha hagut d'estudiar la forma que ha de tenir aquest en base al mecanisme que es vol posar en marxa:



8.1. Mecanisme de treball

El procés a simular és, com s'ha comentat, el d'un sistema de refrigeració hidrogeotèrmic; però en aquesta simulació es vol obviar el que succeeix a l'interior de l'edifici a refrigerar. És a dir, no es construirà cap sistema a petita escala que faci un intercanvi de calor mitjançant uns radiadors. Tot i així, està clar que per poder representar correctament un circuit de bomba de calor sencer cal copiar aquest procés d'escalfament de l'aigua de treball d'alguna manera. Farem servir, doncs, el següent mètode: s'escalfarà aigua que s'hagi extret prèviament de l'aqüífer i es retornarà a una temperatura superior.

Per una altra banda, hem de ser conscients de que aquesta aigua que s'escalfa prové, en un sistema real, del subsòl; de manera que s'haurà de treballar amb un volum de terreny que simuli el subsòl. La idea és la següent: s'ha de crear una "caixa" que s'omplirà de sorra per emular el terreny sobre el que reposaria l'edifici. Aquesta sorra estarà saturada fent-hi passar aigua per l'interior.

Existeix el problema de que, a la realitat, es dona una renovació de l'aigua subterrània de manera natural (però lenta). És a dir, existeix un moviment de l'aigua en les capes freàtiques que fa que sota un teòric edifici es renovi l'aigua paulatinament. El problema radica en la dificultat per simular aquesta renovació de l'aigua per una maqueta relativament petita, tot i que el fet en sí comporta també un avantatge pel nostre sistema: una renovació d'aigua ens garanteix que l'escalfament de l'aigua en una zona local és més lenta i complicada ja que, suposat un punt on s'injecta l'aigua calenta que prové de l'edifici es donarà un moviment (o renovació) del fluid, disminuint així la temperatura.

Per simular la renovació d'aigua es crearà un moviment d'aquesta al seu interior. Es defineix un punt lateral de la caixa d'entrada d'aigua i en l'extrem oposat de la caixa es situa la sortida d'aquesta. A dos laterals oposats de la caixa es col·loquen uns dipòsits. En el lateral d'entrada d'aigua el dipòsit s'omple d'aigua fins a un nivell suficientment alt per tal de que es pugui filtrar des d'aquest dipòsit fins l'altre. Per tant, el dipòsit de sortida recollirà l'aigua que arriba per filtració a través de la sorra. L'aigua recollida és bombejada fins el dipòsit d'entrada, un altre cop.

Si el sistema evolucionés sense extreure-hi energia, a un temps infinit l'aigua del sistema tindria una temperatura igual a la de l'aigua escalfada (provinent de l'edifici teòric) ja que existiria una font que subministra calor i cap que l'absorbís. Per això és necessari, d'alguna manera refredar l'aigua intentant que el dipòsit d'entrada tingui sempre una temperatura que simuli la del subsòl. S'instal·laria un aparell refrigerador que aniria, doncs, situat després de la caixa lateral de sortida.



Entre els dipòsits laterals i la caixa interior hi ha unes parets que eviten que es barregi l'aigua amb la sorra. Malgrat això, és necessari que existeixi contacte entre les substàncies per aconseguir la filtració del líquid entre les partícules de sorra. Per aconseguir-ho es fan uns forats en aquestes parets separadores i es folren amb un filtre que permeti el pas de l'aigua però no el de la sorra. Els forats han de tenir un tamany reduït per tal de poder controlar el pas de líquid i per donar rigidesa a la paret. D'aquesta manera s'aconseguirà el moviment de les partícules de sorra des del dipòsit d'entrada fins el dipòsit de sortida.

Pel que fa a l'extracció d'aigua per ser escalfada (que es troba a la sorra saturada) necessita d'un sistema que no deixi passar tampoc sorra. S'instal·larà un pou tancat per la base i foradat per la part inferior. Els forats també es recobriran amb un filtre i d'aquesta manera es permetrà el pas d'aigua a l'interior del pou, però no de la sorra. Aquesta aigua omplirà el pou, de manera que pugui ser bombejada fins a arribar a un calefactor que li doni la temperatura adient per emular la transferència de calor als radiadors d'un edifici. La diferència de temperatura entre el líquid de sortida de l'aqüífer i el d'entrada estaria entre 5 i 10°C. A la secció de les proves realitzades es farà un estudi detallat sobre els gradients de temperatura que s'ajusten més a les necessitats del sistema. El líquid escalfat tornarà a la sorra passant per un segon pou. Aquest pou serà també tancat per la base i estarà dotat de forats a la part inferior. La transferència d'aigua es realitzarà ara en sentit invers: anirà des de dins del pou fins a fora. La longitud del pou ha de ser la suficient com per poder extreure aigua de zones molt humides però que, tant a l'hora d'extreure com a la d'injectar, s'eviti totalment l'efecte paret. És a dir, han d'estar relativament lluny dels límits de la caixa.

8.2. Flux

Dins el tanc s'intentarà simular un únic aqüífer i s'han de limitar les heterogeneïtats del sistema. Per aconseguir això és necessari treballar amb un únic material de farciment i això contribueix a la creació d'una zona no saturada. Aquest fet és degut a que el flux horitzontal es dona únicament al fons del tanc, ja que, per efecte de la gravetat, el flux a les altres parts té un pendent negatiu. Així doncs, considerarem que el flux és bidimensional i no pas linial. Per tant, no es pot aplicar l'aproximació de Dupuit que diu el següent:

“En un flux permanent d'un aqüífer sensiblement horitzontal, se suposa que les línies de corrent són horitzontals, que els equipotencials són verticals i que el gradient hidràulic és constant al llarg d'una vertical i igual al pendent de la superfície freàtica”.



La llei de Dupuit fa una aproximació en la transmisivitat del líquid a través del sòl:

Donat que no és aplicable aquesta correcció, s'ha de considerar un flux bidimensional (al flux horitzontal lineal s'afegeix la coordenada vertical), que comporta una problemàtica en els càlculs.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{F}{K} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 8.2})$$

L'equació 8.2 mostra l'expressió general per a un flux subterrani.

h = potencial hidràulic (nivell piezomètric).

x, y, z = coordenades.

F = recàrregues externes (pluges, etc).

K = permeabilitat de l'aqüífer.

S = coeficient d'emmagatzematge.

T = transmissivitat.

t = temps.

Donat que a la naturalesa els sòls són anisòtrops, solen tenir tres plans ortogonals de simetria que tallen segons tres eixos principals x, y, z (que són els representats a l'equació 8.2).

Donat que en el nostre sistema no existeixen recàrregues externes, el factor F/K s'anul·la. Per una altra banda, es donen més simplificacions:

Flux bidimensional (explicat anteriorment):	$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$
---	---

$$T \left(\frac{m}{dia} \right) = 100 \cdot \frac{Q \left(\frac{l}{s} \right)}{d_p (m)}$$

(Ec. 8.1)



Treball en règim permanent:

$$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

(Ec. 8.3)

El règim permanent implica que el nivell roman invariable o pràcticament invariable després d'un cert temps de bombeig o d'estabilització. Això és el que provoca que no hi hagi acumulació i, per tant, el coeficient d'emmagatzematge (S) sigui nul.

Per tant, l'equació final que modelitzarà el flux és (després de totes les simplificacions) :

Així doncs, el flux tindrà el progrés que es mostra a la figura 8.1. (línia discontinua):

Pel càlcul del cabal en el nostre sistema es pot fer una aproximació a la realitat fent servir la llei de Darcy, que descriu, en base a uns experiments de laboratori, les característiques del moviment de l'aigua a través d'un medi porós. Henry Darcy va postular que "la velocitat de circulació d'aigua en un medi porós saturat és directament proporcional a la diferència

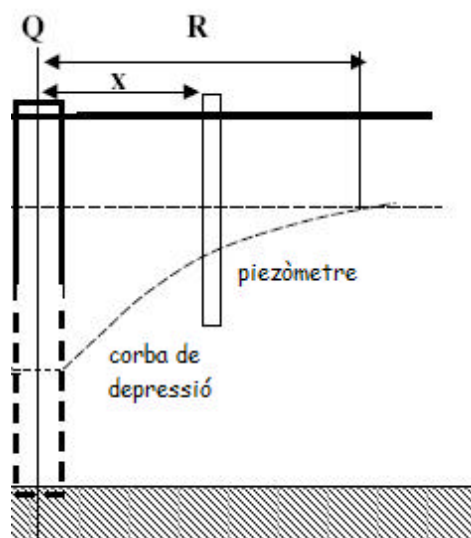


Fig. 8.1. Representació de la direcció del flux passant per un bany de sorra amb piezòmetre



de pressió hidràulica entre dos punts i a la conductivitat del sòl a l'aigua, i inversament proporcional a la distància entre dos punts". Per poder aplicarla cal tenir en compte alguns

$$h = z + \frac{u}{g_t} \quad (\text{Ec. 8.4})$$

conceptes.

L'altura piezomètrica per un líquid ve definida per l'equació 8.4:

h = càrrega hidrostàtica.

z = altura d'elevació.

u = pressió.

g_t = pressió del líquid.

$$i_s = \frac{\partial h}{\partial s} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta s} \quad (\text{Ec. 8.5})$$

$\frac{u}{g_t}$ = altura de pressió.

$$v = \frac{q}{s} \quad (\text{Ec. 8.6})$$

El gradient hidràulic queda determinat per:

La velocitat de flux, que es el vector, la component del qual en una direcció és el cabal que travessa la superfície perpendicular a la direcció. De manera que,



v = magnitud del vector.

q = cabal que travessa una superfície determinada.

s = àrea de la superfície comentada.

$$v = -k \cdot \nabla h \quad (\text{Ec. 8.8})$$

Henry Darcy va demostrar experimentalment, l'any 1856, per un flux unidireccional d'aigua

$$v = k \cdot i \quad (\text{Ec. 8.7})$$

, que la velocitat de l'aigua depèn del producte d'un factor característic del material que ha de travessar la sorra anomenat coeficient de permeabilitat (k), i que té dimensions de velocitat, per un vector de direcció.

L'equació anterior extesa a tres dimensions, pren la forma vectorial següent:

En general, en un líquid newtonià l'equació queda:

$$v = -\frac{k'}{h} \mathbf{g}_i \nabla h \quad (\text{Ec. 8.9})$$

h = coeficient de viscositat del fluid.

\mathbf{g}_i = pes específic.

k' = permeabilitat física; en el sistema c.g.s. té unitats de cm^2 .

Per tal de que es compleixi l'equació de Darcy s'han de donar una sèrie de condicions hidrodinàmiques:

1. Medi porós continu.
2. Aplicació anàlisi diferencial.
3. Porus saturats.
4. Les forces d'inèrcia són menystenibles respecte les forces de la viscositat, i com a conseqüència, el flux és laminar.



5. Existeix proporcionalitat entre l'esforç de tall aplicat al fluid i la velocitat de deformació al tall.

6. El sòlid porós és rígid i isòtrop.

El valor del nombre de Reynolds, Re , a partir del qual deixa de complir-se la llei de Darcy, oscil·la entre 1 i 12. En aquest cas, el nombre de Reynolds ve donat per l'equació 8.10:

$$Re = \frac{0,6 \cdot v \cdot r \cdot D_s}{h \cdot (1-h)} \quad (\text{Ec. 8.10})$$

v = velocitat del fluid.

r = densitat del fluid.

D_s = diàmetre de la partícula, la superfície específica de la qual és igual a la del conjunt.

h = coeficient de viscositat del fluid.

Per nombres de Reynolds superiors a 12, la importància de les forces d'inèrcia en el flux fan que obtinguem la següent expressió:

$$i = a + b \cdot v^2 \quad (\text{Ec. 8.11})$$

Equació vàlida per Reynolds compresos entre 12 i 60 el flux es fa turbulent.

8.2.1. Sòls parcialment saturats

En els sòls parcialment saturats existeixen dos fluids en els porus: aigua i aire. La llei de Darcy s'ha obtingut per un sol fluid i, per tant, no és aplicable, en principi per aquest tipus de sòls. Els cossos insaturats necessiten ser estudiats amb una modificació de la llei de Darcy.

Les bombolles d'aire taponen part dels porus en que es troben, i no permeten el pas de líquid quan aquest és permeant. Per això la permeabilitat a l'aigua d'un sòl parcialment saturat sol ser menor que la del mateix sòl saturat. Per aquest motiu, la permeabilitat d'un sòl parcialment saturat augmenta amb el pas del temps durant el que està exposat al pas



de l'aigua, perquè el seu grau de saturació va augmentant a mesura que més bombolles són arrossegades per l'aigua, i a mesura que l'aire és dissolt en l'aigua.

El coeficient de permeabilitat de sòls parcialment saturats augmenta amb la pressió del líquid, doncs això provoca un increment en la quantitat de gas dissolt i, per tant, una disminució en l'espai ocupat per bombolles gasoses.

Per això és important treballar en estat estacionari, passat un temps relativament llarg des del començament del bombeig. D'aquesta manera ens assegurem aproximar més la realitat al model proposat per Darcy.

En sí, la fórmula desenvolupada per Darcy suposa que el cos que travessa un fluid és isòtrop i continu i aquest últim té una viscositat igual a la de l'aigua a 20°C, desplaçant-se a una velocitat de 1 cm/s sota un gradient de pressió de 1 atm/cm. La figura 8.2. mostra l'evolució del fluid a través del cos pel que passa. L'equació formulada és la següent:

$$Q = K_i \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta h}{\Delta L} \right) \quad (\text{Ec. 8.12})$$

Q = cabal.

K_i = permeabilitat del medi.

A = àrea travessada pel fluid.

Δh = diferència d'altura entre el punt inicial i el final en el recorregut d'una partícula d'aigua.

ΔL = distància horitzontal recorreguda.



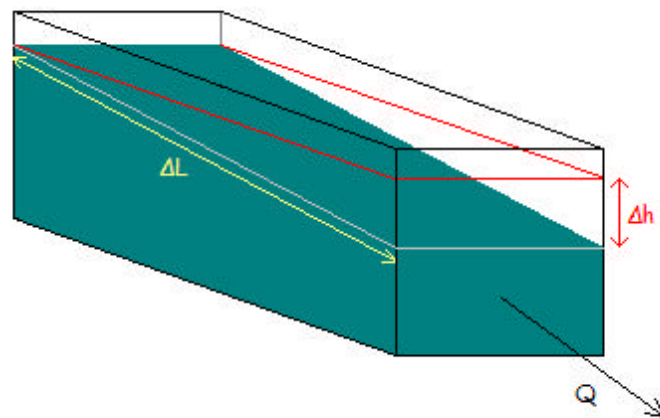


Fig. 8.2. Tall de superfície on es representa el recorregut del líquid per a l'aplicació de la llei de Darcy

És a dir, si diem que el cabal és igual al producte de la velocitat per l'àrea travessada i la porositat, tenim:

$$v_{fi} = \frac{K_i}{n} \cdot \left(\frac{\Delta h}{\Delta L} \right) \quad (\text{Ec. 8.13})$$

on n és la porositat i v_{fi} és la velocitat del fluid.

Per realitzar el càlcul de la constant K de permeabilitat podem fer ús de la fórmula establerta per Allen Hazen el 1892, que diu el següent:

$$K \left(\frac{cm}{s} \right) = 116 \cdot d_{10}^2 (cm) \quad (\text{Ec. 8.14})$$

d_{10} = diàmetre expressat en centímetres corresponent al 10% en la corba granulomètrica.



A la figura 8.3 s'observa un exemple de corba granulomètrica per sorres de diferents diàmetres que permet fer una aproximació del valor de la permeabilitat.

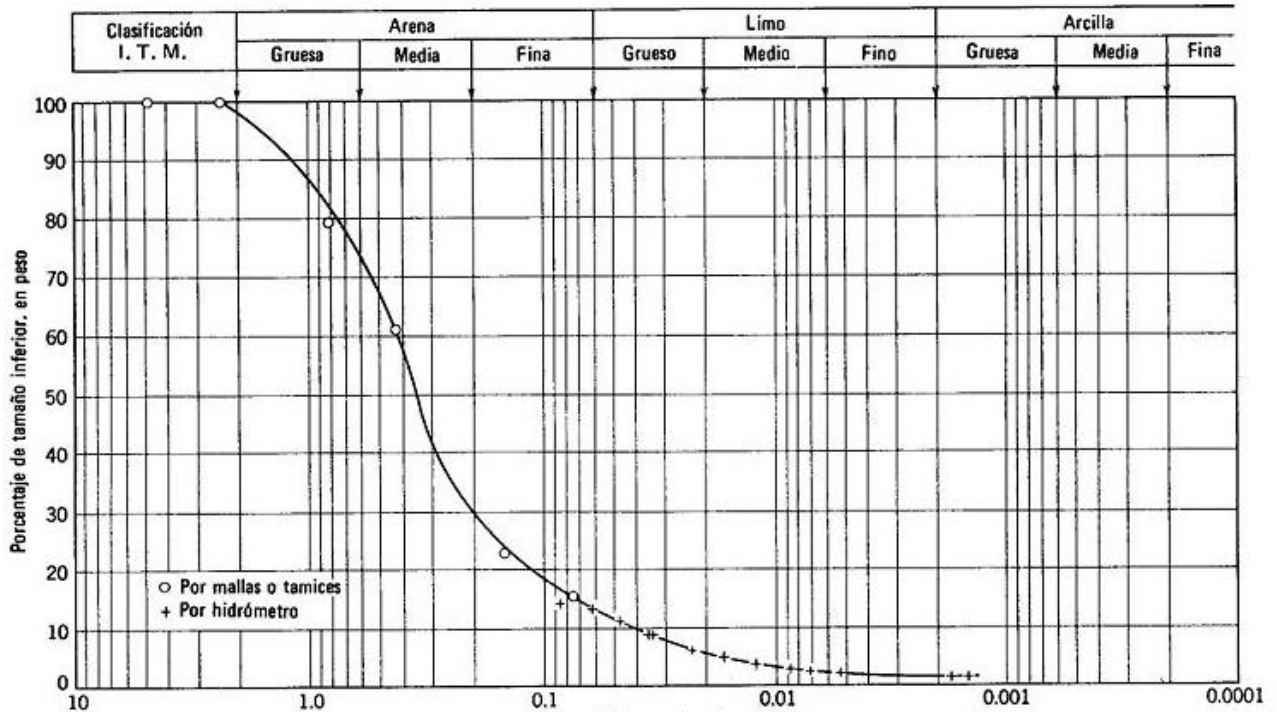


Fig. 8.3. Divisió de les partícules d'un sòl en funció del seu tamany de gra

La llei de Darcy és aplicable tant a terrenys saturats com a insaturats (per a aquests últims cal una modificació de la llei), però en sòls saturats la conductivitat depèn molt del potencial màtric existent i el tipus de sòl. El potencial màtric és el que generen els mecanismes de retenció de l'aigua del sòl, denominats mecanismes d'adhesió i cohesió. Com més sec sigui el substrat, més elevada és la pressió que s'ha d'aplicar per extreure el líquid. Les variacions del potencial màtric depenen de les propietats físiques del substrat.

Les característiques del sistema porós són les que regeixen el moviment de l'aigua a través de l'interior d'aquest. El flux d'aigua és dominat per un factor hidràulic, un factor gravitacional i un de capilaritat del sòl. En un sòl no saturat el moviment d'aigua ve donat per la conductivitat hidràulica i la sortivitat (és a dir, la capacitat que té un sòl per absorbir aigua durant un procés d'humitejament).

El flux que circula per l'interior de la sorra serà proporcional al diàmetre dels porus. Això és degut a que l'aigua només es transmet per l'interior d'aquests i, com a conseqüència, el flux disminueix si es redueix el diàmetre dels forats. Pel que fa als porus més petits, la



disminució de velocitat és més notòria degut a que la mobilitat de les molècules d'aigua unides a les partícules sòlides és molt baixa pels efectes d'adsorció (sortivitat). A mesura que disminueix el contingut d'humitat, es produeix també una disminució del potencial matriu i la conductivitat disminueix amb una velocitat més elevada.

En els casos en els que la sorra estigui saturada o pràcticament saturada, els sòls que presenten un diàmetre de partícula elevat presenten una major conductivitat. Això és conseqüència de que, al ser la partícula més gran, també ho és el porus i, per tant es permet una fàcil transmissió de l'aigua. En canvi, per sòls en els que el potencial matriu és baix (poca humitat), s'aconsegueixen majors conductivitats en sorres de textura fina ja que tenen una secció efectiva de transmissió en aquestes condicions superior als sòls de textura doble (efecte provocat per la bona capilaritat en sòls de sorra fina).

Per una altra banda, la quantitat d'aigua que entra en un sòl és més gran quan aquest està inicialment sec que no pas quan està humit. Malgrat això, la velocitat de moviment de l'aigua o conductivitat, al llarg del perfil del sòl, és inferior quan el sòl està sec.

Els sistemes de flux dels sòls vénen condicionats per un patró natural que defineix a aquests com medis essencialment heterogenis i anisòtrops. A la pràctica, mesurar aquest patró natural és molt complicat, pel que s'ha d'assimilar el sistema real a altres teòrics que en facilitin l'estudi.

Alguns paràmetres físics, com són la densitat aparent, la humitat gravimètrica, la resistència mecànica, la textura, etc., no són suficients si es consideren de manera aïllada per l'estudi del sòl. Però aquests, units a altres paràmetres dependents, com la porositat total, la porositat efectiva i la conductivitat hidràulica, resulten més convenients per estudiar i explicar els processos físics que es donen.

La relació entre les permeabilitats horitzontal i vertical d'argiles (extrapolable a sòls argilosos) augmenten amb:

- i) la màxima tensió efectiva vertical que ha patit l'argila en el passat.
- ii) cada nou cicle de càrrega.
- iii) el percentatge de fricció d'argila.

La mesura de la permeabilitat a un sòl es fa al laboratori mitjançant permeàmetres. Entre els permeàmetres clàssics destaquen el de càrrega constant i el de càrrega variable. Tant un com l'altre poden ser de flux ascendent o descendent.



8.2.2. Densitat i porositat de la sorra

En l'estudi de sòls es distiguen dos tipus de densitat. Són la densitat real o de partícula i la densitat aparent. La primera correspon a la densitat de la fase sòlida en el sòl. En canvi, la aparent inclou el volum de partícules i el volum buit dels porus. La densitat aparent permet evaluar l'efecte del treball que es fa amb el sòl. A més, aquest valor és de gran utilitat per extrapolar les dades obtingudes a nivell de laboratori a una situació de camp. També és necessari per poder calcular la porositat total.

Densitat aparent (dap)

És la relació entre el pes sec d'una mostra de sòl i el volum que ocupa. Per tant, la densitat aparent varia en funció de la textura, de l'estat d'agregació, del contingut de matèria orgànica, de l'ús que s'ha fet del sòl i del contingut d'humitat (sobretot en sòls amb materials expandibles). La sorra que es fa servir en l'aqüífer té una densitat aparent (quan l'única humitat que conté és la de l'aire dels intersticis) de $1,45 \text{ g/cm}^3$.

Densitat real o de partícula (dp)

S'ha pesat una mostra de 100 cm^3 de sorra seca (145,11 g) i el mateix volum de sorra saturada d'aigua (184,73 g) i, per tant, s'ha calculat la densitat de partícula:

$$184,73 - 145,11 = 39,62 \text{ g}$$

$$39,62 \text{ g (H}_2\text{O)} \Rightarrow 39,62 \text{ cm}^3 (\text{porus})$$

$$100 \text{ cm}^3 - 39,62 \text{ cm}^3 = 60,38 \text{ cm}^3$$

$$\frac{145,11}{60,38} = 2,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Porositat total

Es pot calcular a partir de les dades comentades de densitat i fent servir l'equació 8.15, que es mostra a continuació:



$$PT = 1 - \frac{dap}{dp} \quad (\text{Ec. 8.15})$$

$$PT = e = 0,39 \approx 0,4$$

Càrrega constant (permeable)

La llei de Darcy determina que el coeficient de permeabilitat es pot obtenir a partir de l'expressió 8.7:

$$k = \frac{v}{i} = \frac{V \cdot H}{S \cdot t \cdot \Delta h} \quad (\text{Ec. 8.16})$$

V = volum d'aigua que travessa el sòl en el temps t.

S = superfície de la secció de la mostra.

H = distància entre piezòmetres extrems.

t = temps.

Δh = diferència de nivell d'aigua als piezòmetres extrems.

En determinats sòls la càrrega d'humitat és variable. Aquests queden regits per la següent fórmula entre un instant inicial i un moment t_1 de temps:

$$k = H \cdot \frac{s}{S \cdot t_1} \cdot \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad (\text{Ec. 8.17})$$

Donat que la temperatura afecta directament la viscositat del fluid que ha de passar a través de les partícules de sorra, es dóna una influència obvia entre aquesta i el coeficient de permeabilitat. Això fa que, per tenir uns resultats fiables sigui recomanable controlar la temperatura de l'aigua durant l'assaig. Per conèixer el coeficient de permeabilitat per una temperatura T_2 , coneixent el que hi ha amb una temperatura T_1 , es pot fer servir la següent relació:



$$k_{T1} = k_{T2} \cdot \frac{h_{T1}}{h_{T2}} \quad (\text{Ec. 8.18})$$

éssent α_{T1} i α_{T2} els coeficients de viscositat a les dues temperatures donades.

Per poder calcular la temperatura efectiva es poden utilitzar les següents equacions:

Pressió entre grans de sorra:

$$s_i = \frac{N_i}{S} \quad (\text{Ec. 8.19})$$

Pressió total:

$$s_i = \frac{N}{S} \quad (\text{Ec. 8.20})$$

Per tant, per saber la pressió efectiva, es fa el següent desenvolupament:

$$s' = s$$

$$N = u(S - s) + N_i$$

$$s_i = s - u \left(1 - \frac{s}{S} \right)$$

$$\frac{s}{S} \approx 0$$

$$s_i = s - u$$

$$s' = s - u \quad (\text{Ec. 8.21})$$

Els forats en els sòls tenen una amplada variable i es comuniquen entre sí formant un enreixat. En el moment en el que aquest enreixat comunica amb aigua la seva part inferior se satura completament. Més amunt l'aigua només ocupa els forats petits, mentre que els més grans queden plens d'aire.

A la figura 8.4. es mostra el procés d'ascensió de l'aigua pels porus de la sorra:



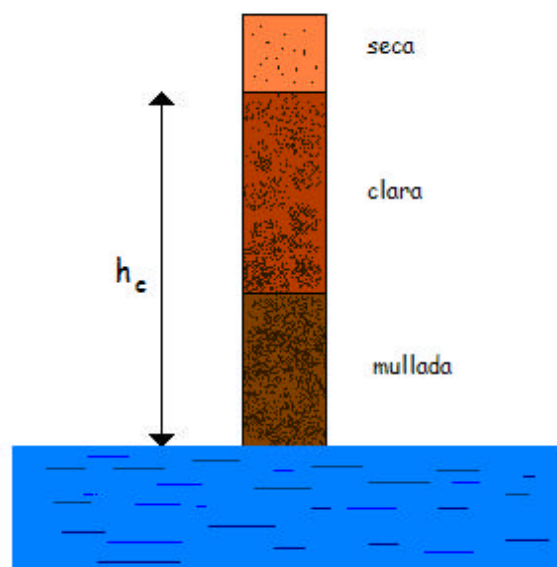


Fig. 8.4. Estat de la sorra en un procés d'ascensió capilar d'aigua

L'aigua que hi ha sobre el nivell freàtic està a pressió inferior a la atmosfèrica, és a dir, a una pressió relativa negativa.



En les zones on hi ha aigua, aquesta forma una "panxa" que, en els casos en els que toca amb els grans de sorra, les forces capilars actuen causant pressions granulars en els espais de sòl que tendeixen a comprimirlos (Fig. 8.5.). És l'anomenada pressió capilar.

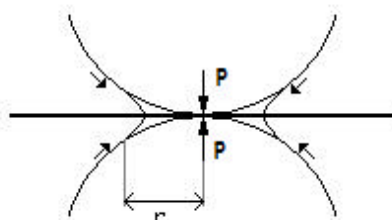


Fig. 8.5. Forces que es donen en el contacte de l'aigua

Aquesta pressió dóna resistència al tall dels sòls fent-los més consistents. En canvi, si submergim el sòl en aigua, desapareixen aquestes pressions donat que la resistència de tracció es fa molt elevada.

S'anomena succió al procés que es dóna per la diferència entre la pressió d'aire i la de l'aigua (u_w). La succió decreix al augmentar la humitat. Malgrat això, la succió és major quan un sòl passa de ser humit a ser sec que no pas a la inversa.

8.3. Disseny i dimensionat de la unitat

Un cop clar el mecanisme segons el qual treballa l'aqüífer, és més fàcil parlar del disseny d'aquest. La forma que tindrà el tanc en el seu conjunt serà la d'un prisma de bases rectangulars amb cares laterals també rectangulars. Per determinar la forma global, primer s'ha estudiat la que ha de tenir la caixa interna (la que conté la sorra). El que es pretén es aconseguir una maqueta que emuli un volum de terreny real. La figura més senzilla, en quant a construcció és la d'un prisma. L'àrea de les parets d'aquest està relacionada amb diversos aspectes:

1. Temps de residència de les partícules d'aigua. El temps que ha de romandre l'aigua dins el tanc és un paràmetre que depèn, entre altres coses, del tamany que tingui aquest tanc. Mentres més gran sigui el tanc (i, per tant, més gran la superfície de paret), més temps trigarà el líquid en anar des de l'inici fins el final de l'aqüífer. El pas de l'aigua per l'interior del sistema ha de ser lent per dos motius: el primer és que ha de simular un procés real en el que la renovació de l'aigua es fa a una velocitat molt baixa, el segon és que la sorra actua de paret permeable, impeding que el líquid la travessi en poc temps.

2. Pes del tanc. La massa del conjunt ha sigut un factor determinant per la realització



d'aquest projecte. El sistema en sí està pensat per tenir el tamany suficient com per evitar l'efecte paret i per poder visualitzar-se correctament l'evolució del procés. A tractar-se d'un tanc ple de sorra i aigua el pes d'aquest augmenta molt ràpidament a mesura que es fa un conjunt voluminós. A més, aquest pes queda concentrat en una superfície relativament petita. D'aquesta manera es converteix en un factor limitant ja que ha de tenir certa mobilitat (s'ha de poder aixecar amb una transpalet, és a dir, un instrument d'ús manual que està dotat de forquetes i eleva la càrrega uns centímetres per tal de moure-la d'un lloc a un altre, i té una distància màxima entre forquetes de 12 a 15 dm) i ha de ser suportat per sòl de l'edifici en el que reposi.

3. Volum del tanc. Interessa que el volum total no sigui excessivament petit ja que si no, és més difícil precisar en els estudis; un volum petit implica proximitat entre els pous, forats més petits, etc., és a dir, la simulació dista encara més del procés real. Per una altra banda, tampoc es pot tenir un volum molt gran ja que l'espai de treball és limitat. A més, un volum elevat implica, també, un augment en els costos.

4. Gruix de les parets. Pel nostre cas, la superfície de paret no depèn del gruix sino a la inversa, però igualment, són directament dependents l'un de l'altre. En funció de quina sigui la superfície de les parets, hi haurà un volum de sorra a l'interior o un altre. Aquesta sorra realitza una força cap a l'exterior i aquesta força és contrarrestada per la resistència de les parets. El gruix de les parets farà que la reposta de la paret a la força que realitza la sorra sigui més o menys eficient. Els càlculs realitzats per obtenir el gruix mínim necessari per resistir queden indicats més endavant.

5. Distància necessària per evitar l'efecte paret. En cas de situar els pous propers a els límits de la caixa es produiria aquest efecte. Per exemple, en el cas del pou on s'injecta l'aigua calenta, les partícules de líquid es filtrarien per la sorra i rebotarien o es concentrarien a prop de la paret, falsejant així els resultats de la distribució de temperatures. També es donarien resultats erronis en les proximitats del pou d'extracció.

L'aqüífer estarà compost per tres caixes en que quedaran unides per dos parets oposades de la caixa del mig. Hi ha un forat a la base de cadascuna de les caixes laterals de manera que es puguin buidar ràpidament. Per una altra banda, als laterals del tanc hi ha uns forats per col·locar-hi unes barres per facilitar el seu transport de manera ràpida.

Les parets que separen la caixa del mig amb les laterals no aniran soldades, sino que se subjectaran gràcies a la pressió que fa la sorra cap a fora i a unes pestanyes d'acer col·locades per subjectarles. Les pestanyes tindran enganxada una tira de goma per donar estanqueïtat al sistema. Això es fa per facilitar la retirada de les parets separadores en cas de necessitat.



A continuació es citarà el mètode utilitzat per conèixer les dimensions en les que es fabricarà l'estructura externa o closca del simulador. Així doncs, s'han seguit els punts comentats en l'apartat anterior per conèixer la longitud de les parets laterals. A partir d'aquesta longitud s'ha estimat el tamany de les altres parets de l'estructura tenint en compte que el volum no fos excessivament elevat per tal de no sobrecarregar el terra on reposarà el circuit i per fer més fàcil el seu transport.

Pel que fa a les mesures de l'aqüífer, s'han pensat unes per tal de no ocupar un volum excessivament gran ja que comportaria un elevat pes ni suficientment petit com per fer-se difícil la seva manipulació i estudi. Pensat això les dimensions són les que figuren a la Fig. 8.6.

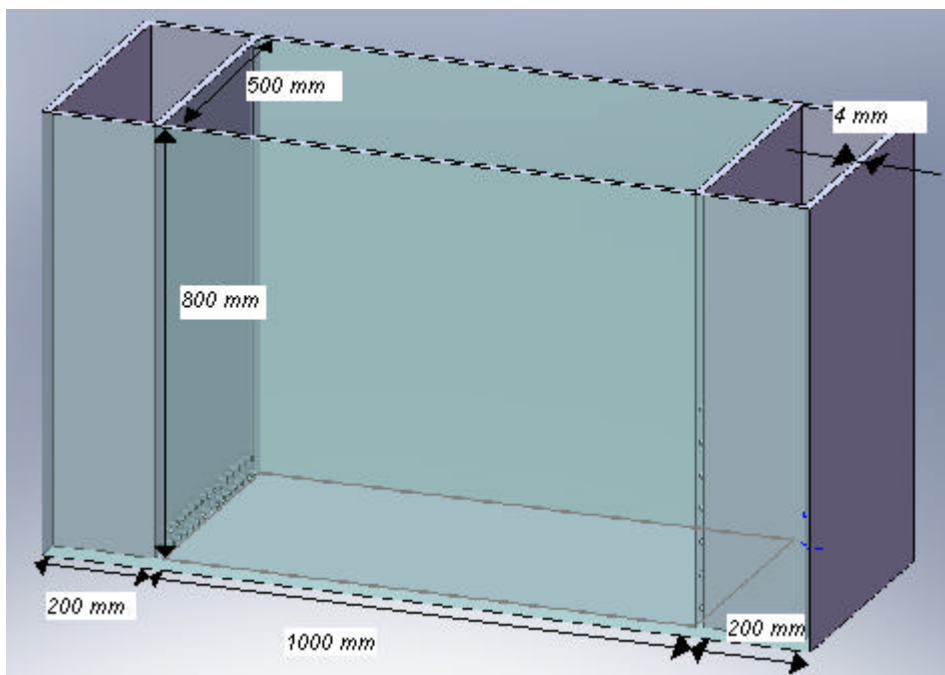


Fig. 8.6. Representació de la carcassa exterior del muntatge de l'aqüífer

Per tant, coneixent la forma i el tamany de l'aqüífer, s'ha de plantejar el volum que han d'ocupar la sorra i l'aigua als respectius dipòsits. El dipòsit del mig no estarà ple del tot, sino que tindrà sorra (saturada a la part inferior i sense saturar a la més superior) fins una alçada de 700 mm. Això implica que el seu volum serà:

$$V_1 = 1 \cdot 0,7 \cdot 0,5 = 0,35 m^3$$

Per una altra banda, els dipòsits laterals tindran un volum diferent entre sí d'aigua. El d'entrada tindrà aigua a un nivell constant de 450 mm, mentre que el de sortida es vol mantenir sobre els 350 mm. Així doncs, els volums que ocuparan als dipòsits laterals



seràn, respectivament, els següents:

$$V_2 = 0,2 \cdot 0,45 \cdot 0,5 = 0,045m^3$$

$$V_3 = 0,2 \cdot 0,35 \cdot 0,5 = 0,035m^3$$

El control del nivell d'aigua per cadascun d'aquests dipòsits es fa de manera diferent. En el dipòsit d'entrada la regulació de la cota d'aigua es fa mitjançant l'ús d'un recipient auxiliar comunicat al primer per un tub. El recipient auxiliar tindrà el nivell d'aigua que volem pel dipòsit d'entrada de l'aquífer i, com que estan connectats, tots dos tindran el mateix nivell. El dipòsit de sortida manté el nivell gràcies a la regulació de cabal des d'una bomba. Es fa que la bomba treballi a unes revolucions adequades per mantenir el nivell de sortida a 350 mm. Les dades de volum ens permeten conèixer la càrrega interna del tanc. La densitat real de l'aigua a 15 °C i 1 atm és de 0,9991 g/cm³ i la densitat aparent de la sorra de 1,4500 g/cm³:

$$Aigua : (0,045 + 0,035)m^3 \cdot \frac{999,09kg}{1m^3} = 79,9kg$$

$$Sorra : 0,35m^3 \cdot \frac{1450kg}{1m^3} = 507,5kg$$

A més, si tenim en compte la porositat de la sorra, podem obtenir la quantitat d'aigua que hi haurà en els seus intersticis quan estigui saturada. L'evolució de l'aigua en el seu pas per la sorra és descendent, fent una corba. Malgrat això, es pot conèixer el volum d'aigua que hi ha al dipòsit central fent una senzilla simplificació; si la cota més alta d'aigua dins la sorra és de 450mm i la més baixa de 350mm i la corba descendent és regular, el volum d'aigua serà el mateix que si tant la cota màxima com la mínima fossin de 400mm. El volum contingut fins aquest nivell és de 0,4x0,5x1, és a dir, 0,2 m³. Si la porositat de la sorra és de 0,4, el volum d'aigua que hi cap és de 0,08m³; i per tant un pes d'aproximadament 80 kg. És cert que, per capilaritat, una part de l'aigua puja pels intersticis de la sorra fins a una cota superior a la suposada.

Un cop definit el volum de la carcassa, és necessari determinar el gruix de les parets d'aquesta. Això és important perquè l'estructura romandrà sotmesa a grans pressions exercides pel contingut d'aquesta. L'important volum de sorra i aigua tendeix a fer força lateral i verticalment per un efecte natural. La pròpia gravetat és la que fa que tant el líquid com la sorra pressionin per acabar en un estat d'equilibri estable. Per tant, són el gruix i el material de la paret les propietats que determinaran a partir de quin punt aquesta és útil per contenir les quantitats de sòlid i líquid determinades.



No és complicat seleccionar un material que pugui suportar les pressions. De fet, amb un gruix suficient, tots els materials poden donar bons resultats. Malgrat això, s'ha de tenir en compte que no interessa fer servir un gruix molt elevat per qüestions de pes, de volum i de dificultat en el mecanitzat. A part, també s'ha de valorar altres propietats físiques del material, com poden ser la ductilitat, facilitat per la degradació o l'oxidació, etc. La ductilitat és un factor força important degut a que les peces s'han de manipular fent-hi diferents talls per obtenir la forma desitjada (per exemple, s'han de perforar per aconseguir el pas de l'aigua). En quant a la capacitat per degradar-se o la resistència a la corrosió, són factors que, tot i no ser determinants per la construcció, sí que ho són si es vol aconseguir una llarga vida del sistema. Per sort, a l'interior del circuit no hi circulen fluids àcids, ni clorats ni especialment corrosius. De fet, l'aigua que hi passa és desionitzada per evitar problemes de calcificació a la bomba que impulsa el fluid.

Els materials plàstics comporten certs problemes si es volen fer servir en la construcció de l'estructura. La majoria no són suficientment resistents si es vol fer servir un gruix de paret relativament petit. En canvi, existeix la opció de fer la construcció en algun material plàstic d'elevada resistència (PMMA, policarbonat, etc) i reforçar les zones que estiguin sotmeses a una major pressió fent servir un metall. El problema que es dona amb polímers com el polimetilmetacrilat o el policarbonat és la seva escassa ductilitat. Aquestes parets s'han de foradar, tallar, etc i, en aquests processos, existeix el risc d'esquerdament del material. A més, aquests plàstics tenen un cost econòmic especialment elevat.

Per tant, s'ha considerat que una bona opció és la construcció en acer. S'ha escollit un acer inoxidable donades les propietats mecàniques que tenen, la seva universalitat, el seu preu i la resistència que presenten a la corrosió. És ben cert que no existeix cap metall que tingui una resistència a la corrosió infinita, però és important evitar la degradació el màxim possible per tal de garantir que aguantí en bones condicions un temps considerable. L'acer escollit seria un 304 2B degut el seu baix preu. El fet de ser de tipus 2B fa referència a l'acabat; és a dir, un 2B és un acer sense polir. No s'ha considerat necessari que estigués polit ja que es creu que els únics avantatges que presentaria serien estètics.

El gruix que es necessita amb un metall per resistir les pressions és, generalment, inferior a la de qualsevol plàstic. A continuació es detallen els càlculs realitzats per conèixer el gruix de paret que s'ha considerat addient per assegurar que no es trenqui l'estructura.

Com s'ha comentat en altres apartats, l'estructura està formada per tres compartiments: un ple de sorra i els altres dos d'aigua. Donada la densitat de la sorra i el volum que aquesta ocupa a l'estructura, queda clar que el recipient que més pateix és el que la conté. És ben cert que els recipients d'aigua exerceixen una pressió sobre les parets



separadores aigua/sorra que equilibra en part la força que fa la sorra cap a fora. Tot i això, per fer els càlculs i obtenir unes dades sobredimensionades (per tal d'assegurar-nos que l'estructura no es trenqui) s'ha considerat la pressió que exerceix la sorra cap a fora suposant que no hi ha cap dipòsit d'aigua que la contrarresti. És a dir, s'ha estudiat el sistema com si l'únic dipòsit existent fos el del mig. Tenint en compte aquesta consideració, la nostra estructura serà com la d'una caixa oberta per dalt (Fig. 8.7.).

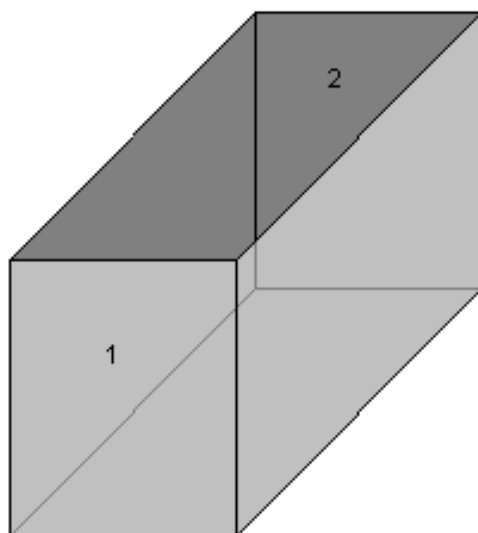


Fig. 8.7. Representació de l'aqüífer tenint en compte que les cares laterals actuen com a reforçants

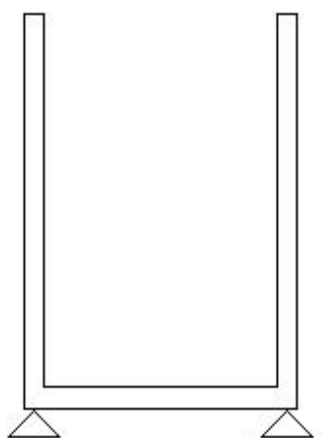


Fig. 8.8. Esquema de barres per al càlcul de càrrega que rep la carcassa de l'aqüífer



Per tant, considerarem que l'estructura de barres a estudiar és com la que es veu a la figura 8.8, però s'ha de tenir en compte que les parets 1 i 2 de la figura 8.7 reforcen aquestes barres. A la figura 8.9. es veu una fotografia d'una d'aquestes parets que actuen com a reforç. A més, com es pot observar la part que pateix més és la placa inferior; però si tenim en compte que l'estructura reposarà sobre un palet, els punts que més pateixen són els més inferiors de les parets laterals ja que han de suportar tot el pes i, a més, es troben en zones crítiques (unió entre parets). Si ens fixem en un punt de les parets laterals a una alçada infinitesimal, la càrrega que ha d'aguantar és la mateixa que la de la paret inferior. Sabent això i fent servir les equacions proposades al llibre "Hormigón Armado" [11], es pot fer servir la següent fórmula per calcular el moment màxim exercit per la sorra:

on M és el moment, q és la càrrega que suporta l'estructura en N/mm, l_y és l'alçada de les plaques laterals i 47 i 0,001 són unes constants proposades pels autors que representen el reforç que fan les parets 1 i 2.

$$M = 47 \cdot 0,001 \cdot q \cdot l^2 \qquad \text{(Ec. 8.22)}$$





Fig. 8.9. Les parets que separen la caixa interior de les lateral actuen com a reforç

Per tant, és necessari conèixer el valor de la càrrega q . Fent un factor de conversió, sabent que la densitat del conjunt sorra + aigua és de 1850 kg/m^3 (en un volum de 100ml caben 145 g de sorra, amb una porositat de 0,4, i la densitat de l'aigua és de 1g/cm^3):

$$1850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{9,8\text{N}}{1\text{kg}} \cdot \frac{1\text{m}^3}{10^9\text{mm}^3} = 18,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{mm}^3}$$

Aleshores, s'ha d'estudiar la forma que té el diagrama de forces (Fig. 8.10.) i calcularem el moment que es fa per una secció d'1 mm de la placa inferior (Fig. 8.11.) suposant que la caixa està plena fins dalt, per sobredimensionar.



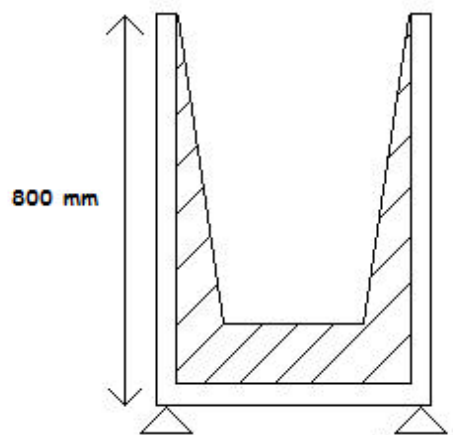


Fig. 8.10. Diagrama de forces del sistema

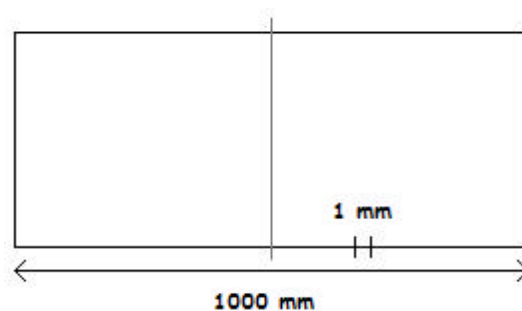


Fig. 8.11. Vista inferior de la caixa central de l'aqüífer

$$18,1 \cdot 10^{-6} \frac{N}{mm^3} \cdot 1mm = 18,1 \cdot 10^{-6} \frac{N}{mm^2}$$

$$q = 18,1 \cdot 10^{-6} \frac{N}{mm^2} \cdot 800mm = 0,0145 \frac{N}{mm}$$

Un cop coneguda la càrrega es pot calcular el moment.

$$M = 47 \cdot 0,001 \cdot 0,0145 \cdot 800^2 = 435,56N \cdot mm$$

El moment i l'espessor de les parets es poden relacionar amb la tensió del límit elàstic mitjançant l'equació 8.23:



$$\frac{M}{\frac{1}{4} \cdot x \cdot e^2} \leq \frac{f_y}{g_s} \quad (\text{Ec. 8.23})$$

on x és la profunditat de la placa inferior, e és el gruix, f_y la tensió de límit elàstic i g_s el coeficient de seguretat.

La tensió de límit elàstic per un acer AISI 304 és de 3100 kg/cm², és a dir, 310 N/mm². Per una altra banda s'ha considerat un coeficient de seguretat de 2,5. D'aquesta manera ens assegurem que l'estructura resisteixi la pressió sobradament. En el cas més extrem, la fórmula anterior es converteix en una igualtat:

$$\frac{435,56}{\frac{1}{4} \cdot 1 \cdot e^2} = \frac{310}{2,5}$$

$$e = 3,75\text{mm} \Rightarrow 4\text{mm}$$

Així doncs, l'estructura es construeix en acer inoxidable AISI 304 2B de gruix 4mm. La densitat de l'acer AISI 304 és de 7930 kg/m³. A continuació es mostra el càlcul del volum de les diferents peces que formen l'estructura metàl·lica i la massa que tenen en el seu conjunt:

$$V_{\frac{1}{2}} = 1 \cdot 0,8 \cdot 0,004 = 0,0032\text{m}^3$$

$$V_{\frac{3}{4}} = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,004 = 0,0016\text{m}^3$$

$$V_5 = 1 \cdot 0,5 \cdot 0,004 = 0,002\text{m}^3$$

$$V_{\frac{6}{7}} = 0,2 \cdot 0,8 \cdot 0,004 = 0,00064\text{m}^3$$

$$V_8 = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,004 = 0,0016\text{m}^3$$

$$V_9 = 0,2 \cdot 0,5 \cdot 0,004 = 0,0004\text{m}^3$$

$$V_{total} = 2 \cdot V_{\frac{1}{2}} + 2 \cdot V_{\frac{3}{4}} + V_5 + 4 \cdot V_{\frac{6}{7}} + 2 \cdot V_8 + 2 \cdot V_9 = 0,01816\text{m}^3$$

$$Massa = V_{total} \cdot \rho_{AISI304} = 0,01816 \cdot 7930 = 144,01\text{kg}$$

El conjunt dels tres dipòsits ja ha quedat ben definit. Coneixem totes les dimensions de les parets que formen el tanc. Això permet, per una altra banda, calcular la velocitat de pas de l'aigua a través d'aquest. Per fer-ho s'ha de fer servir la fórmula que proposa Henry Darcy per a sòls saturats de líquid i que s'ha comentat anteriorment. Per poder utilitzar-la



necessitem el valor de la constant de permeabilitat del nostre sòl. Tenint en compte que es tracta d'una sorra amb un diàmetre de partícula en un rang entre 0,25 i 0,3 mm, podem estimar una constant K de $3,3 \cdot 10^{-3}$ cm/s. Farem servir l'equació 7.12.

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

$$A = 0,45 \cdot 0,5 = 0,225m^2$$

$$Q = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,225 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{0,45 - 0,35}{\sqrt{1^2 + (0,45 - 0,35)^2}} \right)$$

$$Q = 0,74 \frac{cm^3}{s}$$

És a dir, el cabal és de 0,0445 l/min. Per una altra banda, fent la simplificació de que l'aigua que hi ha en moviment no sobrepassa la cota dels 0,4 m, el volum que travessa el líquid és el següent:

$$V = 0,4 \cdot 1 \cdot 0,5 = 0,2m^3$$

Així doncs, el temps que tarda una partícula d'aigua en travessar l'aqüífer és:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{0,2 \cdot 10^6}{5,03 \cdot 3600} = 75,08h$$

El cabal de líquid quedarà controlat per una bomba situada abans del dipòsit d'entrada. Al dipòsit del mig hi ha dos pous situats de manera que disten entre ells 50 cm i que quedin separats suficientment de les parets per evitar l'efecte rebot amb aquestes. En un dels pous (el més proper al dipòsit d'entrada) es filtrarà aigua provinent de la humitat de la sorra. Aquesta aigua estarà a temperatura ambient. El líquid del pou serà impulsat mitjançant una bomba cap a un calefactor que l'escalfarà un ΔT . El valor ΔT d'aquest variarà per les diferents proves a realitzar. L'aigua ja escalfada baixarà a la sorra a través de l'altre pou, de manera que un cop dins d'aquest es filtrarà per uns forats cap a la sorra. Com s'havia comentat en punts anteriors, això comportaria un augment de la temperatura del sistema fins arribar a un estat estacionari. Per evitar això i fer que l'aigua d'entrada sigui sempre l'ambiental s'incorporarà al sistema un refrigerador al sistema que es col·locarà a l'entrada del tanc. S'ha fet un dibuix de l'aspecte que es volia aconseguir de l'aqüífer, és el de la figura 8.12.



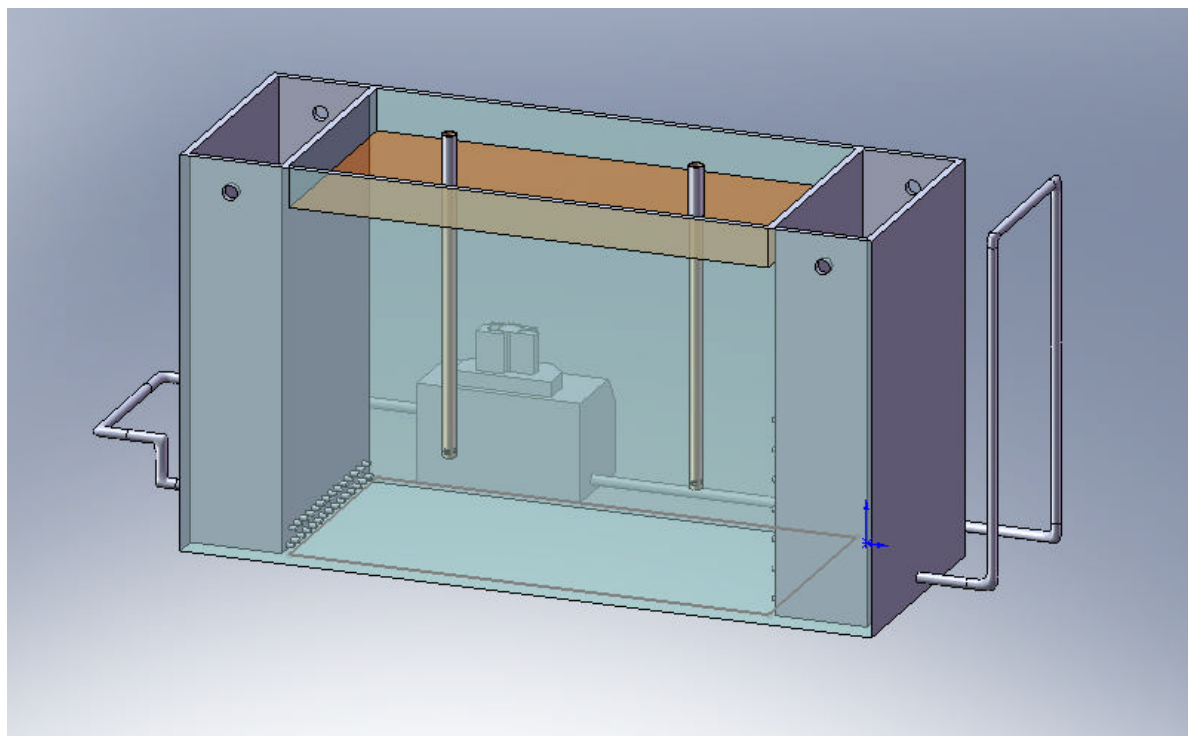


Fig. 8.12. Aspecte teòric de l'aqüífer

Els tubs amb els que es faran les el transport de líquid a l'exterior del tanc seràn polimèrics per facilitar la seva manipulació (Fig. 8.13.). El conjunt de l'aqüífer reposarà sobre un palet de plàstic capaç de suportar el pes. Es fa servir aquest palet per si fos necessari transportar l'aqüífer utilitzant una màquina elevadora.



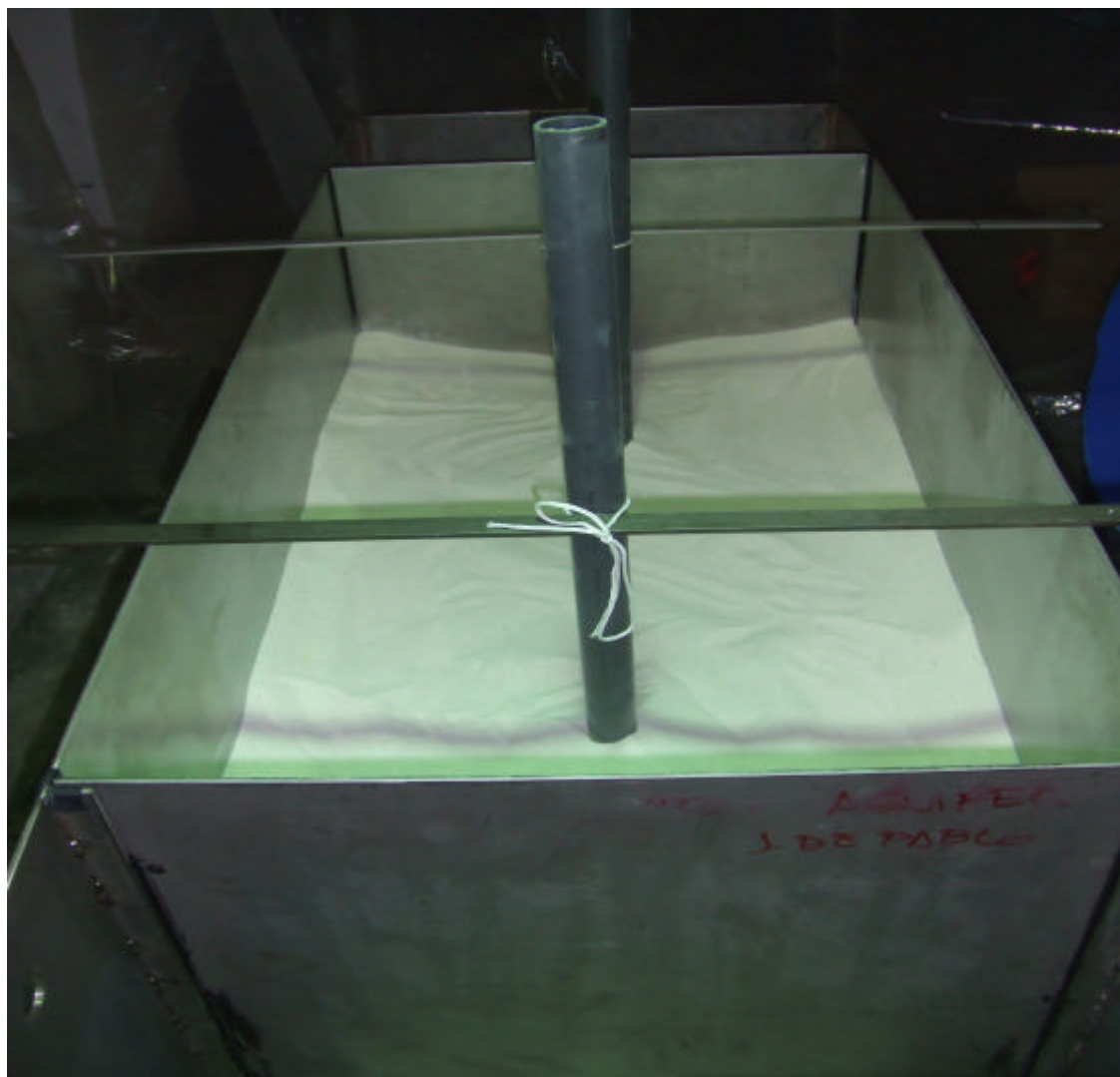


Fig. 8.13. Pous d'extracció i injecció d'aigua.

El transport d'aigua per la part externa al dipòsit es fa mitjançant tubs de PVC i de silicona. Els tubs de PVC tenen un diàmetre interior de 3mm donat que amb aquesta mida és fàcil treballar amb el mateix cabal que el que es dona de manera lliure dins la sorra. Aquests tubs es fan servir pel transport de l'aigua fora de la bomba. Els tubs de silicona tenen un diàmetre interior de 4mm i són l'eina de treball de la bomba. Es tracta d'una bomba peristàltica i el seu funcionament queda reflexat a la figura 8.14.: té un mecanisme que consisteix en el moviment d'uns coixinets que s'encarreguen de pressionar el tub de silicona, rodant sobre la superfície d'aquest per motivar així el moviment del fluid a l'interior. Els tubs amb els que treballa la bomba són de silicona perquè així són més tous



i, per tant, més fàcils de comprimir.



Fig. 8.14. Rotació de l'eix de la bomba on els coixinets (negres) pressionen el tub de silicona (marró per fora i blau a l'interior) amb la direcció de rotació marcada per la fletxa corba.

La bomba té capacitat per treballar amb dos fluxes separats i amb velocitats diferents, sense que es barregin. És per això, que un dels eixos rotatoris es fa servir per impulsar el líquid que ha d'anar des del dipòsit inicial fins a l'inici del recorregut i l'altre per passar aigua des del pou més proper a l'entrada fins el més llunyà d'aquesta. L'aspecte de la bomba s'observa a la figura 8.15.

Per aconseguir un cabal determinat a la bomba és necessari jugar amb dos factors; un és el diàmetre del tub de silicona que comprimeix i descomprimeix la bomba. Quan més gran sigui el diàmetre interior d'aquests, més cabal s'impulsarà. L'altre fet que hi influeix és la velocitat de rotació de la bomba. L'eix unit als coixinets té una velocitat regulable, de manera que a més velocitat d'aquest, major cabal transportarà el tub. Pel cabal que es necessita per transportar l'aigua des de la sortida de l'aqüífer fins l'entrada s'ha d'ajustar la bomba al programa 9,1 (la màquina ofereix un rang des del 0,1 fins el 10,0).





Fig. 8.15. Bomba de dos canals

Així doncs, existeixen dos canals formats per tubs de PVC i de silicona que transporten aigua gràcies a la bomba. A continuació es detalla com s'ha dissenyat cadascun d'aquests circuits:

- El primer és el circuit encarregat de fer que l'aigua passi des del dipòsit de sortida de l'aqüífer fins el dipòsit d'entrada. El primer que es troba l'aigua a la sortida és la mateixa bomba, que succiona l'aigua del dipòsit; aquesta és enviada a un dipòsit auxiliar que serveix per mantenir el nivell d'aigua del dipòsit d'entrada a uns 45 cm d'alçada. El mecanisme per aconseguir aquesta cota és ben senzill. A l'interior del dipòsit auxiliar hi ha instal·lat una vàlvula de boia com la de la figura 8.16. Aquesta queda flotant dins l'aigua i quan l'aigua puja fins el nivell que s'estableix com a màxim, es tanca l'accés de líquid.



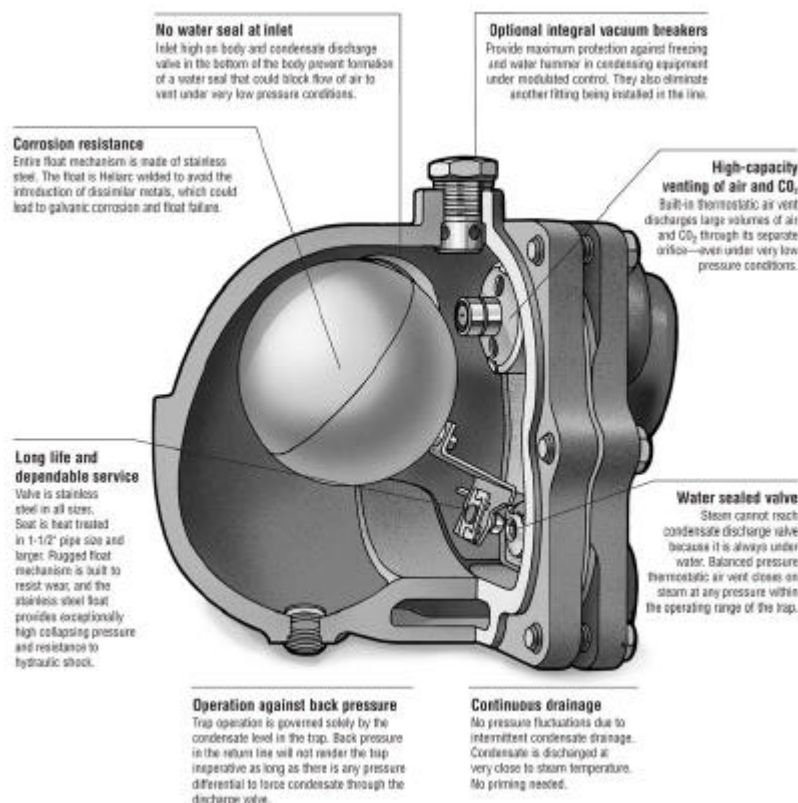


Fig. 8.16. Detall d'una vàlvula de boia

Finalment, l'aigua surt del dipòsit auxiliar per un orifici situat a 5 centímetres de la base i és conduïda, mitjançant un tub de PVC al dipòsit d'entrada de l'aqüífer. El dipòsit auxiliar té, a més, una altra funció: és aquí on es refrigera l'aigua per tal de que aquesta estigui a temperatura ambient (prèviament s'ha escalfat una mica per l'efecte de l'entrada d'aigua calenta a un dels pous). Es fa servir una resistència que treballa amb un cicle Brayton invers i l'aigua s'agita amb un petit agitador per tal de que la temperatura quedi homogènia a tot el recipient.

- L'altre via de pas de l'aigua es dona per passar del pou d'entrada al pou de sortida. La funció d'aquesta operació de traspàs és la d'escalfar l'aigua en un punt mig per simular l'intercanvi de calor que es donaria a un edifici al passar aigua freda pels seus radiadors. L'aigua s'extreu del pou més proper al dipòsit d'entrada i és enviat a un dipòsit rectangular de plàstic. És aquí on s'escalfarà l'aigua gràcies a l'acció d'un termòstat analògic. Aquest, a més, s'encarrega d'agitar l'aigua per mantenir la temperatura uniforme. Finalment, l'aigua surt per l'extrem oposat a l'entrada i, gràcies a l'acció de la bomba, és impulsada al pou d'entrada de l'aqüífer. Per controlar que la temperatura a la base del pou sigui la que es desitja es col·loca un termoparell a



l'interior d'aquest. Així doncs, l'aigua ja escalfada arriba a aquest pou després de passar per la bomba. El pou no té tap a la base; només la té recoberta d'una malla amb forats suficientment petits com per deixar passar l'aigua però no la sorra.

Per aconseguir una total estanqueïtat en els punts més crítics (unions entre tubs, unions entre les plaques foradades interiors de l'aqüífer i la carcassa exterior, entrades i sortides dels dipòsits i, sobretot, entrada i sortida del matrau) s'ha fet servir teflón i silicona principalment. Per les zones en les que era necessària la unió entre dos components de PVC s'ha utilitzat PVC líquid. En les unions entre plaques d'acer no soldades també s'ha utilitzat perfils de cautxú. Finalment, en zones puntuals que necessitaven una unió especialment robusta s'ha fet servir cola de contacte.

Per aconseguir una elevada puresa en el procés s'ha acondicionat la zona de treball amb un rafal amb les parets cobertes per una tel·la de plàstic. A més es treballa amb l'aqüífer, el dipòsit auxiliar i l'entrada dels pous tapats per una pel·lícula de plàstic. L'aigua emprada és desionitzada i la sorra és SiO_2 de mar rentada, amb un diàmetre de partícula que varia entre 0,25 i 0,3 mm. Es fa servir una malla que actua com a filtre a l'entrada del tub connectat al dipòsit de sortida per evitar que qualsevol impuresa passi a través dels tubs de PVC i silicona i els obstrueixin.

8.4. Obtenció de dades

El simulador ha de mesurar dos tipus de magnituds diferents. Una és la temperatura de l'aigua i l'altre és el cabal. La temperatura ha de ser mesurada a diferents punts de la sorra col·locats estratègicament per tal de poder obtenir un bon control sobre la distribució d'aquesta en l'aigua que hi ha al tanc. Es faran servir unes termoresistències per dur aquesta tasca a terme. A part de mesurar la temperatura a la sorra també es pretén conèixer el valor d'aquesta a l'aigua que hi ha als pous, per tal de poder mantenir un ΔT addient. Per una altra banda, també és necessari el càlcul del cabal que es transfereix per filtració a la sorra des del primer dipòsit fins el de sortida, per tal de conèixer la velocitat a la que es mou l'aigua dins el sistema. La mesura d'aquesta velocitat permet saber també amb quina velocitat haurà de ser recirculada l'aigua des del final del circuit fins a l'inici, ja que per evitar acumulacions s'impulsarà el mateix cabal amb l'ús d'una bomba. La mesura de cabal és senzilla de realitzar ja que només necessita fer una recollida d'un volum d'aigua al final del sistema i mesurar el temps que hi transcorre. Tot i això, el sistema està preparat per la incorporació de cabalímetres.

La informació que capten termoresistències és enviada a unes targetes d'adquisició de dades que canvien el tipus de senyal. Les entrades de la tarja són analògiques i cada tarja compta amb 4 entrades. Es treballa amb 10 termoresistències, de manera que són



necessaries tres targetes que poden treballar en paral·lel. Dos de les targetes accepten únicament entrades de termoresistències tipus Pt-100, mentre que l'altre té les quatre entrades analògiques de 0-10 V i 0-40 mA. Es fa servir una tarja diferent per poder dotar el sistema de la incorporació de cabalímetres i visualitzar els resultats a un ordinador. A més, aquesta última tarja accepta també l'entrada de dades des d'un termoparell, de manera que, en l'actualitat només s'hi connectaran dos mesuradors de temperatura.

Les targetes reben la senyal des dels aparells de mesura i l'envien a un convertidor comú a totes aquestes. El convertidor fa la transformació de senyal analògica a digital. Aquesta conversió facilita la interpretació des d'un *software* específic que permet la visualització de les dades i el tractament d'aquestes, així com la realització de gràfics i estudis pel posterior estudi amb el pas del temps.

Les termoresistències, també anomenades RTD són uns sensors de temperatura resistius. Això significa que aprofiten l'efecte de la temperatura en la conducció d'electrons, de manera que es doni un augment en la resistència elèctrica, quan s'incrementi la temperatura. Aquest augment en la resistència ve expressat per:

$$R = R_0 \left(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 - 100 \cdot C \cdot T^3 + D \cdot T^4 \right)$$

on R és la resistència a la temperatura mesurada, R_0 és la resistència a 0°C, T és la temperatura i A, B, C i D són unes constants que depenen del material.

Els sensors termoresistents van, generalment, associats a muntatges elèctrics com els Ponts de Wheatstone. Aquests responen amb variacions a la resistència elèctrica com a conseqüència de un canvi en la temperatura i produeixen una senyal analògica de 4-20 mA. Aquest tipus de senyal és la més habitual pel control mitjançant targetes d'adquisició.

Els tipus de RTD més comuns són les de platí (Pt100 i PT1000). Es diuen així ja que estan construïts en platí i presenten una resistència de 100 Ohms o 1000 Ohms a 0°C, respectivament. Donat que tenen un comportament pràcticament linial en un gran rang de temperatures, se sol expressar la seva variació en la resistència com:

$$R = R_0 \left(1 + \alpha (T^a - T_0^a) \right)$$

on T_0^a és una temperatura de referència i R_0 és la resistència a aquesta temperatura.



9. Proves i resultats

Aquest projecte es dedica, principalment, a la tasca de disseny i construcció d'un aqüífer que representi un sistema de refrigeració geotèrmic. Així doncs, s'han realitzat 3 proves per comprovar el correcte funcionament del sistema, demostrar que la temperatura segueix una evolució lògica i estudiar els resultats difícils de pronosticar. L'estudi de la temperatura en aquests tres assajos s'ha realitzat en dos dimensions, és a dir, les temperatures s'han mesurat sobre un pla horitzontal situat a 10 centímetres de la base de l'aqüífer, de manera que coincideixen en altura la punta de les sondes i la base inferior dels pous. S'ha escollit aquest pla perquè és el més crític ja que sobre aquesta alçada caurà l'aigua calenta que entra al pou d'injecció.

És important tenir en compte que algunes de les proves es realitzen en un interval de temps considerable. Durant aquest temps, la temperatura ambiental varia i, en conseqüència, la de l'aigua també. Això influeix en els resultats dels experiments ja que l'estabilitat total de temperatura mesurada per les sondes no s'assoleix mai. Per saber fins quin punt afecta aquesta variació a l'aqüífer es fan mesures de temperatura en un dipòsit d'aigua aliè al sistema.

9.1. Primera prova

La primera prova realitzada ha sigut una experiment de reconeixement del sistema. S'ha forçat una situació que difícilment es correspondria amb un sistema real. El que s'ha realitzat d'especial en aquesta prova és el de proporcionar una injecció d'aigua al pou d'entrada amb una temperatura de 22°C per sobre de l'ambiental. Així, s'ha pogut comprovar com afecten els canvis intensos de temperatura al sistema.

Les característiques de la prova han sigut les següents:

Dia	22/04/2008
Temperatura inicial de l'aigua del dipòsit aliè al sistema	17,8°C
Pressió ambiental	1 atm
Cabal d'injecció (de pou a pou)	10 ml/min
Programa de la bomba pel circuit de pou a pou	9.40
Cabal de recirculació (de sortida de l'aqüífer a dipòsit auxiliar)	0,045 L/min
Programa de la bomba pel circuit de recirculació	10.00
Cabal d'aigua per l'interior de la sorra	0,015 L/min
Temperatura regulada al termostat	60°C



Temperatura mitja d'entrada al pou d'injecció	40°C
Règim de flux de recirculació	Estacionari
Règim de progressió de la temperatura a l'aquífer	Transitori i estacionari
Nombre de sondes	10
Diferència de nivells d'aigua del dipòsit d'entrada al de sortida	5 cm
Diferència mitja de temperatura entre pous	22,2°C
Durada de la prova	5 h 31 min

Entre les 10 sondes, s'ha col·locat una just en el pou d'extracció d'aigua i un altre en el pou d'injecció. Val a dir que la temperatura del pou d'injecció no és la pròpia temperatura d'injecció ja que a la part inferior d'aquest, es barregen el cabal d'injecció amb el cabal que circula per l'interior de l'aquífer, motiu que fa que baixi molt la temperatura. Per conèixer, doncs, la temperatura d'injecció, es mesura periòdicament (per assegurar-nos de que no hi ha fluctuacions) fent servir una proveta i un termòmetre.

És important dir que el termostat es regula a una temperatura més elevada que la desitjada d'injecció perquè en el pas pels tubs des del dipòsit de calefacció fins a l'entrada del pou es perd calor. Aquesta energia dissipada és força elevada com a motiu de la baixa velocitat del líquid per l'interior dels tubs de transport.

En aquesta prova s'ha fet circular aigua pel circuit que va des del final de l'aquífer fins a l'inici d'aquest durant 90 minuts, assegurant-nos que s'ha arribat a l'estat estacionari en el flux hidràulic. Passat aquest temps, s'ha activat el sistema d'escalfament i, un cop l'aigua del dipòsit de calefacció ha assolit la temperatura desitjada, s'ha activat el bombeig entre el pou d'extracció i el d'injecció. S'ha cregut important arribar a l'estat estacionari prèviament amb el sistema hidràulic perquè, d'aquesta manera, aconseguim una similitud important al que succeiria en un terreny real, on l'aigua que hi ha a les capes freàtiques té un moviment constant (les seves variacions serien mínimes si les comparessim amb les que es poden donar en el cabal d'aigua que va d'un pou a l'altre).

A la figura 9.1. s'observa la situació de les sondes de temperatura a la sorra de l'aquífer. Cada sonda està numerada, de manera que sigui fàcil reconèixer el progrés que fa la temperatura en cadascun dels punts on aquestes estan situades.



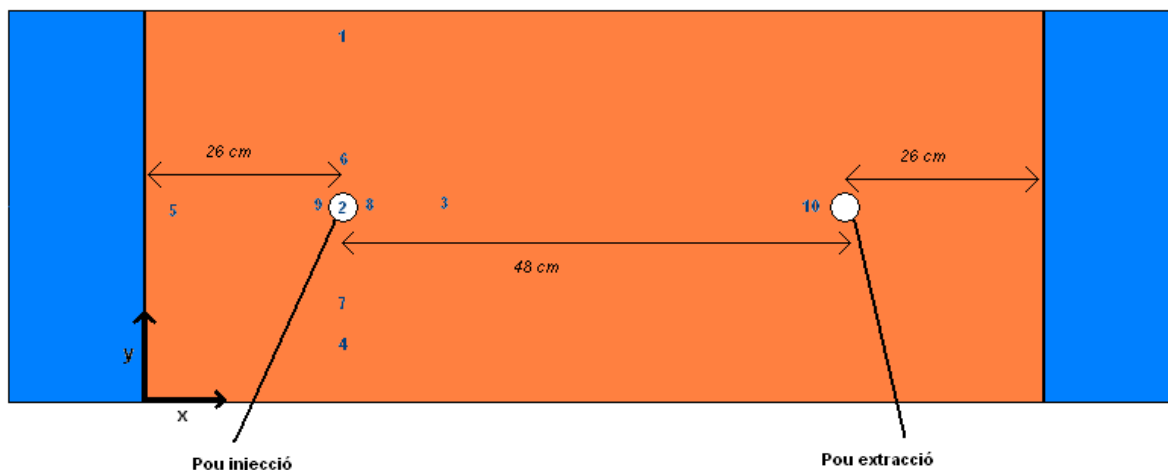


Fig. 9.1. Vista des de dalt de l'aqüífer. Cada número correspon a una termorresistència.

A continuació es detalla la distància de cada sonda al pou d'injecció (situat a l'esquerra en la figura 9.1.) i la coordenada d'aquestes prenent com a origen dels eixos x, y els que hi ha marcats a la part inferior esquerra de la figura 9.1.

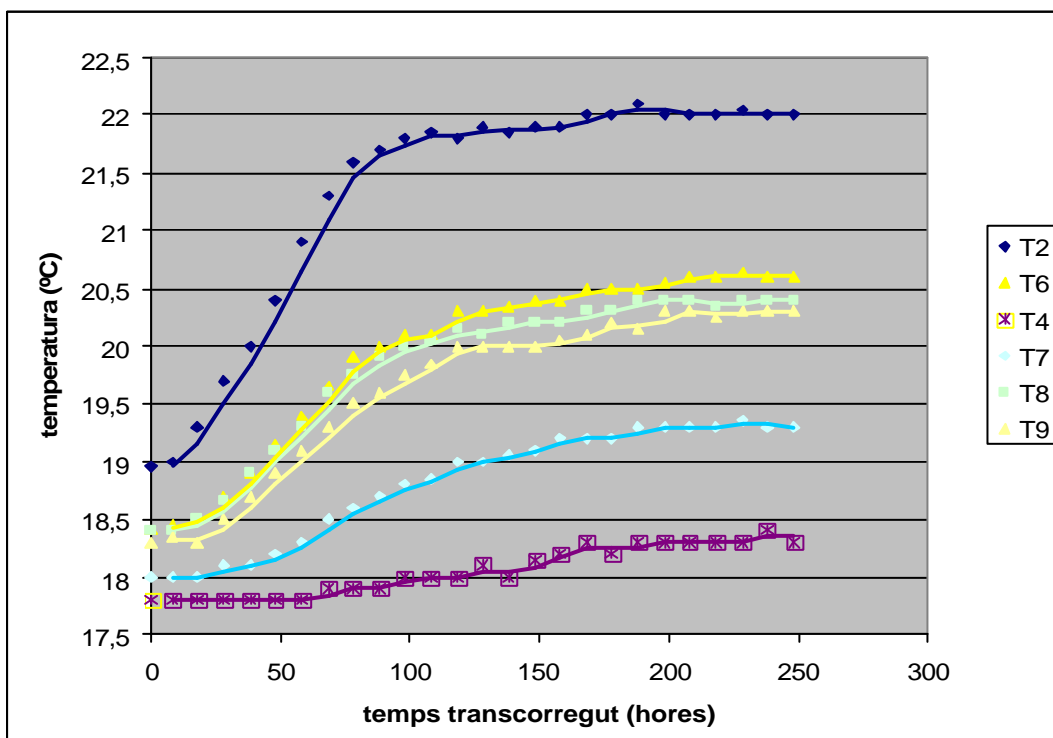
Nº de sonda	Distància centre pou injecció (cm)	Coordenada x (cm)	Coordenada y (cm)
1	18	26	43
2	0	26	25
3	17,5	43,5	25
4	15	26	10
5	17	9	25
6	5	26	30
7	9,5	26	15,5
8	4	30	25
9	4	22	25
10	44	70	25

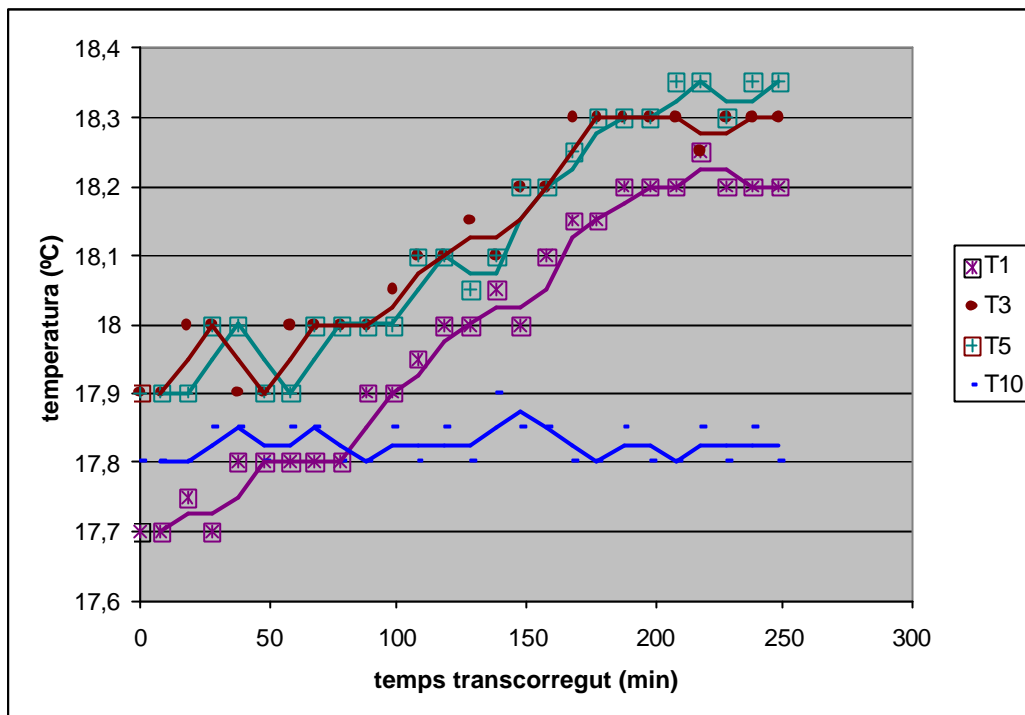
Sobre les característiques del sistema mencionades anteriorment cal destacar que l'assaig ha durat cinc hores i mitja (de 10:50 fins 16:21) però les dues últimes hores les sondes han indicat un augment molt lleu de les temperatures que coincidia amb l'augment de temperatura de l'ambient exterior. Aquest augment ha sigut de 0,5 °C com a màxim. La zona on està la sonda 2 és la que rep l'impacte d'aigua calenta primer, doncs serà també la primera en arribar a l'estat estacionari. A les figures 9.2. i 9.3. es mostra la progressió de les temperatures a l'aqüífer durant les quatre primeres hores. Es mostren en dos gràfics separats per evitar que es superposin les línies de tendència i facilitar la seva



lectura.

Fig. 9.2. Prova 1: evolució de les temperatures segons les sondes 2, 4, 6, 7, 8 i 9.





S'observa, primer de tot, que la temperatura a l'aqüífer respon amb normalitat a

Fig. 9.3. Prova 1: evolució de les temperatures segons les sondes 1, 3, 5 i 10.

l'abocament d'aigua calenta mitjançant una pujada general d'aquesta. També es veu que la sonda 2 (situada a la base del pou d'injecció) és la primera a estabilitzar-se i arribar a l'estat estacionari, com s'havia previst.

A part de la sonda 2, les més properes al pou d'injecció són la 8 i la 9. S'espera que la sonda número 9 segueixi un augment de temperatura més pronunciat que la 8 ja que, tot i estar a la mateixa distància del centre del pou d'injecció, l'aigua que es mou a través dels porus de la sorra a l'aqüífer segueix un sentit de 8 cap a 9, de manera que hauria d'emportar-se l'aigua calenta que baixa pel pou cap a 9 majoritàriament. Els resultats ens mostren que la realitat no és així. La temperatura de 8 i de 9 són, durant tot l'assaig, pràcticament iguals, però la de 8 és lleugerament més elevada sempre. Aquest fet indica que el pas d'aigua a través de la sorra és suficientment lent com per què la transferència de matèria sigui menor que la transferència de calor en punts propers al pou d'injecció. És per aquest motiu que el moviment d'aigua entre els porus de sorra no fa que la transmissió de temperatura segueixi el mateix sentit. Donat que la diferència de temperatura entre 8 i 9 és petita, podem suposar que això succeeix per haver-se fet una



diferent calibració de les sondes, tot i que l'explicació més raonable és que el degoteig d'aigua calenta cau, tot i ser dins el pou, més proper al pou 8 que al 9. Aquesta mateixa explicació es pot donar per justificar que la temperatura al punt 6 sigui major que a 8 o 9 durant tota la prova.

La sonda 7 es veu més afectada per la distància al pou, igual que 4 i 2, que no arriben als 18,5 °C. Si ens fixem en els punts 5 i 3 tornem a observar que el sentit que segueix l'aigua a l'interior de l'aquífer no és rellevant: aquests dos punts es troben, aproximadament, a la mateixa distància del pou d'injecció, però 3 es troba en el sentit contrari a la direcció de l'aigua i 5 a l'extrem oposat; malgrat això, la temperatura que mesuren ambdues sondes és pràcticament igual durant tota la prova.

La sonda 1 es troba un centímetre més allunyada del pou que la sonda 5. Això explica que la primera, tot i seguir una evolució similar, mantingui sempre una temperatura una mica inferior. És interessant destacar que donat que la sonda 1 mesura una temperatura més elevada que l'ambiental, s'està produint un efecte paret (que es volia evitar perquè a gran escala no existeix aquesta paret) ja que aquesta es troba només entre sis i vuit centímetres dels límits de l'aquífer. Tot i això, s'ha de tenir en compte que aquesta prova té com a base l'abocament d'un aigua considerablement més calenta que la que s'abocaria en condicions reals.

Finalment, la sonda més llunyana és la número 10. S'observa en els resultats que aquesta no es veu afectada de manera important per l'entrada d'aigua calenta. Pràcticament es manté constant tota l'estona (fa pujades i davallades de mig grau); és ben cert que la temperatura final que es mesura és lleugerament més elevada que la inicial, però es correspon totalment amb la pujada de temperatura mesurada a l'aigua del dipòsit exterior que té aquesta finalitat.

Donats tots aquests resultat s'afirma que l'evolució de l'augment de temperatura a l'aquífer es fa, pràcticament, de manera circular, tenint com a centre el pou d'injecció. El gran augment de temperatura aplicat a l'aigua extreta fa que s'arribi a produir un efecte paret perquè l'aigua no té temps suficient de refredar-se, abans no arribi aquesta energia en forma de calor a les partícules de sorra més properes a la paret (per a zones de la paret properes al pou d'injecció). És important destacar que, el fet de que la sonda 2 no indiqui que la temperatura a la base del pou d'injecció és de 40 °C (és a dir, la temperatura d'entrada al pou) es deu a que l'aigua que s'aboca es barreja immediatament amb l'aigua més freda de l'aquífer, de manera que la temperatura resultant és una mitja entre la temperatura d'aquests dos fluids, tenint en compte que la quantitat d'aigua calenta que s'aporta és petita comparada amb la de l'aquífer acumulada a la zona d'abocament.

Val a dir que l'augment més pronunciat de temperatura es produeix a l'inici de la prova ja



que es quan es programa el termòstat perquè canviï la temperatura de l'aigua injectada. A mesura que va pujant la temperatura a l'aigua de l'aqüífer, la diferència de temperatura amb la de l'aigua que s'introdueix al pou, va disminuint. És per això que a mesura que passa el temps el pendent en els gràfics és menor.

9.2. Segona prova

Aquest segon assaig manté la mateixa col·locació de les sondes que la prova 1. Una de les diferències respecte el realitzat anteriorment és la temperatura aportada a l'aigua que s'extreu pel primer pou. Aquesta arriba fins a 39 °C al dipòsit d'escalfament, de manera que s'aboca a 30 °C. Aquesta temperatura està 11,6 °C per sobre de l'ambiental, fet que representa un ΔT considerable, tenint en compte que, al refrigerar un edifici, la temperatura de l'aire ha de ser molt elevada perquè l'aigua de refrigeració assoleixi aquesta diferència de temperatures. De totes maneres en aquesta prova i les que seguiran s'aplicarà un augment de temperatura de més de 10 °C per observar com reacciona el sistema davant situacions crítiques. Les característiques del sistema per aquesta prova són les següents:

Dia d'inici	23/04/2008
Temperatura inicial de l'aigua del dipòsit aliè al sistema	18,4°C
Pressió ambiental	1 atm
Cabal d'injecció (de pou a pou)	10 ml/min
Programa de la bomba pel circuit de pou a pou	9.40
Cabal de recirculació (de sortida de l'aqüífer a dipòsit auxiliar)	0,040 L/min
Programa de la bomba pel circuit de recirculació	9.00
Cabal d'aigua per l'interior de la sorra	0,015 L/min
Temperatura regulada al termostat	39°C
Temperatura mitja d'entrada al pou d'injecció	30°C



Règim de flux de recirculació	Estacionari
Règim de progressió de la temperatura a l'aquífer	Transitori i estacionari
Nombre de sondes	10
Diferència de nivells d'aigua del dipòsit d'entrada al de sortida	3 cm
Diferència mitja de temperatura entre pous	11,6°C
Durada de la prova	23 h 07 min

Un altre tret que diferencia aquesta prova de la primera és el cabal de recirculació, és a dir, l'aigua que va des del final de l'aquífer fins l'aquífer auxiliar on és refrigerada per passar al dipòsit d'entrada. S'ha reduït aquest cabal per evitar problemes amb els aparells elèctrics: donat que els aparells han estat funcionant de nit i no s'han pogut vigilar es volia evitar que el nivell d'aigua al recipient auxiliar augmentés fins a un nivell suficient com per tocar l'agitador elèctric i es produís un curtcircuit.

La prova és la més llarga de les quatre realitzades perquè s'ha considerat que, donada la temperatura d'abocament i la col·locació de les sondes, els resultats poden ser representatius. A més, quan s'ha iniciat la prova, la temperatura de l'aigua abocada al pou d'injecció era l'ambiental, de manera que el sistema tenia que passar per l'estat transitori i l'estacionari, fet que motivà la realització d'una prova de llarga durada. Els resultats es tornen a mostrar en dos gràfics separats (figures 9.4. i 9.5.) per facilitar-ne la lectura:



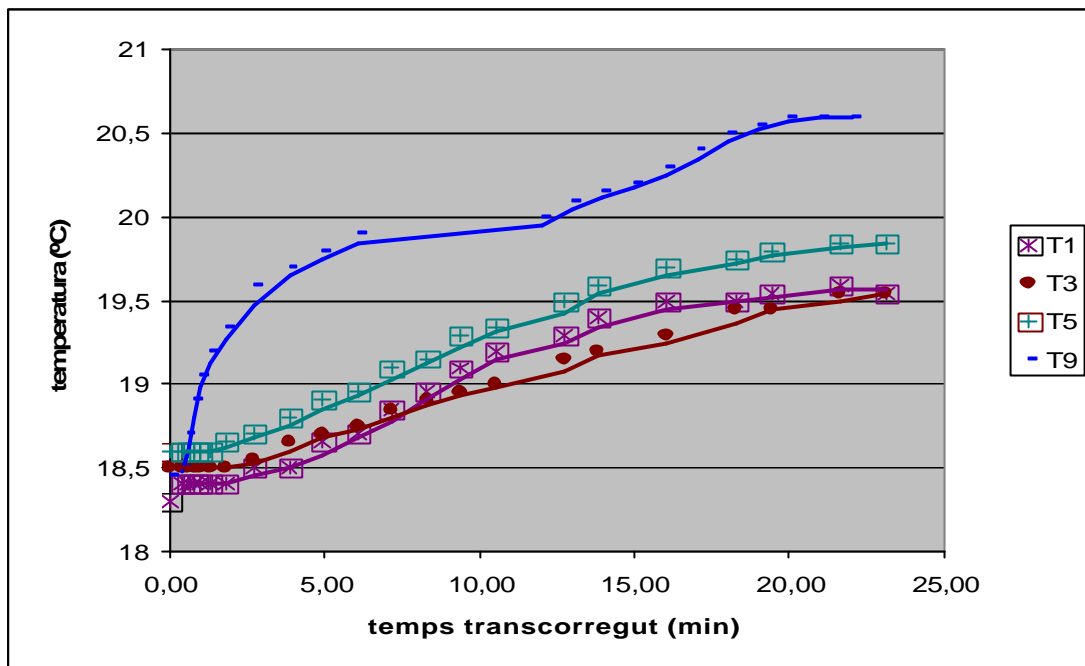


Fig. 9.4. Prova 2: evolució de les temperatures segons les sondes 1, 3, 5 i 9.

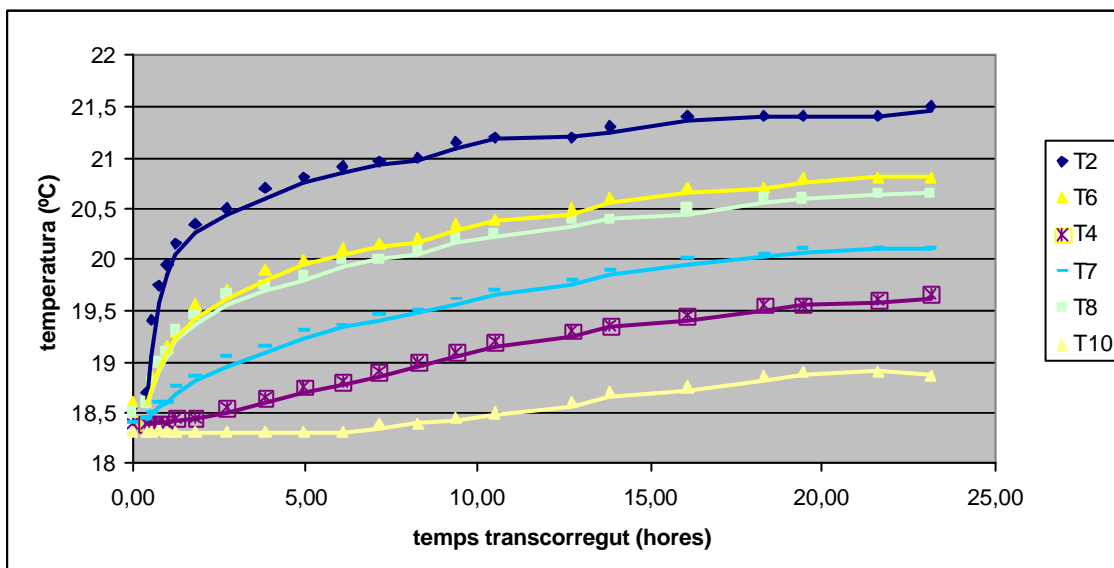


Fig. 9.5. Prova 2: evolució de les temperatures segons les sondes 2, 4, 6, 7, 8 i 10.

Per començar a analitzar els resultats extrets d'aquesta prova cal fer, prèviament, una



aclaració important. S'observa als gràfics que totes les termoresistències mostren un augment de temperatura en tot moment, de manera que pot arribar a semblar que no s'arriba a l'estat estacionari. Aquest augment es veu motivat per un augment de la temperatura ambiental. El dia 23 a les 9h la temperatura ambiental era de 18,3 °C, aproximadament, mentre que el dia 24 a la mateixa hora s'arribava als 19 °C. Això queda totalment reflectit a la línia de tendència de la sonda 10, que no es veu afectada per l'entrada d'aigua calenta al pou d'injecció però sí per l'augment de temperatura externa.

La sonda 2 torna a tenir una evolució similar a la de la prova anterior: es veu altament afectada per l'entrada d'aigua calenta, el que provoca que la temperatura dins el pou augmenti ràpidament i, poc a poc el pendent de la corba va disminuint per arribar a un estat estacionari si no fos per l'augment de temperatura externa. La màxima a la que s'arriba aquest punt crític és de 21,5 °C, és a dir, 2,5 °C per sobre de l'ambiental. No és un augment de temperatura important ja que, segons l'Agència Catalana de l'Aigua seria perjudicial si sobrepassés els 3 °C.

Pel que fa als punts més propers al pou d'injecció, es veu una temperatura molt similar a les sondes 6, 8 i 9, tot i que la primera denota una temperatura lleugerament major. El motiu d'aquesta diferència resideix, tal i com s'ha explicat a la primera prova, per una diferent calibració dels aparells o per més proximitat al punt exacte d'abocament d'aigua calenta. El seu progrés és també ascendent logarítmic i amb una bona regularitat.

7 i 4 són les altres sondes més properes i els més de sis centímetres que les separen fan que hi hagi una diferència de temperatura de més de 0,5 °C. Les sondes 1, 3 i 5, que es troben també a distàncies molt semblants del pou d'injecció mostren també temperatures molt properes. Malgrat això, és la sonda número 5 la que arriba a una cota més elevada. La causa d'aquesta diferència és que està una mica més a prop del punt d'abocament d'aigua i que, segurament, es veurà (encara que sigui mínimament) afectada pel corrent d'aigua que circula a través dels porus de sorra.

La sonda 10, situada a les proximitats del pou d'extracció, es manté pràcticament constant, però pateix un lleu augment de temperatura a partir de les 19:00h del dia 23. Aquesta diferència coincideix, com s'ha comentat anteriorment, amb la pujada de temperatura ambiental.

En aquesta prova es torna a donar un moviment de el calor pràcticament circular, a excepció de la petita diferència que s'observa entre el punt 5 i el punt 3 que pot fer pensar que aquest cercle pot estar mínimament allargat seguint el sentit del flux de l'aigua.



9.3. Tercera prova

Per la realització de la tercera prova s'han modificat les ubicacions de les sondes. Tot i estar situades sobre el mateix pla horitzontal que anteriorment (a 10 cm de la base de l'aqüífer), s'han col·locat en una altra posició per tal de poder estudiar amb millor detall el comportament tèrmic de l'aqüífer. S'ha aprofitat l'estat estacionari tèrmic assolit a la prova anterior però s'ha fet una petita variació en el cabal d'aigua que va d'un pou a l'altre. Per què aquesta variació no influeixi en els resultats s'ha deixat passar una hora abans de començar a enregistrar resultats. D'aquesta manera s'espera haver arribat a l'estat estacionari tant tèrmic com hidràulic. Així doncs, aquesta prova només té com a objectiu veure què succeeix al llarg de l'aqüífer quan no hi han alteracions exteriors (únicament l'augment de temperatura del medi ambient).

Les característiques de l'assaig es detallen a continuació:

Dia	24/04/2008
Temperatura de l'aigua del dipòsit aliè al sistema	19°C
Pressió ambiental	1 atm
Cabal d'injecció (de pou a pou)	10 ml/min
Programa de la bomba pel circuit de pou a pou	9.40
Cabal de recirculació (de sortida de l'aqüífer a dipòsit auxiliar)	0,045 L/min
Programa de la bomba pel circuit de recirculació	10.00
Cabal d'aigua per l'interior de la sorra	0,015 L/min
Temperatura regulada al termostat	39°C
Temperatura mitja d'entrada al pou d'injecció	30°C
Règim de flux de recirculació	Estacionari
Règim de progressió de la temperatura a l'aqüífer	Estacionari
Nombre de sondes	10



Diferència de nivells d'aigua del dipòsit d'entrada al de sortida	4 cm
Diferència mitja de temperatura entre pous	11°C
Durada de la prova	3 h 20 min

Com s'observa, la durada de la prova no és gaire extensa, comparada amb les anteriors, però això és degut a que, en aquesta, no ha sigut necessari passar per una etapa d'estat transitori (només entre els 30 primers minuts, degut l'augment de cabal en el circuit de pou a pou).

Per aquesta prova, tot i que la col·locació de les sondes pot semblar, a priori, aleatòria, cadascuna de les posicions té la seva lògica (figura 9.6.).

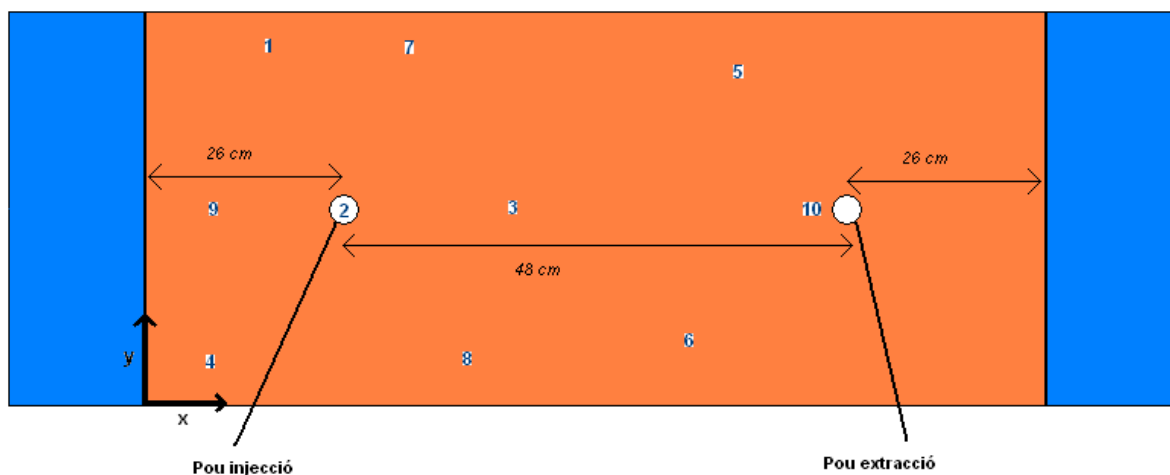


Fig. 9.6. Situació de les sondes a la prova 3.

En aquesta prova s'ha intentat mantenir quatre sondes sobre l'eix que creua l'aqüífer per la meitat; es tracta de la 9, la 2, la 3 i la 10. S'ha considerat que, tant la posició 2 com la 10, poden donar valors, el coneixement del qual és molt important per entendre la prova, ja que un representa la temperatura just en el moment de barrejar-se l'aigua calenta amb la freda i l'altre permet saber a quina temperatura s'està extraient aigua. Pel que fa a les termoresistències 9 i 3, permeten saber quin progrés fa l'augment de temperatura sobre la direcció del cabal d'aigua que circula per dins l'aqüífer.

Les altres sondes volen donar a conèixer el progrés circular de la temperatura per confirmar si hi té una gran incidència el sentit del flux d'aigua. Les sondes 5 i 6 volen demostrar quin és el radi d'acció de l'aigua calenta. Les posicions exactes de les sondes



són les següents :

Nº de sonda	Distància centre pou injecció (cm)	Coordenada x (cm)	Coordenada y (cm)
1	21	18	45
2	0	26	25
3	17,5	43,5	25
4	25,5	12	5
5	38,5	62,5	40
6	32	53,5	9,5
7	21	35,5	45
8	25,5	39	5
9	15	11	25
10	44	70	25

Com s'observa, les úniques sondes que coincideixen en distància al pou d'injecció són 1 i 7, i 4 i 8. Això ens permetrà fer les comparacions pertinents i extreure conclusions clares sobre el progrés de la temperatura. A continuació es mostren les figures 9.7. i 9.8., que detallen quin ha sigut aquest progrés durant les tres hores i vint minuts que ha durat l'assaig:



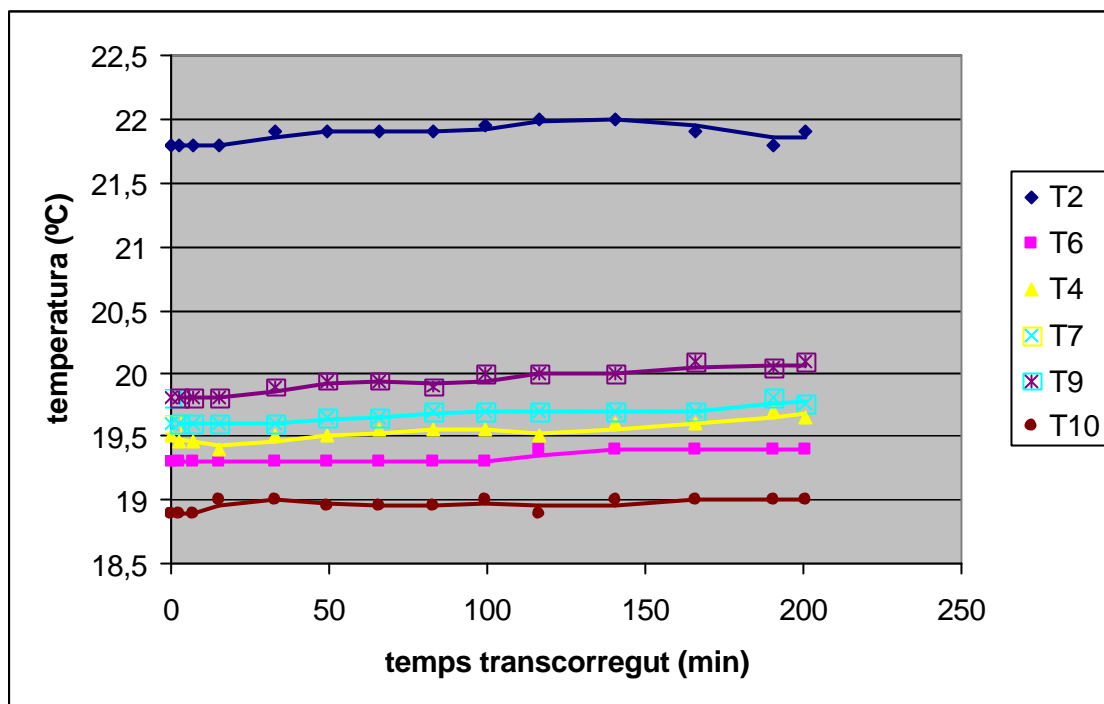


Fig. 9.7. Prova 3: evolució de les temperatures segons les sondes 2, 4, 6, 7, 9 i 10.

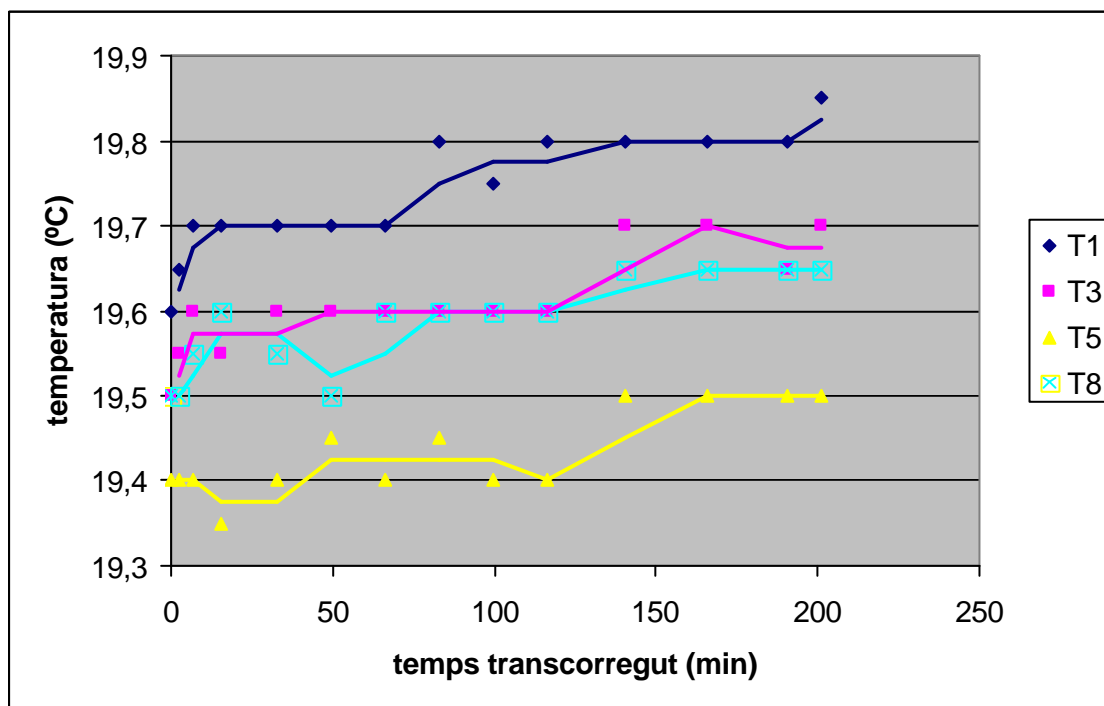


Fig. 9.8. Prova 3: evolució de les temperatures segons les sondes 1, 3, 5 i 8.



En aquesta prova s'observa un comportament força estable de la temperatura en tots els punts de l'aqüífer que només es veu afectada per l'augment de la temperatura de l'ambient. Les variacions des de l'inici de la prova fins al final són de 0,3 °C de màxima, cosa que només es dona a la sonda 9. Es confirma, doncs, que s'ha treballat en estat estacionari. La posició 10 no es veu afectada per l'augment de temperatura en el pou d'injecció i ho demostra no patint un gran canvi de temperatura en cap moment de la prova. La sonda situada en aquest punt és un reflexe de les variacions de temperatura externes. Així doncs, la podem pendre com a referència. Veiem que el punt més crític de l'aqüífer (pel que fa a temperatura), és a dir, el punt 2, es manté uns 2,8 °C de mitja per sobre del punt 10. Sabent que l'aigua calenta s'aboca 11°C per sobre de l'ambiental, podem afirmar que el fet de que el cabal d'injecció sigui petit fa que l'augment de temperatura no sobrepassi els límits indicats com a perjudicials.

Si comparem les sondes 9 i 3 es veu com la diferència de distància al pou d'injecció influeix directament en la calor rebuda per aquestes. És per això que la primera es manté uns 0,4 °C per sobre de la segona. Certament, és una diferència de temperatures important si tenim en compte que la diferència en distàncies no és tan gran (2,5 cm). Es pot sospitar que, donat que han passat moltes hores des que està en funcionament el circuit hidràulic, l'estat estacionari està totalment assolit i hi pot influir el cabal intern que circula per l'aqüífer. Es comprovarà amb l'anàlisi de les sondes 1, 7 i 4, 8.

Les sondes 4 i 8 disten el mateix del pou d'injecció, però una es troba més propera al dipòsit de sortida que l'altra. Pràcticament tota l'estona la sonda 4 es troba amb una temperatura superior a la sonda 8, això sí, només de 0,5 °C com a màxim. Aquesta diferència no és important i menys encara si tenim en compte que al final de la prova s'igualen les temperatures. Tot i així, si haguéssim d'atribuir aquest fet a alguna causa és fàcil pensar en el flux que segueix l'aigua en els intersticis de la sorra, que afavoriria l'aportació de calor més ràpida al punt 4 que al 8. El mateix passa entre 1 i 7, només que aquests mostren una diferència de temperatures de 1 °C durant pràcticament tot l'assaig. Això confirma la influència lleu del flux d'aigua intern. El fet de que la diferència de temperatures entre 1 i 7 sigui més gran que entre 4 i 8 es deu a que els primers estan més pròxims al tub d'injecció i, per tant, la seva temperatura dista més de l'ambiental i això facilita que la seva diferència sigui major per una qüestió de proporcions.

Les sondes 6 i 5 mostren un comportament, si més no, singular. La sonda 6 és més propera al focus de calor que la sonda 5, però la segona indica, pràcticament sempre, estar 1 °C per sobre de la primera. Aquest fet estrany fa pensar que la distribució no es singular o que existeix un error en la mesura. Per acabar de confirmar-ho es realitzarà una altra prova.



9.4. Quarta prova

Aquesta última prova pretén demostrar si, finalment, la distribució de temperatures en estat estacionari, havent deixat molt enrere el transitori, tendeix a la circularitat total o es veu afectada per singularitats. Les característiques de la prova són molt semblants a les anteriors :

Dia	24/04/2008
Temperatura de l'aigua del dipòsit aliè al sistema	19,1°C
Pressió ambiental	1 atm
Cabal d'injecció (de pou a pou)	10 ml/min
Programa de la bomba pel circuit de pou a pou	9.40
Cabal de recirculació (de sortida de l'aquífer a dipòsit auxiliar)	0,045 L/min
Programa de la bomba pel circuit de recirculació	10.00
Cabal d'aigua per l'interior de la sorra	0,015 L/min
Temperatura regulada al termostat	39°C
Temperatura mitja d'entrada al pou d'injecció	30°C
Règim de flux de recirculació	Estacionari
Règim de progressió de la temperatura a l'aquífer	Estacionari
Nombre de sondes	10
Diferència de nivells d'aigua del dipòsit d'entrada al de sortida	4 cm
Diferència mitja de temperatura entre pous	10,9°C
Durada de la prova	5 h 09 min

Les úniques diferències importants són la temperatura ambiental (una mica superior), la



durada de l'assaig i, sobretot, la col·locació de les termoresistències (figura 9.9).

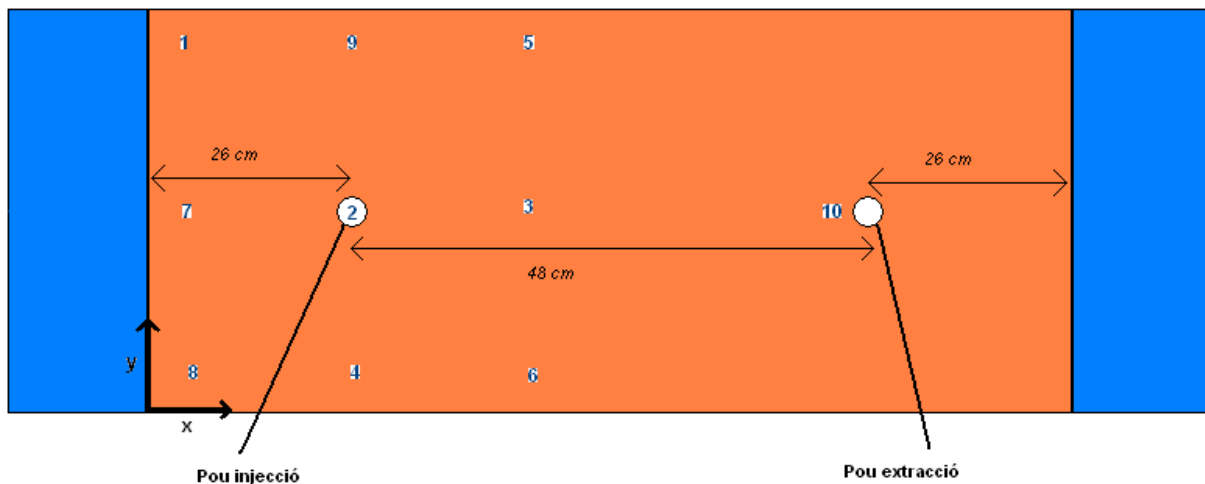


Fig. 9.9. Situació física de les sondes a la prova 4.

Com s'observa, 8 e les 10 sondes formen un rectangle que té com a centre el pou d'injecció. Això facilita les comparacions entre sondes situades a la mateixa distància d'aquest punt.

Nº de sonda	Distància centre pou injecció (cm)	Coordenada x (cm)	Coordenada y (cm)
1	28,3	5,5	44,5
2	0	26	25
3	20,5	46,5	25
4	19,5	26	5,5
5	28,3	46,5	44,5
6	28,3	46,5	5,5
7	20,5	5,5	25
8	28,3	5,5	5,5
9	19,5	26	5,5
10	44	70	25



L'evolució de les temperatures estan graficades a les figures 9.10. i 9.11.:

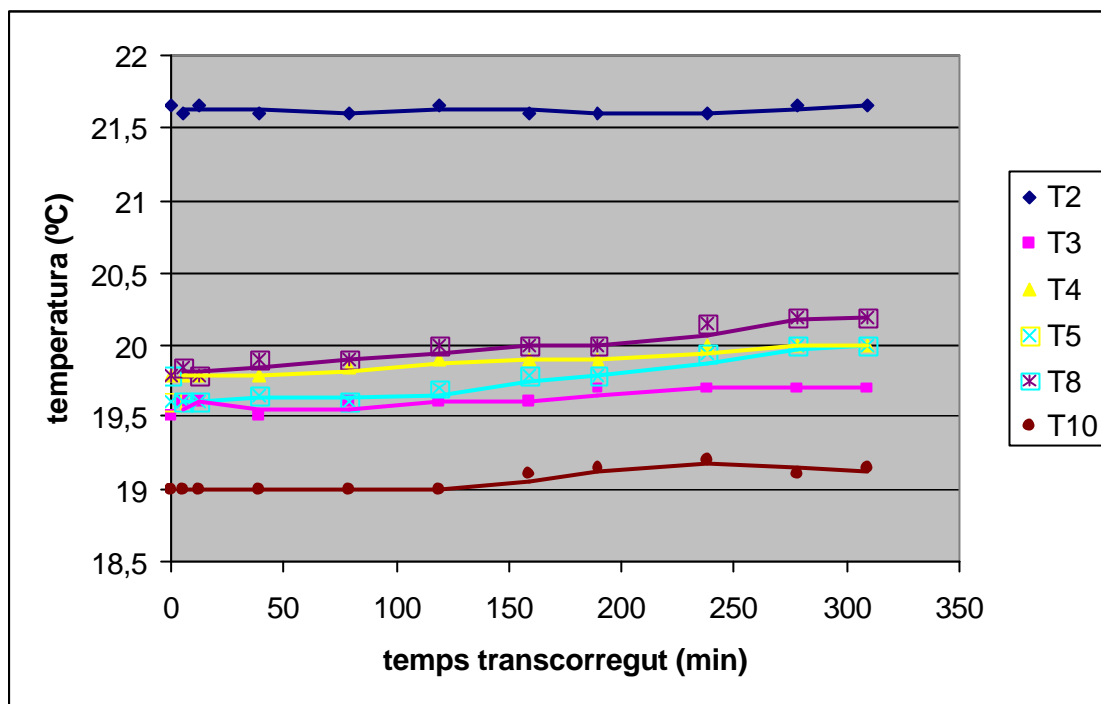


Fig. 9.10. Prova 4: evolució de les temperatures segons les sondes 2, 3, 4, 5, 8 i 10.

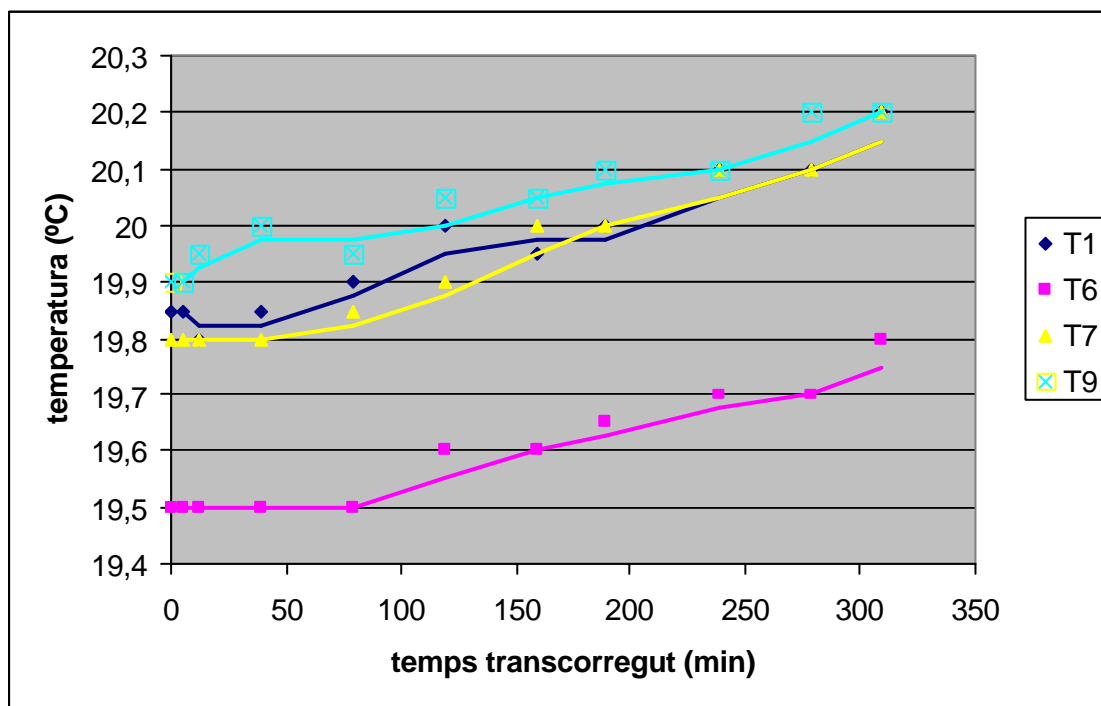


Fig. 9.11. Prova 4: evolució de les temperatures segons les sondes 1, 6, 7 i 9.



Es torna a observar un progrés lleugerament ascendent amb diferències de temperatura entre l'inici i el final de la prova de 0,3 °C com a màxim. Donat que la temperatura ambiental ha patit la mateixa variació es confirma que aquest augment no és conseqüència de l'abocament d'aigua calenta.

La sonda 2 és la que pateix menys variacions i es manté pràcticament constant tota l'estona. Aquest fet es deu a que rep directament la influència de l'aigua calenta que té una temperatura constant, independentment de la temperatura externa ja que està regulada per un termòstat. El punt 2 es manté 2,5 °C per sobre de l'ambient mentre que el punt 10, que es manté també pràcticament constant, coincideix gairebé amb la temperatura externa.

Les altres dues sondes situades al pla mig de l'aqüífer (3 i 7) mostren comportaments ben diferents. Tot i que ambdues segueixen una trajectòria ascendent lleu, la més propera a l'aqüífer de sortida (7) és la més afectada per la calor de l'aigua abocada, amb diferències de fins a 0,5 °C. Això confirma l'efecte del flux intern d'aigua; aquest arrossega l'aigua calenta de manera la calor segueix, en part, el mateix sentit.

Al comparar 1 i 5, i 8 i 6, es torna a observar una influència per part del flux d'aigua intern ja que 1 i 8 (més propers a l'aqüífer de sortida) tenen temperatures majors. Per una altra banda si ens fixem en les diferències entre 1, 9 i 5, i 8, 4 i 6 ens trobem amb que les sondes situades en el dibuix a la part superior reben més calor que les de la cara oposada. Això implica que la distribució de calor no segueix una distribució circular allargada en el sentit del flux, sinò que es desvia per un lateral. Això explicaria que en la prova 3, la sonda 5 rebés més calor que la sonda 6.



Conclusions

El projecte s'ha pogut realitzar satisfactòriament, arribant a uns resultats que han aportat dades, fins el moment desconegudes, de com es comporta la temperatura en un sistema de refrigeració geotèrmic reduït. Un cop finalitzat el treball de camp, s'ha arribat a les següents conclusions:

1.- Aquest projecte ha permès, primerament, veure que és viable el disseny i la construcció d'un aqüífer a escala pilot que representi un terreny en el que hi ha un sistema de refrigeració geotèrmic. És la primera vegada que es construeix un aqüífer en escala reduïda amb la finalitat de realitzar anàlisis de temperatura, de manera que es confirma que és possible dedicar-se a l'estudi d'aquest tipus de refrigeradors, fent servir maquetes que actuïn com a simuladors.

2.- La posta en marxa de l'aqüífer i l'extracció de resultats ha facilitat aclarir aspectes sobre la viabilitat en la construcció d'un sistema geotèrmic a gran escala donat que moltes de les dificultats que han aparegut en el disseny i la construcció de l'aqüífer són extrapolables. Per exemple, la distància que han de mantenir els pous per evitar extreure aigua calenta en el pou d'extracció, o l'intercanvi de calor que s'haurà de fer a l'edifici a refrigerar per tal de que l'aigua ja escalfada que s'aboqui no tingui una temperatura suficientment elevada com per sobreescalfar el terreny més del recomanat; així com la longitud que han de tenir els pous i el seu diàmetre.

3.- Per una altra banda, s'han realitzat una sèrie d'assajos amb el circuit per poder estudiar l'impacte tèrmic del sistema de refrigeració sobre l'aqüífer. S'ha observat que, sota condicions més crítiques que les que s'aplicarien en un sistema real, la temperatura no arriba en cap punt del terreny a assolir una temperatura superior als que marca l'Agència Catalana de l'Aigua com a límit per començar a ser perjudicial pel medi ambient. Només s'ha superat aquest llindar en la prova en que l'aigua s'ha abocat a 40°C, temperatura impensable per a un sistema real. La distribució de la calor segueix, sobretot en les últimes proves una distribució circular, allargada en el sentit del flux de l'aigua que travessa l'aqüífer, ja que aquest arrossega l'aigua calenta que entra pel pou d'injecció. A més, s'arriba a l'estat estacionari amb facilitat, el que implica que s'ha aconseguit evitar que l'aqüífer s'escalfi fins arribar a la temperatura aportada a l'aigua que s'extreu.



Agraïments

M'agradaria agrair aquest projecte, en primer lloc, a en Xavier Riera, per la seva ajuda aportada en el dia a dia en forma de treball, per les seves idees com a gran previsor de possibles problemes futurs en la construcció de l'aqüífer, per facilitar-me tot el material que he necessitat d'una forma molt ràpida i, fins i tot, per llevar-se a hores intempestives per facilitar l'entrada de camions amb planxes d'acer al laboratori.

També li vull agrair a en Joan de Pablo les facilitats que m'ha atorgat per adquirir el material i l'espai necessaris sense plantejar cap dificultat i per donar-me una gran llibertat a l'hora de prendre decisions durant tot el disseny i la construcció.

Finalment, crec que ha sigut molt important la tasca de l'Anna Huguet, dels amics i de la família per donar-me suport en els moments de més nervis i per ajudar-me a superar els problemes que han sorgit, ensenyant-me que amb perseverància és possible arribar allà on es vulgui.



Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] UNFCCC, Framework Convention on Climate Change- Secretariat Convention. *Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Kyoto, 1998.
- [2] UNFCCC, Framework Convention on Climate Change- Secretariat Convention, *Executive Board of the Clean Development Mechanism Thirty-Seventh Meeting*. Bonn, 2008.
- [3] UNFCCC, Framework Convention on Climate Change- Secretariat Convention, *Climate Change 2007: Impact, Adaptation and Vulnerability of Climate Change*. Paris, 2007.
- [4] MINISTERIO DE ECONOMIA E INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y EL AHORRO DE LA ENERGÍA. *Guía práctica de la Energía*. Madrid, 2003.
- [5] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y FUNDACIÓN GAS NATURAL. *Redacción del III Seminario Internacional Sobre Cambio Climático*. Madrid.
- [6] GENERALITAT DE CATALUNYA. DEPARTAMENT DE D'ECONOMIA I FINANCES. Text de la campanya "Aquest estiu no passis fred". Barcelona, 2007.
- [7] OFFICE OF THE DEPUTY UNDER SECRETARY OF DEFENSE (INSTALLATIONS AND ENVIRONMENT). *Ground Source Heat Pumps at Department of Defense Facilities, Report to Congress*. United States of America, 2007.
- [8] CENTRO PARA EL DESARROLLO TECNOLÓGICO INDUSTRIAL. *Proyecto Cenit: Desarrollos tecnológicos hacia el ciclo urbano del agua autosostenible. Tarea 9c del proyecto Sostaqua: Climatización de edificios mediante recursos de agua subterránea*. Valldoreix, Barcelona, 2007.
- [9] SERVEI METEOROLÒGIC DE CATALUNYA. El clima de Catalunya: trets generals. [http://www.meteocat.net/marcs/marc_clima.html, 20 de gener de 2008]
- [10] AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. *Climatització d'edificis basada en l'energia del subsòl: una alternativa sostenible?* Barcelona, 2007.
- [11] P. JIMÉNEZ MONTOYA ET AL. Hormigón armado. Barcelona, 1999.

Bibliografia complementària

- [12] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY GEOTHERMAL DIVISION. *Reference book on geothermal direct use*. Oregon, 1994. Es tracta el tema de les bombes de calor geotèrmiques i l'aprofitament d'energia geotèrmica per edificis i per la indústria.



- [13] INSTITUTO MINERO Y GEOLÓGICO DE ESPAÑA. *Las aguas minerales en España*. Sección 3: Aspectos geológicos e hidrogeológicos de las aguas minerales en España. Oviedo, 2005. Parla sobre aigües subterrànies amb característiques físico-químiques diferents de la major part d'aigües subterrànies.
- [14] NATIONAL GROUND WATER ASSOCIATION. *Guidelines for the construction of vertical boreholes for closed loop heat pump systems*. Ohio, 2001. Fa referència a com instal·lar circuits geotèrmics verticals.
- [15] UNIVERSIDAD DE SALAMANCA, DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA. *Hidroquímica: conceptos fundamentales*. Salamanca, 2000. Parla, entre altres coses, de paràmetres físics i químics de les aigües subterrànies.
- [16] LONDON SOUTH BANK UNIVERSITY. DEPARTMENT OF ENGINEERING SYSTEMS. *Ground source heating and cooling in the United Kingdom*. Londres, 2007. Es tracta l'estratègia d'aplicació de sistemes geotèrmics com a mesura per complir amb el Protocol de Kyoto.
- [17] INSTITUTO DE LA INGENIERÍA DE ESPAÑA. *La generación eléctrica en el siglo XXI*. Madrid, 2005. Es tracten les diferents formes innovadores d'obtenció d'energia entre les quals està la geotèrmica.
- [18] INTERAGENCY SUSTAINABILITY WORKING GROUP. ENERGY DEPARTMENT. *The business case for sustainable design and construction*. Estats Units d'Amèrica, 2002. Ajuda a l'adquisició de coneixements per poder realitzar una construcció de qualsevol tipus marcada per processos sostenibles.
- [19] DEMOCRITUS UNIVERSITY OF TRACE. DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING. *Pilot-scale constructed wetlands for wastewater treatment studies*. Xanthi (Grècia), 2004. Es detalla el disseny i la construcció d'un aqüífer destinat al tractament d'aigües residuals.
- [20] UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR. INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE STRASBOURG. *Detection of advected, reacting redox fronts from self-potential measurements*. Tracta el disseny i la construcció d'un aqüífer destinat a la realització d'experiments utilitzant les mesures de potencial per estudiar el transport i la barreja de reactius redox.
- [21] SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. *A sandbox experiment of selfpotential signals associated with a pumping test*. Madison, 2004. Estudis dels potencials elèctrics de fluids en el seu pas a través d'un material porós.
- [22] UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON TYNE. DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING. *Design, construction and performance of a full-scale compost wetland for mine-spoil drainage treatment at quaking houses*. Newcastle, 1999. Construcció del primer aqüífer a escala pilot per l'estudi de l'absorció de ferro, alumini i manganés dissolts en aigua pel seu pas a través de sorra.

