

Treball de Recerca

L'energia

Sistema d'emmagatzematge per
a producció d'energia estacional

2n Batxillerat, A
IES Pere Barnils

Centelles, 14 de gener de 2010

ÍNDIX

0. ABSTRACT.....	5
1. INTRODUCCIÓ.....	6
2. ENERGIA.....	8
2.1. Classificació de les energies.....	9
2.2. Fonts d'energia.....	11
2.3. Problemes que presenten les energies.....	14
3. PROJECTE D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA ESTACIONAL EN ROCA.....	17
3.1. Presentació.....	17
3.2. Cicle estacional.....	20
3.3. Injectar escalfor.....	23
3.3.1. Primera injecció.....	27
3.3.2. Cicle anual.....	31
3.4. Emmagatzemar escalfor.....	33
3.5. Extreure escalfor.....	37
3.6. Bombejar CO ₂	44
3.7. Eficiència de la central.....	46
3.8. Disseny del jaciment.....	47
3.8.1. Geometria del jaciment.....	48
3.8.2. Perforació.....	51
3.8.3. Fracturació hidràulica.....	54
3.9. Resum.....	55
3.10. Comparació del sistema d'emmagatzematge estacional en roca amb una central hidroelèctrica reversible.....	60
4. CONCLUSIONS I RECOMANACIONS.....	62
5. AGRAÏMENTS.....	65
6. BIBLIOGRAFIA.....	66

ÍNDIX D'IL·LUSTRACIONS

Figura 1. <i>Energia mecànica d'un satèl·lit orbitant</i>	9
Figura 2. <i>Reacció de fissió en cadena</i>	9
Figura 3. <i>Motor impulsat per l'energia que té un gas quan varia la temperatura, pressió i volum, generant treball</i>	10
Figura 4. <i>Central nuclear de Vandellòs (Espanya)</i>	12
Figura 5. <i>Central energètica geotèrmica a Thingvellir (Islàndia)</i>	14
Figura 6. <i>Central Hidroelèctrica reversible a Okinawa (Japó)</i>	17
Figura 7. <i>Recuperació de l'escalfor injectant fluid fred i extraient-lo calent</i>	19
Figura 8. <i>ISONE – demanda anual elèctrica a Nova Anglaterra (Estats Units)</i>	21
Figura 8. <i>Calendari amb els períodes d'injecció i d'extracció d'energia de la reserva geotèrmica</i>	22
Figura 10. <i>Variació de la temperatura de la reserva geotèrmica segons el temps, suposant que hi ha la primera injecció i el cicle anual</i>	29
Figura 11. <i>Jaciment de gres a Utah (Estats Units)</i>	33
Figura 12. <i>Esquema d'una central geotèrmica convencional, en la qual s'injecta un fluid fred, s'extreu calent i es produeix electricitat mitjançant un intercanviador de calor i un turbogenerador</i>	38
Figura 13. <i>Tubera d'injecció</i>	48
Figura 14. <i>Tubera d'extracció</i>	49
Figura 15. <i>Dibuix a escala del jaciment amb els tubs d'injecció i extracció, vista frontal i de perfil</i>	50
Figura 16. <i>Esquema de la perforació del làser, escalfant i desfent la roca</i>	51
Figura 17. <i>Gràfic de la perforació segons el temps</i>	52
Figura 18. <i>Esquema frontal d'una broca HPWD</i>	53
Figura 19. <i>Abans i després de realitzar la fracturació hidràulica</i>	55
Figura 20. <i>Esquema del funcionament de la central en un cicle de funcionament (injecció i extracció)</i>	59

SIMBOLOGIA

Unitats

m : metre (unitat de distància)

m² : metre quadrat (unitat de superfície)

m³ : metre cúbic (unitat de volum)

kg : kilogram (unitat de massa)

s : segon (unitat de temps)

h : hora (unitat de temps; 1 h = 3600 s)

°C : grau centígrad (unitat de temperatura)

°K : grau Kelvin (unitat de temperatura)

Equivalència °C i °K : $(x \text{ } ^\circ\text{C}) = (y \text{ } ^\circ\text{K}) - 273$

Exemple : 1°C = 274 °K

Pa : pascal (unitat de pressió)

J : joule (unitat de treball, calor i energia)

W : watt (unitat de potència; 1 W = 1 J/s)

Índexs

k- : kilo- (10³)

M- : mega- (10⁶)

G- : giga- (10⁹)

T- : tera- (10¹²)

Exemple : 1 MJ (megajoule) = 10⁶ J (joules)

0. Abstract

En la vida quotidiana es necessita un mètode per ajudar a subministrar energia a una zona concreta durant els pics de demanda d'aquesta. L'emmagatzematge d'energia estacional en roca crea un nou recurs geotèrmic artificial del qual l'energia pot ser extreta quan sigui necessària. Per tant, el principal objectiu d'aquest projecte és avaluar l'habilitat de la roca del sòl per tal d'emmagatzemar energia durant els períodes de poca demanda energètica i proveir-la en els períodes d'alta demanda. Es discuteix com podria funcionar el procés del sistema subterrani d'emmagatzematge i la seva eficiència global. Suposant una central energètica nuclear es pot obtenir una eficiència de transformació d'energia del 39.07 %; un cop introduït el sistema estacional d'emmagatzematge a la planta nuclear es pot aconseguir una eficiència del 17.4 %, baixa l'eficiència però es crea una reserva d'energia. Malgrat tot, aquesta eficiència pot ser millorada significativament reduint la caiguda de pressió del fluid geotèrmic CO₂ a través de la reserva, millorant les propietats de la roca i reduint les pèrdues energètiques.

1. Introducció

L'univers pel simple fet d'existir ja és energia, ja que sinó hi hagués hagut energia des de l'origen del tot, el Big Bang, l'univers no seria res del que mínimament coneixem actualment. Sense energia tot seria una massa concentrada en un punt, el qual no existiria en l'espai, ja que aquest no s'hauria format. Però la energia hi ha sigut sempre, ja que gràcies a la contracció i explosió del Big Bang tota la energia, ja existent (principi de conservació de l'energia), es va anar repartint per tota la matèria, aportant així radiació, moviment, interacció entre partícules...

La vida, igual que l'univers, també és simple energia la qual no es crea ni es destrueix sinó que es transforma. Aquest fet fa que la persona en sí, al ser un ésser viu, ha necessitat sempre agafar energia d'algun lloc i transformar-la per tal de poder sobreviure. Ja fos agafant fruits dels arbres i menjant-los (energia química), pujant les pedres de les piràmides egípcies (energia mecànica) o escalfant aigua per tirar-la als adversaris en les guerres (energia tèrmica); l'home sempre ha necessitat energia.

No obstant, actualment la humanitat ha canviat totalment la seva principal font d'energia, fent que el progrés necessiti com a principal energia l'electricitat. Aquesta pot ser aconseguida de moltes maneres (combustibles fòssils, energia nuclear, geotèrmia, vent, Sol...) però això no s'adequa a la demanda energètica durant un any, ja que la producció és sempre constant i la demanda fluctua segons el dia, el temps meteorològic, el lloc i la estació de l'any en general. En trets generals, durant l'any hi ha dos principals pics de demanda energètica, estiu quan es necessita aire condicionat i hivern quan es necessita calefacció. I, conseqüentment, dos valls on la demanda es més baixa, primavera i tardor. És a dir, que si la producció elèctrica és constant, hi ha moments en els quals falta energia i moments els quals se'n malgasta.

Per això es necessita un sistema que pugui cobrir aquesta necessitat, proveir energia en moments de defalliment energètic i recuperar-ne en moments de malbaratament. Així doncs, el sistema artificial geotèrmic ens permet capturar energia d'una central que produeixi energia tèrmica,

emmagatzemant-la i, seguidament, subministrant-la. Un possible exemple seria una central nuclear de quarta generació, una central nuclear amb reactor de sals foses. Aquesta central nuclear escalfa unes sals foses que transmeten tota l'energia tèrmica a unes altres sals foses, evitant així el pas de la radiació. A continuació, aquestes sals foses passarien l'escalfor a un fluid geotèrmic que s'endinsaria en la roca, l'escalfaria i tornaria a sortir. Aquesta injecció d'escalfor faria que es pogués anar emmagatzemant energia durant tres mesos i que després es pogués extreure per crear electricitat. Així creant un cicle anual amb dos períodes d'injecció de 3 mesos cada un (primavera i tardor) i dos períodes d'extracció d'escalfor i transformació en energia elèctrica (estiu i hivern). Això permetria, en general, poder emmagatzemar energia i proveir-la quan convingués, i així satisfer la principal necessitat dels recursos energètics fluctuants.

Aquesta idea ve donada gràcies a l'estància durant els mesos d'estiu d'aquest passat any (2009) en el programa de recerca científica *Research Science Institute* (RSI) als Estats Units d'Amèrica. Així doncs, durant l'estada en aquest programa situat al *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) de Boston, se'm va presentar la oportunitat de fer recerca en el camp de les energies sota la tutela d'un professor de la universitat (Prof. Michael J. Driscoll). Aquest, veient el meu interès per les energies i el seu bon ús, em van proposar la següent idea: "crear un sistema que permetés emmagatzemar energia a gran escala durant un període indeterminat de temps i poder-ne disposar per tal de generar electricitat quan hi hagués un pic de demanda elèctrica". Així, gràcies al meu interès per les energies, ja que són bàsiques per poder viure en la societat actual, i la proposta que se'm va suggerir des del MIT, he realitzat l'estudi i treball de la viabilitat de creació d'un sistema d'emmagatzematge que es mostra a continuació.

2. Energia

L'energia (del grec ἐνέργεια/*energeia*, activitat, operació; ἐνεργός/*energós*, força d'acció o força treballant) és la capacitat de realitzar un treball.

Partint de la definició es pot entendre que és necessita energia per a realitzar qualsevol dels treballs que la transformació de la matèria requereix. Malgrat això, la energia no es pot veure físicament sinó que és una idea que compon el món físic i que provoca el canvi. D'aquesta manera, i seguint el principi de la conservació de l'energia, aquesta es va transformant i va passant de cos a cos realitzant treballs.

El principi de la conservació de l'energia diu que la quantitat d'energia d'un procés en un sistema tancat es conserva, és a dir, l'energia no es genera ni es destrueix, sinó que es transforma. Per tant, la quantitat d'energia és sempre la mateixa, l'única que canvia són les diverses formes que pot presentar. Així doncs, l'energia química que absorbim dels aliments, per exemple, es transformarà en energia mecànica quan ens desplacem d'un lloc a un altre, a la vegada que en energia calorífica, ja que el nostre cos desprèn calor. D'aquest exemple podem arribar a la conclusió que tota l'energia que posseeix un cos no es directament transformada en una altra, sinó que una part d'aquesta es transforma en la forma que volem, però una altra part és energia perduda que adopta altres formes, en aquest cas escalfor.

L'energia és el bé més preuat i apreciat que pot existir, ja que sense ella res existiria i tot seria simple matèria sense moviment. És un fet present en la vida quotidiana, i que ha existit sempre, des del Big Bang. L'energia és bàsica per crear vida i per tant per viure, així doncs s'ha d'intentar saber en quines formes es pot presentar l'energia, com la podem aconseguir i com podem fer per que desaparegui l'energia malgastada, per tal d'assolir una eficiència més alta en els processos energètics.

2.1. Classificació de les energies

L'energia no és d'un únic tipus, sinó que es pot mostrar en diverses formes que varien segons el procés que l'ha fet transformar. D'aquesta manera podem trobar 6 tipus bàsics d'energies:

L' Energia Mecànica ve descrita per la suma de l'energia potencial i l'energia cinètica presents en els components d'un sistema mecànic. L'energia potencial correspon a l'energia emmagatzemada per un cos, ja sigui causant energia gravitatòria, electrostàtica o elàstica. L'energia cinètica és l'energia emmagatzemada per un cos en moviment,



Fig. 1. *Energia mecànica d'un satèl·lit orbitant*

o l'energia que s'ha d'aportar a un cos per tal que es mogui. Per exemple, un satèl·lit donant voltes a un planeta està sotmès a l'energia potencial que l'atreu cap al planeta i a l'energia cinètica al donar voltes al voltant d'aquest, així doncs posseeix un conjunt d'energia mecànica.

L' Energia Nuclear és alliberada quan es separen (fissió) o s'ajunten (fusió) els nuclis de dos o més àtoms. És a dir, és l'energia que es desprèn quan es separen o ajunten dos nuclis, com un simple xoc de partícules. Per exemple, el Sol és una constant reacció nuclear en el qual es formen

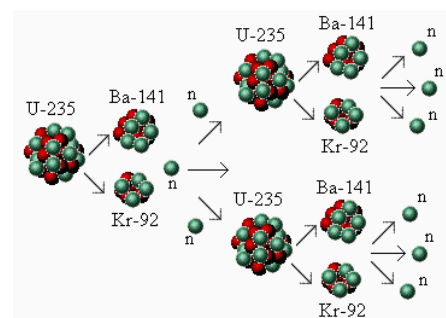


Fig. 2. *Reacció de fissió en cadena*

àtoms d'heli a través de dos nuclis d'hidrogen pel xoc de nuclis d'hidrogen, alliberant així quantitats descomunalment d'energia en forma calorífica i en forma de radiacions.

L' Energia Electromagnètica és el conjunt d'energia elèctrica i magnètica que podem atribuir a un punt de l'espai degut a la presència d'un camp

electromagnètic. Així doncs aquesta energia ve donada pel camp elèctric i pel camp magnètic al qual està sotmès un cos. Per exemple, en passar corrent elèctric per una bobina es forma un camp magnètic, així a partir del camp elèctric s'origina el camp magnètic.

L' Energia Química és l'energia obtinguda al alterar els enllaços existents entre àtoms, molècules i compostos, que al fer reaccions químiques o interaccions entre elles, originen diferents tipus d'energia, com: lluminosa, tèrmica, sonora... Per exemple, quan s'han de netejar les aigües no potables, s'afegeixen un compost anomenat floculant que fan dipositar totes les partícules col·loïdals suspeses en l'aigua al fons del recipient.

L' Energia Termodinàmica és el conjunt de l'energia tèrmica (calor) i la dinàmica (moviment) presents en un sistema. És a dir, és el conjunt de l'energia que tenen les partícules d'un cos al moure's a escala microscòpica, la calor, i el desplaçament del cos en general i l'alteració de posició d'aquest, el moviment. Així, la termodinàmica en general és l'estudi de les propietats dels canvis de la

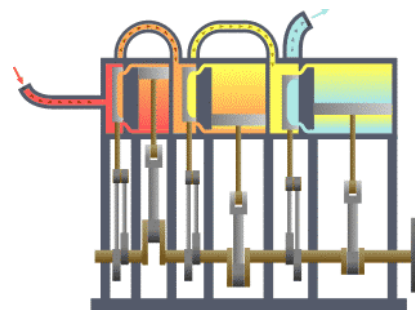


Fig. 3. Motor impulsat per l'energia que té un gas quan varia la temperatura, pressió i volum, generant treball

temperatura, pressió i volum dels sistemes macroscòpics. Per exemple, quan un gas és comprimit augmenta la pressió i la temperatura, i podem utilitzar aquesta propietat per a crear una nevera.

L'Energia de les Ones, molt relacionada a l'energia electromagnètica, és l'energia relacionada amb la propagació en el temps i l'espai de perturbacions. Així aquestes deformacions del medi transporten energia des d'un punt a un altre sense que les partícules es vegin desplaçades. Podem trobar ones electromagnètiques com la llum, la radiació ultraviolada, radiació infraroja, raigs X o les ones de ràdio, i ones mecàniques com el so, els terratrèmols, les oscil·lacions de les cordes o les ones marítimes.

2.2. Fonts d'energia

L'energia, en totes les seves formes, sempre ha de tenir un procés o una matèria primera que la modifiqui d'una forma a una altra. Així per obtenir energia elèctrica podem veure diverses formes i fonts per acabar obtenint electricitat:

Els Combustibles Fòssils són aquells materials que al entrar en combustió, és a dir, cremar-se, alliberen grans quantitats d'energia en forma de calor. Aquests combustibles són fòssils ja que són materials que provenen de restes orgàniques de plantes i animals morts fa milions d'anys, i aquesta característica els fa alliberar tanta energia al cremar-se. Els tres combustibles fòssils per excel·lència són el petroli (format per plàncton i algues, amb una textura viscosa), el carbó (mineral procedent de la descomposició de éssers vegetals) i el gas natural (gas alliberat en els jaciments de petroli i de carbó). Aquests combustibles són cremats en centrals tèrmiques, on un circuit d'aigua és escalfat per l'escalfor dissipada, i aquesta aigua transformada en vapor fa girar una turbina que genera electricitat. Aquestes centrals són molt eficients però a la vegada tenen un gran impacte mediambiental.

Els Biocombustibles són aquells combustibles que deriven directament de productes d'origen animal i vegetal, i que al cremar produeixen gran quantitat d'energia tèrmica i lluminosa. Per una banda, existeix la biomassa que és un conjunt format per organismes que eren anteriorment vius o pels seus residus metabòlics, com la llenya o els fems de vaca. I per altra banda, hi ha els biocombustibles, que són combustibles d'origen biològic que pretenen substituir els combustibles fòssils tradicionals. Així podem trobar bioetanol que s'obté a partir de blat de moro, sorgo, canya de sucre, remolatxa, blat o ordi, o biodièsel que s'obté a partir d'olis vegetals. Així aquests combustibles són cremats en una central tèrmica convencional i es transformen en electricitat, però suposant la gran avantatge que utilitzen un combustible renovable.

La Nuclear és la font que emet més energia, i a la vegada més rendible. El material utilitzat és l'urani o el plutoni, normalment enriquits (s'afegeixen isòtops per a que siguin més reactius), que al ser bombardejats amb neutrons provoquen una reacció de fissió que genera quantitats descomunals d'energia tèrmica.



Fig. 4. *Central nuclear de Vandellòs (Espanya)*

Així en les centrals nuclears un fluid és escalfat a grans temperatures, després aquest fluid escalfa aigua, la transforma en vapor, i aquest vapor podrà fer girar una turbina i crear electricitat. Altres fluids com sals foses també són escalfats de manera que es millora l'eficiència i es redueix el deteriorament de la central. També existeix la reacció de fissió, que consisteix en unir dos nuclis d'àtoms, els quals alliberaran energia, però encara és un procés que està en vies d'estudi.

La font Hidroelèctrica és una de les més rendibles i amb menys impacte mediambiental que hi ha actualment. L'aigua en si mateixa és el material que genera l'electricitat: una gran quantitat d'aigua és emmagatzemada en pantans i és alliberada per un petit tub que dirigeix tota l'aigua cap a una turbina. Així doncs, amb l'energia que porta l'aigua al ser alliberada es fa moure la turbina i aquesta genera electricitat. Aquest tipus de centrals hidroelèctriques les podem trobar en embassaments o centrals hidroelèctriques reversibles. Aquest segon tipus de centrals reversibles funcionen de la mateixa manera que les convencionals però durant la nit tota l'aigua es torna a bombejar cap alçades més altes per tal de deixar-la fluir novament durant el dia. Així doncs part de l'energia que s'ha generat durant el dia és utilitzada per bombejar aigua amunt en períodes de poca demanda, com és la nit. Aquestes centrals presenten una gran avantatge respecte les centrals convencionals ja que permeten generar electricitat quan convingui i no constantment. Així doncs en cas que hi hagués una pujada de la demanda elèctrica en un moment puntual és podria deixar

caure aigua i generar electricitat. Aquest sistema serà presentat a continuació del treball ajudant a formular la hipòtesi.

La font Solar consisteix en una de les fonts energètiques inexhauribles, però també presenta un problema, la seva intermitència dia-nit. El Sol és la font de la qual s'obté l'energia que rebem a la terra, però la rebem de dos maneres, i per tant podem generar electricitat de dos formes. Per una banda, ens arriba energia lluminosa, és a dir, en forma de fotons, aquests tenen la característica d'alterar els electrons d'un material i fer que saltin i es desplacin. Per exemple, en una placa solar fotovoltaica de Silici, els fotons aporten energia als electrons i els fan alliberar i anar lliurement creant un corrent elèctric directe. Per l'altra banda, ens arriba energia en forma de radiació infraroja que es tradueix en energia calorífica, així un material es pot escalfar i guanyar calor. Per exemple, podem trobar col·lectors solars que escalfen aigua a temperatures inferiors a 50 °C, o torres solars que poden escalfar aigua a temperatures superiors als 600 °C en les millors condicions. Per tant, aquesta aigua escalfada i convertida en vapor es pot fer passar per una turbina i generar electricitat.

La Eòlica, referint-se al vent, suposa una de les fonts sense gran impacte mediambiental, renovable i amb gran visió de futur, com és el cas d'Espanya, en moments on l'energia produïda pot arribar a ser del 50% (8 de novembre de 2009) de la total produïda en tot l'Estat. Així el vent, és a dir, el moviment de l'aire, fa que al passar per les ales d'un molí, es mogui, i aquest amb un alternador generi electricitat pel moviment rotacional. També hi ha altres molins, que amb menys força poden bombejar aigua de pous o fer anar unes politges. Aquest tipus de font també té un inconvenient, la seva intermitència.

La font Geotèrmica, per tant l'energia en que s'aprofita l'escalfor procedent de l'interior de la terra, seria una de les més importants si no fos per la difícil localització. Aquesta font es pot trobar en qualsevol lloc del planeta, però hi ha llocs on es fa més fàcil arribar-hi ja que temperatures altes es troben en capes més superficials. Així, en zones puntuals com Islàndia, *The Geysers* (EEUU) o altres on hi ha activitat volcànica present es poden trobar centrals

geotèrmiques. Aquestes centrals injecten un fluid a la terra a baixa temperatura, aquest és escalfat per l'alta temperatura de la roca i després s'extreu a alta temperatura. Aquest fluid es pot servir en forma de calor de directament o bé se'l pot fer passar per una turbina i crear electricitat.



Fig. 5. *Central energètica geotèrmica a Thingvellir (Islàndia)*

La Mareomotriu consisteix en el mar com a font d'energia. Per una banda, podem trobar la força que tenen les onades en picar contra un lloc o per balancejar-se, per exemple el xoc de les onades contra els penya-segats genera un moviment d'aire que a través d'uns conductes mou unes turbines que generen electricitat. Per altra banda, el mar té marees, és a dir que puja i baixa el nivell del mar, per exemple creant una presa artificial en una cala on la diferència de marea sigui molt alta (5 metres) i jugant amb deixa entrar i sortir aigua, es pot aconseguir fer-la passar per una turbina que generi electricitat. Es tracta d'un procés molt costós de realitzar i de difícil manteniment.

2.3. Problemes que presenten les energies

Les energies es poden classificar de diverses maneres, ja sigui per l'origen, per la dificultat d'obtenció, segons la tradició... Però la manera més fàcil és considerar si es poden esgotar o no aquestes energies al fer-ne un ús excessiu. Així doncs trobarem dos tipus d'energies, les renovables i les no renovables. Les quals ens presenten avantatges i inconvenients.

Les Energies No Renovables són aquelles energies obtingudes de fonts finites que s'aniran esgotant mica en mica, fent que resultin tant cares i tant perjudicials pel medi ambient que s'hauran de deixar de fer servir. Així podem trobar que els combustibles fòssils (petroli, carbó i gas natural) i l'energia nuclear, són combustibles que costen tant de formar i trobar que l'ús actual fa que s'estiguin esgotant. Tot i així, en general, aquestes

energies presenten desavantatges i inconvenients respecte les energies renovables:

- Són no renovables i s'esgoten ràpidament, per tant no es poden tornar a trobar i a utilitzar un cop utilitzats.
- Són molt contaminants ja que generen molts gasos en la seva combustió (diòxid de carboni), provocant l'efecte hivernacle, i creen residus un cop utilitzats (residus nuclears).
- L'extracció dels minerals i combustibles fòssils del sòl genera un dany irreversible al medi ambient.
- Algun dia desapareixeran i no les podrem fer servir més.
- No poden ser reciclades i reutilitzades aquestes energies.
- El preu dels combustibles s'incrementa ja que s'estan esgotant.
- La producció d'energia és limitada a cada central i té un màxim segons el combustible i la instal·lació.
- La producció d'energia és continua i constant, el que vol dir que no es pot adaptar a les pujades o baixades de la demanda elèctrica, en cas que hagués d'augmentar o disminuir la producció s'hauria de reestructurar la central productora d'energia. Només les centrals tèrmiques convencionals es poden posar en marxa i engegar de manera relativament fàcil, però això vol dir que poden passar unes 12 hores abans no s'hagin parat o engegat.

Les Energies Renovables són aquelles energies les quals poden ser reemplaçades en un relatiu curt període de temps. Per tant, en aquest grup podem trobar l'energia solar, l'eòlica, la hidroelèctrica, la mareomotriu, la geotèrmica i la biomassa, tot i que la biomassa es posa en dubte ja que un ús molt abusiu i desmesurat pot fer que s'esgoti en un cent per cent i que no se'n pugui tornar a generar. Malgrat tot, aquestes energies també presenten problemes, però cada font d'energia a la seva manera:

- Solar: els panells solars són molt cars i els governs no donen suport total a les tecnologies fotovoltaïques. A més no pot instal·lar-se a tot arreu ja que es veu condicionat pels núvols, la latitud i el factor dia-nit.

- Eòlica: els molins són cars, el vent és intermitent i només es aconsella instal·lar-ho en zones on el vent sigui casi constant.
- Hidroelèctrica: les preses en general són cares i poden arribar a canviar l'ecosistema en una totalitat, no obstant, les turbines són més fàcils d'instal·lar i més barates.
- Mareomotriu: pel que fa a les onades encara està en una fase bastant experimental, i les mareas suposen un cost econòmic considerable però les turbines i la seva instal·lació resulta més barata.
- Geotèrmica: el principal problema és el gran cost de bombejar el fluid geotèrmic i el fer els forats d'injecció i extracció.
- Biomassa: Un ús excessiu pot provocar la desaparició del mateix combustible i a vegades es pot trobar que hi hagi una manca o excés de combustible.
- En conjunt creen impacte mediambiental ja que suposen una gran pèrdua de terreny fèrtil i un gran impacte visual.
- En general aquestes fonts d'energia són intermitents és a dir que produeixen energia sempre que ho permet el medi, de manera que a vegades no es produeix energia o se'n produeix massa.
- No s'adapten a les necessitats d'oferta i demanda que suposa el consum d'energia elèctrica.

D'aquesta manera es pot veure que les energies no renovables són més eficients que les renovables, tot i que aquestes últimes tinguin un menor impacte en la naturalesa. No obstant, comparteixen varis desavantatges o inconvenients, com ara: la eficiència de transformació d'energia que no pot arribar a ser perfecte i que la producció d'energia no s'adapta a la demanda. Per tant, el que es presenta en la següent part del treball estarà relacionat amb la intermitent producció d'energia de les energies renovables i la constant producció energètica de les energies no renovables. Evitant així aquest problema i creant un sistema que ho pugui satisfer.

3. Projecte d'emmagatzematge d'energia estacional en roca

Tal i com s'ha presentat anteriorment, ens trobem que la producció d'energia elèctrica no s'adapta exactament a la demanda dels consumidors. Així doncs les centrals productores d'energia es troben que hi ha èpoques o moments puntuals en els que no donen a l'abast, o pel contrari, èpoques en les quals la producció d'energia sobrepassa la necessitat dels consumidors i, per tant, hi ha pèrdues d'energia elèctrica. Conseqüentment, les centrals experimenten un malbaratament dels recursos energètics. Així, els dos principals grups de fonts d'energia proposen dos problemes, la seva intermitència i impredictibilitat de funcionament (energies renovables) o bé la seva regularitat i constància de producció elèctrica (energies no renovables). Així el que s'ha de fer és buscar una manera d'evitar les pèrdues i el malbaratament d'energia i la seva falta en alguns casos, i adaptar-ho a l'oferta i a la demanda.

Per tal de poder suplir aquesta necessitat d'adaptar l'oferta a la demanda, el següent sistema d'emmagatzematge d'energia és presentat per tal de ser avaluat i anunciar al seva viabilitat.

3.1. Presentació

Generar energia quan es vulgui i amb la quantitat que es vulgui a gran escala és un fet impensable actualment. Només hi ha un sistema actiu que pugui generar electricitat amb aquestes condicions i suplir la necessitat d'adaptació a l'oferta-demanda. Aquest sistema són les centrals hidroelèctriques reversibles (esmentades anteriorment, *pàg. 11*), les quals permeten produir energia sempre que es necessiti i emmagatzemar-la en forma d'aigua estancada durant molt temps. L'únic



Fig. 6. Central Hidroelèctrica reversible a Okinawa (Japó)

inconvenient que suposa és que aquest sistema no es pot instal·lar a tot arreu sinó que només és utilitzable en llocs on la topografia del terreny i grans quantitats d'aigua es puguin trobar [1]. A més a més, aquest sistema només pot guardar i proporcionar energia per a petites zones i per a fets puntuals, ja que la descàrrega de dipòsits d'aigua no s'adapta a produccions a llarg termini i les turbines no permeten produir grans quantitats d'energia. Així doncs, aquesta necessitat per substituir el sistema actual per tal de crear més energia i a llargs terminis ha motivat la següent recerca [2].

La generació d'energia es podria adaptar a períodes de llarg o curt termini, ja que no cada dia, cada setmana, cada més o cada any la producció d'energia és la mateixa. Així doncs, hi podria haver dos possibles propostes de generació d'energia: a curt termini (dies) o a llarg termini (mesos). Per a l'interval de curt termini el sistema de les centrals hidroelèctriques reversibles ja ens funciona, ja que principalment s'utilitza per a produir energia elèctrica diària. En canvi, el que presenta major problema és l'emmagatzematge i producció d'energia a llarg termini, ja que no hi ha cap sistema que pugui satisfer aquesta necessitat. Per tant el que busquem és subministrar energia durant els períodes d'alta demanda durant llargs intervals de temps.

A grans trets podem veure que durant un any hi ha dos períodes on la demanda d'energia per part dels consumidors incrementa i uns altres dos en els quals no hi ha tanta demanda d'energia. Així doncs podem establir una relació respecte les diferents estacions climatològiques de l'any. Durant l'hivern, quan la gent necessita calor, i l'estiu, quan les persones necessiten refrescar-se, hi ha una pujada del consum elèctric; és a dir, que durant aquest període s'ha de subministrar més energia de la normal. Per altra banda, durant la primavera i la tardor la demanda elèctrica defalleix, i les centrals poden arribar a malgastar energia elèctrica. Per a proveir a la població d'una determinada zona amb la corresponent producció d'energia adaptada a la demanda un sistema geotèrmic d'emmagatzematge d'energia estacional podria satisfer aquesta necessitat [3].

Així doncs la idea consisteix en emmagatzemar energia tèrmica provinent d'una font renovable o no renovable, però no contaminant, per després recuperar aquesta energia tèrmica i convertir-la en electricitat. Bàsicament el sistema consisteix en tres conceptes o parts:

1. Primerament, un gran volum de roca és escalfat amb vapor, aigua calenta o gas calent durant els períodes de poca demanda elèctrica, tardor i primavera. Així l'energia provinent d'una central nuclear o d'una central solar tèrmica es emmagatzemada en la roca fins a obtenir 1 Gigawatt-any (3.1536×10^{16} J) d'energia tèrmica en la roca. Això dura tres mesos, és a dir, el temps de cada estació.
2. L'energia es va emmagatzemant en la roca del subsòl mentre aquesta es va escalfant gràcies a la injecció del fluid geotèrmic. L'emmagatzematge és sempre constant, és a dir que en tot el procés s'està emmagatzemant energia, ja que sempre s'està introduint o extraient energia del subsòl.
3. Finalment, quan hi ha una pujada de la demanda de l'electricitat, el mateix fluid geotèrmic injectat anteriorment es igualment injectat però aquest cop a temperatures baixes, tal i com es mostra en la *Figura 7*. Així, quan aquest fluid torna a sortir a la superfície s'ha escalfat i es pot passar per una turbina que accionarà un generador i crearà electricitat, igual que en una central geotèrmica convencional [4].

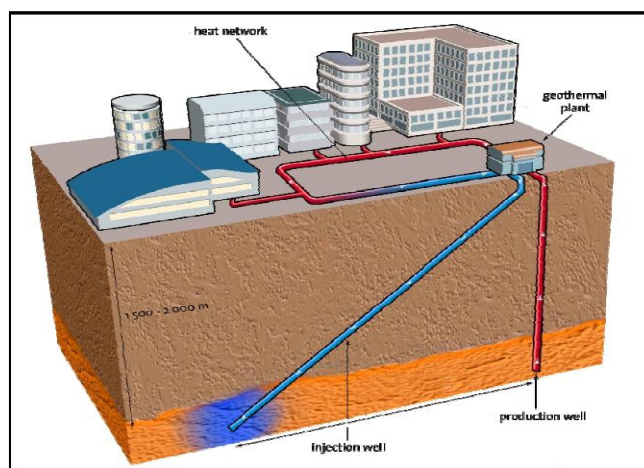


Fig. 7. Recuperació de l'escalfor injectant fluid fred i extraient-lo calent

Principalment, el projecte haurà de tenir en compte identificar el tipus de roca adequat per emmagatzemar energia tèrmica, el que significa que ha de

tenir suficient conductivitat tèrmica per tal d'escampar l'escalfor ràpidament per la roca i a la vegada un alt calor específic per tal d'emmagatzemar energia eficaçment. La porositat de la roca també condiciona molt ja que el fluid ha de fluir el màxim lliurement a través de la roca, preferiblement sense un gran cost en bombejar el fluid o en fracturar la roca hidràulicament per a facilitar el bombeig [5]. Així la roca que més s'adapta a les condicions seria el gres o pedra sorrenca, el qual compleix tot els requeriments.

Hi ha altres processos que utilitzen mètodes similars d'injecció i extracció de materials en el subsòl. La extracció de sorres de quitrà utilitza la injecció de vapor per tal d'extreure la major quantitat possible de quitrà del subsòl [6]. La seqüestració de diòxid de carboni consisteix en capturar el gas hivernacle CO₂ i emmagatzemar-lo en el subsòl [7]. In-situ Leaching (ISL) que és un procés que consisteix en extreure urani o coure bombejant aigua per forats prèviament realitzats [8]. Tot i que hi ha algunes tecnologies que utilitzen processos similars, l'emmagatzematge estacional no està ben estudiat, per això hi ha altres projectes que competeixen per aquest servei. Per exemple, un sistema que emmagatzema hidrogen i el proveeix durant els pics de demanda està sent avaluat i dissenyat per veure si és econòmicament competitiu [9].

3.2. Cicle Estacional

Com ja s'ha esmentat anteriorment la demanda d'electricitat durant un any no és continua, ni molt menys constant, sinó que ve condicionada pel clima, l'economia, la societat o l'estació meteorològica, fent que la demanda sigui irregular. Per tant, cap dia no té la mateixa demanda elèctrica i, conseqüentment, la capacitat productiva no és utilitzada o la demanda és insatisfeta. No obstant, si mirem el cicle de demanda energètica a gran escala podem veure un patró comú al llarg dels anys. Així doncs sorgeix que durant un any solar hi ha els pics de demanda de l'hivern i l'estiu. Tal i com es veu en el següent gràfic (*Figura 8*), es pot veure que durant l'estiu i l'hivern hi ha uns pics en els que es demana més energia de la que es produeix en mitjana, i durant la primavera i tardor hi ha menys demanda d'energia.

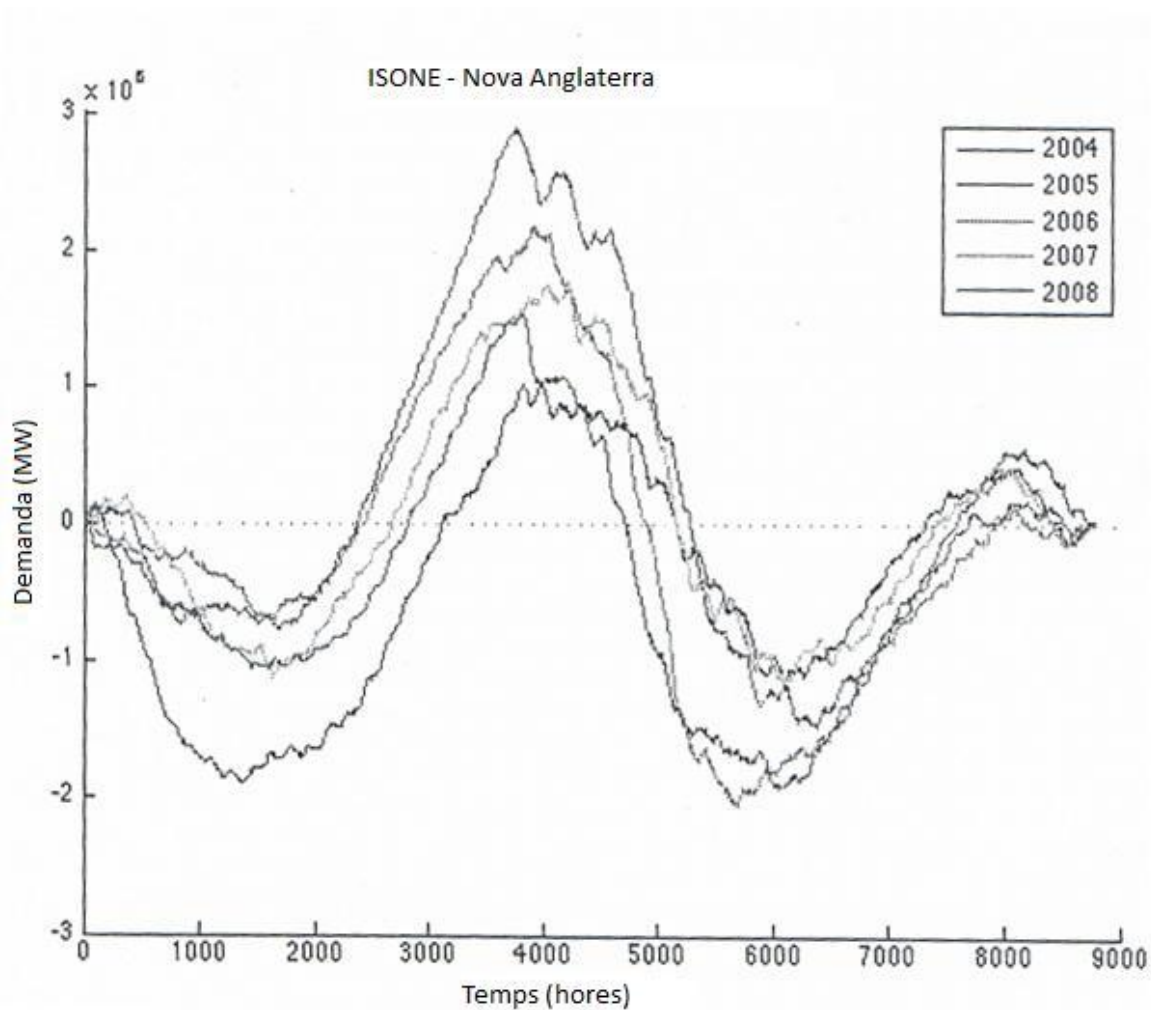


Fig. 8. ISONE – demanda anual elèctrica a Nova Anglaterra (Estats Units).

Per tal de satisfer aquesta necessitat basada en els cicles estacionals, és a dir, crear un cicle de producció i subministrament d'energia estacional; el sistema geotèrmic es presenta de la següent forma. Primerament, s'injectaria energia a la roca durant la primavera (91 dies \cong 3 mesos). A continuació, s'extrauria l'energia tèrmica injectant el fluid geotèrmic fred durant l'estiu (91 dies). Un cop acabat el període d'extracció de l'energia per fer electricitat s'hauria de tornar a injectar energia tèrmica a la roca, és a dir, durant la tardor (91 dies). Finalment, s'extrauria un altre cop l'energia del sòl i es podria tornar a generar electricitat durant l'hivern (92-93 dies). Així doncs un cicle estacional complet d'emmagatzematge i de proveïment d'energia s'hauria complert, el qual constaria de dos períodes d'injecció d'energia tèrmica (càrrega) al sòl i dos períodes d'extracció d'energia

(descàrrega) i generació d'electricitat durant l'extracció. Per tant, la necessitat de suplir els pics d'alta demanda energètica ja es veuria suplert.

Si aquest cicle es delimita en dades concretes podria quedar de la següent manera:

	Primavera (Injecció)	Estiu (Extracció)	Tardor (Injecció)	Hivern (Extracció)
Inici	21 Març	20 Juny	19 Setembre	19 Desembre
Final	19 Juny	18 Setembre	18 Desembre	20 Març

Un cop situats els dies amb dates fixes, com es veu en el següent calendari (*Figura 9*), un ha de tenir en compte els anys de traspàs, en els quals s'afegeix un dia al Febrer. Així doncs simplement s'afegiria un dia al període d'extracció de l'hivern, fent que tingués 93 dies enlloc de 92.

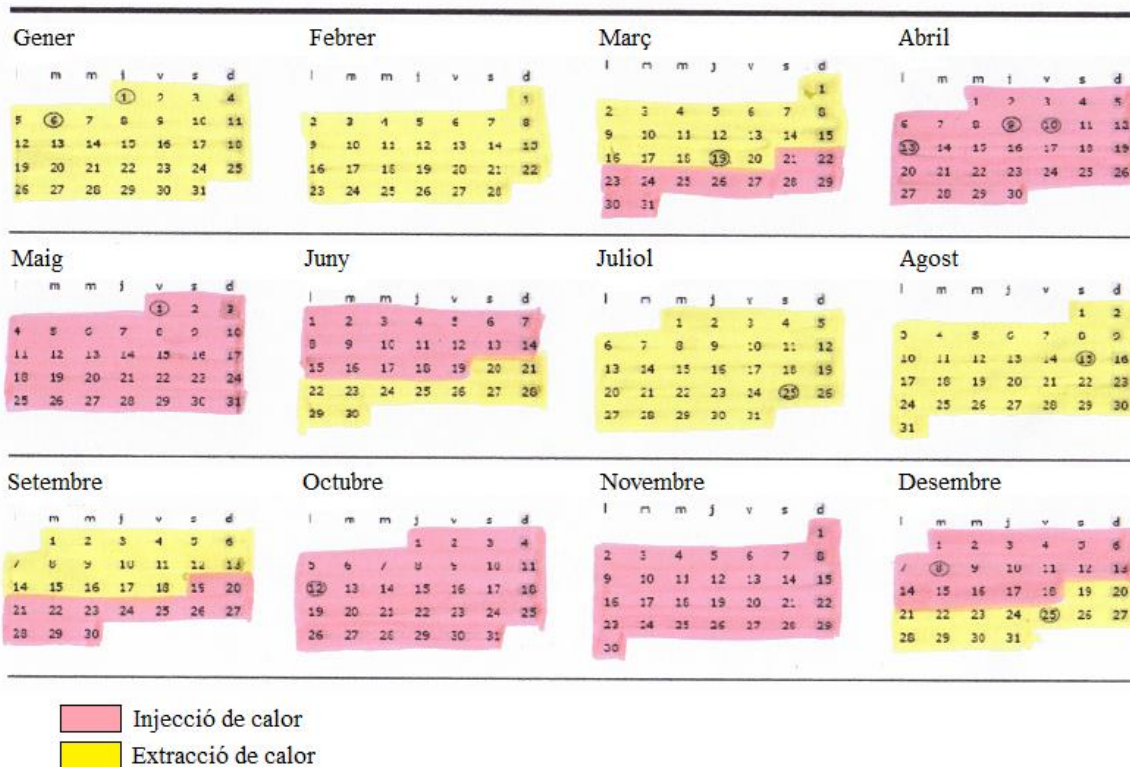


Fig. 9. Calendari amb els períodes d'injecció i d'extracció d'energia de la reserva geotèrmica

3.3. Injectar escalfor

El sistema d'emmagatzematge estacional geotèrmic consisteix en dos cicles a l'any, i cada període consisteix de tres fases: injecció, emmagatzematge i extracció. Així doncs la primera fase seria la injecció.

Parlant del procés d'injecció d'escalfor en roca varies variables a tenir en compte han de ser presentades i, a continuació, avaluades. Així doncs se'ns presenten com a principals aspectes a avaluar la font d'energia, el fluid geotèrmic i els intercanviadors de calor.

La font d'energia la qual ens ha d'aportar energia tèrmica pot ser una central nuclear o un a torre solar. Aquestes dues centrals ens aporten energia en grans quantitats i escalfen els fluids a altes temperatures, fent que el rendiment augmenti considerablement. Així doncs podríem parlar d'una banda dels "High-Temperature Gas-cooled Reactors" (HTGR, reactors nuclears d'alta temperatura refredats amb gas) en les plantes nuclears, que ens podrien aportar temperatures entre 750 i 950 °C [10]. Si ens centrem en les centrals nuclears podem trobar un nou sistema que són els "Molten Salt Reactors" (MSR, reactors nuclears de sals foses), que amb altes eficiències tèrmiques poden arribar a temperatures estables superiors als 750 °C [11]. I, per l'altra banda, hi ha les torres solars on les sals foses del sistema poden assolir temperatures entre 250 i 650 °C [12]. Veien les característiques i els inconvenients proposats anteriorment de cada una, es pot veure que la millor opció a tenir en compte seria la torre solar, ja que es tracta d'una energia renovable i, l'únic i pitjor problema que suposa és el gran espai requerit per instal·lar-la. Malgrat això, els MSR, al ser reactors de IV generació suposen una gran avantatge respecte els coneguts reactors passats, fent que aquest sigui una millor opció a tenir en compte respecte les torres solars, que només poden assolir grans temperatures en localitzacions i condicions molt concretes.

Així, la opció del MSR és millor que una torre solar i serà utilitzat el seu exemple per a realitzar tots els càlculs. Els MSR són reactors nuclears de VI generació, que vol dir que han sigut millorats i, conseqüentment, el seu rendiment i eficiència són millors que el de les generacions anteriors.

Actualment aquests reactors són ficticis i estan en construcció, per tant les dades que s'aporten al treball són totalment orientatives, teòriques i no es basen en cap central nuclear amb MSR real. Només existeix un MSR, el FUJI mini-MSR, però les seves dimensions són petites i no se'l pot considerar com a una central capaç de produir molta energia a gran escala i de cara a un mercat ampli. [13] Les sals foses són uns compostos químics formats per ions en estat líquid, de tal manera que al ajuntar diferents elements (com sodi, urani o fluor) es forma un nou compost que té les propietats adequades per funcionar en el sistema del MSR. Aquestes centrals presenten les avantatges següents: baixa pressió al reactor, ja que les sals foses poden fluir tranquil·lament sense entrar en estat gasós (<1400 °C); més seguretat ja que el reactor no està sotmès a condicions extremades, com a altes pressions, essent la més segura fins al moment; utilització de Tori enlloc d'Urani, el qual és més barat; és més simple que altres reactors, cosa que facilita la construcció i manteniment; la sal és menys corrosiva que l'aigua i el vapor, per tant el seu deteriorament és menor; el reciclatge dels productes contaminats radioactivament és més fàcil i barat [14]; les sals foses, les quals són escalfades, assoleixen temperatures superiors a 750 °C en els millors casos, i no es tracta d'un model experimental, per la qual cosa en un pròxim futur s'instal·laran centrals nuclears d'aquest tipus.

Una central nuclear amb MSR funciona igual que una central nuclear de anterior generació amb la única diferència que utilitza un combustible diferent i un fluid dintre seu també diferent, les sals foses. Així doncs es realitza una reacció de fissió del tori en la el nucli del reactor, aquesta emet energia en forma de radiació i calor. Aquesta calor és transmesa a una sal fosa que traspasarà l'escalfor a un altre circuit de sals foses. Això és així per evitar al màxim el traspàs de radioactivitat de un fluid a un altre i evitar que es pugui escapar radiació a l'exterior.

Així doncs amb el MSR, tota l'energia proveïda i transmesa finalment a l'última de les sals foses pot arribar a ser escalfada a una mitjana de 568.9 °C [15]. A continuació, la sal fosa es conduïda fins que arriba a l'intercanviador. En l'intercanviador de calor la sal fosa passarà la seva

energia tèrmica al fluid geotèrmic, el qual anirà endins la roca. Hi ha vaires possibilitats a l'hora de triar un fluid geotèrmic, com aigua a altes temperatures, vapor d'aigua o CO₂ supercrític. Fent una comparació de les seves característiques es pot veure que la millor opció és el CO₂ supercrític. Això és per què la seva viscositat, densitat, calor específic, expansivitat i solubilitat, fan que desbanqui l'aigua a altes temperatures i el vapor. El CO₂ supercrític consisteix en CO₂ capturat de l'atmosfera i utilitzat com a fluid geotèrmic, aquest s'anomena supercrític ja que és elevat a altes temperatures i bombejat a altes pressions [16]. Això fa que utilitzant aquest fluid s'eviti que es dissolguin les roques en el fluid geotèrmic, que hi hagi més pèrdues de calor i, a més a més, pot fluir més fàcilment que l'aigua i el vapor a través de la roca. Una altra avantatge que suposa és la seqüestració de CO₂, el que redueix els gasos provocants de l'efecte hivernacle en l'atmosfera [17].

Una vegada la calor del reactor és transmesa al CO₂ supercrític (fluid geotèrmic) aquest CO₂ assolirà una temperatura de 548.4 °C. Per tant, les pèrdues en l'intercanviador de calor són relativament baixes, només amb una caiguda de temperatura de 20.5 °C. Amb aquesta aportació d'energia al CO₂ per part de la sal fosa, la temperatura del CO₂ es veu incrementada de 396.4 a 548.4 °C, el que suposa un increment de temperatura positiu de 152 °C [15].

En conseqüència, cada "salt reactor Intermediate Heat Exchanger" (IHX, Intercanviador intermedi de calor de sals foses) proveeix un caudal de CO₂ de 3212 kg/s, per tant amb l'increment de temperatura del CO₂ proporcionaran 593.82 MJ d'energia tèrmica cada segon [15].

$$Q = m \times C_e \times \Delta T$$

Q = quantitat de calor o energia tèrmica per cada IHX (J)

m = caudal o massa (kg/s) = 3212 kg/s

c_e = calor específic del CO₂ a (J/kg × °K) = 1216.3 J/kg × °K

c_e a 675 °K = 1198.7 J/kg × °K

c_e a 900 °K = 1243.0 J/kg × °K

Es fa la mitjana dels dos calors específics en els que varia la temperatura del CO₂ i obtenim el resultat final del calor específic.

ΔT = increment de temperatura (°C) = 152 °C = (548.4 – 396.4) °C

$$Q = 3212 \times 1216.3 \times 152$$

$$Q = 593826851.2 \text{ J} \cong 593.82 \text{ MJ}$$

Si aquesta quantitat és multiplicada per el temps de funcionament de 3 mesos, és a dir, el període d'injecció, obtindrem la quantitat d'energia proveïda a la roca durant el període de càrrega per cada únic IHX. Equivalent així aquest resultat a 4668.9 TJ d'energia tèrmica proveïda a la roca en un període de 91 dies.

$$E = Q \times t$$

E = energia tèrmica proveïda a la roca (J)

Q = quantitat de calor o energia tèrmica per cada IHX en un segon (J) = 593826851.2 J

t = temps de injecció del CO₂ (s) = 3 mesos, 91 dies o 7862400 segons

$$E = 593826851.2 \times 7862400$$

$$E = 4.66890423487 \times 10^{15} \text{ J} \cong 4668.9 \text{ TJ}$$

Per tal de determinar la quantitat d'energia que hem d'injectar a la roca per emmagatzemar 1 Gigawatt·any (3.1536×10^{16} J) d'energia tèrmica, hem d'incrementar el nombre de IHXs. Així, més CO₂ serà injectat a la roca i, en conseqüència, més energia serà transmesa. Un total de 7 IHXs seran necessaris per tal d'assolir 1 GW·any d'energia tèrmica en la roca.

$$n = \frac{Q}{E}$$

n = número de IHXs

Q = energia tèrmica a assolir (J) = 1 GW·any = 3.1536×10^{16} J

E = energia tèrmica proporcionada per un IHX durant 91 dies (J) = 4.6689×10^{15} J

$$n = \frac{3.1536 \times 10^{16}}{4.66890423487 \times 10^{15}}$$

$$n = 6.7545 \cong 7 \text{ IHXs}$$

Amb els 7 intercanviadors de calor IHXs es pot arribar a suplir tota l'energia que requereix assolir 1GW·any. Així doncs tenim una central que injecta a la roca 4.1568 GJ d'energia tèrmica cada segon.

$$Q = \frac{n \times E}{t}$$

Q = energia tèrmica dipositada en la roca cada segon (J)

n = número de IHXs necessaris per subministrar tota la energia = 7 IHXs

E = energia tèrmica proporcionada per un IHX durant 91 dies (J) = 4.6689×10^{15} J

t = temps d'injecció del CO₂ (s) = 3 mesos, 91 dies o 7862400 segons

$$Q = \frac{7 \times 4.66890423487 \times 10^{15}}{7862400}$$

$$Q = 4156787958.4 \text{ J} = 4.1568 \text{ GJ}$$

Amb la injecció de CO₂ supercrític a la roca, feta durant primavera i tardor (91 dies cada estació), podrem emmagatzemar el 1 GW·any d'energia tèrmica que s'ha fixat com a valor a tenir en compte per a realitzar les dades.

3.3.1. Primera Injecció

Malgrat tot, escalfar tota la roca quan el sistema es posi en funcionament no serà el mateix que fer-ho un cop el cicle ha estat començat. Així doncs suposant que la reserva geotèrmica està situada a 500 metres sota el nivell de la central nuclear, podem establir que la temperatura normal d'aquesta profunditat és de 30 °C.

$$T = 15 + \frac{\Delta x}{33}$$

T = temperatura (°C)

Δx= Profunditat del centre del jaciment amb la superfície (m) = 500 m

$$T = 15 + \frac{500}{33} = 30.15 \cong 30 \text{ °C}$$

L'increment de temperatura en el cicle anual és de 152°C, cosa que suposa que la temperatura passa de 396.4 a 548.4 °C, i a l'inrevés. En canvi, durant la primera injecció seria necessari passar la temperatura de la roca de 30 °C a 548.4 °C, la qual cosa implicaria un increment positiu de 518.6 °C.

Per tal d'inicialitzar aquest procés hi ha dos possibles vies. La primera consistiria en escalfar solament una part de la roca. Per exemple, escalfar només un 15 % d'aquesta, fent que durant dues setmanes les capes més superficials del jaciment assolissin temperatures al voltant de 550 °C. Aquest sistema seria adequat si la finalitat del projecte fos proveir electricitat de manera sobtada, de tal manera que l'energia tèrmica injectada durant dues setmanes podria ser extreta fàcilment i transformada en electricitat. Això s'aniria repetint durant un període de temps indeterminat que podria durar anys i que finalment acabaria per aportar tota l'energia tèrmica d'1 GW·any d'energia tèrmica a la reserva geotèrmica. Aquesta via s'assemblaria a les centrals hidroelèctriques reversibles ja que ambdues proveeixen electricitat en moments que hi ha un pic d'energia a petita escala.

La segona via, la qual té a veure amb el propòsit del sistema i que farà més ràpida la primera injecció per tal que es pugui posar en marxa més ràpidament el sistema d'emmagatzematge, consisteix en escalfar la roca uniformement fins que arribi a una temperatura de 548.4 °C aproximadament. Així doncs com s'ha dit anteriorment s'ha de realitzar un increment de temperatura de la roca de 518.4 °C, de 30 °C fins a 548.4 °C, com es veu en la *Figura 10*.

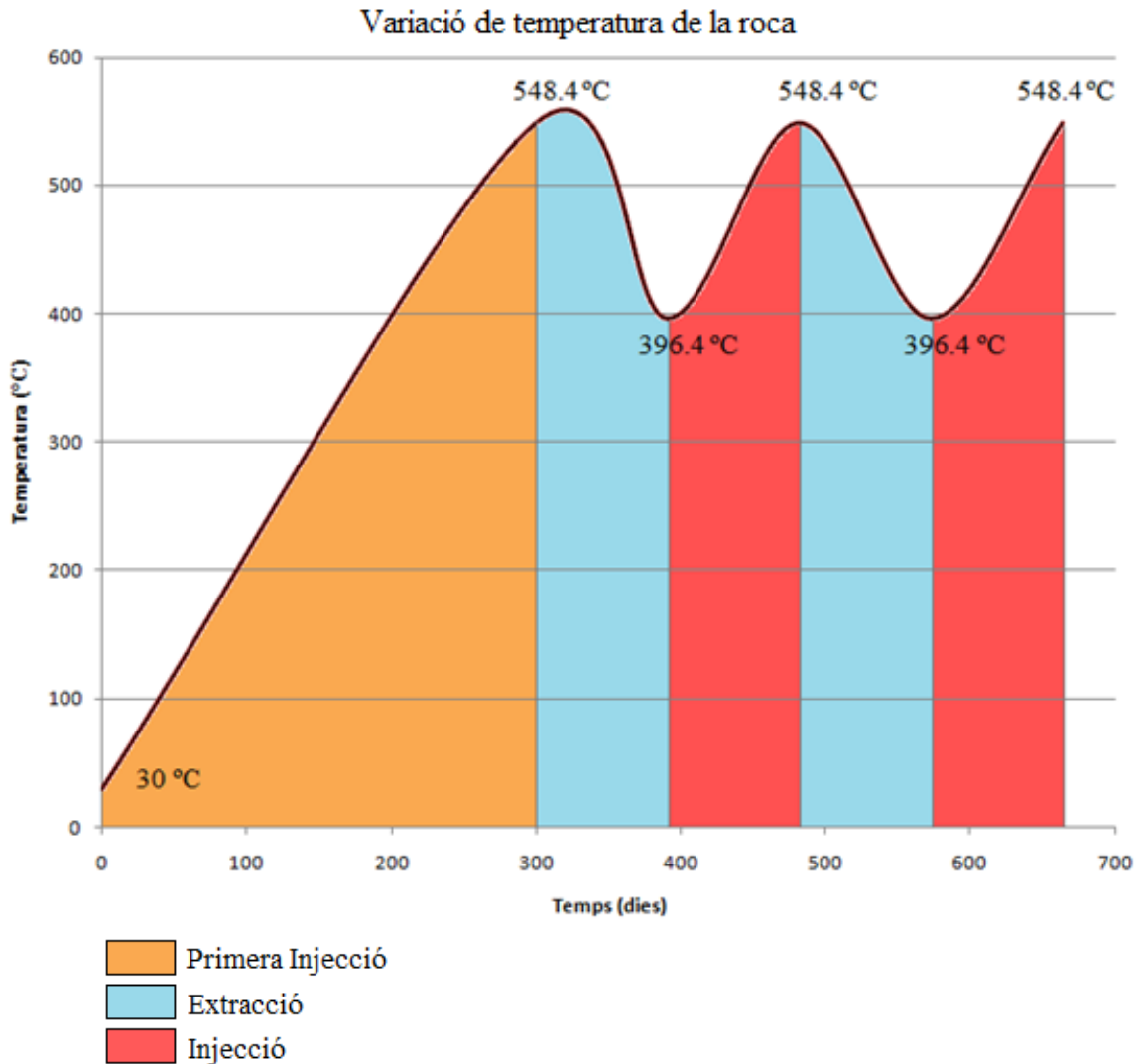


Fig. 10. Variació de la temperatura de la reserva geotèrmica segons el temps, suposant que hi ha la primera injecció i el cicle anual

En la primera injecció s'injecta el mateix caudal de CO_2 supercrític que durant el cicle anual d'injecció i extracció. Així doncs, ja que anteriorment s'ha establert que s'utilitzarien 7 IHXs (3212 kg/s cada un), sabem que aquests aportaran un caudal total de 22484 kg/s de CO_2 . Sabent el caudal, la temperatura del CO_2 i el calor específic d'aquest podem determinar l'energia que es transmet a la roca cada segon, que és de roca 4.1568 GJ d'energia tèrmica cada segon, tal i com s'ha calculat anteriorment. Per tal de determinar el temps que trigarem en fer la primera injecció farem els passos següents. Primer de tot hem de saber la quantitat de roca que s'ha d'escalfar en total, és a dir, la

quantitat de roca que escalfarem i refredarem durant el cicle estacional un cop la central ja estigui posada en funcionament.

$$Q = m \times Ce \times \Delta T$$

Q = quantitat d'energia tèrmica que volem assolir en un període d'injecció o extracció (J) = 3.1536×10^{16} J (1 GW·any)

m = quantitat de roca que serà escalfada (kg)

Ce = calor específica de la roca que s'utilitzarà (J/kg×°K) = 920 J/kg×°K (la roca és gres, la qual es discuteix el seu ús en l'apartat 3.4. *Emmagatzemar escalfor*)

ΔT = Increment de temperatura durant un període d'injecció o extracció (°K) = 152 °K

$$3.1536 \times 10^{16} = m \times 920 \times 152$$

$$m = 225514874142 \text{ kg} \cong 2.5515 \times 10^{11} \text{ kg}$$

Un cop sabem la quantitat de roca que necessitem escalfar, s'ha de calcular la quantitat d'energia que necessitarem per passar al roca del seu estat natural, 30 °C, a l'estat màxim d'acumulació d'energia, 548.4 °C.

$$Q = m \times Ce \times \Delta T$$

Q = quantitat d'energia tèrmica que haurem d'aportar a la roca per tal que s'escalfi de 30 °C a 548.4 °C (J)

m = quantitat de roca que escalfarem (kg) = 2.5515×10^{11} kg

Ce = calor específic de la roca que s'utilitzarà (J/kg×°K) = 920 J/kg×°K

ΔT = Increment de temperatura durant el primer període d'injecció de calor (°K) = 518.4 °K = 518.4 °C

$$Q = 225514874142 \times 920 \times 518.4$$

$$Q = 1.07554357895 \times 10^{17} \text{ J} \cong 1.0755 \times 10^{17} \text{ J}$$

Un cop sabem la quantitat d'energia que es necessita per realitzar un increment inicial de temperatura de 518.4 °C, podem passar a determinar el temps que es necessitarà per injectar tota l'energia. Així doncs s'aporta una energia de 4.1568 GJ d'energia tèrmica cada segon a la roca, i s'han d'omplir un total de 1.0755×10^{17} J, ja que és l'energia que és necessita per escalfar tota la quantitat de roca de 30 °C a 548.4 °C.

$$t = \frac{Q}{Qs}$$

t = temps utilitzat per escalfar tota la roca durant la primera injecció (s)

Q = quantitat d'energia tèrmica aportada a la roca per tal que s'escalfi de 30 °C a 548.4 °C (J) = 1.0755×10^{17} J

Qs = quantitat d'energia tèrmica que s'aporta a la roca cada segon (J/s)
= 4156787958.4 J/s

$$t = \frac{1.07554357895 \times 10^{17}}{4156787958.4}$$

$$t = 25874391.23 \text{ s} \cong 299.47 \text{ dies} \cong 300 \text{ dies} \cong 10 \text{ mesos}$$

Així doncs podem concloure que per realitzar la primera injecció necessitarem un període de 300 dies, equivalent a 10 mesos. Per tant, suposant que es comença el procés el dia 20 de juny d'un any qualsevol que no sigui de traspàs, s'hauria de començar la primera injecció uns 300 dies abans, és a dir, el 24 d'agost de l'any anterior. En cas que fos un any de traspàs s'hauria de començar el 25 d'agost de l'any anterior.

3.3.2. Cicle Anual

Una vegada tota la roca ha sigut escalfada a la temperatura idíl·lica de 548.4 °C, ja es podria començar amb el procés anual d'extracció-injecció, el qual s'ha dit que constarà de dos períodes d'injecció amb dos d'extracció intercalats durant l'any, tal i com es pot veure en la *Figura 10*. Tal i com s'han definit les dates teòriques, el cicle anual regular començaria un 20 de juny, és a dir, que a continuació es procediria amb el buidatge de la reserva geotèrmica per tal de generar electricitat.

Si, tal com s'ha dit anteriorment, comencéssim amb l'extracció ho fariem de la següent manera. Primer s'injectaria CO₂ supercrític a una temperatura de 396.4 °C, després aquest agafaria tota l'energia de la roca i, finalment, sortiria a una temperatura de 548.4 °C. Així durant l'estiu o l'hivern s'extrauria tota la calor de la reserva geotèrmica (l'extracció és discuteix més endavant en l'apartat 3.5. *Extreure escalfor*).

Pel que fa a la injecció d'energia durant el període anual, que seria durant la primavera i la tardor, s'injectaria CO₂ supercrític constantment,

durant dia i nit, a una temperatura de 548.4 °C. Primerament, el CO₂ provinent dels 7 IHX instal·lats a la central nuclear de sals foses s'injectaria a la roca a una profunditat de 500 metres sota la superfície. A continuació, aquest CO₂ fluiria a través de la roca i dipositaria tota l'energia, tal com actuaria un intercanviador de calor. Un cop s'ha dipositat l'energia a la roca aquesta augmentaria de temperatura i faria que el CO₂ disminuís de temperatura assolint 396.4 °C en la seva sortida a la superfície. Seguidament el CO₂ es tornaria a fer circular per els IHX i es tornaria a injectar a la roca.

Així doncs, sabent que s'injecten 4.1568 GJ d'energia tèrmica a la roca cada segon, ja que el CO₂ supercrític entra a una temperatura de 548.4 °C i surt a una temperatura de 396.4 °C, podem calcular la quantitat exacta que es diposita en la roca durant un període d'injecció, que pot ser primavera o hivern, però que durarà 91 dies.

$$Q = Q_s \times t$$

Q = quantitat d'energia tèrmica total que s'injecta en un període d'injecció

Q_s = quantitat d'energia tèrmica que s'injecta cada segon a la roca (J/s)
= 4156787958.4 J/s

t = temps que dura un període d'injecció (s) = 7862400 s (91 dies)

$$Q = 4156787958.4 \times 7862400$$

$$Q = 3.26823296441 \times 10^{16} \text{ J} \cong 3.2682 \times 10^{16} \text{ J}$$

Si mirem el resultat d'energia total que s'injecta a la roca durant la primavera o la tardor, 3.2682×10^{16} J, i la quantitat d'energia ens hem posat com a objectiu per assolir, 3.1536×10^{16} J, veurem que hi ha una diferència. Això és degut a que el nombre d'IHX utilitzat no s'adapta perfectament a la quantitat d'energia que volem, sinó que el nombre d'IHX és aproximat a l'engròs, per tal que no falti energia, sinó que en sobri.

Així doncs durant el cicle anual hi haurà un respectiu increment de temperatura de la roca de 152 °C i -152 °C, segons s'injecti o s'extregui energia tèrmica. Pel que fa a la quantitat d'energia sobrant, s'ha de tenir

en compte que injectar escalfor és un intercanvi d'energies, per tant, com que el rendiment idíl·lic no existeix, aquesta energia sobrant supliria l'energia que s'ha perdut per intercanvis de calor amb tuberes o fregament. Així doncs, ja que no s'han tingut en compte les pèrdues de calor durant la injecció, és a dir, la tubera d'injecció, aquesta energia sobrant es podria dir que fa referència a l'energia que s'ha perdut per la tubera mentre s'injectava escalfor.

3.4. Emmagatzemar escalfor

Quan injectem o recuperem la calor de la roca del subsòl, a la vegada l'estem emmagatzemant, de tal manera que es genera un procés constant d'emmagatzematge ja que la temperatura de la reserva geotèrmica està sempre entre 396.4 °C i 548.4 °C. Això vol dir que es tracta d'un procés d'emmagatzematge on la temperatura de la reserva mai baixa de 396.4 °C. En conseqüència, hi ha diversos factors que condicionaran l'eficiència de la reserva, així com el tipus de roca, la quantitat, la mida i la forma.

Pel que fa al tipus de roca, s'ha de buscar un mineral que tingui les característiques següents: fàcil localització i abundants reserves, alta porositat per tal de deixar fluir fàcilment el CO₂, baixa conductivitat tèrmica per reduir les pèrdues de calor pel voltant, alt calor específic per tal que pugui emmagatzemar gran quantitat de calor en poc espai i alta densitat per tal que hi hagi més massa en poc espai. Que s'adaptin a aquestes característiques,

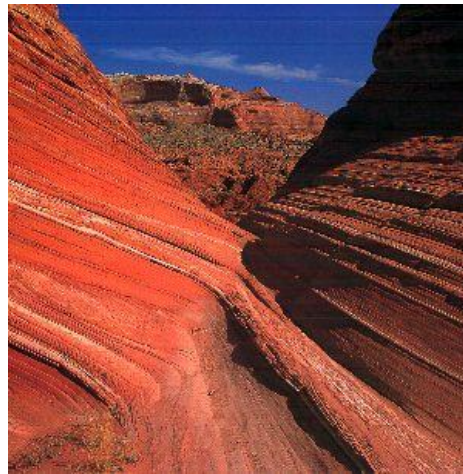


Fig. 11. *Jaciment de gres a Utah (Estats Units)*

dintre de les quals és principal la porositat, hi podem trobar el grup general de roques sedimentàries, ja que es troben fàcilment i tenen una porositat alta ja que no existeixen forts lligams entre les partícules. Dintre del grup de roques sedimentàries, podem destacar dos tipus de roca: el gres (o pedra sorrenca) i la pedra calcària. Si comparem les dos pedres podrem veure

que les dos s'assemblen molt, pel que fa a les seves propietats, però el gres és una pedra que s'adaptarà més a les prioritats esmentades anteriorment. Així, el gres o pedra sorrenca serà la roca utilitzada en el sistema d'emmagatzematge d'energia estacional, amb una porositat mitjana del 27 %, un calor específic de $920 \text{ J/kg} \times ^\circ\text{K}$, una conductivitat tèrmica de 1.7 W/m i una densitat mitjana de 2300 kg/m^3 ($2140\text{-}2360 \text{ kg/m}^3$) [18].

La quantitat de roca necessària per emmagatzemar l'energia total de 1 GW·any ($3.1536 \times 10^{16} \text{ J}$) ha sigut calculada anteriorment, on aquesta equival a $2.5515 \times 10^{11} \text{ kg}$ de gres. Així doncs sabent la quantitat i la densitat del gres podem determinar el volum que ocuparà la reserva.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$\rho =$ densitat del gres (kg/m^3) = 2300 kg/m^3

$m =$ massa total de gres (kg) = 225514874142 kg

$V =$ volum que ocuparà tot el gres en l'espai

$$2300 = \frac{225514874142}{V}$$

$$V = 98049945.28 \text{ m}^3 \cong 9.805 \times 10^7 \text{ m}^3$$

Per tant el volum de roca total serà igual a $9.805 \times 10^7 \text{ m}^3$, que és el mateix que un cub de 461.12 metres de costat. Per tal de deixar el volum igual però minimitzar les pèrdues de calor, hem de transformar aquest suposat cub en un objecte que tenint un volum aproximat de $9.805 \times 10^7 \text{ m}^3$ tingui la menor superfície.

$$V = \frac{4}{3} \times \pi \times R^3$$

$V =$ Volum total de roca (m^3) = 98049945.28 m^3

$R =$ Radi de l'esfera resultant (m)

$$98049945.28 = \frac{4}{3} \times \pi \times R^3$$

$$R = 286.06 \text{ m}$$

Amb el radi calculem la superfície.

$$S = 4 \times \pi \times R^2$$

S = superfície de l'esfera de roca (m²)

R = radi de l'esfera de roca (m) = 286.06 m

$$S = 4 \times \pi \times (286.06)^2$$

$$S = 1028290.2 \text{ m}^2$$

Així doncs l'esfera és el cos que presenta la menor superfície, 1028290.2 m², i conseqüentment que perd menys energia tèrmica durant l'emmagatzematge anual. Malgrat això, els jaciments de gres no es troben com a jaciments de grans dimensions pel que fa a profunditats, sinó que la seva amplada està al voltant dels 130 metres [19]. Això fa que haguem de variar la forma del jaciment, per tal que s'adapti més a la realitat. Suposem un cilindre de 130 metres d'altura.

$$V = h \times \pi \times R^2$$

V = Volum total de roca (m³) = 98049945.28 m³

h = altura del cilindre de roca que volem formar (m) = 130 m

R = Radi del cilindre de roca resultant (m)

$$98049945.28 = 130 \times \pi \times R^2$$

$$R = 489.98 \text{ m} \cong 490 \text{ m}$$

Amb el radi calculem la superfície del cilindre.

$$S = 2 \times \pi \times R^2 + h \times 2 \times R \times \pi$$

S = superfície del cilindre de roca (m²)

R = radi del cilindre de roca (m) = 489.98 m

h = altura del cilindre de roca (m) = 130 m

$$S = 2 \times \pi \times (489.98)^2 + 130 \times 2 \times \pi \times 489.98$$

$$S = 1908692.21 \text{ m}^2$$

Així doncs tindrem un cilindre amb radi de 490 metres de radi i 130 metres d'altura, el que suposa que tindrà una superfície de 1908692.2 m². Si ho comparem amb l'esfera, 1028290.2 m², veurem que la superfície del nou cilindre casi bé doble la superfície de l'esfera, per tant, una esfera perdrà menys calor que el cilindre.

Així doncs, tota la roca, a mesura que es va escalfant quan s'injecta calor i es refreda quan s'extreu calor, també s'anirà refredant a causa del contacte amb tot el conjunt de roca del seu voltant, ja que tot el jaciment de gres estarà en contacte amb un altre jaciment, i així successivament. Per tant, quan es transmet escalfor a la roca a través del CO₂, aquesta també transmet la calor a la roca del seu voltant i per tant hi ha pèrdues, ja que part de la calor no es queda en el volum de roca que volem escalfar sinó que s'expandeix. D'aquesta manera, sabent les propietats de la roca i la reserva i la quantitat d'energia, podem calcular l'energia perduda.

$$q = \lambda \times \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

q = quantitat d'energia tèrmica perduda cada segon per cada metre (J/m·s)

λ = conductivitat tèrmica del gres (W/m·°C) = 1.7 W/m·°C

ΔT = increment de temperatura amb l'exterior (°C) = (548.4 – 30) °C = 518.4 °C

Δx = increment de espai entre el centre de la reserva i la superfície (m) = 500 m

$$q = 1.7 \times \frac{518.4}{500}$$

$$q = 1.7626 \text{ W/m}$$

Així doncs cada segon es perdran 1.7626 W per cada metre, per tant, s'hi ho multipliquem per la superfície obtindrem l'energia total perduda cada segon. A més, si ho multipliquem pel temps total en el que es buida i s'omple la reserva obtindrem l'energia perduda durant un cicle de càrrega i descàrrega.

$$Q = q \times S \times t$$

Q = energia tèrmica perduda cada segon (J)

q = energia tèrmica que es perd cada segon per cada metre (W/m) = 1.7626 W/m

S = superfície total del cilindre (m²) = 1908692.2 m²

t = temps en realitzar un cicle de càrrega i descàrrega (s) = 15724900 s = 182 dies

$$Q = 1.7626 \times 1908692.2 \times 15724900$$

$$Q = 5.29023293556 \times 10^{13} \text{ J} \cong 5.2902 \times 10^{13} \text{ J}$$

Així doncs podem concloure que durant un període càrrega i descàrrega d'energia, és a dir, primavera-estiu o tardor-hivern, hi hauran unes pèrdues de 5.2902×10^{13} J. Si dividim les pèrdues calorífiques per l'energia total que emmagatzema la reserva geotèrmica, obtindrem el tant per cent de pèrdues de calor.

$$P = \frac{Qp}{Q} \times 100$$

P = percentatge de pèrdues energètiques a causa de la conductivitat del gres (%)

Qp = quantitat d'energia perduda durant el cicle de càrrega i descàrrega (J) = $5.29023293556 \times 10^{13}$ J

Q = quantitat total que s'injecta a la roca durant una injecció (J) = $3.26823296441 \times 10^{16}$ J

$$P = \frac{5.29023293556 \times 10^{13}}{3.26823296441 \times 10^{16}} \times 100$$

$$P = 0.1619 \%$$

Malgrat haver-hi pèrdues de calor, aquestes només representen un 0.1619 % del total d'energia que s'injecta a la roca, el que suposa que no són excessives. Per tant les pèrdues energètiques, tot i ser existents, no seran problemàtiques en la injecció i extracció d'energia de la reserva, ja que si recordem hi havia un excés de producció d'energia. És a dir que amb aquest excés d'energia les pèrdues calorífiques de la roca poden ser cobertes satisfactòriament.

3.5. Extreure escalfor

L'últim pas del procés d'emmagatzematge d'energia és l'extracció de l'energia tèrmica equilibradament de la roca per tal de convertir-la en electricitat.

Quan tota la calor ha estat injectada a la roca, el sistema de recuperació ha de començar a funcionar, és a dir, és farà l'extracció d'energia durant els mesos d'estiu (començant el dia 20 de juny) i els d'hivern (començant el 19 de desembre). Aquest últim procés és el mateix que s'utilitzaria en qualsevol altre central geotèrmica convencional, com s'ensenya en la *Figura 12*. No

obstant, hi ha una diferència que la fa diferent de les altres centrals geotèrmiques, el fluid geotèrmic que s'injecta a la roca per tal de treure l'escalfor. Enlloc d'utilitzar aigua a altes temperatures o vapor, com les centrals convencionals, s'utilitza CO_2 supercrític. Així doncs estem utilitzant el mateix fluid que hem utilitzat per injectar escalfor a la roca, i estem evitant l'ús de dos fluids diferents, cosa que facilita el procés i millora l'eficiència del conjunt [20]. A més a més, com s'ha comentat anteriorment, l'ús de CO_2 evita la dissolució de roques en ell mateix, millora l'intercanvi de calor i flueix més fàcilment entre les roques; a més de la seva seqüestració [17].

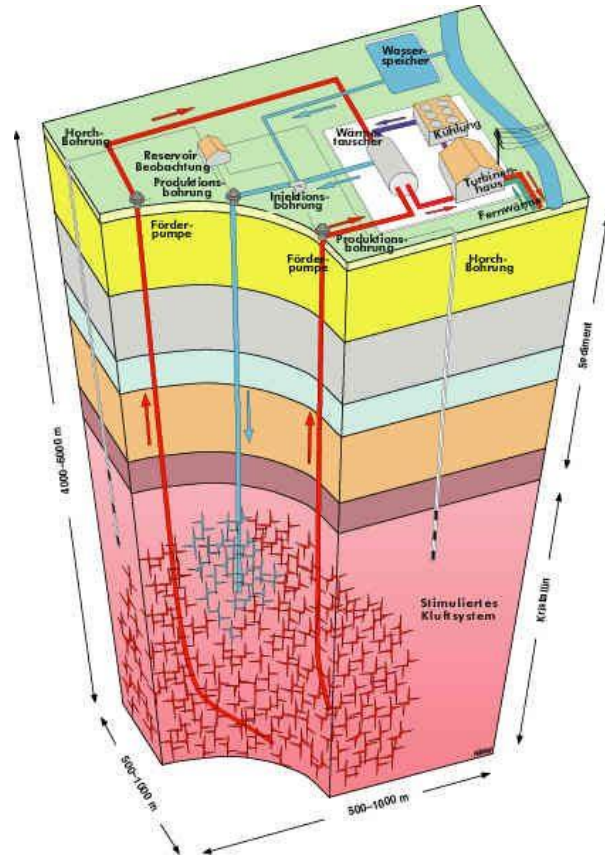


Fig. 12. Esquema d'una central geotèrmica convencional, en la qual s'injecta un fluid fred, s'extreu calent i es produeix electricitat mitjançant un intercanviador de calor i un turbogenerador

en ell mateix, millora l'intercanvi de calor i flueix més fàcilment entre les roques; a més de la seva seqüestració [17].

Per treure l'escalfor, s'injectarà CO_2 supercrític a una temperatura superior a 396.4 °C , però sempre per sobre. Mai podem injectar el CO_2 per sota d'aquesta temperatura, ja que aquesta és la temperatura mínima a la que s'extreu el CO_2 en el període d'injecció. És a dir, si volem treure tota l'energia en el període 91 dies hem d'aplicar les mateixes condicions en els dos processos, injecció i extracció. Un cop s'ha injectat el fluid, el CO_2 fluiria a través d'unes tuberes en direcció al centre de la roca. Tot el CO_2 s'expandirà radialment en totes les direccions del jaciment de tal manera, que al passar per dins la roca, absorbirà l'energia i sortirà a l'exterior. Un cop és escalfat a una temperatura semblant a la del jaciment i estant a la

superfície, tota l'energia tèrmica continguda en el CO₂ serà convertida en energia elèctrica.

Així doncs injectem CO₂ a una temperatura de 396.4 °C, flueix a través de la roca, s'escalfa fins a 538.4 °C i surt a la superfície. Com es pot comprovar, el CO₂ no és escalfat a la mateixa temperatura que li correspon al jaciment (548.4 °C) sinó que és escalfat fins a 538.4 °C. Això és degut a que la roca també actua com a un intercanviador de calor de tal manera que no es pot assolir la mateixa temperatura a banda i banda de l'intercanviador. A més a més, s'han de tenir en compte les pèrdues energètiques en les tuberes de recuperació, és a dir, les que transporten el CO₂ cap a l'exterior. Un cop tota l'energia es transportada cap a la superfície es poden utilitzar dos mètodes per tal d'obtenir electricitat.

El primer mètode, anomenat *Hot Dry Rock* (HDR, roca seca calenta) és el més utilitzat en centrals tèrmiques convencionals que extreuen el fluid a temperatures superiors als 150 °C [21]. Aquest consisteix en transportar directament el fluid geotèrmic (aigua calenta o vapor, ja que es tracta de centrals convencionals) als turbogeneradors on es generarà electricitat. Aquesta opció comporta que el fluid geotèrmic no ha de contenir cap substància dissolta en el seu contingut, com pedres, ja que deteriorarien considerablement els turbogeneradors. Per tant, suposant que el fluid geotèrmic està completament net, aquest pot ser conduït directament al turbogenerador per a generar electricitat. Aquest mètode no serà utilitzat en el nostre sistema ja que no utilitzem ni aigua ni vapor com a fluid geotèrmic, sinó CO₂ supercrític.

El segon mètode, que és el més comú, i que es pot trobar en la majoria de les centrals geotèrmiques, és l'ús d'un intercanviador de calor, de tal manera que la calor del fluid geotèrmic es passa a un altre fluid que serà el que accionarà la turbina o turbogenerador. Per tant, aquest mètode serà l'utilitzat en el sistema estacional d'emmagatzematge d'energia. Així doncs, el CO₂ que arriba a la superfície, arriba amb un caudal de 22484 kg/s i a una temperatura de 538.4 °C. Com que treballem a altes temperatures, utilitzarem el mateix *Intermediate Heat Exchanger* (IHX, Intercanviador

intermedi de calor) per tal de transportar l'energia del fluid geotèrmic a fluid de la turbina. El CO₂, al fluir a través del IHX transmetrà l'energia al fluid de la turbina aportant una energia de 3.8833×10^9 J.

$$Q = m \times C_e \times \Delta T$$

Q = quantitat d'energia tèrmica que transmet el CO₂ al IHX (J)

m = quantitat de CO₂ que circula cada segon pel IHX (kg/s) = 22484 kg/s

C_e = calor específic del CO₂ (J/kg×°K) = 1216.3 J/kg×°K

ΔT = increment de temperatura durant del CO₂ en el IHX (°K) = (538.4 – 396.4) °K = 142 °C

$$Q = 22484 \times 1216.3 \times 142$$

$$Q = 3883315066 \text{ J} \cong 3.8833 \times 10^9 \text{ J}$$

Aquesta energia serà la que es dipositarà en el IHX, però no tota l'energia serà transmesa a l'altre fluid de la turbina, ja que hi haurà pèrdues d'energia calorífica i en altres formes. Sabent el rendiment d'un IHX, 88.11 %, podem calcular tota l'energia que es transmet del fluid geotèrmic al fluid de la turbina. Aquest fluid de la turbina serà igualment CO₂, per tal de millorar el rendiment del sistema.

$$Q_u = \eta \times Q_c$$

Q_u = quantitat d'energia útil que es passarà al fluid de la turbina (J)

η = rendiment del IHX = 0.8811

Q_c = quantitat d'energia consumida procedent del fluid geotèrmic (J) = 3883315066 J

$$Q_u = 0.8811 \times 3883315066$$

$$Q_u = 3421588905 \text{ J} = 3.4216 \times 10^9 \text{ J}$$

Així doncs l'energia tèrmica que serà transmesa al CO₂ que vagi a la turbina serà de 3.4216×10^9 J cada segon. A més, sabent la relació d'eficiència entre la temperatura a la que entre el CO₂ de la roca i el CO₂ que va direcció a la turbina, 97.57 %, podem calcular la temperatura a la qual estarà el CO₂ de la turbina un cop escalfat.

$$T = R \times t$$

T = temperatura a la que surt del IHX el CO₂ que va cap a la turbina (°K)

R = relació d'eficiència entre la temperatura a la que entra el CO₂ de la roca i el CO₂ que va direcció a la turbina = 0.9757

t = temperatura a la que entra el CO₂ procedent de la roca al IHX (°K) = 538.4 °C = 811.4 °K

$$T = 0.9757 \times 811.4$$

$$T = 791.7 \text{ °K} = 518.7 \text{ °C}$$

Per tant, en el IHX hi haurà una caiguda de temperatura de 19.7 °C, que és la diferència entre la temperatura a la que entra el fluid geotèrmic, 538.4 °C, i la temperatura a la que surt el fluid de la turbina, 518.7 °C. Un cop tenim la temperatura a la que surt del IHX el CO₂ que va a la turbina i tota l'energia que se l'hi ha transmès s'ha de calcular la temperatura i el caudal de CO₂ que s'haurà de circular per aquest circuit. Així doncs, suposem que el fluid de la turbina té un increment de temperatura de 200 °C, el que suposa que el CO₂ de la turbina entra a uns 318.7 °C i surt a 518.7 °C. Per tant, l'única xifra que ens falta calcular és el caudal de CO₂ que circularà pel circuit de la turbina.

$$Q = m \times C_e \times \Delta T$$

Q = quantitat d'energia que es transmet al CO₂ de la turbina cada segon (J) = 3421588905 J

m = quantitat de CO₂ que circula cada segon per la turbina (kg/s)

C_e = calor específic del CO₂ (J/kg×°K) = 1216.3 J/kg×°K

ΔT = increment de temperatura que experimenta el CO₂ de la turbina en el IHX (°C) = (518.7 – 318.7) °C = 200 °C

$$3421588905 = m \times 1216.3 \times (518.7 - 318.7)$$

$$m = 14065.56 \text{ kg/s}$$

Per tant obtindrem que al costat del IHX en el que el CO₂ circula per la roca hi ha un caudal de 22484 kg/s, i pel costat de la turbina hi ha un caudal de 14065.56 kg/s. Així doncs, si calculem la relació entre el fluid de cada costat del IHX en el cas teòric normal, 0.3917 [15], i la del IHX que s'utilitza per extreure l'escalfor de la roca, 0.6256, podem veure que hi ha una clara diferència entre els dos. No obstant, això no suposarà un inconvenient.

$$R = \frac{C_s}{C_c}$$

R = relació entre el caudal de costat i costat d'un IHX

Cs = caudal de CO₂ que proveeix un IHX, el costat que s'ha d'escalfar (kg/s)
= 3212 kg/s

Cc = caudal de sals foses que proveeix un IHX, el costat que escalfa (kg/s)
= 8200 kg/s

$$R = \frac{3212}{8200}$$

$$R = 0.3917$$

$$R = \frac{Cs}{Cc}$$

R = relació entre el caudal de costat i costat d'un IHX

Cs = caudal de CO₂ que es proveeix en la banda de la roca (kg/s) = 22484 kg/s

Cc = caudal de CO₂ en el costat de la turbina (kg/s) = 14065.56 kg/s

$$R = \frac{22484}{14065.56}$$

$$R = 0.6256$$

El següent i últim pas consisteix en transformar tota l'energia tèrmica en electricitat. Aquest pas és comú en els dos possibles mètodes d'extracció de l'energia tèrmica de la roca. Així doncs, el que s'ha de determinar és l'eficiència del turbogenerador per a transformar l'energia cinètica que li proporciona el CO₂ a altes temperatures en electricitat.

$$\eta = 0.0005 \times T + 0.166 \text{ [22]}$$

η = rendiment dels turbogeneradors

T = temperatura a la que entra el CO₂ a la turbina (°C) = 518.7 °C

$$\eta = 0.0005 \times 518.7 + 0.166$$

$$\eta = 0.4252 = 42.52 \%$$

L'eficiència dels turbogeneradors, és a dir, de les turbines amb generadors que transformaran l'energia tèrmica del CO₂ en moviment en energia elèctrica, tenen un rendiment del 42.52 %. Per tant només un 42.52 % de l'energia tèrmica es transformarà en energia elèctrica. Un problema que suposa aquesta fórmula és que la temperatura final del CO₂ en el circuit de

la turbina quan hagin passat 3 mesos (91 dies) d'extracció d'energia serà de 380.1 °C.

$$T = R \times t$$

T = temperatura a la que surt del IHX el CO₂ que va cap a la turbina (°K)

R = relació d'eficiència entre la temperatura a la que entra el CO₂ de la roca i el CO₂ que va direcció a la turbina = 0.9757

t = temperatura a la que entra el CO₂ procedent de la roca al IHX (°K) = 396.4 °C = 669.4 °K

$$T = 0.9757 \times 669.4$$

$$T = 653.1 \text{ °K} = 380.1 \text{ °C}$$

Per la qual cosa, l'eficiència de les turbines es veurà rebaixada a 35.61 %.

$$\eta = 0.0005 \times T + 0.166 \text{ [22]}$$

η = rendiment dels turbogeneradors

T = temperatura a la que entra el CO₂ a la turbina (°C) = 380.1 °C

$$\eta = 0.0005 \times 380.1 + 0.166$$

$$\eta = 0.3561 = 35.61 \%$$

Així doncs si fem una mitjana entre la màxima i la mínima eficiència obtindrem l'eficiència mitjana de transformació dels turbogeneradors.

$$M = \frac{0.4252 + 0.3561}{2}$$

$$M = 0.39065 = 39.07 \%$$

Per tant amb una eficiència mitjana de transformació de l'energia tèrmica en elèctrica de 39.07 % podem calcular la quantitat d'energia elèctrica que es crearà cada segon.

$$E = Q \times \eta$$

E = energia elèctrica que es produirà cada segon (W)

Q = quantitat d'energia tèrmica que obté el CO₂ de la turbina cada segon en l'intercanvi del IHX (J/s) = 3421588905 J/s

η = rendiment mitjà de les turbines = 0.39065

$$E = 3421588905 \times 0.39065$$

$$E = 1336643706 \text{ W} = 1.3366 \times 10^9 \text{ W}$$

Doncs amb una potència de 1.3366 GW elèctrics, vol dir que en un segon es subministren 1.3366×10^9 J d'energia elèctrica a la xarxa elèctrica. El que suposa que en un període d'extracció de 91 dies s'obtidria un total de 1.0509×10^{16} J d'energia elèctrica.

$$W = E \times t$$

W = energia elèctrica obtinguda en un cicle(J)

E = energia elèctrica obtinguda en un segon (W) = 1336643706 W

t = temps d'un període d'extracció (s) = 91 dies = 7862400 s

$$W = 1336643706 \times 7862400$$

$$W = 1.050922747 \times 10^{16} \text{ J}$$

Tot i això, aquesta energia elèctrica només seria obtinguda en un període d'extracció d'energia, per exemple, l'estiu; per la qual cosa durant un any s'obtidria el doble d'energia elèctrica assolint així una quantitat de 2.1018×10^{16} J elèctrics.

3.6. Bombejar CO₂

Un afegit d'aquest sistema d'emmagatzematge d'energia estacional és el fet de bombejar el fluid geotèrmic, ja que per ell sol no fluirà lliurement a través de la roca. Per tant, hi haurà d'haver un important sistema de bombeig que permeti injectar i extreure el CO₂ fàcilment del jaciment. Aquest sistema de la central, és una part que ha d'estar en constant funcionament ja que sempre s'ha d'estar fent circular el CO₂ a través del jaciment. Per tant, el que faran les bombes, serà utilitzar l'electricitat que es produeix a la central per tal d'alimentar-se i funcionar. Malgrat això, durant els períodes d'injecció d'escalfor (primavera i tardor), les bombes no podran agafar electricitat produïda per la central sinó que s'haurà d'agafar electricitat de la xarxa elèctrica, però sempre s'haurà de subministrar electricitat a les bombes per tal que funcionin.

Per tant el que s'ha de calcular és la quantitat d'energia elèctrica que es necessitarà per tal d'alimentar les bombes. En primer lloc, el CO₂ supercrític sempre és injectat a la roca a una pressió de 20 MPa, flueix a través de la

roca i surt a l'exterior a una pressió de 18 MPa; el que suposa una caiguda de pressió de 2 MPa durant la circulació del CO₂ [16]. A continuació, sabem que el caudal de CO₂ que sempre circularà per la roca és de 22484 kg/s, la densitat del CO₂ en estat gasos és de 163 kg/m³ i que l'eficiència de bombeig de les bombes és del 90 %. D'aquesta manera podem calcular la quantitat d'energia elèctrica necessària basant-nos en bombes estàndard.

$$Wp = \frac{m \times \Delta P}{\eta \times \rho}$$

Wp = Quantitat d'energia elèctrica necessària per a bombejar el CO₂ a través del circuit (J)

m = caudal de CO₂ que circula per el jaciment i que s'ha de bombejar (kg/s)
= 22484 kg/s

ΔP = caiguda de pressió que experimenta el CO₂ al passar pel jaciment (Pa)
= 2×10⁶ Pa

η = eficiència de les bombes = 0.9 = 90 %

ρ = densitat del CO₂ en estat gasós a temperatures al voltant dels 470 °C i pressió de 2 MPa (kg/m³) = 163 kg/m³

$$Wp = \frac{22484 \times 2000000}{0.9 \times 163}$$

$$Wp = 306530334.01 \text{ J} = 3.0653 \times 10^8 \text{ J}$$

Així sabem que la quantitat d'energia que s'utilitzarà en un sol segon per tal d'injectar o extreure el CO₂ a la roca serà de 3.0653×10⁸ J, el que comportarà que si ho multipliquem per el temps d'un cycle d'injecció i extracció, sabem l'energia elèctrica total necessitada.

$$We = Wp \times t$$

We = energia elèctrica necessària per les bombes durant un cycle (J)

Wp = energia elèctrica necessària cada segon (J/s) = 306530334.01 J/s

t = temps d'un cycle d'injecció i extracció (s) = 182 dies = 15724800 s

$$We = 306530334.01 \times 15724800$$

$$We = 4.82012819624 \times 10^{15} \text{ J}$$

Així doncs sabem que en un cycle d'extracció i injecció hi ha una demanda elèctrica de 4.8201×10¹⁵ J, el que suposa un 45.87 % de la producció elèctrica del sistema estacional en un cycle.

$$P = \frac{We}{W} \times 100$$

P = percentatge d'energia elèctrica produïda i utilitzada per a alimentar el mateix sistema de bombeig (%)

We = energia elèctrica necessària per alimentar les bombes durant un cicle (J) = $4.820128196 \times 10^{15}$ J

W = energia elèctrica obtinguda en un cicle (J) = $1.050922747 \times 10^{16}$

$$P = \frac{4.820128196 \times 10^{15}}{1.050922747 \times 10^{16}} \times 100$$

$$P = 45.87 \%$$

Aquesta despesa elèctrica és molt gran en comparació a la producció elèctrica pel que fa baixar l'eficiència del sistema d'emmagatzematge en general. Així doncs la producció elèctrica que realment serà útil per tal de ser enviada a la xarxa elèctrica serà de 5.6891×10^{15} J en un cicle.

$$Wu = W - We$$

Wu = energia elèctrica útil per a ser enviada directament a la xarxa elèctrica (J)

W = energia elèctrica obtinguda en un mes (J) = $1.050922747 \times 10^{16}$

We = energia elèctrica necessària per alimentar les bombes durant un cicle (J) = $4.820128196 \times 10^{15}$ J

$$Wu = 1.050922747 \times 10^{16} - 4.820128196 \times 10^{15}$$

$$Wu = 5.68909927 \times 10^{15} \text{ J}$$

3.7. Eficiència de la central

Finalment una vegada sabem tota l'energia que es genera a la central nuclear, la que s'injecta a la roca, la que s'extreu, la que és utilitzada en el sistema de bombeig i la que és transformada en electricitat, podem determinar les diferents eficiències de cada part de la central.

El sistema d'emmagatzematge com a conjunt té una eficiència del 17.41 %, donada per l'energia que produeix la central geotèrmica i la que és finalment transformada en electricitat.

$$e = \frac{Wu}{Q} \times 100$$

e = eficiència energètica del sistema d'emmagatzematge en conjunt (%)

W_u = energia elèctrica que és finalment proporcionada a la roca en un cicle (J) = $5.68909927 \times 10^{15}$ J

Q = energia tèrmica que és proveïda per la central nuclear (J) = $3.26823296441 \times 10^{16}$ J

$$e = \frac{5.68909927 \times 10^{15}}{3.26823296441 \times 10^{16}} \times 100$$

$$e = 17.4073 \%$$

La central nuclear, en cas que no tingués el sistema d'emmagatzematge estacional té una eficiència de generació d'electricitat del 39.07 %, la mateixa que tenen les turbines, ja que en aquest suposat cas tota l'energia tèrmica produïda a la central nuclear seria directament transformada en electricitat sense tenir que passar per la roca.

La eficiència del sistema d'emmagatzematge estacional només tenint en compte la part de la roca, es trobaria dividint l'eficiència del sistema d'emmagatzematge total entre l'eficiència de la central nuclear sola.

$$R = \frac{e}{E} \times 100$$

R = rendiment del sistema d'emmagatzematge només en la roca (%)

e = eficiència energètica del sistema d'emmagatzematge en conjunt = 0.174073

E = eficiència energètica del sistema sense l'emmagatzematge = 0.3907

$$R = \frac{0.174073}{0.3907} \times 100$$

$$R = 44.55 \%$$

Així doncs, sabent que el rendiment del sistema d'emmagatzematge en la roca solament és del 44.55 %, podem determinar directament tota l'energia que és transformada en electricitat sense haver de fer tots els càlculs en possibles càlculs ràpids.

3.8. Disseny del Jaciment

Un dels factors més importats per a tal que la central funcioni correctament és el disseny correcte del jaciment, ja que no tota la roca

s'adapta a les propietats desitjades. S'ha de tenir en compte la forma del jaciment, les tuberes d'injecció i extracció, i el fluir del CO₂ a través de la roca. Tal i com es presenten les característiques següents fa que aquest sistema es pugui instal·lar a qualsevol part del món, tot i que la geografia i la geologia de l'indret afectaran més positivament o menys a la construcció i funcionament del sistema.

3.8.1. Geometria del Jaciment

Tal i com s'ha comentat anteriorment, el jaciment serà de gres i tindrà les característiques següents:

- Volum: 98049945.28 m³
- Massa: 225514874142 kg
- Superfície: 1908692.2 m²
- Distància del centre a la superfície: 500 m
- Forma: cilindre
 - Alçada: 130 m
 - Radi: 489.98 m

Per tant, sabent aquestes propietats es pot passar a la col·locació estratègica de les tuberes d'injecció i les d'extracció de CO₂, per tal d'aconseguir el màxim rendiment en el transport del CO₂ a través de la roca.

Sabem que el CO₂ s'ha d'injectar per unes tuberes, ha de circular per la roca i ha de sortir per unes altres. El caudal de CO₂ que s'injecta a la roca sempre serà el mateix, 22484 kg/s (137.94 m³/s), i serà el mateix que s'haurà de extreure per a tal de tornar a injectar, creant així un circuit. Així doncs es col·locarà una tubera central per la que s'injectarà el CO₂, ja sigui a baixa o a alta temperatura. Aquesta haurà de tenir les dimensions següents:

- Llargada: 560 m
 - Inici dels forats: 440 m
 - Final dels forats: 560 m
- Radi interior: 2.541 m

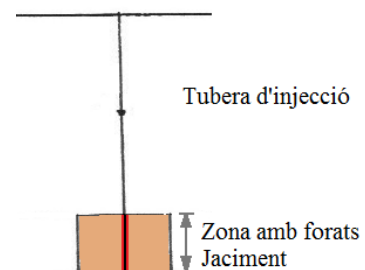


Fig. 13. Tubera d'injecció

A més a més, aquesta tubera haurà de tenir uns forats a la última part de tal manera que el CO₂ pugui anar entrant al jaciment de gres. Així doncs, els forats començaran a ser presents a una distància de 440 m, i la quantitat de forats haurà d'anar augmentant progressivament fins que el tub s'acabi, per tal que no tot el CO₂ entri a la roca per la part més superficial sinó que es reparteixi per tota la roca equitativament [23].

A continuació, el CO₂ fluirà a través de la roca, expandint-se des de la part inferior central del jaciment en direcció als laterals. Així, com que el CO₂ fluirà d'una manera regular cap als laterals, s'hauran de col·locar tuberes al voltant de la tubera central per tal de recuperar tot el CO₂ injectat. Aquestes tuberes s'han de col·locar de manera que totes quedin a la mateixa distància del centre i que permetin la correcte extracció del fluid. Així doncs, les tuberes d'extracció, les quals absorbiran el CO₂ que s'hagi refredat o escalfat, estaran quasi bé als límits del jaciment, per tal d'aprofitar al màxim les dimensions d'aquest [24]. Es col·locaran 16 tuberes equidistants al centre a un radi de 450 m. Aquestes començaran aproximadament a la meitat del jaciment i la part que queda dintre del jaciment tindrà forats, de tal manera que a l'extrem inferior n'hi hagi molts i a mesura que s'acosta a la part superior del jaciment no n'hi hagin. Això és degut a que el CO₂, al ser un gas, té una densitat inferior a la de la roca i, per tant, té tendència a anar cap amunt. Tot i això, al estar sotmès a altes pressions dins la roca, el moviment del CO₂ estarà condicionat per les esquerdes i les parts més poroses del gres.

- Quantitat: 16
- Distància a la tubera central: 450 m
- Llargada: 500 m
 - Forats superiors: 435 m
 - Forats inferiors: 500 m
- Radi interior: 0.635 m

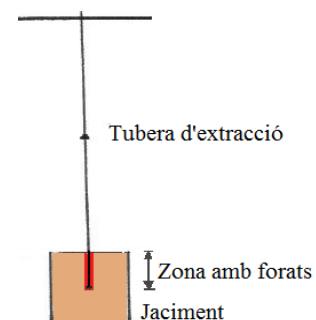


Fig. 14. Tubera d'extracció

Teòricament el fluid geotèrmic CO₂ es dirigirà sempre cap a les fonts d'extracció ja que és la única escapada possible cap a l'exterior i cap a latituds superiors, ja que la tendència a pujar el farà anar en direcció

ascendent. A més, hi haurà bombes que xuclaran el CO₂ per tal que el seu flux sigui més constant. Un altre problema que és pot presentar és que el CO₂ s'escapi pels voltants, però com que a l'hora d'adaptar el jaciment per tal que hi circuli el CO₂ s'ha fet fracturació hidràulica, farà que el camí que ha de fer el CO₂ estigui més marcat i que vagi directament a les tuberes d'extracció.

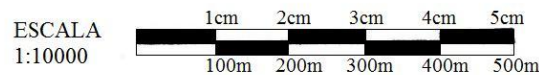
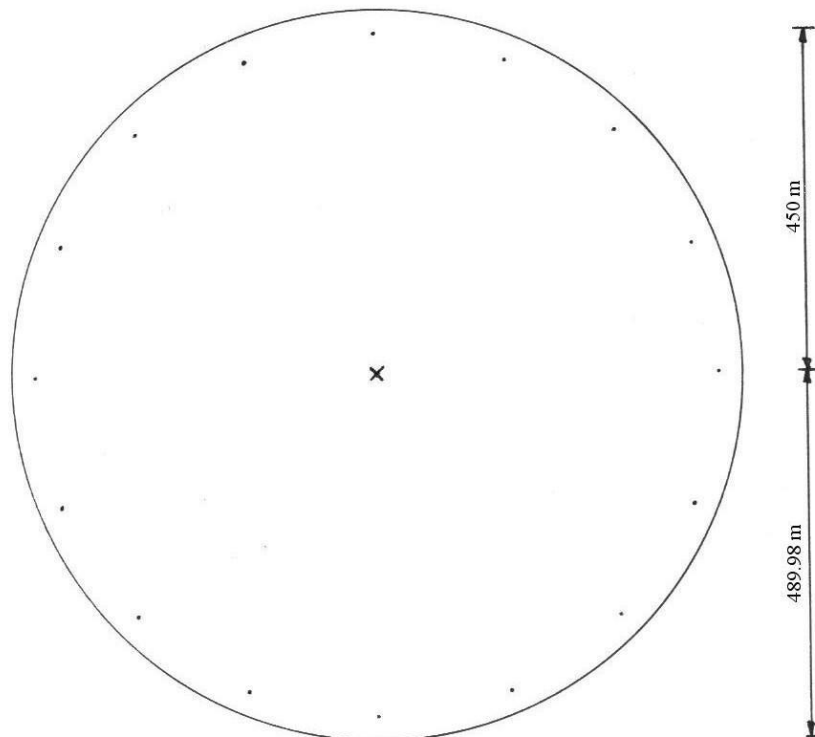
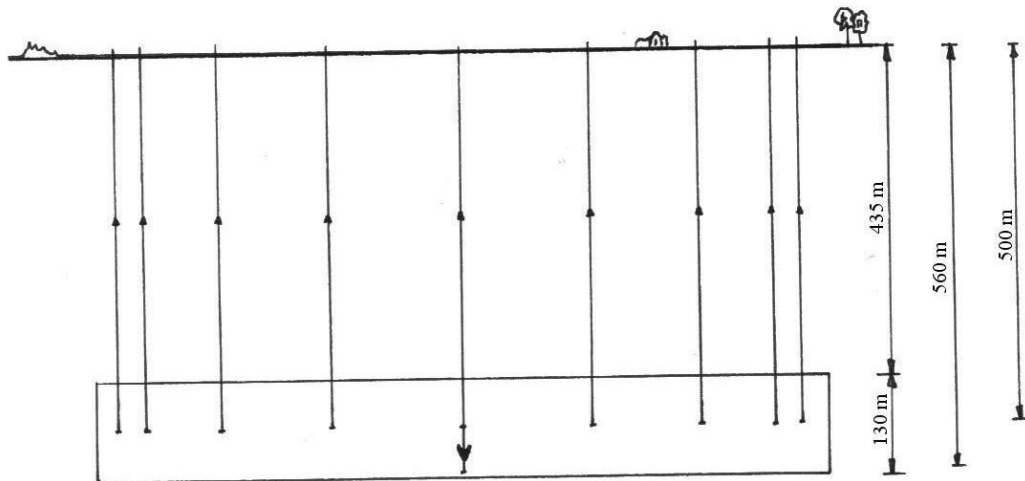


Fig. 15. Dibuix a escala del jaciment amb els tubs d'injecció i extracció, vista frontal i de perfil

3.8.2. Perforació

Tot i que el primer pas que s'ha de realitzar és la selecció del terreny, el següent pas consistiria en l'adaptació del terreny. Anteriorment s'ha dit que el lloc triat és un lloc supòsit en el qual trobarem un jaciment de gres (quasi bé homogeni) que estarà en profunditats entre 435 m (base superior) i 565 m (base inferior), per tant tindrà una amplada de 130 m, i la seva superfície superior haurà de ser de 754234.8 m^2 , tenint en compte que es tracta d'un cilindre.

Com que hi ha d'haver un fluid que circuli a través de la roca, s'han de crear uns forats que permetin entrar i sortir el fluid geotèrmic. Se'n crearà un d'entrada al centre amb 2.541 m de radi, i 16 als laterals amb 0.635 m de radi. Per tal de perforar la roca hi ha diverses possibilitats, dintre de les quals s'ha d'escollir la més rendible. Així doncs, aquí es presenten diverses noves tecnologies de perforació [25]:

La perforació làser o *Laser Drilling* és un sistema que utilitza la tecnologia làser (Llum amplificada per l'emissió estimulada de radiació) per a tal de desfer les roques i perforar-les. Aquest sistema utilitza la potència dels làsers per tal d'escalfar la roca instantàniament a temperatures molt elevades, cosa que fa que aquesta es desfaci, i un cop desfeta que es pugui perforar, tal i com es mostra en la *Figura 16*. Aquest sistema aporta varies avantatges respecte la perforació amb broca: és més ràpid i perfora més en poc temps (unes 100 vegades més), menys impacte ambiental, més segur, elimina l'estructura que subjecta la broca, i millora el rendiment econòmic de la

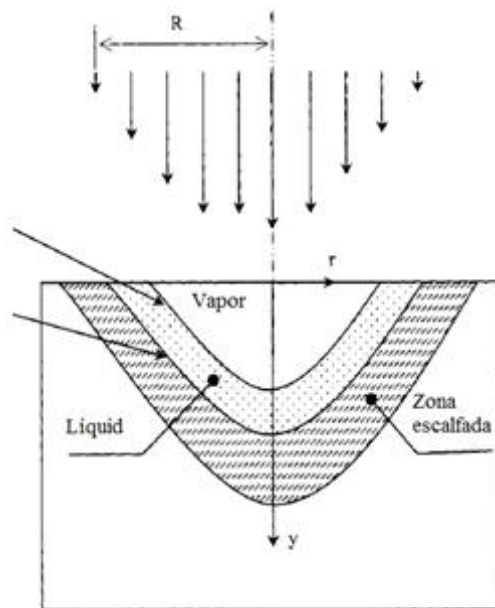


Fig. 16. Esquema de la perforació del làser, escalfant i desfent la roca

perforació. Tenint en compte que perforem gres, podem trobar perforacions mitjanes de $270 \text{ cm}^3/\text{h}$ ($50.6 \text{ m}^3/\text{h}$) en els làsers convencionals com el làser de CO_2 , però hi ha làsers experimentals com el MIRACL de l'armada dels EEUU que són capaços de

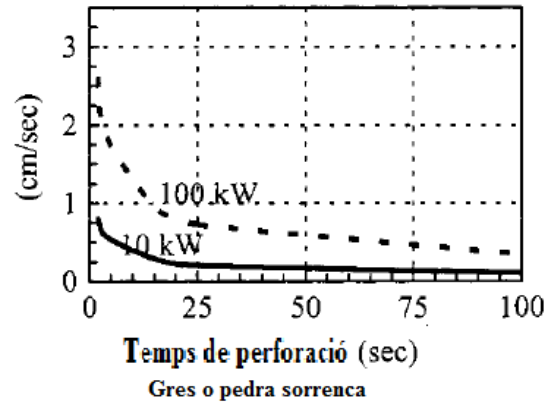


Fig. 17. Gràfic de la perforació segons el temps

perforar $92906.7 \text{ cm}^3/\text{h}$. L'inconvenient d'aquests làsers és que al principi la seva capacitat de perforació és molt elevada però després disminueix en una constant, tal i com es veu a la *Figura 17*; de tal manera que s'ha de parar i engegar per tal que sigui més eficaç. A més a més, el diàmetre del forat perforat depèn del diàmetre del làser, i aquests làsers solen tenir diàmetres d'uns 15.24 cm .

La perforació amb aigua a alta pressió o *High Pressure Water Jet Drilling* (HPWD) és un sistema que utilitza aigua a alta pressió per tal de foradar. Així doncs s'introdueixen uns capçals a la roca que perforen la roca amb aigua a pressions màximes de 40 MPa , ja que pressions superiors no són econòmicament rendibles, i gràcies a l'alta pressió de l'aigua i al moviment rotacional del capçal perforador es realitza el forat. Amb aquesta pressió es poden aconseguir perforacions d'entre $61 \text{ m}^3/\text{h}$ a $91.4 \text{ m}^3/\text{h}$, depenen de la porositat i duresa de la roca que s'ha de perforar. El HPWD suposa bastants avantatges respecte la perforació amb broca, com ara la reducció d'equipament, és més econòmic, més ràpida i, per tant, menys temps utilitzat en la perforació. A més, està demostrat que aquest sistema funciona molt millor en profunditats superiors als 5000 m .

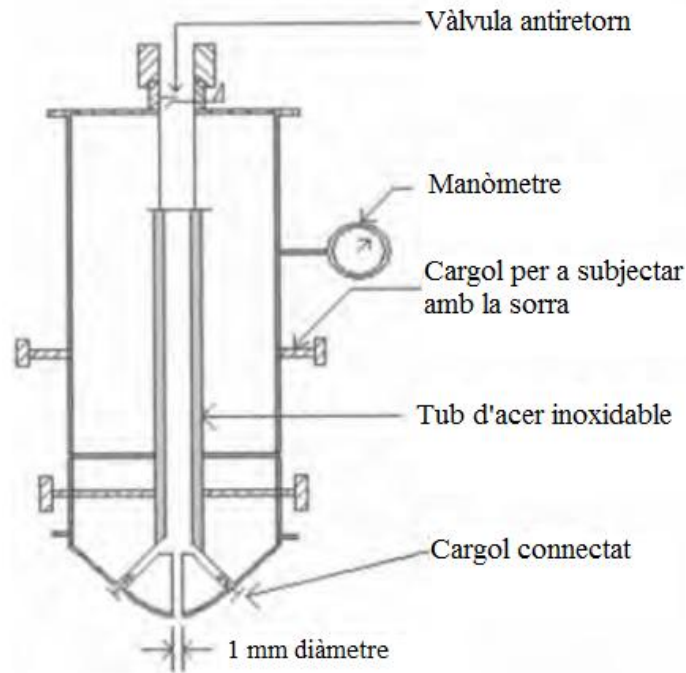


Fig. 18. Esquema frontal d'una broca HPWD

Els sistemes de perforació intel·ligent o *Smart Drilling Systems* (SDS) són uns nous sistemes de broques que al introduir-se a la roca van agafant dades i les van interpretant, canviant així la trajectòria, la velocitat i l'operació del capçal. Els SDS són capaços de agafar dades de les propietats de la roca i ajustar-les a la broca, agafar dades de com estar treballant la broca i com reacciona en condicions extremes, enviar la informació ràpidament a la superfície, utilitzar les dades per adaptar el treball de la broca i millorar el funcionament en condicions extremes (com a 175°C i 68.9 MPa).

La perforació profunda amb gas o *Deep Gas Drilling* és un sistema que consisteix en realitzar forats a grans profunditats, per la qual cosa es sotmetent les broques a condicions extremes. Aquest nou sistema permet aguantar temperatures de 205 °C i pressions molt altes, gràcies a la constant obtenció de dades de la perforació que fa que es puguin adaptar les propietats de la broca a la perforació en temps real.

Així doncs, comparant aquests diferents sistemes de perforació podem veure que els més eficients són la perforació làser o amb aigua a alta pressió, per la qual cosa un dels dos ha de ser escollit. Comparant

les seves propietats, podrem veure que la perforació amb aigua a alta pressió desbanca a la perforació làser ja que la velocitat de perforació és més ràpida i menys costosa. Així doncs utilitzarem la perforació amb aigua a alta pressió per tal de realitzar els 17 forats, que ens permet fer els forats a 91.4 m/h a 40 MPa de pressió. Per tal d'estalviar preus i l'ús de moltes broques diferents només n'utilitzarem una de 0.65 m de radi, aproximadament la mida de les tuberes d'extracció del fluid. Així doncs el procés de perforació duraria aproximadament unes 181.16 hores (7.55 dies), en cas que no hi haguessin problemes en la perforació i que no es paressin les màquines en cap moment.

$$t = \frac{x \times 16 + l \times \left(\frac{R}{r}\right)^2}{v}$$

t = temps de perforació (h)

x = longitud de les tuberes d'extracció (m) = 500 m

l = longitud de la tubera d'injecció (m) = 560 m

R = radi de la tubera d'injecció (m) = 2.541 m

r = radi de la broca (m) = 0.65 m

v = velocitat de perforació (m/h) = 91.4 m/h

$$t = \frac{500 \times 16 + 560 \times \left(\frac{2.541}{0.65}\right)^2}{91.4}$$

$$t = 181.1594 \text{ h} \cong 7.55 \text{ dies}$$

3.8.3. Fracturació Hidràulica

El següent pas per tal d'adaptar el terreny un cop ja s'han fet els forats que accedeixen al jaciment, és augmentar la porositat d'aquest. La fracturació hidràulica és un mètode utilitzat per a crear una font d'energia geotèrmica en qualsevol indret de la terra i utilitzat recentment en els Sistemes geotèrmics millorats o *Enhanced Geothermal Systems* (EGS). Aquest procés consisteix en fer un forat pel qual s'introduirà aigua barrejada amb altres materials a altes pressions (100 MPa) i caudal abundant (0.265 m³/s), això farà que flueixi a través de la roca i que creï esquerdes [26]; com es mostra en la *Figura 19*. A continuació, es treu tota l'aigua i, per evitar que es tanquin les esquerdes, s'introdueix un

material amb una permeabilitat més alta que la roca que s'ha fracturat per tal de recobrir les fractures i esquerdes.

Aquest sistema, s'utilitzarà de la següent manera en el nostre sistema geotèrmic: s'anirà introduint per la tubera central el compost d'aigua a 100 MPa fins que ja no en pugui circular més; després, s'obriran les tuberes d'extracció i com que es seguirà injectant el compost aquós, aquest es dirigirà a la superfície, finalment, tota l'aigua

serà extreta injectant el fluid per a recobrir les parets de les esquerdes. L'avantatge que suposa esperar a que es facin les fractures i després deixar sortir el compost d'aigua per les tuberes d'extracció, és que es crea un circuit per tal que el CO₂ circuli més fàcilment a través de la reserva geotèrmica que s'ha creat. Així doncs, aquest sistema ens permet millorar la fluïdesa del CO₂ a través de la roca [27].

3.9. Resum

El sistema d'emmagatzematge d'energia estacional és un sistema que serveix per a aproximar l'oferta d'energia a la demanda de la població, de tal manera que no falti ni es malbarati energia. Per aconseguir això s'ha proposat la creació del següent sistema d'emmagatzematge, tal i com es veu en la *Figura 20*, el qual té com a objectiu emmagatzemar 1 GW·any (3.1536×10^{16} J) d'energia tèrmica:

- Primerament hem de determinar el lloc en el que volem situar la central d'emmagatzematge. Aquesta s'ha de localitzar en un lloc on la geografia sigui més o menys plana i que es trobi un jaciment de gres a una profunditat aproximada de 500 m sota terra. Un lloc ideal seria una gran vall de

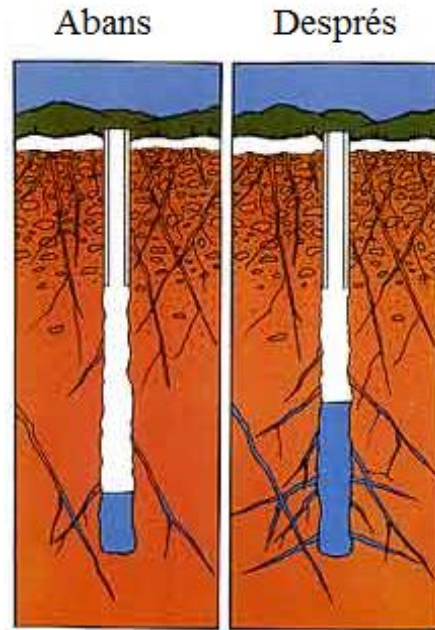


Fig. 19. Abans i després de realitzar la fracturació hidràulica

muntanyes on antigament hi hagués hagut un llac el qual s'ha assecat, de tal manera que la sedimentació de roques ha creat un gran jaciment de gres.

- En segon lloc, s'ha de concretar la quantitat de gres (225514874142 kg) i per tant el volum (98049945.28 m^3) que es necessita per emmagatzemar 1 GW-any d'energia tèrmica. Això equival a un jaciment amb una forma cilíndrica aproximada de 130 m d'alçada i 489.98 m de radi. En aquest jaciment que tindrà el centre a 500 metres sota terra, s'hi ha de perforar 17 forats: 1 forat central de 2.54 m de radi i 560 m de llargada, i 16 forats a 450 m equidistants al central, de 0.635 m de radi i 500 m de llargada. Per tal d'acabar d'adaptar el terreny es procedirà a fer fracturació hidràulica que augmentarà la porositat de la roca fent així que el CO_2 circuli més fàcilment a través seu. A més a més, a la superfície s'haurà d'instal·lar un sistema de seqüestració de CO_2 de l'atmosfera, un sistema de bombeig, una central nuclear que es aporti l'energia necessària i una central geotèrmica per a recuperar l'energia tèrmica i transformar-la en elèctrica.

- Una vegada ja s'ha creat tot el sistema es pot passar a començar a injectar escalfor a la roca per tal d'adaptar-la i poder començar amb el procés cíclic. Així doncs, obtenim energia procedent d'una central nuclear de sals foses, la qual ens aportarà aquestes sals foses escalfades a una temperatura de $568.9 \text{ }^\circ\text{C}$. Un cop aquestes sals circulin per l'intercanviador de calor IHX i transmetin l'escalfor al fluid geotèrmic CO_2 , aquest passarà d'estar de $396.4 \text{ }^\circ\text{C}$ a $548.4 \text{ }^\circ\text{C}$. El caudal de CO_2 que circularà per la roca serà el que aportaran 7 IHX, equivalent a 22484 kg/s , per tant, cada segon es transmetran $4.1568 \times 10^9 \text{ J}$ d'energia tèrmica a la roca.

- El primer pas que s'ha de fer es escalfar tota la roca de al reserva de gres, de la seva temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a la temperatura màxima que tindrà la reserva $548.4 \text{ }^\circ\text{C}$. Això es fa per tal de que es pugui començar amb normalitat el procés estacional i cíclic i per a millorar el rendiment, ja que és com si poséssim greix a un engranatge. Per tant, tenint en compte que cada segon s'aporten $4.1568 \times 10^9 \text{ J}$ d'energia a la roca, es necessitaran uns 300 dies (10 mesos aprox.) per a escalfar tota la roca de 30 a $548.8 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Una vegada tota la roca ja ha sigut escalfada es pot procedir amb el cicle anual, el qual consisteix d'una càrrega d'energia a la primavera (21 març – 19 juny), una descàrrega a l'estiu (20 juny – 18 setembre), una càrrega a la tardor (19 setembre – 18 desembre) i una descàrrega a l'hivern (19 desembre – 20 març), i així al llarg dels anys. Suposant que ja s'ha realitzat la primera càrrega i la següent descàrrega, es passarà a fer la primera càrrega del cicle anual. Aquesta farà que s'acumuli un total de 3.2682×10^{16} J d'energia tèrmica, els quals s'aniran injectant a la roca progressivament amb 4.1568×10^9 J cada segon durant 91 dies.

- Quan ja s'hagi arribat a injectar tota l'energia, es passarà a extreure-la. Això es farà mitjançant la injecció de CO₂ a 396.4 °C, el qual, al passar per la roca, s'escalfarà i assolirà una temperatura de 538.4 °C. A continuació tot aquest caudal de 22484 kg/s de CO₂ fluirà per uns altres IHX que transmetran una energia de 3.4216×10^9 J al fluid de la turbina. Aquest fluid de la turbina també serà CO₂, i amb un cabal de 14065.56 kg/s al passar per el IHX, experimentarà un increment de temperatura de 318.7 °C a 518.7 °C.

- També s'ha de tenir en compte que mentre dura la injecció i l'extracció d'energia hi ha una quantitat d'energia tèrmica que s'escapa pels voltants de la reserva, ja que no es tracta d'un sistema aïllat. Així doncs durant el temps que duren les dos fases, injecció i extracció, 182 dies, hi haurà una pèrdua energètica de 5.2902×10^{13} J el que representa un 0.1619 % del total d'energia que es s'injecta a la roca, per tant són pèrdues poc considerables.

- La quantitat d'energia que anirà a la turbina serà de 3.4216×10^9 J, que a continuació es transformaran en electricitat mitjançant un generador. En conjunt, el turbogenerador té una eficiència mitjana de 39.07 %, el que significa que tindrà una potència de 1.3366×10^9 W o 1336.6 MW. No obstant, això no significa que tota aquesta electricitat sigui enviada directament a la xarxa elèctrica de distribució, sinó que hi ha una part que és utilitzada per alimentar el propi sistema d'emmagatzematge. D'aquesta manera, un 45.87 % de l'electricitat generada és consumida per la central, i l'altre percentatge s'envia a la xarxa de distribució. Per tant ens trobem

davant d'una central de potència de 723.6 MW. Això vol dir que durant un període d'extracció d'energia es generaran 5.6891×10^{15} J elèctrics que s'enviaran a la xarxa de distribució.

- L'eficiència de la central amb el sistema d'emmagatzematge és del 17.4 %, és a dir, que si surten 100 J d'energia de la central nuclear, els fem estar en la roca, els traiem, i fem electricitat, només 17.4 J aniran directament a la xarxa de distribució elèctrica. En canvi, si eliminem el sistema d'emmagatzematge obtenim una eficiència del 39.07 %, que significa que de cada 100 J d'energia tèrmica es generen 39.07 J d'electricitat. Per tant podem veure que l'eficiència del sistema d'emmagatzematge, només tenint en compte la part de la roca, té una eficiència de 44.55 %, el que significa que el sistema d'emmagatzematge fa baixar l'eficiència general de elaboració d'energia, però permet emmagatzemar-la.

- Així doncs aquest sistema permet equilibrar la producció amb la demanda d'una zona determinada i fer que no hi hagi falta o malbaratament d'energia per part de les centrals veïnes.

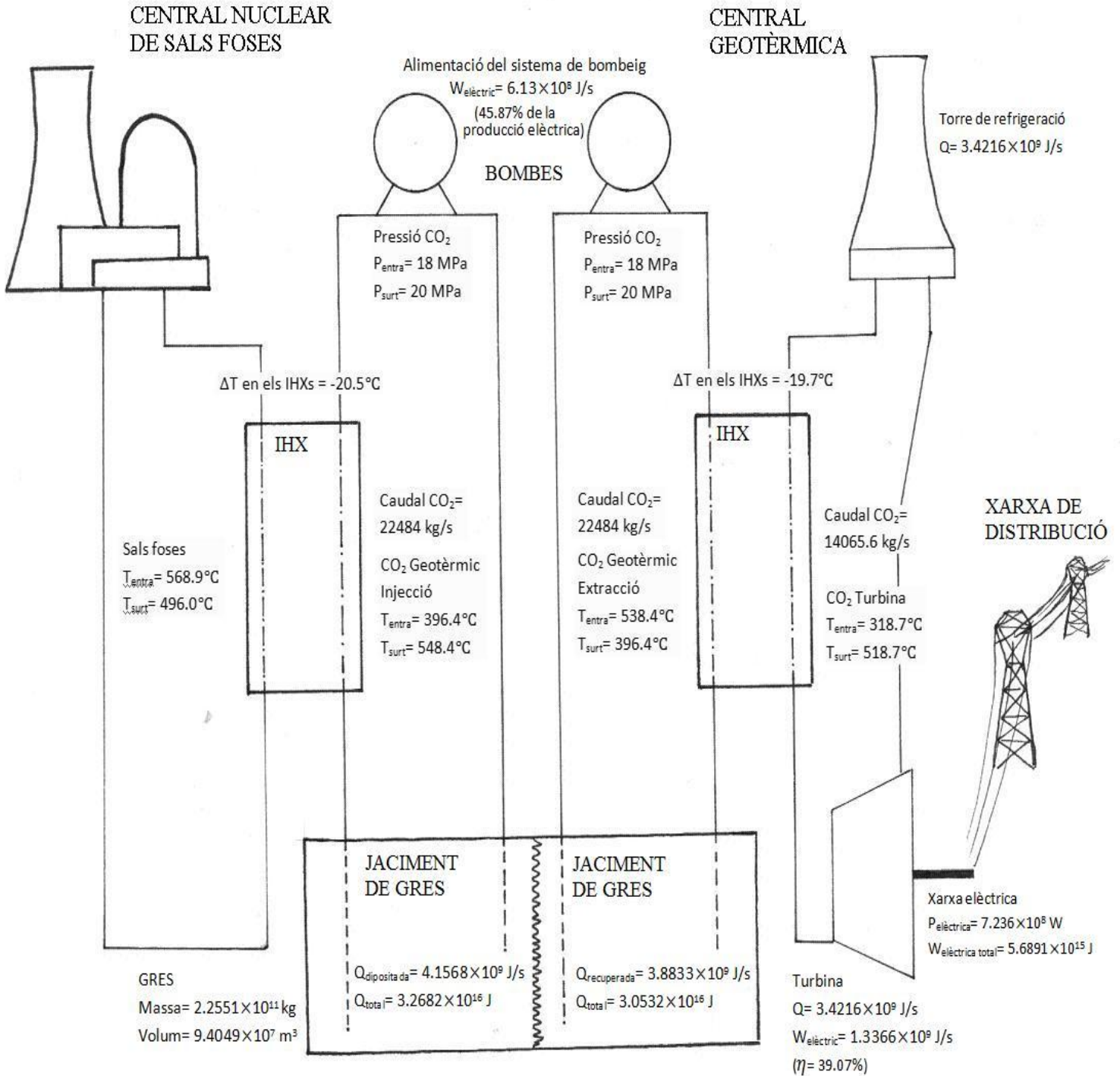


Fig. 20. Esquema del funcionament de la central en un cicle de funcionament (injecció i extracció)

3.10. Comparació del sistema d'emmagatzematge estacional en roca amb una central hidroelèctrica reversible

Tal i com s'ha dit abans, l'únic sistema que es pot comparar amb el nou sistema d'emmagatzematge estacional en roca és la central hidroelèctrica reversible. Així doncs, les seves propietats de les dues són presentades a continuació per fer una comparació:

Central hidroelèctrica reversible:

- Té una eficiència de generació i emmagatzematge d'energia del 75 %.
- Utilitza energies renovables com molins que bombegen aigua o bé plaques solars, o energia sobrant de plantes d'energia no renovables com centrals tèrmiques de carbó o centrals nuclears
- El temps de càrrega de la reserva d'aigua és d'entre unes quantes hores fins a períodes de cap de setmana, depenen del volum d'aigua que es vol utilitzar.
- El temps màxim de producció elèctrica és d'entre 5 i 6 hores, depenen del volum de l'aigua que es mou [28].
- Es triguen aproximadament 15 segons en posar en marxa i en aturar la central [28].
- Es necessita un lloc molt concret per a tal de col·locar la central, ja que ha de constar d'una reserva d'aigua a una desnivell considerable comparat amb l'altre reserva. Així doncs, la topografia i geografia té un paper important ja que hi ha d'haver dos reserves d'aigua separades per un desnivell important.
- És econòmicament car a l'hora de construir la central, degut a la complicada geografia de l'indret [29].

Sistema d'emmagatzematge estacional en roca:

- Té una eficiència d'emmagatzematge del 44.55 %.
- Pot utilitzar energia provinent d'una font no renovable com una central nuclear, o provinent d'una font renovable com una torre solar; però la temperatura del fluid ha de ser sempre molt elevada.

- El temps de càrrega de la central va de pocs dies a llargs períodes, depenen de la quantitat d'escalfor que es vulgui acumular, en el cas presentat anteriorment és de 3 mesos (91 dies).
- El temps de producció elèctrica va des de curts períodes (dies) fins llargs períodes (mesos), així l'exemple presentat pot abastir a la població durant 3 mesos (91 dies).
- Costa parar el bombeig de CO₂ i els intercanviadors de calor, ja que s'han de tancar unes comportes que hauran suportar les altes pressions del CO₂ (20 MPa). A més a més, com tot està a temperatures elevades costa molt refredar-ho i, per tant, es seguirà creant electricitat fins que es refredi el circuit, el que pot trigar unes quantes hores. En cas que s'utilitzés una central nuclear com a font d'alimentació, el sistema no es podria parar mai, ja que una reacció de fissió en cadena (realitzada al reactor de la central nuclear) no es pot aturar fins que el combustible s'ha exhaurit.
- Gràcies a la fracturació hidràulica es pot situar aquest sistema d'emmagatzematge en roca a qualsevol indret del món.
- És un sistema econòmicament car, ja que en la construcció del sistema s'ha d'invertir molt (perforació, fracturació hidràulica, central nuclear o torre solar i central geotèrmica) i a més el cost del bombeig del CO₂ consumeix molta electricitat.

Així doncs, venien les característiques dels dos sistemes es pot veure que la que té una millor eficiència és al central hidroelèctrica reversible. No obstant, aquesta no produeix electricitat a gran escala i a llargs períodes, a diferència, el sistema d'emmagatzematge d'energia estacional en roca ens permet satisfer aquesta prioritat.

4. Conclusions i recomanacions

De l'anterior anàlisi i proposta de creació d'un mètode que ens permetés equilibrar l'oferta a la demanda, per a tal que no es malbaratés ni faltés energia elèctrica, podem treure les següents conclusions:

- L'objectiu principal d'aquest estudi era plantejar la possible creació d'un sistema que emmagatzemés energia en grans quantitats de tal manera que pogués ser extreta per tal de cobrir els pics de demanda elèctrica de l'estiu i l'hivern. Aquest objectiu s'ha complert satisfactòriament, ja que totes les dades presentades i obtingudes es mouen en relació a aquesta necessitat. Fent així que, durant la primavera i la tardor s'emmagatzema energia, i durant l'estiu i l'hivern es recupera per a tal de crear electricitat.

- L'eficiència total del sistema d'emmagatzematge d'energia estacional en roca té una eficiència del 17.4 %. Tot i no ser una eficiència molt elevada, s'ha de tenir en compte que hi ha molts canvis d'estat d'energia, la qual es canvia múltiples vegades de material i de lloc. Això fa que l'eficiència sigui bona, ja que durant un període d'obtenció d'energia s'obtinguin 5.6891×10^{16} J d'energia elèctrica.

- Tot el sistema es basa en l'ús de noves tecnologies el que fa incrementar l'eficiència, ja que les seves propietats són millors comparades amb la de materials i sistemes utilitzats anteriorment. Alguns d'aquestes tecnologies són el CO₂ supercrític com a fluid, la fracturació hidràulica i la font d'energia d'una central amb reactor nuclear de sals foses (quarta generació).

- Aquest sistema es pot instal·lar en qualsevol indret del món ja que amb la fracturació hidràulica es poden adaptar les propietats de la roca i fer-la més porosa. Tot i això, sempre és més aconsellable situar aquest sistema en un lloc on la geografia i la geologia siguin favorables, per tal de fer la seva construcció i posada en marxa més econòmica i senzilla.

- Pel que fa a l'impacte ambiental, el major risc que suposa són els residus nuclears, però actualment això no suposa un problema ja que està tot molt controlat. Per altra banda, aquest sistema presenta una gran avantatge per

a la biosfera, ja que redueix la quantitat de CO₂ de l'atmosfera. Mitjançant la seqüestració de CO₂ per tal d'utilitzar-lo com a fluid geotèrmic es beneficia la biosfera, ja que es redueix la concentració en l'aire i s'evita l'efecte hivernacle, i es beneficia el sistema d'emmagatzematge, ja que les seves propietats són millors a les de l'aigua calenta o el vapor.

- Donada la comparació amb el sistema actual que es pot igualar al presentat, les centrals hidroelèctriques reversibles presenten algunes avantatges que el sistema d'emmagatzematge no té. No obstant, basant-nos en la hipòtesis del treball (emmagatzemar energia per equilibrar l'oferta amb la demanda elèctrica) i les dades obtingudes, el sistema d'emmagatzematge d'energia en roca és més prometedor i ens permet guardar i produir energia a gran escala i a llarg termini, cosa que farà equilibrar els pics de demanda elèctrica de l'estiu i l'hivern amb l'oferta.

Per a posteriors estudis de recerca o d'aplicació d'aquest sistema hi hauria varies recomanacions, tot i que en general s'hauria de fer un estudi molt més detallat si es volgués dur a la pràctica:

- S'haurien de reduir els costos elèctrics i econòmics del sistema de bombeig ja que suposen un 45.87 % de la producció elèctrica del sistema d'emmagatzematge.

- S'hauria de reduir la caiguda de pressió, les pèrdues energètiques i els increments de temperatura en cada lloc on es fa un intercanvi. Per poc significatives que semblin aquestes dades ajudarien a millorar l'eficiència del sistema

- S'hauria de fer un estudi més detallat del CO₂ supercrític com a fluid geotèrmic ja que tot i presentar avantatges sobre els altres fluids geotèrmics, encara és una tecnologia molt nova que està en vies de investigació.

- A part de millorar el sistema i els càlculs més detallats, també s'hauria d'estudiar la possibilitat que el sistema funcionés en períodes diferents i de maneres diferents a la presentada en el treball. Per exemple, que es generés la mateixa quantitat d'energia, però que només se n'enviés a la

xarxa elèctrica durant el dia, cosa que faria augmentar l'eficiència del sistema; que es produís electricitat per a proveir pics d'electricitat més concrets, com ara hores o dies puntuals, o que s'utilitzés energia sobrant d'altres centrals per estalviar energia. Malgrat el possible estudi d'altres vies de funcionament del sistema, és molt difícil engegar i parar el sistema a causa de les condicions extremes a les que està sotmès (alta temperatura i pressió).

5. Agraïments

M'agradaria agrair a tothom que ha aportat una mica d'ajuda o suport a l'elaboració d'aquest estudi, el qual ha donat lloc al treball de recerca. No cal que hagi sigut fonamental o, contràriament, imprescindible aquesta ajuda, sinó que pel simple fet d'estar al meu costat quan més ho necessitava ha sigut suficient.

M'agradaria agrair primerament al meu tutor del treball de recerca, Pere Bach, la seva ajuda, ja que sempre que l'he necessitat ha sigut la primera persona a la que m'he pogut adreçar. En segon lloc, està tota l'experiència viscuda durant l'estiu (2009) als Estats Units, en la qual vaig formar part del *Research Science Institute* (RSI). Aquesta estada em va permetre estar amb el professor Michael J. Driscoll i el doctor Charles W. Forsberg, els quals em van presentar l'oportunitat de realitzar un treball sobre aquest tema. Així doncs, gràcies a aquests professors per la seva vital ajuda i a tothom que va estar amb mi durant l'estiu. A continuació vull agrair el suport donat per la meua família més pròxima –Àngels, Carlos i Marc–, que m'ha servit per anar tirant endavant mica en mica sense perdre el rumb. Després ve la meua família en general que tot i no ser-hi cada dia, sí que han jugat un paper important. Finalment, moltes gràcies a un conjunt de persones interminable que va des dels meus amics més propers fins als professors de l'institut, el nom dels quals ocuparia uns altres dos treballs més.

6. Bibliografia

- [1] Richard Baxter: *Energy Storage, a nontechnical guide* PennWell Corporation 2006.
- [2] C. Forsberg and D. Solis: *A Nuclear-Geothermal Heat Storage System for Daily, Weekly, and Seasonal Peak Electricity Production* Massachusetts Institute of technology, 15-19 November 2009.
- [3] Dr Charles W. Forsberg: *Nuclear Geothermal Heat Source for Peak Electricity Production* Massachusetts Institute of Technology, spring 2009.
- [4] J. W. Tester et al.: *The Future of Geothermal Energy* Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [5] G. C. Howard and C. R. Fast: *Hydraulic Fracturing Monography* vol. 2 Henry L. Doherty Series 1970.
- [6] Butler, Roger M.: *Thermal Recovery of Oil and Bitumen*. 1997 ISBN 0-9682563-0-9.
- [7] *Squaring the circle on carbon capture and storage* Claverton Energy Group Conference. 24 October 2008. <http://www.claverton-energy.com/download/137/>
- [8] Gavin M. Mudd: *Acid In Situ Leach Uranium Mining* Victoria University, Melbourne 23-26 January 2000.
- [9] Isaiah O. Oloyede: *Design and Evaluation of Seasonal Storage Hydrogen Peak Electricity Supply System* Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Science and Engineering 10 June 2009.

- [10] M.P.LaBar, A.S.Shenoy, W.A.Simon and E.M.Campbel: *The Gas Turbine-Modular Helium Reactor Nuclear News*, a publication of the American nuclear society October 2003.
- [11] Section 5.3, WASH 1097: *Energy From Thorium's Document Repository "The Use of Thorium in Nuclear Power Reactors* For sale by the Superintendent of Documents, U.S., Washington, DC, or available in PDF from , Accessed November 2009.
- [12] *How LPT works*. Bright Source Energy, Inc. Technology. www.brightsourceenergy.com=technology=howlptworks
- [13] International Atomic Energy Agency (IAEA): *Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refueling* IAEA-TECDOC-1536 January 2007. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1536_web.pdf
- [14] Raymond C. Briant, Alvin M. Weinberg: *Molten Fluorides as Power Reactor Fuels. Nuclear Science and Engineering*. pp. 2, 797–803. May 2008. http://www.energyfromthorium.com/pdf/NSE_moltenFluorides.pdf
- [15] Neil E. Todreas and Pavel Hejzlar: *Flexible Conversion Ratio Fast Reactor Systems Evaluation* Nuclear Energy Research Initiative (NERI) Project 06-040 Project DEFC07- 06ID14733 June 2008.
- [16] Karsten Pruess and Mohamed Azaroual: *On the Feasibility if using Supercritical CO2 as Heat Transmission Fluid In an Engineering Hot Dry Rock Geothermal System* Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, February 2006. SGP-TR-179
- [17] Claverton Energy Group Conference: *Squaring the circle on carbon capture and storage*, 24 October 2008. <http://www.claverton-energy.com/download/137/>

- [18] Ray E. Bolz and George L. Tuve: *Handbook of tables for Applied Engineering Science* CRC Press 1973.
- [19] Messel Pit (Jaciment de Messel). Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/Messel_pit
- [20] Donald W. Brown: *A Hot Dry Rock Geothermal Energy Concept utilizing Supercritical CO2 instead of Water* Earth and Environmental Sciences Division, Los Alamos National Laboratory January 2000.
- [21] Antonio Creus Solé: *Energías Renovables* Cano Pina, S.L. - Ediciones CEYSA, 2004.
- [22] S. S. Fernandez, Adi Al Hajj-Ahmad, Eren Bolukbasi and M. J. Driscoll: *Extended-Scope Applications of the Supercritical CO2 Power Conversion System* Center for Advanced Nuclear Energy Systems (CANES) and Massachusetts Institute of Technology (MIT) August 2006.
- [23] James T. Kuwada: *Geothermal hot water recovery process and system*. United States Patent 3,782,468 September 1971
- [24] William C. Ziegenhain: *Method for the recovery of geothermal energy*. United States Patent 4,458,492 Mars 1978.
- [25] M. Ibrahim Khan and M. R. Islam: *The Petroleum Engineering Handbook: Sustainable Operations*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas ISBN 978- 1-933762-12-8 1968.
- [26] Hydraulic Fracturing. Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_fracturing

[27] C. Stephen Haase, Karen L. Von Damm, Stephen H. Stow: *Closure of the Oak Ridge National Laboratory Hydrofracture Facility*. Environmental Sciences Division Oak Ridge National Laboratory

[28] *Dinorwig power station*. International Power plc and Mitsui & CO., Ltd.
<http://www.fhc.co.uk/dinorwig.htm>

[29] Gyuk I, Kulkarni P, Sayer JH, 'et al.'. *The United States of storage*. IEEE Power and Energy Magazine **3**: 31–9. doi:10.1109/MPAE.2005.1405868
2005