

IMPIANTO GEOTERMICO PILOTA TORRE ALFINA

Distribuzione di temperatura e pressione nel serbatoio geotermico e Modello strutturale, idrogeologico e idraulico del serbatoio geotermico

1. PREMESSA

Nel seguito si riportano alcune considerazioni sulla distribuzione di pressione e temperatura nel serbatoio geotermico sia nell'intorno dei pozzi produttivi che in quello dei pozzi reiniettivi utilizzando i dati che emergono dalle simulazioni effettuate con il programma TOUGH 2 riportate nell'allegato 3 al Progetto Definitivo (ALL.3_MOD_NUM).

Inoltre, in analogia a quanto fatto per lo SIA di Castel Giorgio in risposta alla prescrizione A.2)d, il cui iter non è ancora concluso, si integra la simulazione del sistema geotermico Castel Giorgio – Torre Alfina mediante lo stesso software VISUAL MODFLOW Premium, prendendo in esame la contemporanea attività dei due impianti denominati Castel Giorgio (CG) e Torre Alfina (TA).

Si coglie l'occasione per ricordare che la portata di fluido considerata per il progetto CG è superiore a quella che sarà in realtà in quanto, successivamente all'istanza di VIA per CG, sono stati introdotti per legge limiti di produzione annua (40MWh) che di fatto impongono una riduzione della taglia dell'impianto e di conseguenza della portata di fluido necessaria. Lo SIA, che era stato concepito in linea con i precedenti valori di portata, in via assolutamente cautelativa, è stato mantenuto in linea con essi.

Complessivamente la richiesta di fluido per i due impianti non assumerà il valore pari alla somma delle due portate rispettivamente pari a 1050t/h e 850t/h ma sarà per ciascuno di essi pari a 850t/h. Pertanto le considerazioni svolte hanno carattere sicuramente cautelativo.

2. Modello geologico-strutturale del campo geotermico

Lo scopo della presente nota è quello di presentare i risultati di un nuovo modello idrogeologico del serbatoio geotermico predisposto dallo Studio Associato GEOTECNA per conto della società scrivente, che integra e reinterpreta i dati geofisici, geochimici e geologici dell'esplorazione profonda per valutare che quella proposta nel programma lavori corrisponde all'ubicazione ottimale dei pozzi di produzione e di reiniezione.

Le caratteristiche essenziali del campo geotermico sono riassunte nel profilo geologico riportato nella Fig. 1, prodotto utilizzando i risultati dei pozzi profondi da A13 a A14.

Il serbatoio geotermico è ospitato nelle rocce carbonatiche Mesozoiche fratturate di facies Toscana. La copertura impermeabile è rappresentata dalle unità alloctone flyschoidi di facies Ligure e Austroalpina interna, a loro volta localmente ricoperte dai terreni argilloso-sabbiosi a bassa permeabilità del Neogene e infine dalle vulcaniti quaternarie dei Vulsini, che comprendono anche un piccolo centro eruttivo ubicato proprio nel paese di Torre Alfina.

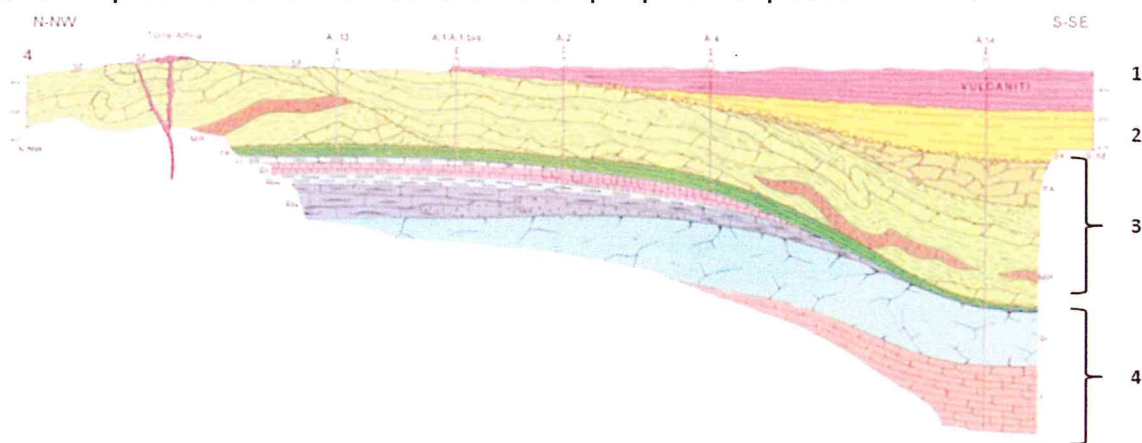


Figura 1. Profilo geologico della zona geotermica tra Torre Alfina e Castel Giorgio (pozzo A14) nel quale sono indicati 1) i terreni vulcanici; 2) le rocce Neogeniche; 3) le rocce dell'unità di facies Ligure e Austroalpina interna (copertura impermeabile); 4) le rocce di facies Toscana (che comprendono il serbatoio geotermico nei calcari fratturati (da Costantini et al., 1984).

Altre importanti informazioni geologico-strutturali sono fornite dal sondaggio A15, perforato nel 1987 fino alla profondità di 4826m dal p.c. (Buonasorte et al., 1989 e 1991).

3. Distribuzione della pressione nel serbatoio e relazione con la sismicità

La perturbazione di pressione indotta nel serbatoio geotermico dall'esercizio dell'impianto genera uno stato di depressione nel volume di roccia interessato dai pozzi produttivi e uno stato di sovrappressione nel volume di roccia interessato dalla reiniezione.

L'analisi della distribuzione di pressione nel serbatoio è stata effettuata sulla base:

- della simulazione numerica riportata in All.3 al Progetto Definitivo (eseguita da Terra Energy per conto del proponente facendo uso del programma TOUGH 2, per i cui dettagli si rimanda all'Allegato 3 al Progetto Definitivo); si è tenuto conto inoltre che la società RSE spa, che svolge attività di ricerca per conto del Ministero dello Sviluppo Economico, nel 2015 ha reso disponibili i risultati di una simulazione numerica del campo geotermico Castel Giorgio - Torre Alfina anche se operata per il solo impianto pilota Castel Giorgio. Anch'essa ha impiegato il software TOUGH 2 ma calato su un modello numerico ancor più sofisticato del precedente.

- di un'analisi numerica che prende in esame, con ancora maggior dettaglio della simulazione con TOUGH 2, il sistema geologico e le condizioni idrauliche del serbatoio, in accordo con quanto fatto anche per il progetto Castel Giorgio per lo studio dei flussi di acqua interni al serbatoio. Questa seconda analisi è stata fatta dalla società GEOTECNA per conto del proponente impiegando il programma di simulazione numerica MOD FLOW.

3.1 Risultati della simulazione con TOUGH 2

Sono stati ripresi i risultati della simulazione riportata in All. 3 al Progetto Definitivo per l'impianto di Torre Alfina considerato in esercizio contemporaneo a quello di Castel Giorgio, con l'obiettivo di focalizzare le zone interessate da perturbazione di pressione sia negativa che positiva, dovuta rispettivamente all'emungimento (pozzi produttivi) e alla reiniezione (pozzi reiniettivi).

Terra Energy ha completato il precedente lavoro delimitando i campi entro cui l'esercizio simulato del campo geotermico induce variazioni di pressione (ΔP)

rispetto allo stato originario di 10bar, 5bar e 3bar. I risultati sono stati rappresentati come regioni dello spazio entro le quali si generano perturbazioni ΔP maggiori o uguali, in valore assoluto, ai tre valori convenzionali di riferimento suddetti.

In Allegato 1 al presente documento è riportata la nota predisposta da Terra Energy ricavando i dati dalla simulazione riportata in All. 3 al Progetto Definitivo dell'impianto di Torre Alfina.

Nelle seguenti Figg.2 e 3 sono riportate in pianta e in un sistema tridimensionale le regioni dello spazio interessate dai valori presi a riferimento della perturbazione dopo 30 anni di esercizio dell'impianto.

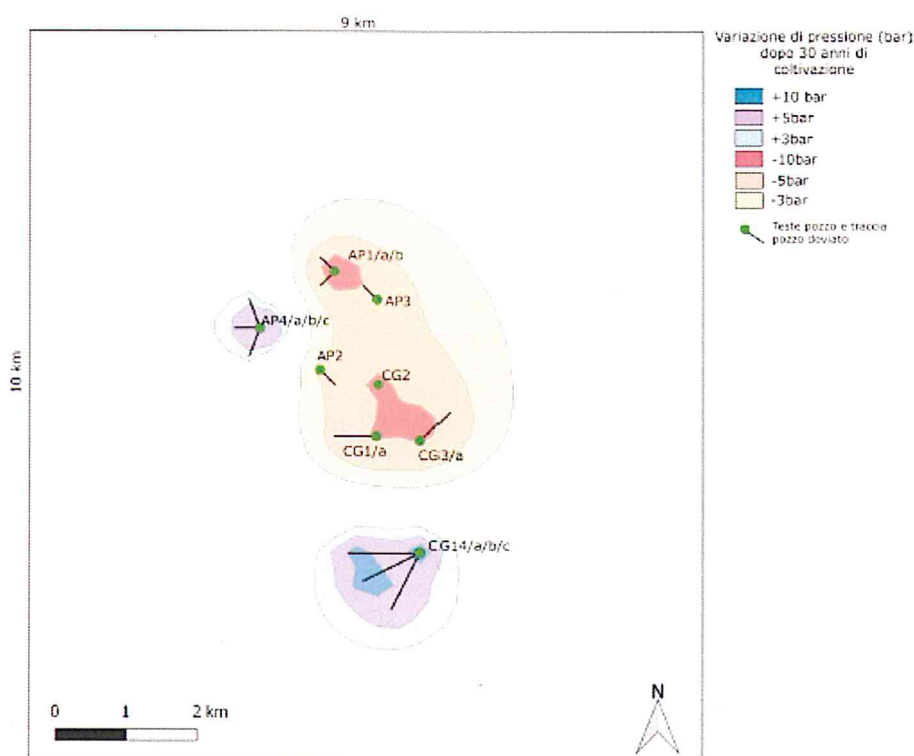


Figura 2 – Visualizzazione in pianta delle regioni interessate dai valori di sovrappressione e di sottopressione di 3, 5, 10 bar dopo 30 anni di coltivazione all'interno dell'intero volume di roccia interessato dalla simulazione numerica.

Com'è evidente la perturbazione maggiore, $\Delta P = \pm 10 \text{ bar}$, è estremamente localizzata nell'intorno dei pozzi e addirittura non si registra nei pozzi di reiniezione di Torre Alfina (AP4).

Anche la perturbazione $\Delta P = \pm 5 \text{ bar}$ è molto localizzata: nei pozzi reiniettivi rimane entro circa 500m dai fondi pozzo; nel caso dei pozzi di emungimento la

perturbazione di $\Delta P = -5\text{bar}$ è risentita al massimo entro circa 1000m dai pozzi produttivi del cluster AP1.

La modestissima perturbazione $\Delta P = -3\text{bar}$ è ovviamente risentita in una regione più ampia anche per l'evidente effetto di coalescenza della perturbazione dei singoli fondi pozzo ma resta comunque entro circa 2000m dai fondi pozzo produttivi.

I risultati della simulazione sono riferiti a 30 anni di esercizio degli impianti.

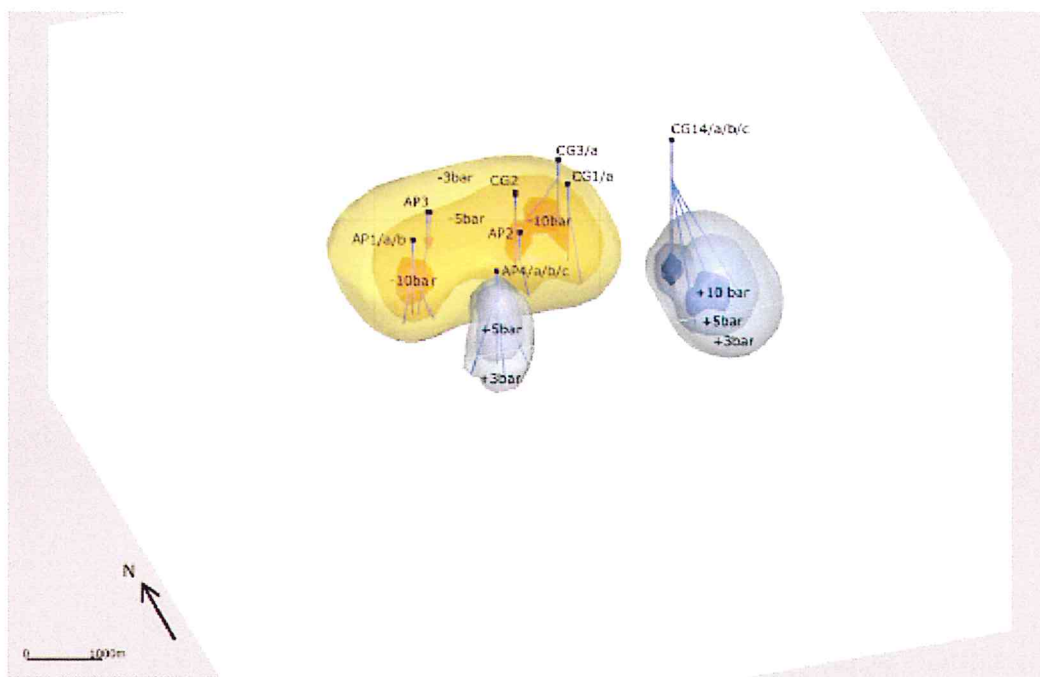


Figura 3 - Visualizzazione tridimensionale delle regioni dello spazio interessate dalle perturbazioni di riferimento esaminate. Per le variazioni di pressione i colori sono quelli indicati in Fig. 2.

3.2 Volumi di roccia interessati dalle sovrappressioni

Nella Tabella seguente sono indicati i volumi del serbatoio interessati dalle sovrappressioni e dalle sottopressioni rilevati nella simulazione di Terra Energy (Allegato 1).

ΔP (bar)	Zona	Indicazione dei pozzi nell' area di ΔP	Volume (km ³)	Volume Tot (km ³)
+10	CG	CG14/a/b/c	0,09	0,09
+5	CG	CG14/a/b/c	1,25	1,47
+5	TA	AP4/a/b/c	0,22	
+3	CG	CG14/a/b/c	3,74	4,36
+3	TA	AP4/a/b/c	0,62	
-3	CG+TA	AP1/a/b-AP2-AP3- CG1/a-CG2-CG3a	11,49	11,49
-5	CG+TA	AP1/a/b-AP2-AP3- CG1/a-CG2-CG3a	3,72	3,72
-10	CG	CG1/a-CG2-CG3/a	0,12	0,20
-10	TA	AP1/a/b	0,079	
-10	TA	AP3	0,00046	

Tabella 1 - Computo dei volumi interessati da sovrappressioni di +3/+5/+10 bar e da sottopressioni di -3/-5/-10 bar registrati dopo 30 anni di coltivazione, (CG:Castel Giorgio, TA:Torre Alfina) .

Nel polo reiniettivo di Castel Giorgio (pozzi cluster CG14) il volume di roccia interessato da un ΔP di 10bar è estremamente limitato e interessa solo l'effetto skin nell'intorno dei pozzi. Come già detto questo valore non è rilevato numericamente nel caso del polo reiniettivo di Torre Alfina (pozzi cluster AP4). Il volume interessato dalla sovrappressione di 5bar è pari a 1,25km³ nel caso di CG14 e a solo 0,22 km³ nel caso di AP4.

La sovrappressione di 3bar interessa un volume di 3,74km³ in CG14 e di 0,62 km³ in AP4.

La differenza di volume tra le due zone reiniettive riflette il fatto che mentre il cluster AP4 interessa anche il tetto (a permeabilità più alta) del serbatoio carbonatico, il cluster di pozzi CG14 è progettato per interessare le zone fratturate profonde meno permeabili già intercettate con il pozzo Alfina 14 perforato dall'Enel negli anni '70.

3.3 Confronto tra i valori di pressione simulati da Terra Energy e da RSE

La società RSE spa, che opera nel campo della ricerca mineraria facendo anche simulazioni numeriche, ha eseguito per conto del MISE uno studio del comportamento del campo di Castel Giorgio – Torre Alfina nelle condizioni di sollecitazione superiori a quelle previste dal progetto pilota Castel Giorgio (2000t/h di portata di acqua in luogo di 1050 - RSE, 2015). Il modello impiegato da RSE indica che la variazione di pressione che si registra nelle zone entro circa 1km dai pozzi è inferiore a quella rilevata dalle simulazioni di Terra Energy. Entrambe le simulazioni mettono in evidenza la "velocità" con cui si manifesta la perturbazione nel tempo: si registra infatti una perturbazione abbastanza rapida nel primo anno di esercizio per stabilizzarsi nei successivi anni (50 anni è l'orizzonte temporale studiato da RSE, 30 quello di Terra Energy).

Come giustamente osserva RSE a conclusione del proprio studio, la loro scarsa significatività ai fini delle sollecitazioni sul sistema roccioso appare in tutta la sua evidenza se si tiene conto del valore della pressione effettiva del fluido presente nel serbatoio geotermico. Infatti la variazione di pressione si mantiene entro **2%** del valore ante perturbazione per assestarsi nel tempo a valori ancora inferiori e prossimi all'**1%** a circa 800-1000m dai pozzi. Anche alla profondità di 2865m (punto di monitoraggio "numerico"), quindi al di sotto della zona di reiniezione dei pozzi CG14, la variazione di pressione risulta pari all'**1%**. Si tratta di valori *troppo bassi per generare perturbazioni meccaniche apprezzabili sulla formazione rocciosa*.

3.3.1 Alcune considerazioni sui valori di pressione

Questo tema è stato ripetutamente affrontato anche nei documenti di progetto. Si veda in proposito il Progetto Definitivo, pag. 11.

Nello SIA viene specificato (pag. 140) testualmente *"si sottolinea che molto diverso è il caso dei progetti EGS (Enhanced Geothermal Systems) che hanno per obiettivo la creazione di un serbatoio artificiale iniettando grandi volumi di acqua in pressione in rocce calde a bassa permeabilità proprio allo scopo di indurre scivolamenti sismici e innalzare la permeabilità di fratture preesistenti."*

Il progetto Torre Alfina, così come quello di Castel Giorgio, prevede di coltivare un campo geotermico idrotermale, quindi caratterizzato da un sistema **naturalmente fratturato** e in condizioni fisiche cosiddette **under pressure**.

I pozzi sono previsti con una iniettività molto alta (Progetto Definitivo, par. 2.4.2) pertanto la sovrappressione di reiniezione assumerà valori irrisori, in accordo anche con i risultati della simulazione numerica di Allegato 3 al

Progetto Definitivo, e assolutamente non in grado di produrre fratture nella roccia del serbatoio né tantomeno in altra formazione contigua.

Questa caratteristica del serbatoio non nasce da considerazioni teoriche ma risulta da ben dieci perforazioni condotte nell'area dall'Enel, pertanto il rischio di incontrare situazioni geologiche difformi da questa è veramente basso, per non dire nullo.

Si ricorda che i fenomeni di *sismicità indotta* si sono manifestati laddove sono state operate operazioni di tipo EGS (alias fratturazione idraulica). Una di queste fu operata nel pozzo Basilea nel quale fu iniettata acqua a portate di centinaia di ton/ora con pressione di testa pozzo che raggiunse valori anche di centinaia di bar e nel pozzo San Gallo sempre in Svizzera. In questi casi non era stato intercettato un serbatoio fratturato.

Altri casi di EGS sono quelli che riguardano fratturazioni per la ricerca di shale gas ma, com'è evidente, si tratta di situazioni geologiche completamente diverse dai campi geotermici, in particolare da quelli idrotermali.

E' evidente che qualora la perforazione dei pozzi rivelasse caratteristiche di permeabilità del serbatoio diverse da quelle previste, il progetto non sarebbe realizzabile e i lavori sarebbero interrotti.

3.4 Distribuzione della temperatura nel serbatoio

La simulazione effettuata da Terra Energy, che ha utilizzato il programma TOUGH 2 merita alcune riflessioni.

Le caratteristiche geologiche delle formazioni interessate dai pozzi sono state tradotte matematicamente attribuendo valori di permeabilità in linea con quelli attesi per ciascuna tipologia. Pertanto alla formazione flyshoide che costituisce la copertura del serbatoio, è stata attribuita una permeabilità bassissima (la formazione è ricca di argilla). In linea con i dati di letteratura pubblicati dall'Enel a seguito delle perforazioni degli anni '70 e '80, la copertura è stata considerata suddivisa in due strati: uno superficiale (Neogene) con permeabilità 0.01mD e uno (Liguridi) con permeabilità ancora più bassa, pari a 0.001mD. Si osserva che da un punto di vista macroscopico, la risposta della formazione alle azioni di perforazione e di esercizio dei pozzi, inclusi quelli a gas, confermano la sostanziale impermeabilità della copertura.

Come è evidente, indipendentemente da tale suddivisione, alla copertura è stata attribuita una permeabilità insignificante ai fini dalla circolazione dei fluidi, quindi del tutto in linea con i risultati del monitoraggio delle emissioni dal terreno che hanno messo in evidenza che la copertura è in grado di

esercitare un isolamento veramente efficace del serbatoio (Carapezza et al., 2015).

Il serbatoio carbonatico è stato suddiviso in tre strati:

- quello del “tetto” con permeabilità molto alta, anche in questo caso in linea con i dati di letteratura e con i risultati delle prove e osservazioni effettuate da Enel sui pozzi; la permeabilità attribuita a questo primo strato del serbatoio carbonatico, dello spessore di 100m, è di 100mD;
- al secondo strato a spessore variabile, è stata attribuita una permeabilità di 10mD;
- la parte più profonda del serbatoio carbonatico è stata considerata con permeabilità 2mD; al basamento è stata attribuita una permeabilità di 0.001mD.

La scelta di attribuire un valore di permeabilità molto alto nel primo strato del serbatoio carbonatico è in linea con i risultati della perforazione di molti pozzi dell'Enel, a cominciare da quello di carattere più esplorativo, pozzo Alfina 1, ma riscontrata anche in Alfina 4 e in altri della zona centrale del campo.

Di conseguenza, gli effetti attesi di tale attribuzione sulla circolazione del fluido durante l'esercizio simulato dell'impianto, sono quelli di una circolazione *preferenziale* del fluido in questo primo strato. Quindi, l'aver riscontrato degli abbassamenti di temperatura significativi (5°C in AP2 e 2°C in CG2) anche se accettabili dopo 30 anni di esercizio dell'impianto, risponde alle attese ed è del tutto in linea con le caratteristiche del serbatoio.

E' evidente che in fase di perforazione dei pozzi, le misure di permeabilità della formazione attraversata, rilevata attraverso il parametro “iniettività” (vedi ad esempio par. 2.4.2 del Progetto Definitivo), permetteranno di adeguare la distribuzione effettiva di permeabilità lungo l'asse dei pozzi e quindi di ripetere la simulazione per prevedere in maniera più mirata di quanto sia possibile al momento attuale il comportamento termoidraulico del serbatoio.

4. Simulazione dei flussi di fluido nel serbatoio di Castel Giorgio - Torre Alfina

Lo scopo della simulazione è verificare se esistono condizioni fisiche per l'instaurarsi di un movimento del fluido geotermico di entità apprezzabile e quindi potenzialmente in grado di interferire con il processo industriale di sfruttamento.

Per la verifica del serbatoio in condizioni indisturbate si considerano due scenari:

- Uno scenario, che trae spunto da un lavoro pubblicato da Buonasorte et al., 1989 dal quale sembra che esista un flusso di ricarica da Nord verso Sud in condizioni stazionarie indisturbate;
- Un secondo che trae origine da misure eseguite ripetutamente dall'Enel nei propri pozzi A4 e A14 trasmesse alla Regione Umbria e da questa messe a disposizione; le misure in pozzo, opportunamente rielaborate per renderle confrontabili, evidenziano invece un flusso da Sud verso Nord in condizioni stazionarie indisturbate.

A nostro parere il secondo scenario è più realistico perché fa riferimento a rilievi fisici ben determinati e descritti mentre il primo si basa su considerazioni di carattere generico e non suffragate da rilievi effettivi di pressione e temperatura.

Tuttavia, anche per esigenze di verifica di sensitività dei modelli, sono stati presi a riferimento entrambi gli scenari.

4.1 Rilievi nei pozzi Enel e stato fisico del serbatoio

Parte del tetto del serbatoio è interessato dalla presenza di una cappa di gas la quale conferisce localmente allo stesso caratteristiche del tutto particolari in termini di pressione. Altrove, in particolare nella zona di Castel Giorgio, il serbatoio si comporta in condizioni statiche come un acquifero senza che il contenuto di gas (in prevalenza CO₂), peraltro totalmente disciolto nel liquido, abbia influenza sulla pressione alla testa dei pozzi che connettono il serbatoio con la superficie.

Questo dato trova piena conferma sperimentale nel comportamento dei pozzi Alfina 4 e Alfina 14 (nel seguito A4 e A14), pozzi che dopo decenni dal termine della perforazione e delle prove di emungimento effettuate da Enel, si sono sempre mantenuti con pressione (effettiva) nulla a testa pozzo, condizione che esprime equilibrio idrostatico all'interno di ciascuno di essi.

La ragione fisica di questo comportamento risiede nel fatto che, geometricamente, il rapporto tra il diametro dei pozzi e la loro lunghezza (profondità) è talmente basso che il gradiente di concentrazione del gas disciolto nel fluido del serbatoio è tale per cui il movimento di gas che si determina nei pozzi è insignificante e comunque lontanissimo dai valori che potrebbero provocare l'innescò spontaneo della produzione di fluido geotermico.

Nell'analisi che segue si utilizzano i dati rilevati da misure nei pozzi effettuate negli anni antecedenti la loro chiusura mineraria, avvenuta a fine 2013, per ricavare alcune grandezze fisiche che caratterizzano lo stato del serbatoio geotermico in corrispondenza dei due pozzi A4 e A14 che corrispondono rispettivamente al polo produttivo e a quello re iniettivo del progetto Castel Giorgio.

I due pozzi realizzavano la connessione tra la superficie e lo stesso serbatoio geotermico, a partire da due profondità differenti, rispettivamente a 830m e 2050m circa, dove erano state incontrate fratture.

Periodicamente sono state fatte misure di controllo della temperatura e della pressione lungo l'asse dei pozzi dal piano campagna fino alla loro profondità massima di agibilità. Nel seguito ci si riferisce in particolare ai rilievi del settembre 2003, eseguiti dopo circa 30 anni dalla fine delle operazioni di perforazione, quando, senza ombra di dubbio, i due pozzi erano in equilibrio con il serbatoio geotermico.

Dai rilievi del settembre 2003 disponibili presso la Regione Umbria, risulta che nel pozzo A4 la pressione a circa 825m dal piano campagna (cioè a $-825 + 530 = -295$ m dal livello del mare), agli effetti pratici coincidente con la prima e unica frattura produttiva incontrata poco sotto il contatto tra copertura flyschoidale e serbatoio, è esattamente 6,20 MPa con un livello in pozzo determinabile a circa 173m.

Il pozzo A14 ha raggiunto il serbatoio ad una profondità sensibilmente superiore, circa 1600m. In esso il livello idraulico in pozzo è determinabile a circa 230m, quindi circa 57m più profondo, rispetto al proprio piano campagna, che in A4. Tuttavia i due valori di livello statico dal piano campagna non sono direttamente confrontabili perché la profondità della frattura più alta (la "prima") determina condizioni diverse di temperatura della colonna che rendono difficile il confronto in termini di densità media della colonna.

E' stata allora presa a riferimento la pressione misurata alla profondità di circa 825m in A4 (assunta per semplicità corrispondente a quella della frattura di 830m) e a 2050m in A14, cioè in corrispondenza della prima frattura incontrata in ciascuno dei due pozzi dove è quindi certa la connessione con il serbatoio. Il raffronto tra i due valori di pressione fornisce un'indicazione molto precisa della differenza di pressione idrostatica a parità di quota slm nei due pozzi.

La quota slm del piano campagna di A14 è pari a 535m; alla profondità di 2050m dal piano campagna, in prossimità della prima frattura incontrata dal

pozzo, è stata valutata una pressione di 17,465MPa, valore ottenuto interpolando linearmente quelli misurati a 2000 e 2100m.

Questi rilievi di pressione hanno particolare importanza sia per la notevole precisione dello strumento utilizzato per la rilevazione, sia perché, come detto sopra, sono rappresentativi delle condizioni statiche del sistema pozzo – serbatoio e permettono di accertare la pressione in due zone distinte del serbatoio poste alla stessa quota sul livello del mare, quindi su uno stesso piano orizzontale.

La pressione sulla verticale di **A4** alla stessa profondità di 2050m rispetto ad A14 (ovvero a 2045m dal piano della postazione A4) si può ritenere con buona approssimazione pari alla somma della pressione rilevata a 825m (in pratica la profondità della frattura), sempre in A4, e quella dovuta al carico idrostatico tra 825 e 2045m. Tale carico è noto perché il campo è costituito da un acquifero alla temperatura di 140°C. Cioè $6,20\text{MPa} + 925,92 \cdot (2045 - 825) \cdot 1.003 \cdot 9,81 / 1.000.000 = 17,3\text{MPa}$, essendo $925,92\text{kg/m}^3$ la densità dell'acqua alla temperatura di 140°C e 1.003 il fattore correttivo della densità dovuto alla salinità della soluzione. Per la precisione si nota che eventuali modeste differenze di temperatura, anche dell'ordine di $\pm 5^\circ\text{C}$, non sarebbero in grado di produrre variazioni apprezzabili del valore della densità dell'acqua considerato nel calcolo.

La differenza tra la pressione misurata in **A14** alla profondità di 2050m e quella stimata in A4 alla stessa profondità (2045m dal piano campagna) risulta $17,465 - 17,3 = 0,16\text{MPa}$.

Ai fini del bilancio idrogeologico del serbatoio geotermico, in assenza di disturbi del campo, la zona del serbatoio dove è ubicato il polo reiniettivo risulta pertanto leggermente pressurizzata rispetto a quella del polo produttivo.

Sulla base dei valori di pressione di cui sopra possono essere determinate le piezometriche in corrispondenza dei pozzi A4 e A14. Dal momento che la colonna idrostatica ha, fisicamente, una temperatura e una densità variabili lungo la sua altezza, si assume come riferimento la densità $925,92\text{kg/m}^3$ conseguente alla temperatura di 140°C. Il risultato è il seguente:

- piezometrica in A14 a 2050m dal p.c., $2050 - (17,465 \cdot 10^6 / (9,81 \cdot 925,92)) = 2050 - 1922,7 = 127,2\text{m}$ dal piano campagna A14 (535m slm), ovvero 408m slm
- piezometrica in A4 a 2045m (corrispondente a 2050m dal piano di A14) = $2045 - (17,30 \cdot 10^6 / (9,81 \cdot 925,92)) = 2045 - 1905 = 140\text{m}$ ovvero 390m slm; la

differenza tra le due piezometriche risulta di 18m di colonna d'acqua alla temperatura del serbatoio.

Considerato che nelle varie carte la quota sul livello del mare è indicata con valori talvolta leggermente diversi e del diverso allungamento termico tra condizioni di perforazione e stato dei pozzi al momento delle misure, i valori di cui sopra sono stati arrotondati a **391m** per A4 e a **409m** per A14.

5. Modello idrogeologico e simulazione numerica del serbatoio

In Allegato 2 è riportato il modello idrogeologico del serbatoio geotermico ottenuto utilizzando un modello matematico che riproduce il campo come risulta dai vari lavori pubblicati sia dall'Enel che da altri autori e utilizzando valori di permeabilità in linea con quelli che mediamente si riscontrano nelle litologie incontrate e, per quanto riguarda il serbatoio carbonatico, gli stessi valori impiegati nella simulazione numerica riportata in Allegato 3 del Progetto Definitivo Torre Alfina utilizzato nella procedura di VIA.

Il codice di calcolo impiegato è il MODFLOW. Esso prevede di utilizzare un unico tipo di fluido a temperatura costante, pertanto il fluido geotermico è stato simulato con acqua a 140°C avente densità di 925,92kg/m³ e, analogamente, per la viscosità dell'acqua richiesta dal codice, è stata assunta quella che corrisponde alla temperatura del serbatoio; inoltre si è fatto riferimento anche ad uno scenario di ricarica che prevede apporto di acqua dalla struttura elevata del M.Cetona secondo l'ipotesi avanzata da Buonasorte ed al., 1988.

Per lo sviluppo del calcolo di simulazione è stato ricostruito il modello geologico del sottosuolo, fino alla profondità di circa 3500 m, con il quale sono stati definiti i rapporti fra le varie formazioni geologiche e soprattutto la geometria del serbatoio geotermico che risulta compartimentato in due sottoserbatoi da una formazione geologica intermedia a più bassa permeabilità.

Per la descrizione delle condizioni al contorno del modello litologico, del sistema di faglie, dei valori assunti per il "potenziale imposto" e delle proprietà idrauliche considerate si rimanda direttamente all'Allegato 2.

Su queste basi è stato costruito lo stato stazionario (ante disturbo per l'attività industriale). L'infiltrazione, nell'ambito del complesso vulcanico di superficie, è stata messa in conto con un valore efficace di 230mm annui. Le isopieze relative sono riportate nella Fig. 18 dell'Allegato 2.

5.1 Primo scenario, ricarica da Nord verso Sud

Questo scenario considera l'ipotesi che l'acqua nel serbatoio scorra da Nord verso Sud con riferimento al lavoro di Buonasorte et al., 1988. In esso si ipotizza che il flusso di acqua abbia origine dal M. Cetona e che determini le piezometriche riportate in Fig. 3 dell'Allegato 2. In effetti, questo scenario è stato considerato prevalentemente per ragioni di completezza e di valutazione della sensitività della modellazione. In questo scenario viene preso a riferimento il livello di acqua rilevato nel pozzo A14 (circa 305m slm) e assunto questo valore come piezometrica perché coincidente con la isoipsa 300m. Assunto ragionevolmente un gradiente medio dell'1%, sulla base del livello in A14 viene stabilito anche il livello in A4 che risulta di 323m slm, valore effettivamente non molto diverso dal livello riscontrato in pozzo.

Questi due valori del livello di acqua nei pozzi Alfina 4 e Alfina 14 sono assunti come riferimento per la calibrazione del modello, ottenuta variando i carichi di ingresso da Nord e di uscita da Sud, rispetto all'area modellata, fino a raggiungere un grado di confidenza del 96% (Fig. 20 dell'Allegato2) e utilizzando le piezometrie di Fig. 21 di Allegato 2 che caratterizzerebbero, nelle ipotesi fatte, l'acquifero del carbonatico.

Il disturbo dovuto alla coltivazione, arrecato allo stato stazionario dai prelievi attraverso i pozzi produttivi e dalla reiniezione nei pozzi reiniettivi, è stato riferito per uniformità con il Progetto Definitivo e con le precedenti valutazioni alla portata di 1050t/h che, per le ragioni dette, è conservativa rispetto alla soluzione finale.

Per meglio simulare geometricamente nello spazio l'ubicazione delle zone di prelievo dai rami deviati dei pozzi produttivi, ogni pozzo è stato suddiviso in 5 tratti attribuendo a ciascuno di essi una portata pari a 1/5 del valore di progetto.

Nei pozzi reiniettivi deviati, essendo i singoli rami deviati troppo lunghi per adottare per ciascuno di essi lo stesso criterio, il ramo deviato open hole è stato ubicato in posizione intermedia tra la verticale e il fondo pozzo.

I risultati della simulazione evidenziano che lo scambio tra acquifero vulcanico e profondo non viene alterato dall'esercizio del campo ed è dominato esclusivamente dalle condizioni di isolamento del flysch.

Al cap. 6 dell'Allegato 2 è riportata la distribuzione della portata di fluido nel serbatoio carbonatico durante l'esercizio del campo e quindi le variazioni che, in condizioni stazionarie, si verificano negli scambi sui fronti Nord e Sud a seguito dell'interscambio tra i poli produttivo e reiniettivo.

Il fluido *complessivamente* ricircolato una volta che il sistema sia a regime, tramite i pozzi di reiniezione e che raggiunge i pozzi di estrazione, è circa il 77% di quanto estratto; il restante 23% viene fornito dalle condizioni al contorno.

La situazione di regime è stata convenzionalmente stabilita in ben 36.500 ipotetici giorni di esercizio (100 anni). Nei pozzi di CG a fronte di un'estrazione di $25.200\text{m}^3/\text{giorno}$ ($1050\text{ m}^3/\text{h}$), viene ricircolata attraverso i pozzi reiniettivi una quantità di fluido pari a $17.321\text{m}^3/\text{giorno}$, cioè circa il 70%.

Nei pozzi di TA a fronte di una estrazione di $20.400\text{m}^3/\text{giorno}$ ($850\text{ m}^3/\text{h}$) il fluido ricircolato attraverso i pozzi reiniettivi è $18.263\text{ m}^3/\text{h}$ pari a circa il 90%.

5.2 Secondo scenario, ricarica da Sud verso Nord

Questo scenario prevede un flusso di fluido nel serbatoio da Sud verso Nord ed è più realistico del precedente in quanto prende in esame la condizione fisica effettiva del serbatoio carbonatico così come risulta dai rilievi periodici eseguiti dall'Enel e comunicati alla Regione Umbria. In particolare ci si riferisce ai dati raccolti nel 2003 dai quali si può dedurre la pressione esatta a una stessa profondità in corrispondenza dei pozzi A4 e A14, come sopra riportato (vedi capitolo 4.1).

La calibrazione del modello per definire lo stato stazionario è stata fatta, al solito, variando le condizioni fino a riprodurre in A4 e A14 la piezometrica che si deduce dalle misure fatte nei pozzi medesimi, con un grado di confidenza del 95% (vedi Fig. 32 dell'Allegato 2). Ovviamente la piezometrica in questione è quella che compete alla colonna idrostatica avente la temperatura del serbatoio, quindi densità $925,92\text{kg}/\text{m}^3$, e con riferimento alle determinazioni precedentemente descritte nel cap. 3.1.1, 409m slm in A14 e 391m slm in A4.

Il fluido *complessivamente* ricircolato tramite i pozzi di reiniezione, e che raggiunge i pozzi di estrazione, è circa il 76% della portata estratta; il restante 24% viene fornito dalle condizioni al contorno.

Nei pozzi di CG a fronte di un'estrazione di $25200\text{m}^3/\text{giorno}$ ($1050\text{ m}^3/\text{h}$), viene ricircolato attraverso i pozzi reiniettivi $19753\text{m}^3/\text{giorno}$, cioè circa il 78%.

Nei pozzi di TA a fronte di una estrazione di $20400\text{m}^3/\text{giorno}$ ($850\text{ m}^3/\text{h}$) il fluido ricircolato attraverso i pozzi reiniettivi è $16754\text{ m}^3/\text{h}$ pari a circa il 82%.

5.3 Considerazioni conclusive sulla distribuzione dei flussi

Come sopra riferito, la modellizzazione è stata eseguita sia sullo scenario 2, che trae origine da precise osservazioni e misure nei pozzi di osservazione disponibili fino al 2013, quindi è sicuramente più realistico, sia sullo scenario 1. Quest'ultimo, completamente diverso dal primo, risponde all'esigenza di prendere in esame un ampio campo di variabilità del gradiente di pressione nel serbatoio carbonatico fino a valori tali da permettere un'inversione del flusso dell'acqua geotermica.

La simulazione numerica dimostra la sostenibilità dei prelievi nel lungo periodo in entrambe le situazioni esaminate e mette in evidenza che la realizzazione del progetto non produce effetti sul bilancio idrogeologico della falda idropotabile presente nell'acquifero vulcanico che è separato dal serbatoio geotermico da un consistente spessore di sedimenti flyschoidi con bassissima permeabilità che rende i due sistemi idrogeologici indipendenti agli effetti pratici.

In entrambe le simulazioni il transitorio iniziale, a partire dall'avvio dell'esercizio dell'impianto con prelievo e reiniezione dell'acqua geotermica, ha una durata di circa un anno dopodiché i parametri idraulici si stabilizzano (Tabb. 28, 29, 42 e 43 di Allegato 2 al quale si rimanda per i dettagli).

Analogamente, una volta interrotto l'esercizio del campo, sono sufficienti da 250 a 360 giorni per avere il totale recupero delle condizioni iniziali.

5.3.1 Scambio di fluido tra vulcaniti e serbatoio

Come sostenuto in risposta alla richiesta di integrazioni per i progetti Torre Alfina e Castel Giorgio, motivando l'analisi sulla base delle condizioni idrostatiche che caratterizzano il serbatoio e le vulcaniti, la simulazione conferma che in tutto il sistema geologico, il flusso di acqua che si realizza tra il complesso delle vulcaniti (sede di acquiferi sospesi e non), per quanto modestissimo per effetto dell'efficacia della copertura del serbatoio geotermico, è quello naturale e si muove dalle vulcaniti alimentando il serbatoio con una portata di qualche metro cubo al giorno. In nessuna situazione, comprese le zone in sovrappressione dei pozzi reiniettivi, avviene il contrario.

5.4 Aspetti qualitativi della simulazione numerica realizzata

Un aspetto di rilievo che è opportuno mettere in evidenza riguarda l'andamento dei parametri idraulici nel tempo. Tutti i grafici riportati nell'Allegato 3 al Progetto Definitivo mostrano un andamento caratteristico perfettamente rispondente alle attese. Infatti nei pozzi di emungimento la

ITW LKW GEOTERMIA ITALIA S.p.A. Sede legale Via Cavour 1 – 10123 Torino - P.IVA 1117323100916

Capitale Sociale EURO 1.000.000,00 I.v. Numero REA: TO- 1144269

Sede Amministrativa: Via di Porta Pinciana, 4 – 00187 – Roma

Tel + 36 06 42020461 Fax + 39 06 48905185 E-mail – info@itwlkwgeotermia.it

pressione tende a calare rapidamente nel primo anno per poi tendere a stabilizzarsi e a diventare costante nel tempo (Figura 11 di All. 3 al Progetto Definitivo).

Analogamente, nei pozzi reiniettivi la pressione aumenta in modo rapido all'inizio dell'iniezione per stabilizzarsi nel tempo a valori costanti.

Per inciso si sottolinea che quanto osservato sopra costituisce una conferma della buona qualità della simulazione realizzata.

Viceversa, ove tali andamenti non si verificassero, o addirittura si verificasse un andamento inverso della sovrappressione nel tempo, questo sarebbe un elemento rivelatore della presenza di errori nella simulazione o comunque di una sua inadeguatezza.

Questa caratteristica è confermata anche dalla simulazione con MODFLOW e direttamente rilevabile dai grafici di pressione delle Figg. 28, 29, 42 e 43. dell'Allegato 2.

5.5 Ripetizione della simulazione

Durante la perforazione dei pozzi profondi saranno effettuati rilievi sul fluido e sulle caratteristiche del serbatoio (rilevamenti geochimici sugli acquiferi, verifica delle caratteristiche litologiche delle formazioni attraversate, caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero geotermico, iniettività/permeabilità delle formazioni).

Sulla base di tali rilievi sarà eseguita una nuova simulazione che permetterà di affinare i risultati forniti dalla presente simulazione numerica per una più adeguata previsione del comportamento del campo nel tempo.

6. Descrizione della rete di monitoraggio ReMoTA nell'area di Castel Giorgio - Torre Alfina

Allo scopo di aggiornare le informazioni precedentemente fornite sull'attività di monitoraggio sismico della società scrivente, si trasmette in Allegato 3 una pubblicazione (Braun et al., 2017) dei Rapporti Tecnici INGV, ISSN 2039-7941, anno 2017, numero 370, nella quale viene descritta la rete di monitoraggio sismico di Torre Alfina (ReMoTA), realizzata dall'INGV per conto del proponente.

In particolare nella pubblicazione citata viene descritta la rete, l'ubicazione delle stazioni, la strumentazione sismica, i risultati delle analisi del rumore sismico per la scelta dei siti, il rapporto segnale/rumore degli eventi sismici. Viene anche descritta la capacità di detezione di ReMoTA rispetto alla rete sismica nazionale dell'INGV.

Risulta evidente dalla pubblicazione allegata che il proponente si è attenuto agli "Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio" pubblicate dal MISE nel novembre 2014 e nell'ottobre 2016.

Si ricorda che la rete verrà completata con nuovi sensori sismici e accelerometrici non appena la scrivente società avrà ottenuto dal MISE il relativo titolo minerario.

Allegati

Allegato 1, Estratto_sim_num_alfina_maggio_2017_ver_04 rid

Allegato 2, Simulazione del flusso interno al serbatoio con gli impianti TA e CG in esercizio

Allegato 3, Braun et al., 2017 - Rapporti Tecnici INGV, ISSN 2039-7941, anno 2017, numero 370

7. Riferimenti Bibliografici

- AMATO A., BIELLA G., DE FRANCO R. (1991). *Velocity structure of the Vulsinian Volcanic Complex (Latium, Italy) from seismic refraction data and three-dimensional inversion of travel times*. J. Geophys. Res., 96, 517-535.
- BIELLA G., DE FRANCO R., LOZEJ A., AMATO A. (1987). *Is there a shallow body of lower crust under the Vulsinian Volcanic Complex?* Per. Mineral. 56, 303-318.
- BUONASORTE G., CATALDI R., CECCARELLI A., COSTANTINI A., D'OFFIZZI S., LAZZAROTTO A., RIDOLFI A., BALDI P., BARELLI A., BERTINI G., BERTRAMI R., CALAMAI A., CAMELI G., CORSI R., DACQUINO C., FIOREDELISI A., GHEZZO A., LOVARI F., (1988). *Ricerca ed esplorazione nell'area geotermica di Torre Alfina (Lazio Umbria)*. Boll. Soc. Geol. It. 107, 265-337.
- BUONASORTE G., FIOREDELISI A., PANDELI E. (1989). *Deep exploration in the Torre Alfina geothermal field (Italy): the test hole Alfina 15*. European geothermal update, 98-108.
- BUONASORTE G., ENRICO P., ADOLFO F. (1991). *The Alfina 15 well: deep geological data from northern Latium (Torre Alfina geothermal area)*. Boll. Soc. Geol. It., 110, 823-831.
- BUONASORTE G. et al. (1995). *Seismic reflection in the Bolsena lake : a contribution to the knowledge of a caldera controlled geothermal system*. World Geothermal Congress, Florence, Italy.
- CARAPEZZA M.L., RANALDI M., GATTUSO A., PAGLIUCA N., TARCHINI L. (2015). *The sealing capacity of the cap rock above the Torre Alfina geothermal reservoir (Central Italy) revealed by soil CO₂ flux investigation*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 291, 25-34.
- CHIARABBA C., AMATO A., FIOREDELISI A. (1995). *Upper crustal tomographic images of the Amiata-Vulsini geothermal region, Central Italy*. J. Geophys. Res., 100, 4053-4066.
- COSTANTINI A., GHEZZO C., LAZZAROTTO A. (1984). *Geologic map of the Torre Alfina geothermal field, Siena, Viterbo and Terni provinces*. Boll. Soc. Geol. It., 107.
- RSE (anno 2015). Titolo. (consultabile sul sito del MISE). Inserire titolo



ITW LKW GEOTERMIA ITALIA S.p.A.

- TERRA ENERGY (2013). *Modellizzazione numerica del sistema geotermico di Castel Giorgio (TR)*. Rapporto per ITW&LKW Geotermia Italia spa.
- TERRA ENERGY (2014). *Modellizzazione numerica del sistema geotermico di Torre Alfina-Castel Giorgio*. Rapporto per ITW&LKW Geotermia Italia spa.
- TERRA ENERGY (2017). *Richiesta integrazioni relative al report "Modellizzazione numerica del sistema geotermico di Torre Alfina-Castel Giorgio"*. Rapporto per ITW&LKW Geotermia Italia spa.