

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL
TERRITORIO**

DIPARTIMENTO DICAM

TESI DI LAUREA

in

Campionamenti e Misure negli Acquiferi L

**Accoppiamento esterno del simulatore per sistemi geotermici ad
alta entalpia iTOUGH2 con un simulatore di pozzo**

CANDIDATO
Andrea Reverberi

RELATORE:
Chiar.mo Prof. William Bortolotti

CORRELATORE/CORRELATORI
Dott. Elena Lognoli

Anno Accademico 2009/10
Sessione III

Indice generale

1	Notazioni.....	6
2	Sommario.....	8
3	Introduzione alla geotermia.....	9
3.1	Forma e struttura della Terra.....	9
3.1.1	Il nucleo.....	9
3.1.2	Il Mantello.....	10
3.1.2.1	II moti convettivi.....	11
3.1.2.2	Lo strato D".....	12
3.1.3	La crosta.....	12
3.2	Flusso di calore terrestre ed energia geotermica.....	13
3.2.1	Origine del flusso geotermico.....	14
3.3	Gradiente geotermico.....	15
3.4	Bacini geotermici.....	17
3.4.1	Sistemi geotermici idrotermali.....	17
3.4.1.1	Sistemi a vapore secco.....	17
3.4.1.2	Sistemi a vapore umido o ad acqua dominante.....	18
3.4.1.3	Sistemi ad acqua calda.....	19
3.4.2	Sistemi geotermici in rocce calde secche.....	20
3.4.3	Sistemi geotermici magmatici.....	20
3.4.4	Sistemi geotermici geopressurizzati.....	20
3.5	Geotermia a bassa ed alta entalpia.....	21
3.6	Pozzi per sistemi geotermici ad alta entalpia.....	23
3.7	Geotermia come fonte d'energia elettrica.....	23
3.8	Impatto Ambientale dello sfruttamento dell'energia geotermica.....	25
3.8.1	Impatto Visivo.....	25
3.8.2	Inquinamento acustico.....	26
3.8.3	Inquinamento chimico.....	26
3.8.4	Microsismicità.....	26
3.8.5	Subsidenza.....	26
3.8.6	Perforazione.....	26
3.9	Leggi che disciplinano l'attività di coltivazione geotermica.....	27
4	Introduzione alla simulazione.....	28
4.1	Sistemi e modelli.....	28
4.1.1	Definizioni.....	28
4.1.2	Classificazione dei sistemi.....	29
4.1.2.1	Condizioni di regime e condizioni di transitorio.....	30
4.1.3	Modelli.....	30
4.1.3.1.1	Modelli simbolici a simboli attivi.....	31
4.1.3.2	Utilizzo dei Modelli.....	32
4.1.3.2.1	Interpretazione.....	32
4.1.3.2.1.1	Calibrazione:.....	32
4.1.3.2.1.2	Analisi di sensitività:.....	32
4.1.3.2.1.3	Analisi di propagazione dell'errore:.....	32
4.1.3.2.2	Simulazione.....	32
4.1.4	Generalità sulla simulazione di bacini geotermici.....	33
4.1.4.1	Problematiche correlate all'impiego di modelli numerici per la simulazione di bacini	

geotermici.....	34
4.2Modelli matematici di sistemi geotermici.....	36
4.2.1Modelli di flusso.....	36
4.2.1.1Equazione di continuità.....	37
4.2.2Modelli di scambio termico.....	41
4.2.2.1Bilancio energetico sistemi aperti.....	41
4.2.2.2Bilancio energetico per flusso bifase.....	44
4.2.3Discretizzazione delle equazioni analitiche.....	44
4.2.3.1Discretizzazione del dominio spaziale.....	45
4.2.3.1.1Tipo di griglia.....	46
4.2.4Discretizzazione del dominio temporale.....	47
4.2.5Errori numerici.....	47
4.2.6Condizionamento del problema e stabilità dell'algorithmo di calcolo.....	48
4.2.7Rilassazione delle derivate in differenze finite.....	48
4.2.7.1Metodi espliciti, impliciti e di Crank-Nicolson.....	50
4.2.7.1.1Metodo Esplicito.....	50
4.2.7.1.2Metodo Implicito.....	50
4.2.7.1.3Metodo di Crank-Nicolson.....	51
5Simulatori per sistemi geotermici.....	52
5.1iTOUGH2.....	52
5.1.1TOUGH2.....	54
5.1.1.1Discretizzazione del dominio spazio-temporale.....	54
5.1.1.2Bilanci di massa ed energia.....	55
5.1.1.2.1Metodo delle differenze finite integrali.....	56
5.1.1.3Struttura di TOUGH2.....	59
5.1.1.4Variabili termodinamiche primarie.....	61
5.1.1.4.1Scelta delle variabili termodinamiche primarie.....	62
5.1.1.5Input.....	62
5.1.1.6Moduli EOS.....	66
5.1.1.6.1EOS1 (acqua e acqua tracciante).....	67
5.1.1.7Condizioni al contorno.....	67
5.1.1.8Sorgenti e pozzi.....	68
5.1.1.9Output.....	68
5.2Simulatori di pozzo.....	69
5.2.1Modelli di flusso in pozzo.....	69
5.2.1.1Flusso in porzione di pozzo non finestrata.....	69
5.2.1.1.1Bilancio di massa.....	69
5.2.1.1.2Bilancio della quantità di moto.....	70
5.2.1.1.3Bilancio di energia.....	70
5.2.1.2Flusso nelle porzioni di pozzo finestate.....	71
5.2.1.2.1Bilancio di massa totale e parziale.....	72
5.2.1.2.2Bilancio d'energia.....	72
5.2.1.3Flusso bifase in tubazioni verticali ed inclinate.....	73
5.2.1.3.1Flusso monofase.....	73
5.2.1.3.2Flusso bifase.....	74
5.2.1.3.3Regimi di flusso bifase.....	76
5.2.1.3.3.1Determinazione del regime di flusso.....	77
5.2.1.3.4Perdite di pressione per frizione.....	78

5.2.1.4	Risoluzione numerica delle equazioni di flusso bifase in pozzo.....	79
5.2.1.4.1	Porzioni non finestrate	80
5.2.1.4.2	Porzioni finestrate.....	81
5.2.1.5	Input.....	81
5.2.1.6	Output.....	82
6	Simulazione accoppiata.....	84
6.1	Accoppiamento interno o “Fully coupled”.....	84
6.2	Ipotesi del problema affrontato.....	85
6.2.1	Griglia e parametri idrogeologici.....	86
6.2.2	Condizioni al contorno, tempi di simulazione e altri parametri.....	88
6.2.3	Opzione DELV o Deliverability Model.....	88
6.2.4	Opzione f-type e accoppiamento esterno.....	90
6.2.4.1	Formato della tabella esterna.....	90
6.3	Lavoro svolto.....	93
6.4	Risultati.....	106
7	Conclusioni.....	111
8	Bibliografia.....	113

1 Notazioni

T è la temperatura (K) o (°C)

F = flusso (Kg/m²s)

ρ = densità (Kg/m³)

v_x = velocità in direzione x (m/s)

S_i = saturazione nella fase I

n = porosità

p = pressione (Pa)

Φ = energia potenziale per unità di massa (J/Kg)

[k] = tensore di permeabilità (m²)

k_r = permeabilità relativa

μ = viscosità dinamica (Pa s)

D = profondità rispetto al piano campagna (m)

β = indice della fase

e = energia specifica per unità di massa = $e = \frac{v^2}{2} + gz + u$ (J/Kg \equiv m²/s²)

u = energia interna per unità di massa (J/Kg)

ΔE è la variazione totale di energia

ΔQ è la variazione di energia sotto forma di calore

ΔL è la variazione di energia sotto forma di lavoro

L_p rappresenta il lavoro di pulsione

$v = 1/\rho$ è il volume specifico (m³/Kg)

F è la forza (N)

s è lo spostamento compiuto da una forza (m)

A è un'area (m²)

V è il volume (m³)

m è la massa (Kg)

\dot{m} è la portata massica (Kg/s)

q è la portata volumetrica (m³/s)

h entalpia specifica del fluido (J/Kg)

\dot{Q} è la potenza termica scambiata (W)

λ_x è la conducibilità termica, lungo la direzione x, del mezzo (W/(m·K))

H è il termine di produzione di calore concentrato per unità di volume (come un pozzo) (J/(m³·s)).

\vec{n} è il vettore normale uscente dalla superficie S dell'elemento infinitesimo di volume

Q_v è il calore per unità di volume (J/m³).

\dot{Q}_T Potenza termica scambiata per conduzione per unità di lunghezza (W/m)

Ω è la diffusività termica (m²/s),

τ è la conduttività termica della roccia,

Notazioni

η = costante di Eulero (0.577216...),

e è la scabrezza della tubazione (mm),

Re è il numero di Reynolds = $\rho v d / \mu$

f è il fattore di frizione

x_i è la frazione massica della fase i nel flusso bifasico

K è il coefficiente di velocità del flusso bifasico

σ è la tensione superficiale fra acqua e vapore

u_b è la velocità di bolle di vapore in flusso bifasico in regime "bubble"

k_c è l'incompressibilità (Pa)

Γ è un parametro delle perdite per frizione,

B_s è un coefficiente semi empirico delle perdite per frizione

ξ è l'esponente di Blasius

C_R è il calore specifico della roccia

D^k è il tensore di dispersione

$R_n^{k, j+1}$ residuo delle iterazioni di Newton-Raphson al passo di tempo $j+1$, del componente di indice k , del volume infinitesimo di indice n

2 Sommario

Questa tesi si pone come obiettivo principale l'accoppiamento esterno del software di simulazione numerica di flusso multifase, multicomponente, non isoterma iTOUGH2 (Finsterle, 1999) con il simulatore di pozzo HOLA (Aunzo et al., 1991).

In particolare il lavoro è orientato alla simulazione di sistemi geotermici ad alta entalpia, ovvero quei giacimenti che contengono fluidi utilizzabili direttamente per la produzione di energia elettrica.

Per sfruttare in modo ottimale un sistema geotermico sarebbe necessario conoscere molti parametri del sottosuolo e la loro variazione spaziale. La conduzione di prove finalizzate alla determinazione di tali parametri è tuttavia molto costosa e spesso poco rappresentativa del sistema reale.

La simulazione di un sistema geotermico tramite modelli matematici è uno strumento utile per una corretta coltivazione del giacimento: in funzione dei piani di sfruttamento, permette di prevederne l'evoluzione futura (fase di *previsione*); è inoltre una valida alternativa a prove dirette ed indirette, in quanto con bassi investimenti di capitale consente di ricavare informazioni sulle caratteristiche del giacimento, mediante l'analisi dei dati storici (fase di *interpretazione*).

Per questi motivi la coltivazione di sistemi geotermici è oggi quasi sempre preceduta ed accompagnata dall'esecuzione di approfondite simulazioni.

Gran parte dei software per la simulazione di bacini geotermici trascurano gli effetti, sull'intero bacino, del flusso dei fluidi all'interno dei pozzi e delle condizioni di emungimento, relegando queste funzionalità a software di simulazione di pozzo.

Trascurare gli effetti indotti dai pozzi può pregiudicare significativamente i risultati della simulazione. Come sarà mostrato nei capitoli dei risultati, gli esiti di simulazioni con software accoppiati possono scostarsi molto dai risultati ottenuti tramite l'impiego del solo software di simulazione del serbatoio, senza provocare un aumento rilevante dei tempi di calcolo.

I risultati delle simulazioni hanno dimostrato come l'accoppiamento preveda cali di portate emunte e di pressione nel reservoir molto inferiori alle simulazioni che considerano pressioni di fondo pozzo costanti. Tale comportamento consentirebbe uno sfruttamento maggiore e più prolungato nel tempo del giacimento.

E' necessario dunque interfacciare i due software per poter prevedere ed interpretare in maniera più affidabile il sistema fisico reale, consentendo una migliore coltivazione del giacimenti geotermici ad alta entalpia, che permetta di aumentarne la capacità produttiva e la sostenibilità dello sfruttamento nel tempo.

3 Introduzione alla geotermia

3.1 Forma e struttura della Terra

La forma della superficie della Terra è approssimabile a quella di un ellissoide di rotazione, leggermente schiacciato ai poli, a causa del movimento di rotazione terrestre. Il raggio medio polare (~6356,7 Km) è dunque inferiore al raggio medio equatoriale (~6378,2 Km)¹. Tale approssimazione provoca scostamenti massimi, fra la quota del ellissoide e della superficie terrestre, dell'ordine di 100 (m).

E' bene precisare che lo studio diretto dell'interno della Terra è praticamente impossibile, dato che il pozzo più profondo mai perforato (il pozzo della penisola di Kola, in Russia, terminato nel 1984), raggiunge la profondità massima di ~12 Km, ben poco rispetto agli oltre 6000 Km del raggio terrestre.

La maggior parte delle informazioni disponibili riguardo della struttura interna della Terra derivano dunque da osservazioni o metodi indiretti, quali le prove geofisiche, in particolare dagli studi di propagazione delle onde sismiche dovute a terremoti ed esplosioni atomiche artificiali.

A seguito dei numerosi studi geofisici, la struttura interna del pianeta è stata suddivisa in tre gusci concentrici, in funzione delle discontinuità sismiche, che sono determinate dalle differenze di composizione e struttura mineralogica :

1. Nucleo,
2. Mantello,
3. Crosta.

3.1.1 Il nucleo

Il nucleo è suddiviso in due zone, per la diversa composizione chimica e lo stato fisico della materiale costituente. Complessivamente il nucleo occupa un volume pari al 16% del volume terrestre ed ha una massa pari al 31% di quella terrestre.

Il nucleo interno si estende dal centro della terra fino a ~5150 Km di profondità; per analogia con con le diverse tipologie e composizioni delle meteoriti denominate "sideriti", per il nucleo si ipotizza una composizione in Ferro e Nichel, quest'ultimo in percentuale compresa fra il 10 ed il 20% del totale; la materia è allo stato solido o parzialmente fusa. La pressione a ~5200 Km di profondità è stimata attorno a 3,5 Mbar (350 Gpa).

Il nucleo esterno si estende fino a 2900 Km di profondità ed è composto da Ferro, Nichel (~2%) ed elementi più leggeri (ossigeno, zolfo), in percentuale massima del 15%; la densità della materia nel nucleo esterno è pari a ~10 g/cm³.

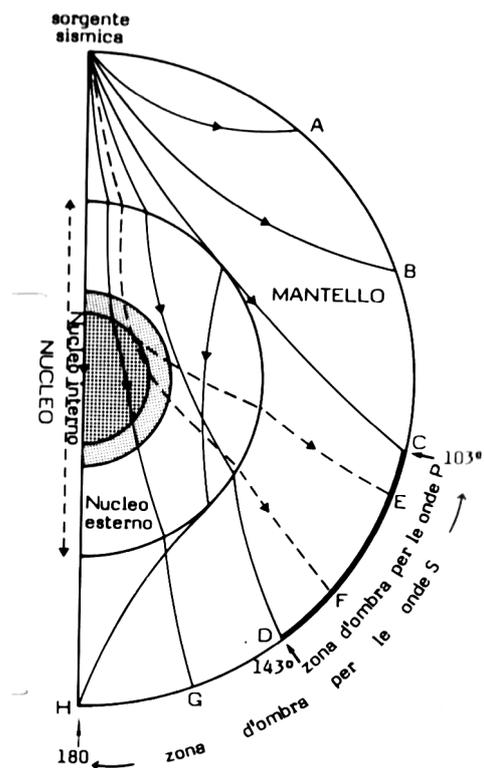


Figura 1: Percorsi delle onde sismiche durante l'attraversamento dei vari gusci costituenti l'interno della Terra, da P. Casati, Scienze della Terra

Introduzione alla geotermia

Nella zona di separazione fra nucleo interno ed esterno, la temperatura stimata è di circa 5000-5500 K. Lo stato della materia nel nucleo esterno è liquido ed il campo magnetico terrestre è probabilmente originato dai moti convettivi del ferro liquido.

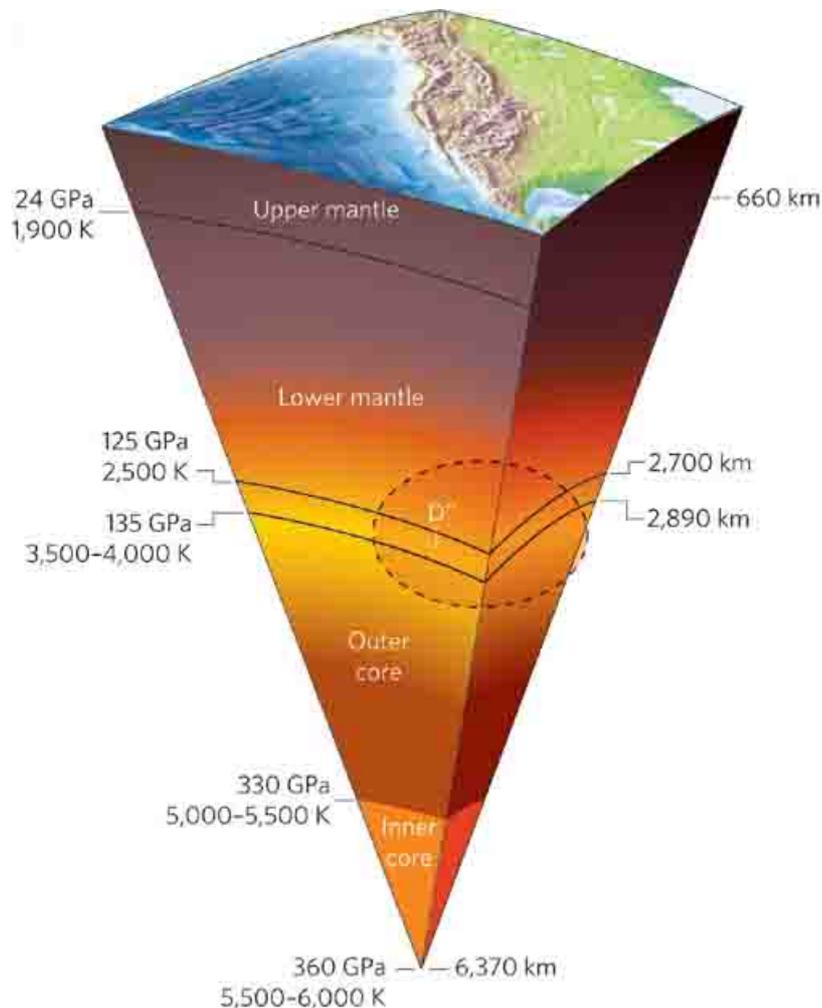


Figura 2: Schema della struttura interna della Terra, con indicazione delle temperature e pressioni in funzione della profondità, da http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7176/fig_tab/nature06584_F2

3.1.2 Il Mantello

Il mantello occupa l'84% del volume terrestre e contribuisce al 68% della massa. E' separato dal nucleo dalla superficie di discontinuità, detta "di Gutenberg", in onore di colui che la scoprì nel 1913. Tale superficie è stata identificata attraverso l'osservazione della trasmissione di onde sismiche. E' separato dalla crosta, che lo sovrasta, dalla discontinuità detta "di Mohorovičić", dal sismologo che la individuò nel 1909. L'analisi della velocità di propagazione delle onde sismiche all'interno del mantello indica densità comprese fra 3,3 e 6 g/cm³. La pressione alla base del mantello è circa 130 Gpa. Così come il nucleo, anche il mantello può essere suddiviso in tre macro aree, mantello inferiore, zona di transizione e mantello superiore: la zona di transizione è localizzata fra i 400 ed i 670 Km di profondità, anche in questo caso in corrispondenza di variazioni di velocità di propagazione di onde sismiche.

Il mantello inferiore è composto principalmente da una associazione di minerali con strutture cristalline compatibili con pressioni e temperature elevate, le perovskiti silicatiche, il che ne farebbe il minerale più abbondante sul nostro pianeta; la composizione è comunque variabile e si ritiene che vi sia un aumento della percentuale di Ferro all'aumentare della profondità.

Il mantello superiore si estende dalla discontinuità di *Mohorovičić* ed ha composizione molto variabile in funzione della profondità. Il mantello superiore è ulteriormente suddiviso in più zone.

Nella parte superiore del mantello è stata individuata una zona di rallentamento del 3-6% della velocità delle onde sismiche, denominata zona di bassa velocità (Low Velocity Zone, LVZ); la LVZ ha spessori differenti: a partire dai 50 Km di profondità, sotto le parti meno antiche degli oceani, e dai 150 Km, sotto i continenti; ha base a circa 220 Km.

Si ritiene che la riduzione di velocità delle onde nella LVZ sia dovuta alla presenza di materiale fuso tra i granuli solidi del materiale mantellico.

Il magma eruttato dai vulcani è dovuto alla risalita di materiale proveniente proprio dal mantello, dove si trova a temperature elevate, fino alla superficie terrestre: il magma è allo stato solido o semi-plastico quando si trova nel mantello e fonde durante la risalita all'interno della crosta, a seguito della diminuzione di pressione.

La teoria della tettonica a placche prevede il movimento delle masse appartenenti all'involucro più esterno del pianeta: tali masse si muoverebbero sopra la superficie superiore della LVZ. Tale involucro in movimento è detto Litosfera ed è costituito dalla porzione del mantello che poggia sulla superficie superiore della LVZ e dalla crosta; è relativamente freddo ed ha comportamento rigido.

La litosfera "galleggia" sull'Astenosfera, molto calda e plastica, che consiste nelle parti del mantello che vanno dalla LVZ fino a 700 Km di profondità.

3.1.2.1 I moti convettivi

A causa della differenza di temperatura fra crosta e nucleo e per effetto di deformazioni plastico-viscose, all'interno del mantello si instaura una circolazione convettiva di materiale, che consiste nello sprofondamento di materiale freddo e risalita verso la crosta di materiale magmatico. La discesa delle porzioni di mantello più fredde dà luogo al processo di subduzione (sprofondamento di porzioni di litosfera oceanica al di sotto di quella continentale) mentre in prossimità delle dorsali oceaniche avviene la risalita di magma.

I moti convettivi sono molto lenti, potendosi osservare su scale di tempo geologico, ma sono importanti poiché sono responsabili della distribuzione di temperatura all'interno del mantello e contribuiscono ai fenomeni dei Punti Caldi, vedi (§3.1.2.2 Lo strato D").

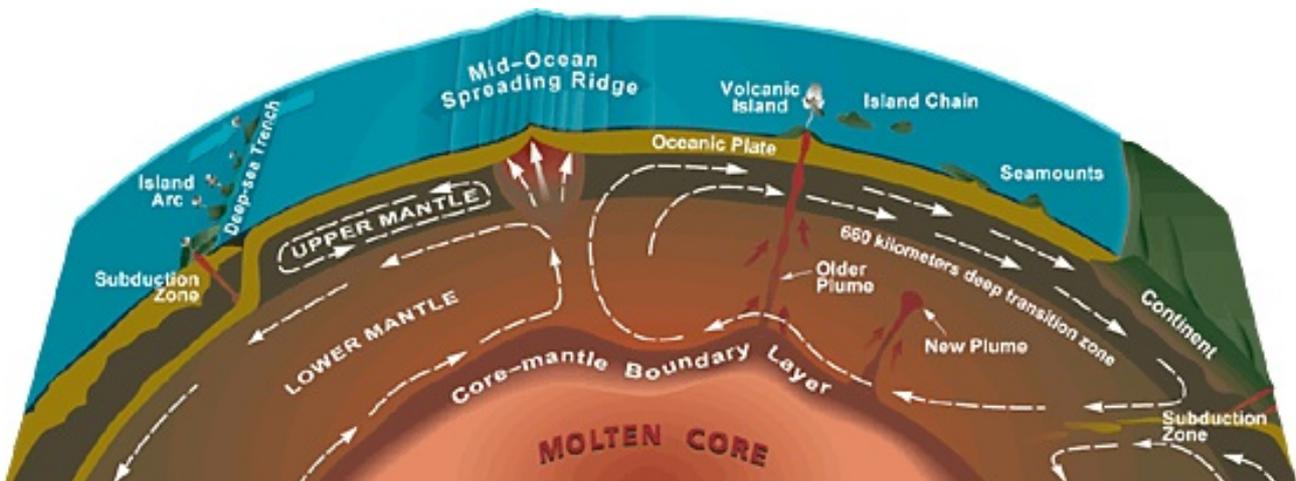


Figura 3: Rappresentazione dei movimenti convettivi, dei pennacchi e delle zone di subduzione, da <http://noblelab.coas.oregonstate.edu/research/solidearth/mantleplume/mantleplume.html>

3.1.2.2 Lo strato D''

Al confine fra mantello e nucleo è stato identificato lo strato denominato D'', caratterizzato da gradienti anomali di velocità delle onde sismiche, che ha spessore variabile fino ad un massimo di 300 Km, ove il materiale liquido del nucleo esterno si infiltrerebbe tra i grani solidi costituenti il mantello; si pensa che dallo strato D'' si innalzino i pennacchi di materiale caldo che si manifestano sulla sommità del mantello come *Punti Caldi* o "Hot Spot", che originano caratteristiche manifestazioni di risalita di magmi anche in superficie, come nelle Hawaii¹.

Il fenomeno dei pennacchi è indipendente dalle celle convettive ed hanno posizione fissa rispetto ai movimenti accoppiati di mantello e crosta. I pennacchi sono stati "dedotti" proprio perché i magmi prodotti hanno composizione incompatibile con il processo di normale subduzione-fusione-risalita

3.1.3 La crosta

La crosta è l'involucro più superficiale della superficie terrestre ed ha una massa pari a solo allo 0,4% di quella totale del pianeta.

Come detto in precedenza, il limite inferiore della crosta è rappresentato dalla discontinuità di Mohorovičić.

Esistono due tipi di crosta:

1. crosta continentale,
2. crosta oceanica.

La crosta continentale è spessa generalmente fra i 30 e i 50 Km, ma può arrivare a estendersi fino a 70 Km, al di sotto di catene montuose, quali le Ande e l'Himalaya. La densità è compresa fra 2,2 e 2,5 g/cm³.

La crosta oceanica ha uno spessore variabile fra i 5 e i 15 Km ed è caratterizzata da un peso specifico superiore a quello della crosta continentale, con densità media di 3 g/cm³.

La crosta si forma dalla fuoriuscita di magma dalle dorsali di espansione medio-oceaniche.

3.2 Flusso di calore terrestre ed energia geotermica

E' stato mostrato come all'interno della terra, la temperatura cresca all'aumentare della profondità e poiché il calore viene trasmesso dai corpi caldi a quelli freddi, sul pianeta vi è un flusso di calore o flusso geotermico diretto dall'interno verso l'esterno¹.

Il flusso geotermico medio sulla superficie del pianeta è stimabile tra 59 e 81mW/m², il che indica che l'intero pianeta trasmette una potenza termica compresa fra 30 e 42 TW attraverso la sua superficie (510·10⁶ Km²).

Considerando che il fabbisogno energetico mondiale (potenza necessaria per soddisfare le esigenze di tutti i paesi mondiali) del 2004 è inferiore ai 20 TW², si può avere un'idea dell'enorme quantità di energia in gioco.

Il fattore principale che determina la temperatura sul pianeta non deriva tuttavia dalla trasmissione di calore proveniente dall'interno del pianeta, ma dal calore fornito per irraggiamento dal sole. L'irraggiamento solare medio è circa 200 W/ m² alle latitudini medie e moltiplicando tale dato per la superficie solare esposta al sole e considerando la rotazione terrestre, si ottiene una potenza totale superiore di diversi ordini di grandezza a quella fornita dal flusso geotermico.

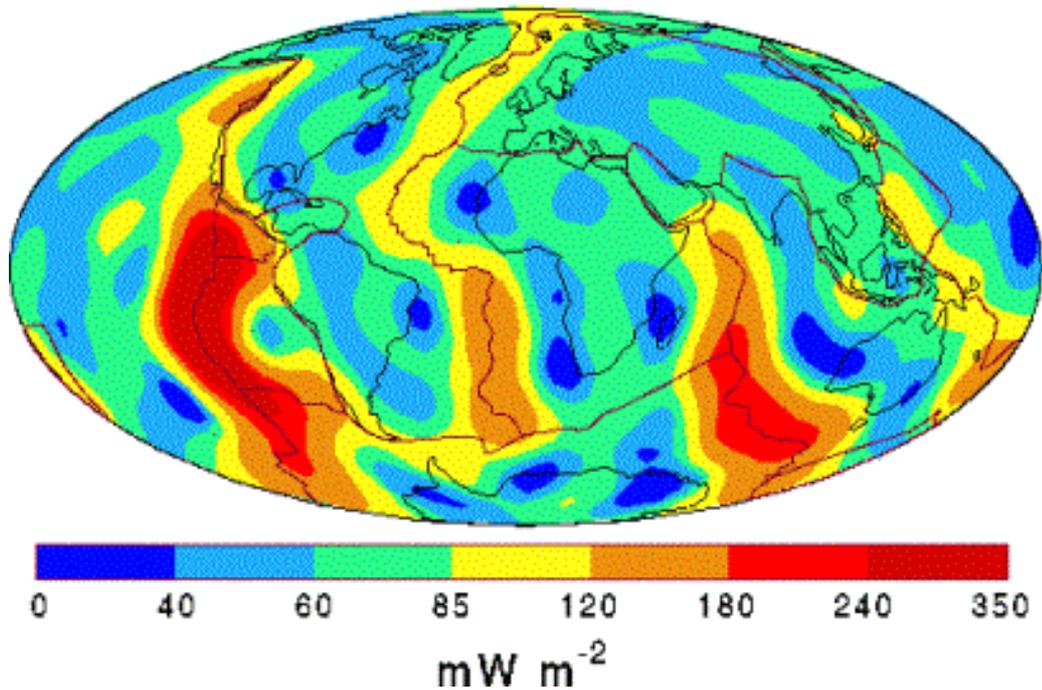


Figura 4: Flusso di calore geotermico sul globo terrestre, da http://www.minambiente.it/home_it/menu.html?mp=/menu/menu_attivita/&m=argomenti.html|Fonti_rinnovabili.html|Geotermia.html|Tecnologia02.html

Il flusso di calore geotermico è comunque molto variabile, come è possibile vedere in Figura 4 e Figura 5. In particolare è molto elevato in corrispondenza delle dorsali oceaniche in espansione, mentre è piuttosto basso all'interno dei continenti; questo non esclude che in aree ristrette all'interno di continenti vi possano essere flussi elevati dovuti a anomalie termiche nel sottosuolo, come nei casi di Larderello, ove si registrano valori fino a 1000 mW/m^2 .

3.2.1 Origine del flusso geotermico

L'origine del calore geotermico ha diverse cause, qui riassunte:

1. produzione di calore per decadimento nucleare di isotopi radioattivi
2. processi di cristallizzazione del nucleo
3. solidificazione di magma

La prima è la fonte principale del flusso di calore (20-80% del flusso della crosta terrestre): gli isotopi sono atomi di uno stesso elemento chimico, ossia atomi con numero di protoni caratteristico, ma numero di neutroni che può variare dal numero di riferimento per tale elemento; tale variazione può generare processi di decadimento radioattivo per instabilità del nucleo, accompagnati da sviluppo di calore

Diversi isotopi radioattivi sono contenuti nelle rocce costituenti crosta, mantello e nucleo terrestre. Nella Tabella 1 si possono leggere i principali isotopi contenuti all'interno delle rocce che producono energia mediante decadimento radioattivo; tali isotopi sono contenuti maggiormente nelle rocce granitiche, quindi nella crosta continentale, ed in quantità minore in quella oceanica; sono inoltre presenti pure nel mantello e nel nucleo, sebbene in concentrazioni inferiori. Si stimano

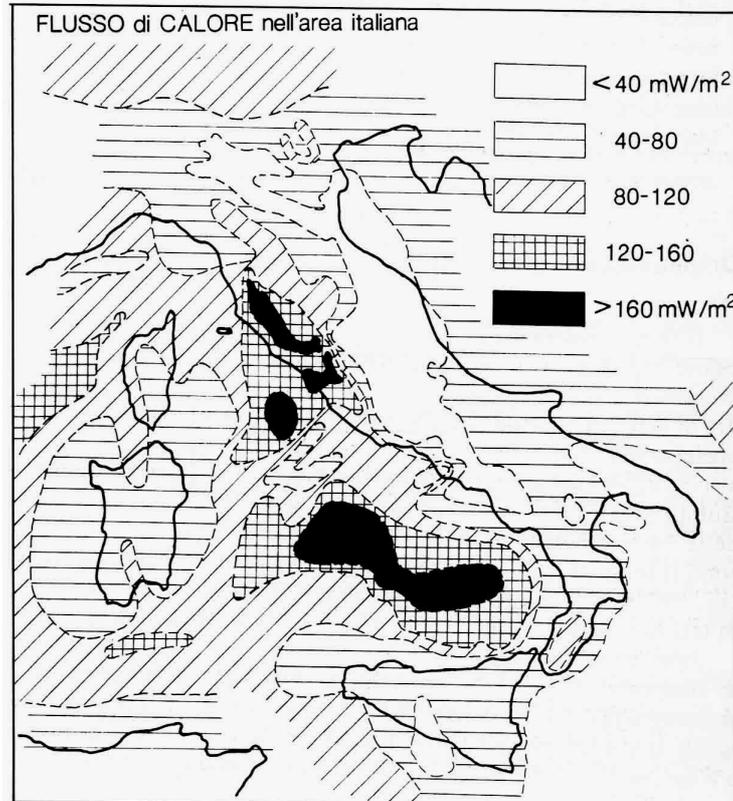


Figura 5: Flusso di calore nell'area italiana, da Mongelli et al. 1992

Introduzione alla geotermia

potenze dovute a decadimento radioattivo di 0,5-3,0 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ per rocce appartenenti alla crosta continentale, mentre valori ben più bassi (0,1-0,7 $\mu\text{W}/\text{m}^3$) sono associati alle rocce della crosta oceanica.

ISOTOPO/ELEMENTO	PRODUZIONE DI CALORE [cal/(g·anno)]
^{238}U (e serie di decadimento)	0,69
^{235}U (e serie di decadimento)	4,34
U naturale (miscela di isotopi)	0,72
^{232}Th (e serie di decadimento)	0,19
^{40}K	0,21
K naturale (miscela di isotopi)	$2,62 \cdot 10^{-5}$

Tabella 1: Principali isotopi radioattivi presenti sulla terra e produzione di calore in un anno da un grammo di isotopo associata al decadimento, da P. Casati, Scienze della Terra

I processi di cambiamenti di fase e reazione chimica costituiscono una fonte di calore meno importante: nel nucleo esterno, ad esempio, oltre alla produzione di calore tramite decadimento radioattivo, si ha produzione di calore dovuto al passaggio del materiale dallo stato liquido allo stato solido con struttura cristallina.

Un'ulteriore causa del flusso termico si ha ove il magma allo stato liquido si solidifica, cedendo la stessa quantità d'energia assorbita durante il processo di fusione, subito al di sotto della crosta terrestre. Questo fenomeno è una causa tipica di formazione di bacini geotermici, in quanto spesso vi sono risalite di materiale magmatico dagli strati inferiori della crosta fino a profondità ove la temperatura è molto inferiore: qui il magma cede calore al terreno circostante ove può formarsi un bacino geotermico se si presentano condizioni idonee (vedi §3.4 Bacini geotermici).

3.3 Gradiente geotermico

Per effetto del flusso di calore dall'interno all'esterno della Terra, si può definire il gradiente geotermico, ossia la variazione di temperatura T in funzione della profondità z .

$$\text{gradiente geotermico} = \frac{dT}{dz}$$

Il gradiente geotermico dipende dalla temperatura dell'aria e dalle condizioni atmosferiche solo per la porzione di suolo più vicina alla superficie: la temperatura del suolo, a sufficiente distanza dalla superficie, è indipendente dalle condizioni atmosferiche e rimane pressoché costante durante l'anno e pari alla temperatura media durante il corso dell'anno in quell'area³. In Figura 6 è possibile osservare l'esito di una simulazione di distribuzione delle temperature nel sottosuolo al variare delle condizioni atmosferiche annuali.

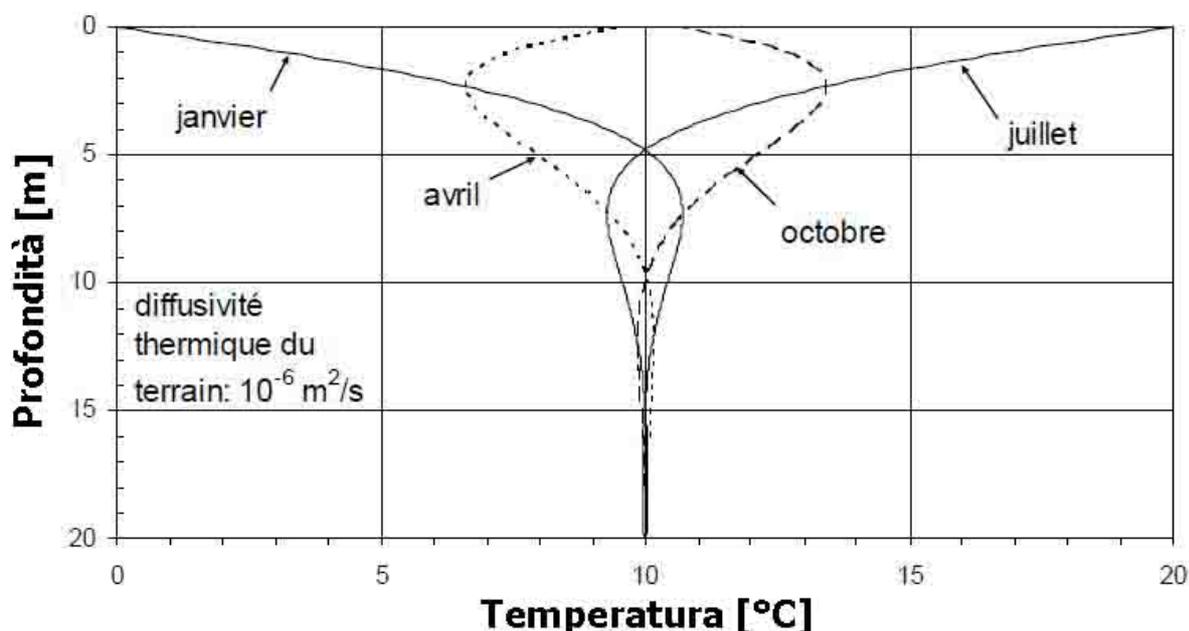
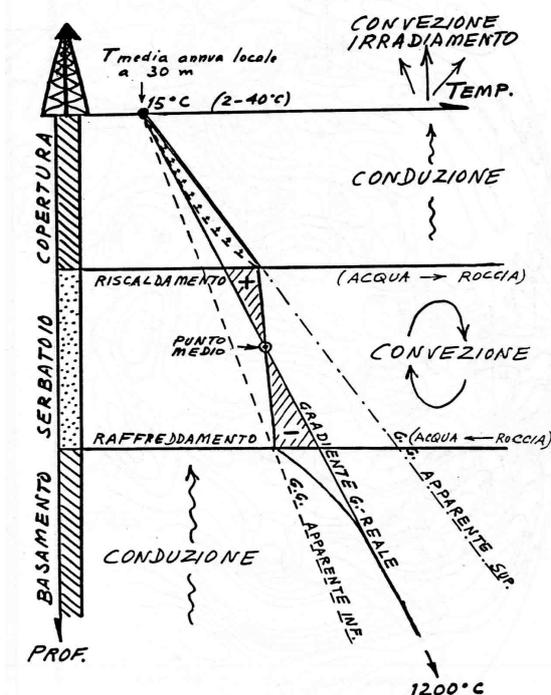


Figura 6: Profili teorici di temperatura nel sottosuolo in funzione della profondità, fino a 20 metri, e delle condizioni meteorologiche stagionali, da *Geothermal Energy and Heat Storage, SUPSI 2002*

Tali affermazioni non sono valide in condizioni particolari del sottosuolo, quali la presenza di acque di fusione di ghiacci o presenza di permafrost. Con permafrost si intende una porzione di terreno ghiacciato da almeno due anni: il permafrost si può estendere fino ad elevate profondità in zone a clima particolarmente rigido, tanto che in Siberia è stato stimato uno spessore di migliaia di metri di profondità⁴.

Un valore di riferimento del gradiente geotermico nella litosfera, a sufficiente distanza dalla superficie, è 3°C ogni 100m, ma anch'esso ha grande variabilità in funzione della presenza di fonti di calore, acquiferi (porzione del sottosuolo saturata da acqua ed altri componenti), ecc... Un intervallo di variazione tipico è fra 1,5 e 5°C ogni 100 metri.



Il gradiente geotermico è un parametro molto importante nel campo della geotermia in quanto è un indicatore della presenza di fonti di calore e dei principali meccanismi di trasporto del calore. Quando il valore del gradiente supera fortemente i valori medi, è indice della presenza di fonti di

Figura 7: Meccanismi di trasporto del calore nel sottosuolo ed andamento del gradiente geotermico in funzione delle caratteristiche del sottosuolo, da Sommaruga, *Elementi di geotermia*

calore nel sottosuolo. Quando il gradiente è molto basso, vicino al valore nullo, significa che la temperatura non varia colla profondità ed i meccanismi di trasporto convettivo del calore, operato probabilmente da un fluido, prevalgono sui fenomeni conduttivi.

Nel mantello superiore, interessato da moti convettivi, il gradiente geotermico medio è stimato di soli $0,5^{\circ}\text{C}/\text{Km}^1$.

3.4 Bacini geotermici

Un bacino o reservoir o sistema geotermico è una porzione di sottosuolo, costituito da rocce porose e permeabili, in cui vi è compresenza di un acquifero e di una fonte di calore.

In idrogeologia, con il termine *acquifero* si indica una porzione del sottosuolo costituita da terreno o rocce dotati di una porosità efficace e di una continuità spaziale fra i pori, tali da consentire il passaggio di acqua (in generale di fluidi), per effetto della forza di gravità o per un gradiente di pressione.

In alcuni casi vi può essere una manifestazione della presenza di bacini geotermici sulla superficie, come ad esempio la presenza di geysers (getti periodici di colonne di acqua calda e vapore dal sottosuolo), fumarole o getti di vapore detti “soffioni”.

Date queste caratteristiche si può comprendere l'importanza di tali sistemi come risorse naturali dalle quali prelevare energia.

Vi sono diversi tipi di bacini geotermici:

1. Sistemi geotermici idrotermali,
2. Sistemi geotermici in rocce calde secche,
3. Sistemi geotermici magmatici,
4. Sistemi geotermici geopressurizzati

3.4.1 Sistemi geotermici idrotermali

L'acquifero è a contatto con una fonte di calore ed ha una ricarica meteorica. E' presente una struttura geologica impermeabile di copertura dell'acquifero che impedisce ai fluidi caldi di risalire in superficie, mantenendoli in pressione. Vi possono essere manifestazioni superficiali.

Sono i sistemi più sfruttati per la produzione di energia sia elettrica che termica.

Si distinguono a loro volta in sistemi:

1. a vapore secco,
2. a vapore dominante,
3. ad acqua calda.

3.4.1.1 Sistemi a vapore secco

In questi sistemi vi è la risalita di vapore “secco”, ossia surriscaldato, o saturo, accompagnato da basse quantità di altri gas, quali CO_2 , H_2S , CH_4 , B, NH_3 , ecc.

L'utilizzo tipico è finalizzato alla produzione di energia elettrica. Nel mondo sono piuttosto rari, in quanto ne sono stati scoperti solo quattro: Larderello (Toscana, Italia), The Geysers (California, USA), Matsukawa (Giappone) e Kawah Kamojang (Indonesia).



Figura 8: Torri di raffreddamento nel campo geotermico di Larderello, da http://bellenergia.altervista.org/PRINCIP_GEOTERMIA.htm

3.4.1.2 Sistemi a vapore umido o ad acqua dominante

Nel sottosuolo è presente fluido ad alta temperatura e pressione, che vaporizza se si riduce la pressione nel serbatoio o durante la risalita in pozzo: in superficie avviene la produzione di acqua mista a vapore.

Campi di questo tipo sono presenti a Wairakei (Nuova Zelanda), nei Campi Flegrei (Campania, Italia) e Cerro Prieto (Messico).



Figura 9: Craters of the moon, Taupo, campo geotermico di Wairakei, Nuova Zelanda (da Wikipedia, Wairakei)

Per l'utilizzo dei fluidi per la produzione di energia elettrica è richiesta la separazione del vapore dal liquido, poiché molto spesso viene usato solo il vapore per alimentare la turbina della centrale.

Introduzione alla geotermia

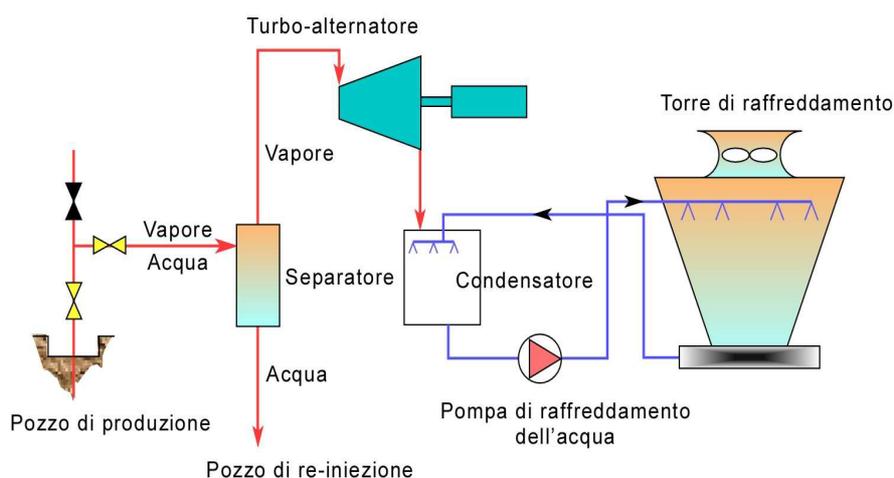


Figura 10: Rappresentazione schematica di un impianto a condensazione per generazione di elettricità. A valle della turbina è presente il separatore del vapore dal liquido, da Dickson e Fanelli, CNR Pisa, Cos'è L'energia geotermica?, 2004

3.4.1.3 Sistemi ad acqua calda

Sono sistemi idrotermali non dotati di un tetto impermeabile e ciò influisce sul fatto che le temperature siano più basse rispetto ai casi precedenti, in genere inferiori ai 100°C. L'emungimento è di acqua liquida. In questi casi l'uso dei fluidi è raramente destinato alla produzione di energia elettrica, ma è finalizzato ad usi diretti quali il riscaldamento di ambienti interni e serre, per agricoltura, piscicoltura, usi termali, ecc...

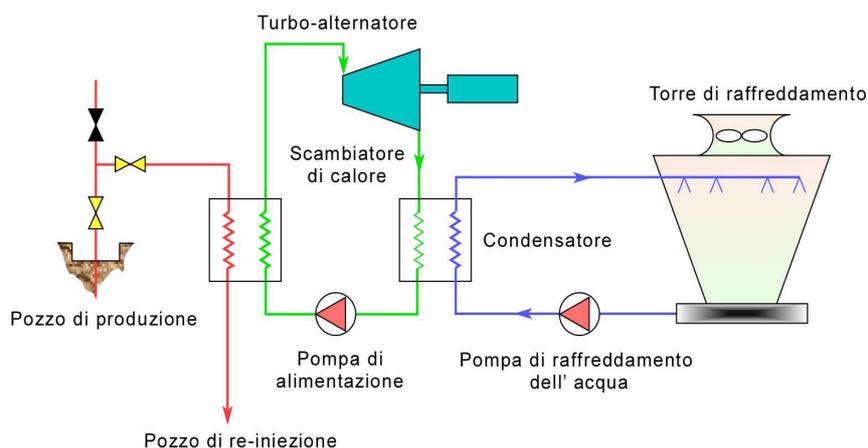


Figura 11: Rappresentazione di un impianto a ciclo binario per la produzione di energia elettrica da sistemi ad acqua calda (da Dickson e Fanelli, CNR Pisa, Cos'è l'Energia Geotermica?, 2004)

Vi sono casi (ad esempio presso Mammoth Lakes nella California centrale, USA) in cui attraverso l'impiego di un ciclo binario, ossia l'uso del fluido estratto assieme ad un fluido secondario, per lo scambio del calore, rende possibile la produzione di energia elettrica, seppure con basso

rendimento¹.

3.4.2 Sistemi geotermici in rocce calde secche

Si definiscono come sistemi geotermici in rocce calde secche (RCS o HDR “Hot Dry Rocks”) quelle porzioni di sottosuolo ove le temperature nel sottosuolo sono superiori alla temperatura dovuta ad un flusso geotermico normale, ma vi è assenza di acqua, a causa di bassi valori di permeabilità. Attraverso una circolazione artificiale di acqua, resa possibile dalla fratturazione delle rocce in situ, è possibile lo sfruttamento del flusso termico, tramite il riscaldamento dell'acqua iniettata o addirittura la vaporizzazione della stessa; in tal caso si attiverebbe un sistema geotermico idrotermale artificiale.

La fratturazione delle rocce è effettuata mediante idrofratturazione (iniezione di acqua ad elevata pressione che crea fratture all'interno della roccia) ed azione termoclastica (iniezione di acqua fredda che raffreddando le rocce calde ne provoca una contrazione tale da creare fratture).

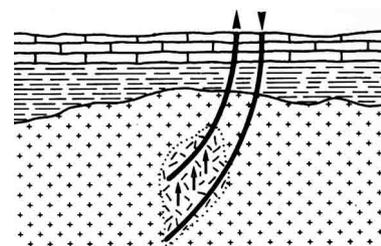


Figura 12: Schema di sfruttamento dei sistemi a rocce calde secche, con fratturazione artificiale [da Casati, Scienze della Terra]

Tali sistemi sono ancora in fase di sperimentazione¹; un esempio si ha presso Los Alamos (New Messico, USA), ove vi è una caldera vulcanica risalente ad 1 milione di anni fa, posta a circa 4000 metri di profondità, sul cui bordo si raggiungono flussi di calore fino a 250mW/m^2 : già negli anni settanta erano stati perforati due pozzi direzionati (ossia che non hanno direzione verticale) che raggiungono le profondità di 4100 e 4018 m rispettivamente¹.

3.4.3 Sistemi geotermici magmatici

Con questi sistemi si vuole sfruttare il calore di masse magmatiche, contenute ad elevata profondità 5-7 Km, tramite il riscaldamento e la vaporizzazione di acqua fredda proveniente da un sistema di circolazione costituito da un unico pozzo, sia per l'iniezione che per l'emungimento (vedi Figura 13).

L'idea è semplice ma la tecnologia adottata è molto avanzata, poiché i materiali adottati debbono resistere alla temperatura ($650\text{-}1300^\circ\text{C}$) ed alla natura corrosiva dei magmi. Inoltre non si può prevedere l'effetto del raffreddamento del magma attorno al pozzo, ove si potrebbe formare un involucro di roccia fredda che ne ridurrebbe drasticamente le prestazioni.

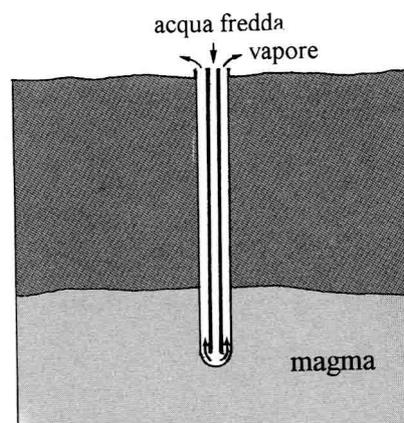


Figura 13: Schema di sfruttamento dei sistemi geotermici magmatici: dallo stesso pozzo avviene l'iniezione di acqua fredda e la risalita di vapore. [da Casati, Scienze della Terra]

3.4.4 Sistemi geotermici geopressurizzati

Sono sistemi nei quali l'acqua si trova a pressione superiore rispetto alla pressione idrostatica. Spesso questi bacini contengono metano disciolto. La temperatura dell'acqua varia generalmente fra i 120 e i 170°C . La coltivazione di questi bacini consentirebbe

lo sfruttamento dell'energia termica dell'acqua, assieme a quello dell'energia meccanica e chimica (del metano).

Sistemi di questo tipo sono presenti nella parte settentrionale del Golfo del Messico e nella Pianura Padana a profondità di 4000 m, ma non ancora sfruttati ¹.

3.5 Geotermia a bassa ed alta entalpia

I bacini geotermici vengono suddivisi in sistemi ad alta o bassa entalpia, per indicare il valore di entalpia dei fluidi contenuti all'interno del serbatoio. L'entalpia è una grandezza termodinamica, definita come:

$$E=U+pV$$

ove E=entalpia (J), U= energia interna (J), p=pressione (Pa), V=volume (m³).

Ciò che permette una distinzione fra bassa ed alta entalpia non è un valore di tale grandezza, ma piuttosto un intervallo di temperature e pressioni, oltre il quale i fluidi estratti possono essere utilizzati per la produzione di energia elettrica.

I fluidi provenienti da bacini a bassa entalpia vengono utilizzati invece per usi diretti.

Esempi di questi usi sono il riscaldamento di edifici e serre, la piscicoltura, l'uso come fluidi riscaldanti per processi industriali, ecc... ; una panoramica più completa è mostrata in Figura 14.

Mentre nella geotermia ad alta entalpia vengono utilizzati direttamente i fluidi estratti dal sottosuolo, nella geotermia a bassa entalpia si fanno circolare solo dei fluidi secondari, che hanno il compito di trasportare calore dal sottosuolo alla superficie; i pozzi non servono dunque per emungere od iniettare acqua, ma svolgono la funzione di scambiatori di calore.

Introduzione alla geotermia

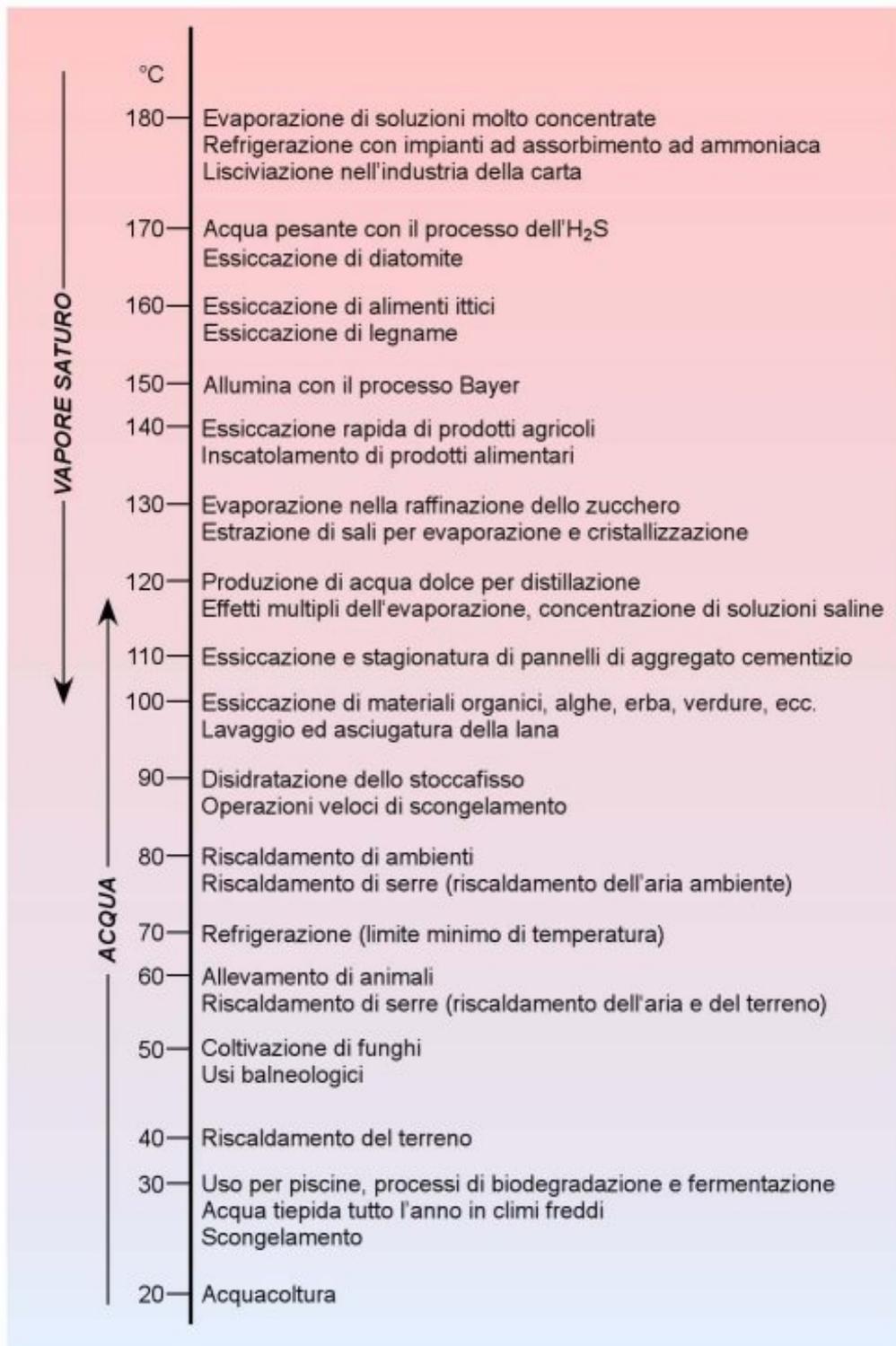


Figura 14: Usi dei fluidi geotermici in funzione della temperatura a boccapozzo o diagramma di Lindal.

Questa tesi sarà focalizzata all'uso delle risorse geotermiche ad alta entalpia.

3.6 Pozzi per sistemi geotermici ad alta entalpia

La progettazione di pozzi destinati allo sfruttamento di campi geotermici ad alta entalpia deve prestare particolare attenzione alle condizioni ambientali alle quali sarà sottoposto il manufatto: infatti i pozzi costruiti per lavorare in queste condizioni estreme del sottosuolo, con temperature anche superiori ai 400°C, sono concepiti in maniera differente rispetto agli altri tipi di pozzo (petroliferi, idrici, geotermici a bassa entalpia).

Anche la scelta dei fanghi di perforazione, del cemento utilizzato nella realizzazione del casing, e del sistema di ricircolo dei fanghi, deve considerare gli effetti provocati dall'esposizione ad elevati flussi di calore.

Il sistema di ricircolo dei fanghi ad esempio deve prevedere un sistema di raffreddamento dei fluidi risaliti in superficie⁵.

Bisogna poi prevedere le misure da adottare in caso di venute di gas corrosivi quali CO₂ o H₂S, che seppure non frequenti sono eventualità possibili.

3.7 Geotermia come fonte d'energia elettrica

I primi tentativi di sfruttamento di fluidi geotermici per la produzione di energia elettrica risalgono ai primi anni del 1900 e furono effettuati in Toscana.

Già nel Medio Evo nell'area di Larderello si sfruttava la peculiarità del luogo per estrarre zolfo e vetriolo dalle manifestazioni superficiali dell'attività geotermica, quali i soffioni.

Nel 1827 il francese Larderel, che diede poi il nome alla località, sfruttò l'energia termica dei soffioni nel processo di produzione dell'acido borico, molto richiesto ai tempi dall'industria farmaceutica.

Negli anni 1904 e 1905 Piero Ginori Conti fece i primi tentativi al mondo per azionare una dinamo mediante i fluidi geotermici, collo scopo di generare energia elettrica.

Fu solo nel 1912 che venne costruita la prima centrale geotermoelettrica del mondo, proprio a Larderello; fu tuttavia solo negli anni '30 che la produzione da fonte geotermica cominciò ad avere una certa importanza, con 11 MW di potenza installata.

Fino ad ora, in Italia, l'industria geotermoelettrica è presente solo in Toscana; nel 2009 il complesso di centrali geotermoelettriche in funzione hanno sviluppato una potenza complessiva di 737 MW, con una produzione annua di oltre 5000 GWh⁶.

Introduzione alla geotermia

	%
Hydro	80,51
Wind	5,35
Primary Solid Biomass**	3,99
Primary Solid Biomass**	3,99
Geothermal	1,58
Municipal Waste*	1,42
Municipal Waste*	1,42
Biogas	0,77
Solar Photovoltaics	0,29
Industrial Waste	0,27
Industrial Waste	0,27
Liquid Biofuels	0,08
Solar Thermal	0,02
Tide, Wave, Ocean	0,01
Total	100,00

Tabella 2: Fonti rinnovabili destinate alla produzione di energia elettrica a livello mondiale (dati 2008, fonte IEA 2011)

Produzione lorda energia elettrica Mondiale 2008 (20200TWh)
(dati in percentuale, fonte TERNA 2011)

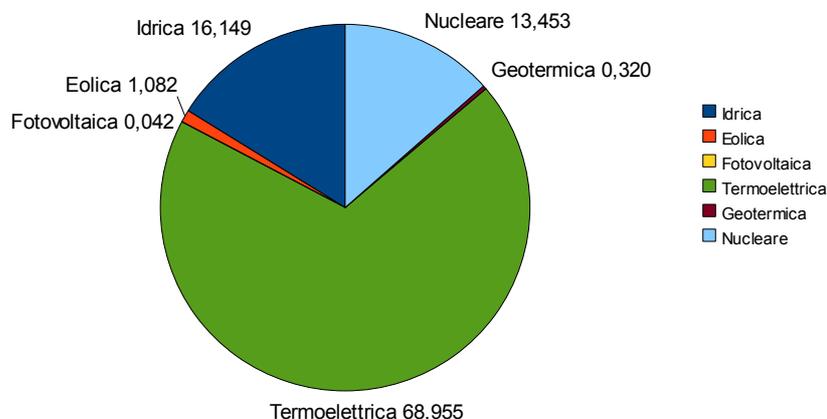


Figura 15: Dati percentuali di produzione di energia elettrica nel Mondo, divisi per fonte, nel 2008,

Seppure in Toscana la produzione geotermoelettrica sia importante, a livello sia italiano che mondiale, la quota di produzione di energia elettrica derivante da fonte geotermica è marginale, come è possibile constatare nella Tabella 2 ed in Figura 15.

Infatti a livello mondiale la quota di energia elettrica di origine geotermoelettrica, è complessivamente solo lo 0,32% del totale.

A livello italiano, la percentuale di energia da fonte geotermoelettrica è superiore a quella globale e pari all'1,7%⁷ seppure la crescita del settore sia scarsa. Un caso a parte a livello mondiale è rappresentato dall'Islanda, ove lo sfruttamento dell'energia geotermica è particolarmente sviluppato. L'isola fa parte di una dorsale di espansione medio-oceanica emersa, impostata su un Hot Spot e tale origine geologica è causa di un'importante anomalia geotermica

Nel 2009 la generazione di 16'839 Gwh di energia elettrica è avvenuta al 99% tramite fonti rinnovabili, di cui il 27% di fonte geotermoelettrica⁷: ciò consente al paese una maggiore indipendenza energetica dai paesi fornitori d'energia ed una bassa produzione di gas serra.

In Figura 16 sono riportati i dati di produzione annua mondiale di energia geotermoelettrica ed i dati di produzione di energia termica tramite fonte geotermica.

Geothermal electricity production		Geothermal direct use	
Country	GWh/yr	Country	GWh/yr
United States	16 603	China	20 932
Philippines	10 311	United States	15 710
Indonesia	9 600	Sweden	12 585
Mexico	7 047	Turkey	10 247
Italy	5 520	Japan	7 139
Iceland	4 597	Norway	7 000
New Zealand	4 055	Iceland	6 768
Japan	3 064	France	3 592
Kenya	1 430	Germany	3 546
El Salvador	1 422	Netherlands	2 972
Costa Rica	1 131	Italy	2 762
Turkey	490	Hungary	2 713
Papua New Guinea	450	New Zealand	2 654
Russia	441	Canada	2 465
Nicaragua	310	Finland	2 325

Figura 16: Produzione geotermica per produzione elettrica e termica in diversi paesi (dati 2009, fonte IEA 2011)

3.8 Impatto Ambientale dello sfruttamento dell'energia geotermica

L'energia geotermica non è una fonte rinnovabile vera e propria, in quanto acqua e vapore vengono estratti ad una velocità maggiore di quella di rigenerazione naturale, per quanto si preveda la reiniezione di fluidi nel serbatoio. Può essere però una valida alternativa alle fonti energetiche tradizionali per il basso impatto ambientale che può derivare da un corretto sfruttamento.

In generale la coltivazione di campi geotermici ad alta entalpia è più impattante di quella a bassa entalpia.

Alcuni impatti sono dovuti alla fase di ricerca e perforazione, quindi hanno carattere temporaneo, mentre altri impatti si distribuiscono su tutta la vita dell'impianto e pure oltre.

La legge italiana richiede una valutazione di impatto ambientale (V.I.A.) precedente alla presentazione sia del permesso di ricerca, che della domanda di concessione di coltivazione: il permesso di ricerca riguarda le aree interessate ad indagini finalizzate a determinare le aree più favorevoli allo sfruttamento, mentre la concessione di coltivazione fa riferimento alle aree dove avviene la coltivazione del campo geotermico.

E' bene quindi specificare quali impatti ambientali possono derivare dallo sfruttamento geotermico.

3.8.1 Impatto Visivo

La creazione di centrali per la produzione di energia elettrica provoca una rilevante antropizzazione del territorio: superfici occupate da edifici e costruzioni quali torri di raffreddamento, suolo occupato da reti di condutture che trasportano i fluidi estratti, colonne di vapore derivanti dagli scarichi delle centrali.

3.8.2 Inquinamento acustico

E' predominante durante le fasi di perforazione dei pozzi e di prova dei pozzi⁵.Può essere sensibilmente ridotto tramite impiego di idonei silenziatori.

3.8.3 Inquinamento chimico

Deriva dalle emissioni gassose e liquide uscenti dalle centrali. I fluidi estratti contengono infatti una gran quantità di sostanze quali Arsenico, Mercurio, Boro, Fluoro, Piombo e Zinco¹, le quali, ad alte concentrazioni, sono tossiche.

La contaminazione dell'ambiente con tali sostanze avviene tramite la dispersione di vapore ed acqua estratti, i quali possono trasportare i vari componenti a grande distanza dal punto di emissione. In particolare gli inquinanti gassosi o assorbiti nei vapori emessi possono depositarsi sul suolo, dal quale si immettono nel sistema di acque superficiali e sotterranee, rischiando di intaccare le fonti di acqua potabile.

Gli inquinanti liquidi si disperdono invece direttamente nel sistema di acque superficiali e sotterranee.

Per evitare la dispersione di sostanze pericolose nell'ambiente si possono adottare sistemi di abbattimento e considerare la reiniezione dei fluidi estratti.

Durante il funzionamento, le centrali possono produrre anche rifiuti solidi, derivanti da incrostazioni nelle torri di refrigerazione e depositi di silice¹.

3.8.4 Microsismicità

Sono stati riscontrati eventi sismici di bassissimo livello nelle aree coinvolte da sfruttamento di serbatoi geotermici, in gran parte a seguito della reiniezione di fluidi e avvertibili unicamente da strumenti. E' bene però monitorare il fenomeno.

3.8.5 Subsidenza

Deriva dall'eccessivo sfruttamento del campo, con velocità superiore a quella di ricarica naturale dell'acquifero: l'estrazione di fluidi comporta un'aumento del carico effettivo che induce compattazione del terreno ed una conseguente riduzione dello spessore dei sedimenti.

Si manifesta soprattutto nei campi a vapore umido ed ad acqua calda: il campo di Wairakei, in Nuova Zelanda, ha subito un abbassamento del suolo di 4,5m nel periodo 1964-1974.

Nei campi a vapore dominante il fenomeno è molto più limitato: tra il 1923 ed il 1986 a Larderello si è registrato un abbassamento di soli 1,7m, mentre a The Geysers (USA) è stato di 0,14m tra il 1973 ed il 1977.

Un rimedio al fenomeno della subsidenza può derivare dalla reiniezione di fluidi nella roccia-serbatoio.

3.8.6 Perforazione

E' necessaria cautela nel caso i pozzi di captazione dei fluidi geotermici attraversino falde acquifere, per evitare di mettere in comunicazione più acquiferi ed evitare contaminazioni delle acque adibite all'uso potabile. Per evitare tali avvenimenti è necessario uno studio dettagliato dell'idrogeologia dell'area su cui si interviene ed un monitoraggio costante e duraturo dei parametri ambientali sensibili.

In aree soggette a vulcanismo attivo è bene prestare attenzione a non indurre eruzioni vulcaniche,

come successo durante una perforazione in Islanda ⁵.

3.9 Leggi che disciplinano l'attività di coltivazione geotermica

L'attività geotermoelettrica è considerata attività mineraria⁸, pertanto le norme principali di riferimento sono:

- Il Regio Decreto 29 luglio 1927 n. 1443 “Norme di carattere legislativo per disciplinare la ricerca e la coltivazione delle miniere nel regno”
- Il DPR 18 aprile 1994 n.382 “Disciplina dei procedimenti di conferimento dei permessi di ricerca e di concessioni di coltivazione di giacimenti minerari di interesse nazionale e di interesse locale”

E' stata poi dettata una disciplina specifica per la geotermia:

- Legge 19 dicembre 1986 n. 896 “Disciplina della ricerca e della coltivazione delle risorse geotermiche”
- DPR 27 maggio 1991 n. 395 “Approvazione del regolamento di attuazione della legge 896/86, recante la disciplina della ricerca e della coltivazione delle risorse geotermiche”
- DPR 18 aprile 1994 n. 485 “Regolamento recante la disciplina dei procedimenti di rilascio di permesso di ricerca e concessione di coltivazione delle risorse geotermiche di interesse nazionale”

La Legge 99 del 2009 “Disposizioni per lo sviluppo e l'internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia” ha introdotto novità interessanti in materia.

Sulla G.U. n.45 del 24 febbraio 2010 è stato pubblicato il D.Lgs 11 febbraio 2010 n. 22 "Riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche, a norma dell'art. 27, comma 28, della legge 23 luglio 2009, n. 99, che abroga la L. 896/1986".

4 Introduzione alla simulazione

Prima di affrontare il tema dell'accoppiamento dei software di simulazione di bacino iTOUGH2 e di simulazione di pozzo è bene chiarire alcune nozioni fondamentali, necessarie alla comprensione dell'argomento "simulazione" in generale.

Definiremo in questo capitolo i significati che assumono nell'ambito di una simulazione numerica di un bacino geotermico i termini sistema, processo, modello, modello numerico, simulazione, ecc... che useremo spesso di qui in avanti.

4.1 Sistemi e modelli

4.1.1 Definizioni

Sistema: per sistema si intende un aggregato di parti, coordinate in un unico "corpo", coll'obiettivo di raggiungere uno scopo. Un sistema non è però un semplice insieme dei suoi componenti, poiché è richiesto che le parti che compongono il sistema interagiscano fra di loro⁹. Un esempio di interazione può essere lo scambio di energia o di informazioni.

Esempi di sistemi possono essere cose più disparate, quali una squadra di calcio, un edificio, oppure, come nel nostro caso, un bacino geotermico.

Processo: col termine processo si definisce l'insieme di interazioni, trasformazioni e trasmissioni di energia, materiale ed informazioni finalizzate al raggiungimento di un determinato scopo.

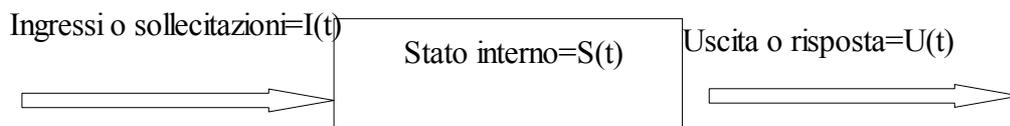
Dopo aver definito cos'è un processo, si può dare una *seconda definizione di sistema*, ossia come raggruppamento di tutti i mezzi materiali attraverso i quali si realizza il processo.

Ogni sistema è definito da proprietà intrinseche che ne contraddistinguono il comportamento. Vi sono due tipi di proprietà, *permanenti* e *condizionate*, espresse rispettivamente da due grandezze:

1. i *parametri*, che sono grandezze costanti nel tempo, che caratterizzano i sistemi tempo-invarianti,
2. le *variabili*, che sono grandezze caratteristiche dei sistemi tempo-varianti, che cambiano nel tempo, in funzione delle azioni esercitate dagli altri elementi del sistema e dall'ambiente esterno. Una variabile rappresenta proprio la capacità del sistema di evolvere nel tempo, mediante interazioni con altri elementi del sistema e l'ambiente esterno al sistema.

Un esempio di parametro del sistema acquifero è la comprimibilità dell'acqua, mentre una variabile può essere la pressione dei fluidi contenuti nell'acquifero.

Un sistema può essere schematizzato come un'entità, al cui interno avviene un processo, e che ha relazioni coll'ambiente esterno tramite un ingresso ed un'uscita:



L'uscita (o *risposta*) del sistema dipenderà dalle azioni che il sistema stesso subisce dal mondo esterno (dette *ingressi* o *sollecitazioni* o *perturbazioni*) e da ciò che avviene all'interno del sistema, ovvero il suo stato interno. L'uscita del sistema $U(t)$ si può rappresentare dal punto di vista matematico come una funzione che dipende da un'altra funzione che descriva lo stato interno $S(t)$ e da una funzione che descriva le sollecitazioni $I(t)$ subite dal sistema: $U(t) = f[S(t), I(t)]$, ove f è una funzione.

Nel caso di acquiferi geotermici, un ingresso può essere la messa in produzione di un pozzo di emungimento di vapore con portata definita; la risposta può essere la variazione di pressione dei fluidi, mentre lo stato interno può essere descritto dalla distribuzione delle saturazioni.

4.1.2 Classificazione dei sistemi

In base agli scambi di materia ed energia

Un sistema si dice *aperto* (dal punto di vista termodinamico) quando scambia sia materia che energia coll'ambiente esterno.

Se lo scambio di energia e materia non è permesso, si dice *isolato*, mentre se non è consentito unicamente lo scambio di materia, si dice *chiuso*.

I serbatoi geotermici, in generale, sono sistemi aperti.

In base alla variazione temporale dei parametri

Un sistema in cui la stessa sollecitazione, ripetuta in momenti diversi, produce la stessa uscita, si dice *invariante*.

E' però inevitabile che i parametri varino nel tempo, per effetto di processi d'invecchiamento; i sistemi in cui i parametri variano nel tempo sono detti *varianti*.

Si può però assumere che, nonostante un sistema sia variante, i parametri che lo caratterizzano siano costanti su intervalli di tempo ristretti. Ad esempio la porosità, su lunghi intervalli di tempo può variare per effetto della compattazione del terreno, tuttavia si può assumere che resti costante in periodi di tempo brevi, ad esempio nell'arco di mesi.

E' quindi la velocità di variazione dei parametri confrontata con la velocità d'evoluzione del sistema che determina l'invarianza del sistema.

In base alla variazione temporale delle variabili

A seconda che le variabili che descrivono il sistema siano costanti o meno nel tempo, i sistemi si definiscono: *statici* o *dinamici*. Affinché un sistema sia definito dinamico è sufficiente che solo una delle variabili muti nel tempo.

Per questa classificazione è necessario definire l'obiettivo dell'analisi.

In base ai valori assunti dalle variabili

L'insieme di definizione delle variabili del sistema definisce la suddivisione in sistemi *a variabili continue* o *a variabili discrete*.

Nel primo caso le variabili hanno un insieme di definizione in corrispondenza biunivoca coll'insieme dei numeri reali. Nel secondo caso le variabili hanno un insieme di definizione in corrispondenza biunivoca coll'insieme dei numeri naturali, od un suo sottoinsieme finito.

Un esempio di sistema a variabili discrete può essere un componente elettronico che gestisca informazioni in formato binario, ossia tramite una variabile che assume unicamente i valori di 0 e 1.

In base alle proprietà delle relazioni

Se le relazioni esistenti fra variabili dipendenti e variabili indipendenti permettono di determinare il valore di una variabile dipendente in modo univoco, il sistema si dice *deterministico*. Se altrimenti le relazioni non sono in grado di definire un legame così stretto fra variabili dipendenti ed indipendenti, ma è richiesta l'adozione di relazioni statistiche, si parla di sistemi *stocastici* o *probabilistici*.

4.1.2.1 Condizioni di regime e condizioni di transitorio

Osservando l'uscita prodotta da un sistema a seguito di sollecitazioni in ingresso, si possono definire gli *stati di regime* e *di transitorio*.

Lo stato di regime è lo stato in cui il sistema ha terminato la sua evoluzione e produce un'uscita costante o tendente asintoticamente ad un valore, detta *uscita di regime*.

Lo stato di transitorio è invece lo stato in cui il sistema si trova in evoluzione fra due stati di regime e l'uscita tende a stabilizzarsi verso l'uscita di regime del secondo stato.

4.1.3 Modelli

Un sistema reale è in genere molto complesso da analizzare, dati i numerosi aspetti da considerare e l'impossibilità di valutare con oggettività numerose proprietà dello stesso.

Al fine di risolvere un problema inerente il sistema stesso, si può però considerare una rappresentazione semplificata, detta *modello*: questo nuovo sistema sarà composto da tutti e solo quegli elementi del sistema originario che si ritengono determinanti per la risoluzione del problema in questione.

I modelli si dividono in

- modelli fisici
 - in scala
 - analogici
- modelli simbolici
 - a simboli passivi
 - a simboli attivi

I modelli fisici sono anch'essi dei sistemi reali, le cui proprietà rispecchiano, attraverso una relazione di proporzionalità, le proprietà del sistema originario.

Modelli Fisici in scala

Ad ogni elemento considerato del modello originario viene fatto corrispondere un elemento che sia rappresentato dalla stessa grandezza fisica (es. lunghezze con lunghezze, masse con masse); il rapporto di proporzionalità fra i valori assunti dalla stessa grandezza viene mantenuto costante per tutti gli elementi del modello. Un esempio di tale modello può essere un plastico tridimensionale di

un edificio.

Modelli Fisici analogici

Nei modelli fisici analogici, le proprietà del sistema originario sono rappresentate nel modello tramite grandezze fisiche differenti. Ad esempio un termometro rappresenta la grandezza fisica temperatura mediante la lunghezza della colonnina di mercurio. In passato venivano inoltre realizzati modelli di acquiferi con circuiti elettronici, che sfruttavano l'analogia esistente fra la legge di Darcy, sul flusso d'acqua nel sottosuolo, e la legge di Ohm, sulla trasmissione di corrente elettrica in conduttori.

Modelli Simbolici

I modelli simbolici sono contraddistinti dalla rappresentazione di caratteristiche del sistema reale tramite l'uso di simboli.

Modelli simbolici a simboli passivi

Rappresentano gli elementi del sistema tramite simboli che non possono essere manipolati, quali le icone; la relazione fra elementi e icone è mantenuta da una legenda. Un esempio può essere la mappa di un campo petrolifero, con icone che indicano la posizione dei pozzi.

Fanno parte di questa categoria i modelli concettuali, necessari ad eseguire una simulazione mediante modelli numerici di una porzione del sottosuolo(vedi §4.1.3.1.1 Modelli simbolici a simboli attivi): in genere tali modelli si riducono a schemi che permettano di raccogliere tutte le informazioni idrogeologiche, fisiche e chimiche del bacino necessarie all'esecuzione del modello numerico.

4.1.3.1.1 Modelli simbolici a simboli attivi

Come i modelli a simboli passivi, i modelli a simboli attivi riproducono il sistema tramite simboli, sui quali sia possibile però effettuare una rielaborazione, tramite regole definite. Sono esempi di questa tipologia i modelli matematici, che consentono di elaborare i simboli matematici adottati tramite legami funzionali.

Per quanto concerne la soluzione del problema matematico, i modelli matematici si possono suddividere ulteriormente in modelli *analitici* e *numerici*: i primi permettono di ricavare soluzioni, se queste esistono, esatte; i modelli numerici invece risolvono le equazioni che regolano il problema in questione mediante approssimazioni, consentendo di ottenere soluzioni, non esatte, ma sufficientemente vicine ai valori di queste ultime. La necessità di usare modelli numerici è indotta dall'impossibilità di risolvere analiticamente le equazioni in casi complessi quali quelli che si presentano comunemente nello studio di un sistema reale, quale un bacino geotermico.

Il termine modello numerico è tuttavia più spesso associato all'insieme delle equazioni matematiche discretizzate e dei parametri necessari alla loro risoluzione, definiti in ogni intervallo in cui è stato discretizzato il dominio spazio-temporale.

I modelli numerici debbono contenere una gran mole di dati, se il dominio spazio-temporale viene suddiviso in intervalli piccoli, tuttavia possono essere trattati in maniera automatizzata; tale peculiarità ne permette lo studio tramite algoritmi eseguiti da computer. Ciò consente di avere una riproduzione non solo qualitativa, ma pure quantitativa del sistema reale, in tempi brevi ed a costo contenuto.

4.1.3.2 Utilizzo dei Modelli

I modelli servono per due finalità:

- interpretazione
- simulazione

4.1.3.2.1 Interpretazione

In genere si prestano per questi utilizzi i modelli a simboli attivi matematici, i quali sono utilizzati per ricavare informazioni aggiuntive del sistema, sulla base della risposta del sistema a seguito di una perturbazione. Tramite tali procedimenti si cerca di capire se e quanto il modello utilizzato sia adatto a riprodurre il sistema reale.

Alcune operazioni eseguite sul modello, che hanno come obiettivo l'interpretazione del sistema, sono:

1. *Calibrazione o History Matching o Model Calibration*
2. *Analisi di sensitività o Sensitivity Analysis*
3. *Analisi di propagazione dell'errore*

4.1.3.2.1.1 Calibrazione:

La calibrazione dei parametri, permette di determinare il miglior valore da attribuire all'insieme dei parametri di input di un modello tali che le variabili di output del modello riproducano il più fedelmente possibile i valori misurati sul sistema reale.

Da tale operazione non è escluso che sia possibile determinare combinazioni di parametri tali che inducono la stessa, o una simile, evoluzione delle uscite del modello in fase di simulazione.

4.1.3.2.1.2 Analisi di sensitività:

L'analisi di sensitività è in grado di identificare le variabili di output del modello che sono maggiormente influenzate (sensibili appunto) dai parametri di input. Tale funzionalità è importante per capire quali misure di laboratorio o in situ è meglio affinare.

4.1.3.2.1.3 Analisi di propagazione dell'errore:

L'analisi di propagazione dell'errore consente di studiare l'impatto dell'incertezza di valori di parametri sulle previsioni realizzate da modelli, mediante l'analisi di propagazione lineare degli errori o la simulazione di Monte Carlo. Essa fornisce correlazioni fra parametri ¹⁶

Nella modellazione degli acquiferi, si utilizza l'interpretazione durante le prove di falda, ove analizzando la risposta del modello alle sollecitazioni di pozzi in produzione, si cerca di determinare parametri quali trasmissività e coefficiente d'immagazzinamento.

4.1.3.2.2 Simulazione

Nell'attività di simulazione si utilizza il modello per ottenere informazioni sul comportamento del sistema originario e prevederne l'evoluzione futura, a seguito di differenti sollecitazioni esterne e condizioni iniziali.

L'attendibilità dei risultati di una simulazione dipendono fortemente dall'accuratezza con cui si è

riprodotto il sistema originario, dal numero di dati a disposizione e da caratteristiche del modello stesso: ad esempio, nel caso di modelli discretizzati, dal tipo di griglia adottata.

Non è però possibile ottenere risultati con precisione superiore a quella dei dati in ingresso al modello, a causa della propagazione dell'incertezza e delle numerose assunzioni semplificative adottate: vale infatti il detto “garbage in, garbage out”, ovvero spazzatura entra, spazzatura esce¹⁰.

Prima di fare previsioni tramite simulazioni, è bene eseguire una fase di *calibrazione* del modello, affinché si possano mettere in evidenza difetti del modello stesso e correggerli: solo quando il modello avrà riprodotto con sufficiente precisione il passato del sistema, i risultati sull'evoluzione futura potranno essere ritenuti verosimili.

E' quindi necessario prestare particolare cautela nell'analisi dei risultati forniti da una simulazione, in quanto non si ha mai la certezza sull'affidabilità di questi ultimi.

In seguito useremo il termine *simulatore* per indicare il software che esegue l'attività di simulazione su un modello numerico.

4.1.4 Generalità sulla simulazione di bacini geotermici

La simulazione di bacini geotermici è strettamente correlata a quella dei giacimenti di idrocarburi, che ha avuto inizio a partire dagli anni '50.

La simulazione mediante modelli numerici del sottosuolo si è evoluta velocemente negli ultimi anni, grazie all'impiego di tecniche numeriche sempre più evolute ed alla disponibilità di computer con capacità di calcolo in continua crescita. E' cresciuta inoltre la richiesta di una stima quantitativa dei processi di moto e scambio di calore nel sottosuolo¹¹.

Una buona metodologia nella realizzazione di modelli permette di aumentare l'affidabilità dei risultati delle simulazioni, infatti stabilire in partenza gli obiettivi dell'operazione di modellazione e i possibili risultati, consente un utilizzo più efficace della simulazione¹¹.

È quindi utile rispondere a queste quattro domande prima di intraprendere l'attività di simulazione:

1. Qual'è il problema che il modello deve risolvere?
2. E' la simulazione il metodo più appropriato e semplice per ottenere una risposta al problema?
3. Quanto dev'essere sofisticato il modello per fornire una risposta accettabile?
4. Qual'è l'affidabilità dei dati in ingresso e dei risultati forniti dalla simulazione?

La risposta alle prime tre domande permette di scegliere il tipo di modello da utilizzare (mono, bi, tri-fase, mono o pluri componente, mono ,bi o tridimensionale, ecc...)

La risposta alla quarta domanda consente di anticipare informazioni sull'utilità dei risultati e di effettuare un rapida analisi costi-benefici dell'operazione di simulazione¹¹.

Inoltre benché la simulazione di un bacino geotermico sia spesso richiesta dalle autorità competenti per concedere autorizzazioni allo sfruttamento, è spesso necessario integrare una simulazione numerica con altri strumenti, al fine di ottenere una migliore analisi del sito sul quale si dovrà operare.

Uno schema tipico di progetto di modelli numerici è il seguente:

1. Definizione dell'obiettivo della simulazione: ad esempio nel caso di bacini geotermici può essere la previsione dei valori di pressione e temperatura a seguito di messa in produzione di

- nuovi pozzi.
2. Sviluppo di un modello concettuale/geologico del sistema (geometrie, zonazioni, distribuzione spaziale delle caratteristiche petrofisiche, saturazioni iniziali in fluidi e pressioni iniziali, ecc...)
 3. Individuazione dei parametri termodinamici dei fluidi in giacimento e delle loro variazioni spaziali; definizione delle curve di permeabilità relativa e di pressione capillare.
 4. Scelta delle equazioni che governano i processi e di un software di simulazione. Entrambi devono essere verificati: le equazioni devono descrivere i processi fisici, termodinamici, chimici e biologici che si è stabilito di simulare al punto 1, mentre il codice dev'essere verificato tramite il confronto dei risultati numerici con la soluzione analitica di un problema noto.
 5. *Definizione della griglia* (“mesh”): si definisce la modalità di suddivisione in blocchi del dominio spaziale del sistema. Dev'essere appropriata alla riproduzione del volume occupato dal giacimento, delle condizioni al contorno e di particolari conformazioni del sottosuolo quali faglie o fratturazioni.
 6. *Inizializzazione del modello*: ovvero si assegna ad ogni blocco i valori iniziali dei parametri petrofisici, termodinamici e fluidodinamici relativi alle rocce ed ai fluidi presenti in giacimento. L'insieme della fase 5 e 6 costituiscono il cosiddetto *pre-processamento* o “*pre-processing*”, ovvero la creazione dei dati necessari a processare il modello numerico, che saranno memorizzati in un file di input del simulatore.
 7. *Calibrazione del modello* o *history matching*
 8. *Analisi di sensitività* (o *sensibilità*)
 9. *Previsione* del comportamento del modello in funzione di programmi futuri di coltivazione del giacimento, o uso in “forecast mode”. L'analisi dei risultati è anche chiamata *post-processamento* o “*post-processing*”.
 10. *Correzioni e modifiche* del modello in base ai risultati delle simulazioni.

4.1.4.1 Problematiche correlate all'impiego di modelli numerici per la simulazione di bacini geotermici

Un difetto dell'impiego di modelli numerici nella simulazione di sistemi geotermici è che essi richiedono grandi quantità di dati in ingresso, i quali spesso sono troppo costosi e difficili da ottenere, cosicché spesso si fanno ipotesi semplificative o vengono adottati valori ricavati dalla letteratura, che possono non essere strettamente rappresentativi delle reali proprietà del bacino.

Valori di parametri misurati in situ sono intesi d'altronde come valori medi o complessivi dell'area coinvolta (ad esempio tramite prove di pompaggio, si ricavano trasmissività e coefficiente d'immagazzinamento dell'acquifero), che possono non rispecchiare una particolare situazione locale del giacimento; d'altro canto, valori ottenuti in laboratorio (quali la permeabilità o la porosità) sono invece rappresentativi solo della zona in cui è stato fatto il campionamento di materiale, che può avere caratteristiche molto diverse dalle zone circostanti.

Il tentativo di modellare un sistema, del quale si hanno a disposizione pochi dati risulta ugualmente un'operazione utile, in quanto consente di identificare le aree ove sono necessari un maggior numero di informazioni¹¹, aumentando in tal modo la comprensione del giacimento.

La necessità di avere risultati in tempi ridotti richiede l'uso di computer molto potenti e quindi costosi; nonostante l'adozione dei calcolatori più potenti disponibili sul mercato non si può

Introduzione alla simulazione

aumentare a dismisura il dettaglio delle griglie, così come la precisione di calcolo, tutto ciò a discapito della correttezza dei risultati finali della simulazione.

L'impiego di modelli numerici in campo petrolifero ha evidenziato la necessità e priorità di concentrare gli sforzi sull'individuazione del più probabile modello geologico del giacimento e della sua struttura interna e di suddividere i compiti, all'interno della squadra di simulazione, in funzione delle competenze individuali¹⁰.

La calibrazione del modello, ottenuta mediante la soluzione del così detto *problema inverso*, permette di ottenere un modello *validato*; tale modello non è necessariamente unico: possono infatti esistere diversi modelli (ovvero diverse distribuzioni di parametri) che riproducono la storia passata del giacimento, ma solo uno coincide con quello reale.

Benché la fase di validazione del modello sia obbligatoria, non garantisce che il modello validato sia capace di prevedere correttamente il comportamento futuro del giacimento¹⁰.

Non si può inoltre mai provare che i risultati ottenuti da una simulazione siano corretti¹¹.

L'analisi di sensibilità è eseguita variando, entro un intervallo ragionevole, i valori di un parametro alla volta e confrontando i risultati della serie di simulazioni. Ciò consente di determinare l'influenza dell'incertezza dei parametri, sulla risposta finale della simulazione.

Tale procedimento permette di determinare i valori dei parametri più probabili; gli studi di sensibilità sono la maniera più realistica di impiego dei modelli numerici per la previsione del comportamento dei giacimenti¹⁰.

4.2 Modelli matematici di sistemi geotermici

In questo capitolo illustreremo i modelli utilizzati per la simulazione di sistemi geotermici. Inizialmente daremo spazio alla descrizione dei modelli matematici analitici, per poi illustrare alcuni metodi di risoluzione numerica degli stessi.

Nei bacini geotermici avvengono due processi principali: il moto dei fluidi all'interno del mezzo poroso/fratturato, che costituisce il serbatoio, e lo scambio di calore. Daremo quindi spazio alla descrizione dei modelli dei processi di flusso e di scambio termico che avvengono nel sottosuolo.

4.2.1 Modelli di flusso

Esistono molti modelli di flusso di fluidi nel sottosuolo, che si differenziano per il numero di fasi e di componenti.

Per fase si intende una porzione di materia chimicamente e fisicamente omogenea, delimitata da superfici di separazione ben definite¹². Esempi di fase sono solida (con volume e forma definiti), liquida (con volume definito ma forma dipendente dal recipiente) e gassosa (con forma e volume dipendenti da recipiente e condizioni di pressione e temperatura).

La classificazione in base al numero di fasi porta a distinguere fra:

- flusso monofase
- flusso bifase
- flusso trifase

Nei modelli di flusso monofase i fluidi in moto possono essere in genere acqua, olio o gas. L'olio, benché sia in fase liquida come l'acqua, è considerato come una fase separata, in quanto la quantità di olio miscibile in acqua è molto limitata e ciò fa sì che si formi una fase oleosa liquida, distinguibile dalla fase acquosa liquida.

I modelli di flusso bifase e trifase considerano la compresenza di più fasi, ossia la combinazione di fase acquosa, oleosa e gassosa.

La classificazione in base al numero di specie chimiche porta a distinguere fra:

- flusso monocomponente
- flusso pluricomponente

Ogni molecola è considerata come componente di una fase; il flusso di acqua liquida pura è flusso monocomponente, mentre se in acqua liquida è disciolto un sale, quale NaCl, il flusso è pluricomponente.

Il flusso può essere:

- monodimensionale
- bidimensionale
- tridimensionale

a seconda delle direzioni del flusso che si considerano nel modello.

Nel seguito verrà sinteticamente ricavato il modello di flusso di massa in un mezzo poroso, tratto da

le dispense del corso di laurea “Campionamenti e misure negli acquiferi L”.

In generale il modello di flusso ricavato tramite la combinazione di:

1. equazione di continuità o di bilancio di massa (per tutti i componenti presenti nel fluido)
2. equazione di stato
3. equazione del potenziale
4. legge di Darcy generalizzata

Si ricorda il significato di alcune notazioni, prima di utilizzarle:

$$\vec{v} = [v_x; v_y; v_z]$$

Operatore gradiente.

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}; \frac{\partial}{\partial y}; \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

Gradiente di un vettore:

$$\nabla \vec{v} = \left[\frac{\partial v}{\partial x}; \frac{\partial v}{\partial y}; \frac{\partial v}{\partial z} \right]$$

Divergenza di un vettore:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \text{div}(\vec{v}) = \left[\frac{\partial v_x}{\partial x}; \frac{\partial v_y}{\partial y}; \frac{\partial v_z}{\partial z} \right]$$

4.2.1.1 Equazione di continuità

L'equazione di continuità si ricava dal bilancio di massa in un volume elementare, rappresentato in Figura 17.

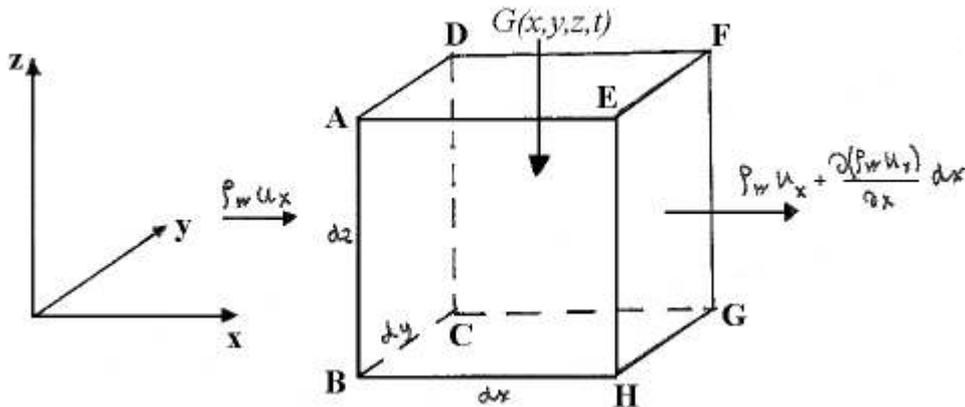


Figura 17: Volume infinitesimo elementare

Si può scrivere il flusso di massa (F) entrante nella faccia ABCD ed uscente in corrispondenza della faccia EFGH del volume elementare, ovvero in corrispondenza dei valori di ascissa x e x+dx, come:

$$F_x = \rho_i \cdot v_{ix} \tag{4.2.1.1.1}$$

$$F_{x+dx} \simeq \rho_i \cdot v_{ix} + \frac{\partial(\rho_i \cdot v_{ix})}{\partial x} dx \tag{4.2.1.1.2}$$

ove F_x è il flusso di massa nella direzione x (Kg/m²s), attraverso le facce ABCD e EFGH di dimensione dydz; “i” è l'indice del fluido del quale si sta eseguendo il bilancio di massa, ρ_i è la

Introduzione alla simulazione

densità del fluido "i"; u_{ix} è la velocità del fluido "i" in direzione x.

Per F_{x+dx} non è stato usato il simbolo di uguale perchè tale espressione deriva dallo sviluppo lineare di Taylor, arrestato agli infinitesimi del primo ordine.

La variazione di massa dm_x di fluido "i", nel tempo dt nella direzione x sarà:

$$dm_x = (F_x - F_{x+dx}) dy dz dt = - \frac{\partial(\rho_i v_{ix})}{\partial x} dx dy dz dt \quad (4.2.1.1.3)$$

Sommando le componenti lungo i tre assi x,y,z si ottiene

$$dm_i = dm_x + dm_y + dm_z = - \left[\frac{\partial(\rho_i v_{ix})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_{iy})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_i v_{iz})}{\partial z} \right] dx dy dz dt \quad (4.2.1.1.4)$$

ove dm_i rappresenta la variazione di massa del componente i nell'intervallo di tempo infinitesimo dt nel parallelepipedo elementare, dovuta al trasporto di massa.

Con S_i si indica la saturazione del componente i, ovvero il rapporto fra volume occupato dal fluido i e volume poroso, mentre con n la porosità.

La massa di "i" contenuta nel volume elementare sarà pari a:

$$m_i = n S_i \rho_i dx dy dz \quad (4.2.1.1.5)$$

e la variazione di massa di i nel volume nell'intervallo di tempo dt sarà:

$$dm_i = \left[\frac{\partial(n S_i \rho_i)}{\partial t} \right] dx dy dz dt \quad (4.2.1.1.6)$$

Dall'uguaglianza fra le due scritte di dm_i , equazioni 4.2.1.1.4 e 4.2.1.1.6, si ottiene l'equazione di bilancio della massa in forma differenziale per il fluido "i":

$$\frac{\partial(\rho_i v_{ix})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_{iy})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_i v_{iz})}{\partial z} = \frac{\partial(n S_i \rho_i)}{\partial t} \quad (4.2.1.1.7)$$

La cui forma compatta è:

$$\nabla(\rho_i v_i) = \frac{\partial(n S_i \rho_i)}{\partial t} \quad (4.2.1.1.8)$$

ove il termine a sinistra dell'uguale rappresenta il termine di trasporto, mentre quello a destra è il termine d'accumulo.

In coordinate cilindriche l'equazione di bilancio della massa prende la forma:

$$\frac{\partial(\rho_i v_{ir})}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_i v_{iz})}{\partial z} = \frac{\partial(n S_i \rho_i)}{\partial t} \quad (4.2.1.1.9)$$

L'equazione di bilancio della massa per tutti i componenti o equazione di bilancio di massa totale si esprime nella forma:

$$\nabla(\rho v) = \frac{\partial(n S \rho)}{\partial t} \quad (4.2.1.1.10)$$

Equazione del potenziale

In tale equazione si esprime l'energia per unità di massa contenuta nel fluido, rispetto alle componenti di pressione e altezza piezometrica:

$$\phi = \int_0^p \frac{dp}{\rho} - g \cdot D \quad (4.2.1.1.11)$$

ove D è la profondità, presa pari a 0 sul piano campagna e crescente colla profondità. p la pressione; Φ ha le dimensione di una energia per unità di massa ($J/Kg \equiv m^2/s^2$).

Legge di Darcy generalizzata

Esprime la velocità di un fluido nell'attraversare un mezzo poroso, con permeabilità intrinseca espressa dal tensore di permeabilità [k] (m^2), quando è sottoposto ad un gradiente di energia potenziale $\nabla \phi$

$$\vec{v} = - \frac{[k] k_r \rho}{\mu} \nabla \phi \quad (4.2.1.1.12)$$

\vec{v} è detta velocità di Darcy e non è la velocità del fluido all'interno del mezzo poroso, la quale è maggiore e si ricava da $\vec{v}_r = \vec{v} / \phi$; [k] è il tensore di permeabilità intrinseca della matrice porosa (m^2), k_r è la permeabilità relativa del fluido, μ viscosità dinamica del fluido (Pa s).

Equazioni di stato o costitutive

Esprimono lo stato di un corpo sotto un dato insieme di condizioni termodinamiche.

Densità e viscosità dinamica del fluido dipendono esclusivamente da pressione e temperatura:

$$\rho = \rho(p, T) \quad (4.2.1.1.13)$$

$$\mu = \mu(p, T) \quad (4.2.1.1.14)$$

Comprimibilità del fluido: esprime la variazione di densità del fluido a seguito di una variazione unitaria di pressione, a temperatura costante.

$$c = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad (4.2.1.1.15)$$

Comprimibilità del volume poroso: esprime la variazione di porosità del mezzo poroso a seguito di una variazione unitaria di pressione, a volume costante

$$c_f = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_v \quad (4.2.1.1.16)$$

Comprimibilità totale

$$c_t = c_f + c \quad (4.2.1.1.17)$$

Combinando l'equazione (4.2.1.1.11) (del potenziale) con l'equazione (4.2.1.1.12) (della legge di Darcy generalizzata), si ottiene l'equazione risolutiva:

$$\vec{v} = -\frac{[k]k_r\rho}{\mu} \nabla(p - gD) = -\frac{[k]k_r}{\mu} (\nabla p - \rho g \nabla D) \quad (4.2.1.1.18)$$

avendo supposto che la densità dipenda solo da pressione e temperatura.

Si può quindi riscrivere l'equazione di bilancio di massa totale, combinando l'(4.2.1.1.18) con l'(4.2.1.1.10), ricavando:

$$\nabla \cdot \left[-\frac{[k]k_r}{\mu} \nabla(p - \rho \cdot gD) \right] = \frac{\partial(nS\rho)}{\partial t} \quad (4.2.1.1.19)$$

Considerando inoltre l'iniezione o l'estrazione di fluido dal sistema (ad esempio operata mediante pozzi), si deve aggiungere il termine \tilde{q}_m , che esprime la portata di massa fluida estratta per unità di volume di roccia:

$$\nabla \cdot \left[-\frac{[k]k_r}{\mu} \nabla(p - \rho \cdot gD) \right] \pm \tilde{q}_m = \frac{\partial(nS\rho)}{\partial t} \quad (4.2.1.1.20)$$

ove il segno positivo di \tilde{q}_m indica che il pozzo inietta massa nel volume elementare, mentre il segno negativo indica estrazione.

Se il flusso è monofase si dovrà considerare :

- $p = p(x,y,z,t)$
- $S = 1$
- $k_r = 1$

Se il flusso è polifase si dovrà considerare :

- $p_\beta = p_\beta(x,y,z,t)$ = pressione misurata nella fase β considerata
- $0 < S_\beta < 1$
- $k_{r,\beta} = k_{r,\beta}(S_\beta)$

L'equazione (4.2.1.1.20) può essere scritta nella forma seguente, per considerare la geometria del serbatoio, del quale si vuole descrivere il flusso di fluidi:

$$\nabla \cdot \left[-\alpha \frac{[k]k_r}{\mu} \nabla (p - \rho \cdot gD) \right] \pm \alpha \tilde{q}_m = \alpha \frac{\partial (nS\rho)}{\partial t} \quad (4.2.1.1.21)$$

Ove α è un coefficiente che esprime le caratteristiche geometriche del serbatoio:

- in geometria monodimensionale $\alpha(x) = A(x) =$ sezione del mezzo poroso
- in geometria bidimensionale $\alpha(x) = h(x,y) =$ spessore del mezzo poroso
- in geometria tridimensionale $\alpha(x) = 1$

L'equazione (4.2.1.1.21) è il *modello matematico* generale per un serbatoio contenente fluidi.

4.2.2 *Modelli di scambio termico*

4.2.2.1 *Bilancio energetico sistemi aperti*

Nel seguito verrà sinteticamente ricavato il modello di flusso di massa in un mezzo poroso, tratto da le dispense del corso di laurea “Campionamenti e misure negli acquiferi L”.

Considerando il volume elementare della Figura 17 come un sistema aperto, si può fare ragionamenti analoghi a quelli fatti per ricavare il modello di flusso, per un modello matematico di scambio di calore.

Il principio di conservazione dell'energia afferma che:

“L'energia scambiata da un volume elementare in un intervallo di tempo Δt , sotto forma di calore e lavoro, sommata all'energia netta trasportata dal fluido transitante nel volume elementare è pari alla variazione totale dell'energia contenuta nel volume elementare nell'intervallo di tempo Δt ”.

L'energia specifica (“e” = energia per unità di massa) del fluido è:

$$e = \frac{v^2}{2} + gz + u$$

ove v è la velocità del fluido, z la quota ed u è l'energia interna (J/Kg).

Si può scrivere il principio di conservazione dell'energia sotto forma di equazione:

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta L + (\Delta m e)_{in} - (\Delta m e)_{out} \quad (4.2.2.1.1)$$

ove ΔE è la variazione totale di energia, ΔQ è la variazione di energia sotto forma di calore, ΔL è la variazione di energia sotto forma di lavoro, mentre gli ultimi due termine esprimono la variazione d'energia del volume elementare dovuta al flusso di fluido.

Il lavoro L ($L > 0$ se compiuto dal volume verso l'ambiente esterno) si può esprimere come composto da due termini, L_p e L_a :

- L_p rappresenta il *lavoro di pulsione*, ovvero il lavoro esercitato dal fluido in corrispondenza delle sezioni di entrata ed uscita del volume elementare, necessario ad iniettare ed espellere il fluido per mantenere il flusso di massa attraverso il volume elementare.
- L_a rappresenta i rimanenti tipi di lavoro possibili, ovvero:
 - lavoro di espansione attraverso le contrazioni e dilatazioni della superficie del volume elementare,
 - lavoro elettrico ed altre forme di lavoro

Introduzione alla simulazione

L_p può essere esplicitato nella forma:

$$Lp = F s = p A s = p V = p m v \quad (4.2.2.1.2)$$

ove $v=1/\rho$ è il volume specifico (m^3/Kg), F è la forza (N), s è lo spostamento compiuto dalla forza (m), p è la pressione (Pa), A è l'area su cui la pressione è esercitata (m^2), V è il volume (m^3), m è la massa (Kg).

Il principio di conservazione dell'energia può essere riscritto come:

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta L_a + (\Delta m e)_{in} - (\Delta m e)_{out} + (\Delta m p v)_{in} - (\Delta m p v)_{out} \quad (4.2.2.1.3)$$

Se lo si scrive tenendo conto delle sole componenti lungo l'asse x si ottiene:

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta L_a + (\Delta m e)_x - (\Delta m e)_{x+\Delta x} + (\Delta m p v)_x - (\Delta m p v)_{x+\Delta x} \quad (4.2.2.1.4)$$

Trascurando L_a ed osservando che

$$\Delta Q_x = (\dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x}) \Delta t \simeq -\frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} \Delta x \Delta t \quad (4.2.2.1.5)$$

$$(\Delta m p v)_x - (\Delta m p v)_{x+\Delta x} \simeq -\frac{\partial}{\partial x} [(\Delta m p v)_x] \Delta x \quad (4.2.2.1.6)$$

$$(\Delta m e)_x - (\Delta m e)_{x+\Delta x} \simeq -\frac{\partial}{\partial x} [(\Delta m e)_x] \Delta x \quad (4.2.2.1.7)$$

si ottiene:

$$\Delta E_x \simeq -\frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} \Delta x \Delta t - \frac{\partial}{\partial x} [\Delta m_x (e + p v)_x] \Delta x = -\frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} \Delta x \Delta t - \frac{\partial}{\partial x} \left[\Delta m_x \left(\frac{v^2}{2} + g z + u + p v \right)_x \right] \Delta x \quad (4.2.2.1.8)$$

ove $h = u + p v$ entalpia specifica del fluido (J/Kg),

$$\Delta E_x \simeq -\frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} \Delta x \Delta t - \frac{\partial}{\partial x} \left[\Delta m_x \left(\frac{v^2}{2} + g z + h \right)_x \right] \Delta x \quad (4.2.2.1.9)$$

Dividendo entrambi i membri della (4.2.2.1.9) per Δt si ottiene,

$$\frac{\Delta E_x}{\Delta t} = -\frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\Delta m_x}{\Delta t} \left(\frac{v^2}{2} + g z + h \right)_x \right] \Delta x \quad (4.2.2.1.10)$$

Introduzione alla simulazione

ove $\Delta m_x/\Delta t = \rho \Delta A u_x$ è la portata in massa, mentre il flusso di calore si può riscrivere introducendo l'equazione di Fourier per la conduzione del calore:

$$\dot{Q}_x = -\lambda_x (\Delta A) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.2.2.1.11)$$

ove $\Delta A = \Delta x \Delta y \Delta z$ è la superficie di scambio termico, λ_x è la *conducibilità termica* del mezzo poroso contenente fluido (W/(m·K)) e T è la temperatura.

$$\frac{\Delta E_x}{\Delta t} = \Delta A \Delta x \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \Delta A \Delta x \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho v_x \left(\frac{v^2}{2} + gz + h \right) \right] = \Delta V \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho v_x \left(\frac{v^2}{2} + gz + h \right) \right] \right\} \quad (4.2.2.1.12)$$

Analizzando il termine $\frac{v^2}{2} + gz + h$ ci si accorge che i primi due termini possono essere trascurati, da cui:

$$\frac{\Delta E_x}{\Delta t \Delta V} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} [\rho v_x h_x] \quad (4.2.2.1.13)$$

Si può poi riscrivere il primo termine così:

$$\frac{E_x}{\Delta V} = \frac{E_x}{\Delta m} \rho = \rho e \quad (4.2.2.1.14)$$

ove e si definisce come energia per unità di massa.

Si ottiene dunque:

$$\frac{\Delta(\rho e)_x}{\Delta t} \simeq \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} [\rho v_x h_x] \quad (4.2.2.1.15)$$

Sommando ora i contributi lungo tutte e tre le direzioni e ricordando che l'entalpia è una funzione scalare, si ricava:

$$\frac{\Delta(\rho e)}{\Delta t} = \frac{\Delta(\rho e)_x}{\Delta t} + \frac{\Delta(\rho e)_y}{\Delta t} + \frac{\Delta(\rho e)_z}{\Delta t} \simeq \nabla \cdot [\vec{\lambda} (\nabla T)] - \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) \quad (4.2.2.1.16)$$

ove $\vec{\lambda}$ è il vettore che ha come componenti la conducibilità termica lungo le tre direzioni.

Se si considera la presenza di una produzione di energia, si può aggiungere il termine H (J/(m³·s)).

Passando poi agli infinitesimi, si ricava l'equazione differenziale dello scambio termico:

$$\frac{\Delta(\rho e)}{\Delta t} = \frac{d(\rho e)}{dt} \quad (4.2.2.1.17)$$

$$\frac{\Delta(\rho e)}{\Delta t} = \nabla \cdot [\vec{\lambda} (\nabla T)] - \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) \pm H \quad (4.2.2.1.18)$$

La stessa relazione può essere scritta in forma integrale :

$$\int_V \frac{\partial Q_V}{\partial t} dV = \int_S \left(\underbrace{\tilde{\lambda} \nabla T}_{\text{diffusione}} - \underbrace{\rho \vec{v} h}_{\text{avvezione}} \right) \vec{n} dS \pm \underbrace{\int_V H dV}_{\text{produzione}} \quad (\text{W}) \quad (4.2.2.1.19)$$

ove \vec{n} è il vettore normale uscente dalla superficie S dell'elemento infinitesimo di volume e Q_V indica il calore per unità di volume (J/m^3).

Applicando il teorema di Gauss al primo termine del secondo membro si ottiene

$$\int_S (\tilde{\lambda} \nabla T - \rho \vec{v} h) \vec{n} dS = \int_V \nabla \cdot (\tilde{\lambda} \nabla T - \rho \vec{v} h) dV \quad (4.2.2.1.20)$$

e quindi

$$\int_V \frac{\partial Q_V}{\partial t} dV = \int_V [\nabla \cdot (\tilde{\lambda} \nabla T - \rho \vec{v} h) \pm H] dV \quad (4.2.2.1.21)$$

4.2.2.2 Bilancio energetico per flusso bifase

Per il flusso bifase, composto da fase vapore e liquida, in un mezzo con porosità Φ , l'equazione di bilancio energetico^{13,14} è:

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1-\phi)\rho_m e_m + \phi(\rho_L S_L e_L + \rho_g S_g e_g)] = \nabla \cdot [\lambda \nabla T - (\rho_L \vec{v}_L h_L + \rho_g \vec{v}_g h_g)] \pm H \quad (4.2.2.2.1)$$

ove ρ_i , e_i , S_i , h_i , v_i sono rispettivamente densità, energia interna, saturazione, entalpia e velocità della fase "i", con i= m (matrice rocciosa), L (liquido), g (gas); H è l'apporto di calore esterno.

Oppure in forma integrale¹⁴:

$$\int_V \left(\frac{\partial}{\partial t} [(1-\phi)\rho_m e_m + \phi(\rho_L S_L e_L + \rho_g S_g e_g)] \right) dV = \int_S ([\lambda \nabla T]) \vec{n} dS - \int_S (\rho_L \vec{v}_L h_L + \rho_g \vec{v}_g h_g) \vec{n} dS \pm H \quad (4.2.2.2.2)$$

4.2.3 Discretizzazione delle equazioni analitiche

Le equazioni alle derivate parziali che descrivono i processi in atto in bacini geotermici sono risolvibili in forma chiusa in pochissimi casi, di scarso interesse pratico, in quanto le ipotesi da imporre sono molto restrittive; inoltre non sono in grado di gestire variazioni spaziali e temporali di parametri, quali permeabilità e saturazioni.

Anche le condizioni al contorno utilizzate per la risoluzione analitica sono in genere semplificate rispetto ad un caso reale.

Per permettere la risoluzione delle equazioni si ricorre dunque alla loro discretizzazione o rilassazione.

La discretizzazione deve essere eseguita sia per il dominio temporale che per quello spaziale: si passa da un modello fisico a grandezze variabili in modo continuo ad un modello numerico a valori delle grandezze concentrati, nei quali cioè i valori di tutte le proprietà (costanti e variabili

dipendenti) sono attribuiti ad un punto per ciascun volume elementare (blocco) in cui il sistema è stato discretizzato ¹⁰.

4.2.3.1 *Discretizzazione del dominio spaziale*

I metodi di discretizzazione del dominio spaziale più diffusi sono:

- metodo delle differenze finite
- metodo degli elementi finiti
- metodo delle differenze finite integrali

Questi metodi non saranno discussi in modo particolareggiato, in quanto tale operazione esula dall'obiettivo di questo lavoro: illustreremo solo brevemente i concetti fondamentali.

Il metodo alle differenze finite richiede una discretizzazione del dominio spaziale in blocchi parallelepipedici: se il dominio è quindi una superficie piana, i blocchi dovranno essere o quadrati o rettangoli o rombi o romboidi, mentre se il dominio è uno spazio a tre dimensioni, dovranno essere parallelepipedi.

Il metodo degli elementi finiti non limita la geometria degli elementi in cui viene suddiviso il dominio, consentendo la definizione di elementi con forme poligonali e prismatiche.

Il metodo delle differenze finite integrali sarà approfondito nel capitolo dedicato al software iTOUGH2 (vedi §5.1.1.2.1 Metodo delle differenze finite integrali).

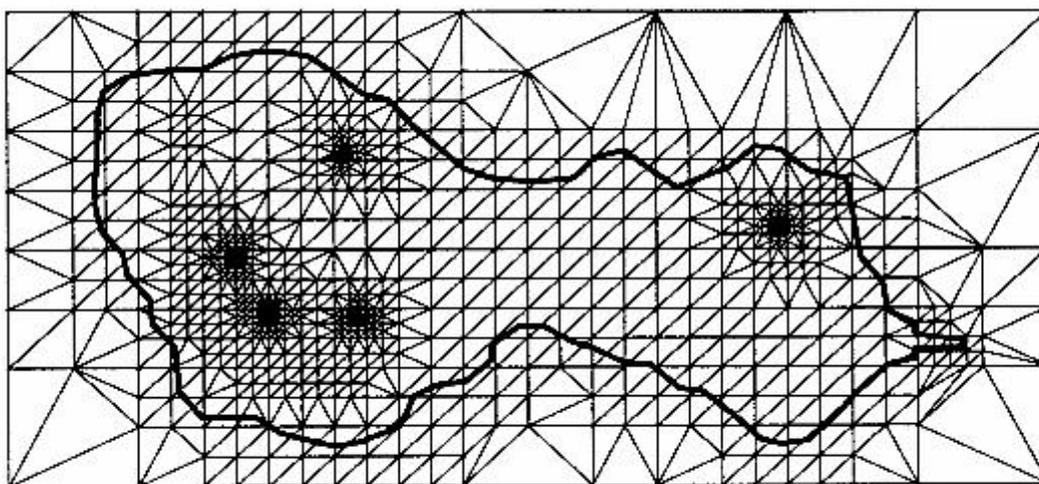


Figura 18: Discretizzazione del dominio spaziale tramite il metodo degli elementi finiti (da <http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/papers/gms/gms.html>)

La scelta del metodo di discretizzazione del dominio è di primaria importanza durante la risoluzione numerica delle equazioni, poiché la quantità di calcoli eseguiti, il tempo impiegato per la simulazione e l'affidabilità dei risultati dipendono dal numero e dalla disposizione spaziale dei blocchi.

Il metodo degli elementi finiti permette di raffinare la discretizzazione in zone del reservoir ove si richiede una descrizione più accurata del flusso. Nell'intorno di un pozzo è bene impiegare maglie più fitte, per descrivere più precisamente gli elevati gradienti locali di pressione e saturazione.

Il metodo delle differenze finite consente il raffittimento della griglia di elementi, ma a costo di estendere a zone in cui non è richiesto un tale dettaglio, rendendo la simulazione inutilmente lenta ed onerosa. Si può notare tale problema in Figura 19, ove il raffittimento non avviene solo in prossimità del centro, ove si voleva aumentare il dettaglio, ma pure nelle zone esterne.

Si nota in Figura 18 come col metodo degli elementi finiti sia possibile aumentare il raffittimento della griglia in zone limitate e di utilizzare invece maggiori dimensioni dei blocchi in zone ove le variazioni spaziali delle proprietà sono piccole.

Il difetto del metodo degli elementi finiti è che presenta sensibili difficoltà nel descrivere il flusso di fluidi ad alta comprimibilità, quali i gas, in prossimità di forti gradienti, come nelle vicinanze dei pozzi ¹⁵.

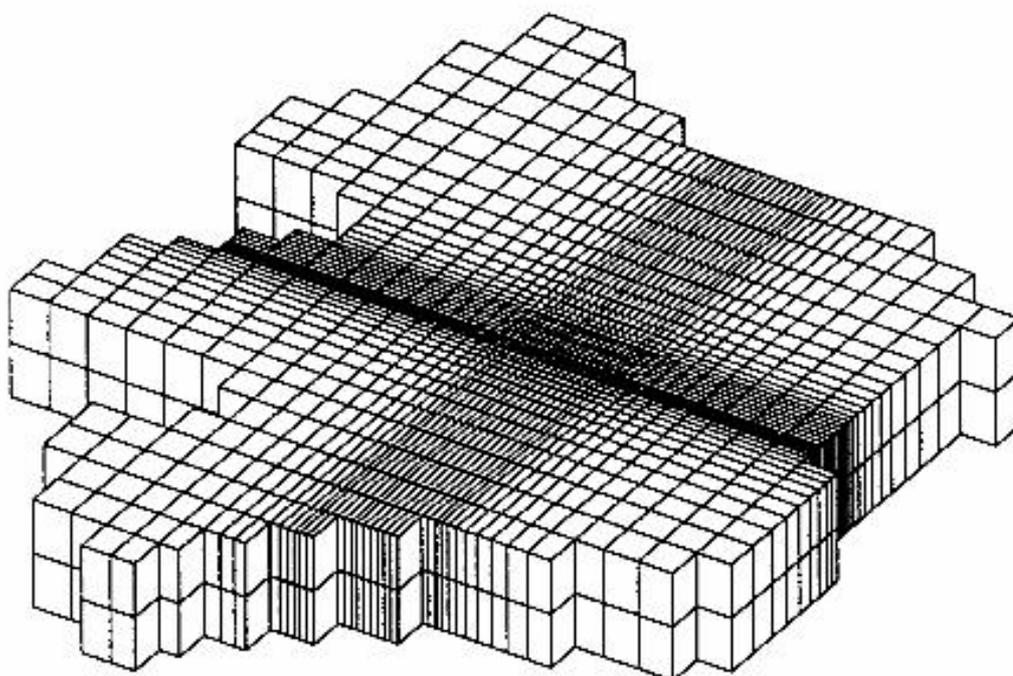


Figura 19: Discretizzazione di un dominio spaziale in tre dimensioni, tramite il metodo delle differenze finite (da <http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/papers/gms/gms.html>)

4.2.3.1.1 Tipo di griglia

Se i valori delle proprietà del reservoir sono assegnati (parametri) o calcolati (variabili) al centro di ogni blocco, la griglia si dice “a blocchi centrati”; se invece le proprietà vengono definite in corrispondenza dei nodi, ovvero degli spigoli dei blocchi, la griglia si dice “centrata sui nodi”, vedi Figura 20.

La griglia a blocchi centrati è particolarmente adatta quando le condizioni al contorno sono di tipo Neumann, ovvero di portate, velocità o flussi di calore prefissati, lungo il contorno del dominio. Quella centrata sui nodi si presta particolarmente quando le condizioni sono di tipo di Dirichlet, ovvero di pressioni o temperature prefissate, lungo il bordo esterno

Poiché nei giacimenti le condizioni al contorno sono prevalentemente di portata prefissata (in

particolare: nulla), la griglia impiegata nei modelli numerici di giacimento è quella a blocchi centrati ¹⁰.

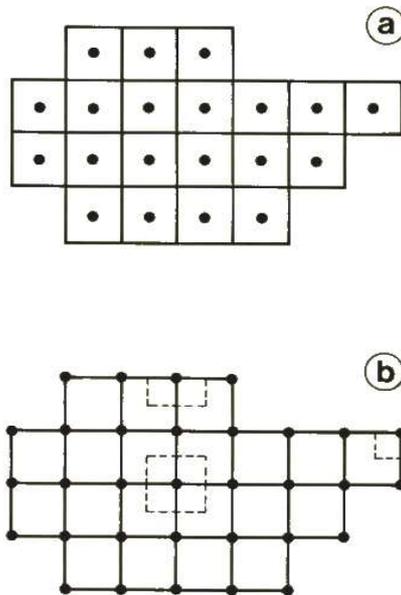


Figura 20: Griglia a blocchi centrati (a) e centrata sui nodi (b)

4.2.4 Discretizzazione del dominio temporale

E' necessario suddividere il dominio temporale in intervalli, detti passi temporali, per risolvere per via numerica le equazioni alle derivate parziali che sono alla base del modello. Come nella discretizzazione spaziale, anche la discretizzazione temporale richiede diversi accorgimenti, che consentono di ridurre i tempi di calcolo della simulazione e limitare gli errori numerici (vedi §4.2.5 Errori numerici).

4.2.5 Errori numerici

L'operazione di calcolo mediante computer richiede di rappresentare i numeri col sistema a virgola mobile, ovvero avendo inevitabilmente a disposizione un numero finito di cifre per la mantissa e per l'esponente da dare alla base. La rappresentazione può essere in *precisione semplice* o a *doppia precisione*.

L'impiego di tale rappresentazione introduce degli errori.

1. Errori di arrotondamento: deriva dall'arrotondamento di numeri, la cui mantissa ha un numero di cifre superiore a quello disponibile in notazione a virgola mobile
2. Cancellazione numerica: deriva da sottrazione di due numeri molto vicini; evitando l'operazione di sottrazione fra i due operandi si elimina l'errore.
3. Errore di troncamento o di discretizzazione: originato dallo scarto fra derivata e differenza

finita; non è eliminabile, ma si può ridurre raffittendo la griglia.

4.2.6 Condizionamento del problema e stabilità dell' algoritmo di calcolo

Per conoscere la bontà di un algoritmo, utilizzato per la risoluzione di un problema numerico, è necessario conoscere la "reazione" dell'algoritmo all'introduzione di perturbazioni nei dati iniziali: occorre in altre parole sapere come gli errori (inevitabili) presenti nei dati, vengono propagati dal problema, in assenza di errori di calcolo e rappresentazioni di numeri.

Tale studio consente di stabilire la massima precisione raggiungibile da un algoritmo.

Se si indica il problema con la funzione f , poiché in generale non avremo i dati iniziali x , ma una loro approssimazione \bar{x} (ad esempio in virgola mobile), la funzione f ci fornirà come risposta $f(\bar{x})$.

Avendo a disposizione i dati \bar{x} , l'obiettivo dell'algoritmo è quindi $f(\bar{x})$ e non $f(x)$.

Per giudicare la bontà di un algoritmo si deve dunque confrontare la risposta fornita dal calcolo, \tilde{y} , con $f(\bar{x})$.

L'algoritmo è stabile se

$$\frac{\|f(\bar{x}) - \tilde{y}\|}{f(\bar{x})} < \epsilon$$

ove ϵ è la precisione di macchina, ovvero la massima precisione di calcolo raggiungibile sul calcolatore.

Il problema si dice *ben condizionato* se ad una perturbazione dei dati x , corrisponde una perturbazione su $f(x)$ dello stesso ordine di grandezza; altrimenti si dice *mal condizionato*. Il condizionamento è una caratteristica intrinseca del problema numerico e non dipende né dagli errori di arrotondamento, né dall'algoritmo scelto per determinare la risposta $f(x)$ ¹⁶.

4.2.7 Rilassazione delle derivate in differenze finite

Per una funzione $f(x)$, di classe C^k , definita su un intervallo (a, b) , ovvero con k -derivate continue nell'intervallo (a, b) , può essere approssimata nell'intorno di x_0 , tramite il teorema di Taylor:

$$f(x_0 + dx) = f(x_0) + f'(x_0) \frac{dx}{1!} + f''(x_0) \frac{dx^2}{2!} + \dots + f^{(k)}(x_0) \frac{dx^k}{k!}$$

ovvero:

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \left(\frac{df}{dx}\right)_{x_0} \frac{\Delta x}{1!} + \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)_{x_0} \frac{\Delta x^2}{2!} + \left(\frac{d^3f}{dx^3}\right)_{x_0} \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots + \left(\frac{d^k f}{dx^k}\right)_{x_0} \frac{\Delta x^k}{k!}$$

$$f(x_0 - \Delta x) = f(x_0) - \left(\frac{df}{dx}\right)_{x_0} \frac{\Delta x}{1!} + \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)_{x_0} \frac{\Delta x^2}{2!} - \left(\frac{d^3f}{dx^3}\right)_{x_0} \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots + (-1)^k \left(\frac{d^k f}{dx^k}\right)_{x_0} \frac{\Delta x^k}{k!}$$

Dalle ultime due relazioni si possono ricavare le approssimazioni alle differenze finite delle derivate prime. Tali approssimazioni possono essere fatte in diversi modi:

Differenza in avanti:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_{x_0} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

Differenza all'indietro:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_{x_0} = \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

Differenza centrata:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_{x_0} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2 \Delta x} + O(\Delta x^2)$$

La formulazione alla “differenza centrata” presenta una migliore approssimazione delle derivate prime, rispetto ai casi “in avanti” e “all'indietro”, benchè richieda di conoscere il valore della funzione sia nell'intorno sinistro che destro del punto x_0 .

Si può anche scrivere la formulazione in differenze finite per la derivata seconda:

$$\left(\frac{d^2 f}{dx^2}\right)_{x_0} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2)$$

Se si suddivide il dominio delle x , preso per comodità monodimensionale, in blocchi, ognuno dei quali denotato da un valore dell'indice “ i ”, si possono scrivere le differenze finite per una funzione f che ha valori in tale dominio:

Differenza in avanti:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x}$$

Differenza all'indietro:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_i = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x}$$

Differenza centrata:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2 \Delta x}$$

Derivata seconda:

$$\left(\frac{d^2 f}{dx^2}\right)_i = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{\Delta x^2}$$

Analogamente si può fare la derivata temporale:

Differenza in avanti:

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_i = \frac{f_i^{n+1} - f_i^n}{\Delta t}$$

nel caso delle derivate temporali è stato suddiviso il tempo in intervalli definiti dall'apice n , quindi

$$f_i^{n+1} = f(x_i, t_{n+1}) \quad .$$

4.2.7.1 Metodi espliciti, impliciti e di Crank-Nicolson

Sarà ora illustrato un esempio di risoluzione numerica di un'equazione alle derivate parziali; in particolare si considera un'equazione parabolica, detta di Fourier:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{k} \frac{\partial u}{\partial t}$$

Supponendo noti i valori di u^n , ovvero i valori di u al tempo n per tutti i blocchi, si desidera conoscere i valori u^{n+1} , ovvero al passo di tempo successivo in ogni blocco.

4.2.7.1.1 Metodo Esplicito

Per prima cosa si trasforma il primo membro, utilizzando le differenze finite per le derivate seconde, considerando i valori di u al tempo n :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{\Delta x^2}$$

Si trasforma il secondo membro:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}$$

ed si ottiene dunque:

$$\frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{\Delta x^2} = \frac{1}{k} \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}$$

L'unica incognita dell'equazione è u_i^{n+1} .

4.2.7.1.2 Metodo Implicito

Si trasforma sempre il primo membro, utilizzando le differenze finite per le derivate seconde, considerando però questa volta i valori di u al tempo $n+1$:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2}$$

Si trasforma il secondo membro:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}$$

si ottiene dunque:

$$\frac{u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} = \frac{1}{k} \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}$$

Si hanno ora 3 incognite: $(u_{i-1}^{n+1}, u_i^{n+1}, u_{i+1}^{n+1})$.

4.2.7.1.3 Metodo di Crank-Nicolson

Con questo metodo si considera una media aritmetica dei valori di u ai tempi $n+1$ ed n :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x^2} \frac{(u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}) + (u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n)}{2}$$

ed ottenendo dunque:

$$\frac{1}{\Delta x^2} \frac{(u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}) + (u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n)}{2} = \frac{1}{k} \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}$$

Si hanno le 3 incognite del metodo esplicito: $(u_{i-1}^{n+1}, u_i^{n+1}, u_{i+1}^{n+1})$.

La presenza di 3 incognite negli ultimi due casi non comporta difficoltà risolutive maggiori, in quanto la determinazione del problema è ottenuta mediante le condizioni iniziali ed al contorno.

L'analisi di stabilità inoltre mostra che il metodo esplicito è stabile solo se $\gamma = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} < \frac{1}{2}$, ovvero vi è un limite superiore agli intervalli di tempo, il quale aumenta fortemente i tempi di simulazione. I metodi implicito e di Crank-Nicolson sono invece incondizionatamente stabili per qualsiasi valore di passo temporale: per tale ragione sono gli unici impiegati per approssimare con differenze finite le derivate di funzioni¹⁰, dipendenti sia dal tempo che da coordinate spaziali.

La metodologia di discretizzazione delle equazioni alle derivate parziali illustrata in questo capitolo viene utilizzata nella risoluzione di casi più complessi, come i modelli di flusso e di scambio di calore per mezzi porosi illustrati in questo capitolo.

Il simulatore di bacini geotermici iTOUGH2 (vedi §5.1 iTOUGH2) non utilizza il metodo delle differenze finite per la discretizzazione spaziale, ma quello delle differenze finite integrali, la cui descrizione è approfondita nel paragrafo 5.1.1.1 Discretizzazione del dominio spazio-temporale.

5 Simulatori per sistemi geotermici

Esistono diversi software adatti alla simulazioni di sistemi geotermici: quali iTOUGH2, Schemat, FeFlow, ecc...

Tra questi è stato scelto iTOUGH2 per la possibilità di effettuare la calibrazione automatica del modello (problema inverso) e la possibilità di modificare e personalizzare il codice sorgente, per l'elevato numero di opzioni di simulazioni che si possono definire ed infine per il suo elevato utilizzo sia in campo industriale che accademico.

5.1 iTOUGH2

Più propriamente iTOUGH2 è un software che fornisce le funzionalità di calibrazione dei parametri del modello al software TOUGH2 (Pruess et al., 1991), inglobandolo al suo interno. TOUGH2 è un software di simulazione numerica per flusso multidimensionale, non isotermico, di fluidi multifase, multicomponente in mezzi porosi e fratturati, di tipo compositivo (si considerano gli scambi di componenti fra fasi, in funzione delle variabili termodinamiche, le quali influenzano le condizioni di equilibrio).

Se l'obiettivo principale dell'utilizzo di iTOUGH2 è la calibrazione di modelli di flusso e scambio di calore nel sottosuolo, per TOUGH2 è la simulazione di sistemi geotermici, per determinarne l'evoluzione futura; si dice che TOUGH2 svolge una *simulazione in avanti*, mentre iTOUGH2 realizza una *simulazione all'indietro*.

iTOUGH2 è stato sviluppato da Stefan Finsterle, mentre TOUGH2 da Karsten Pruess, entrambi del Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), della University of California.

Il codice sorgente di iTOUGH2 è scritto in linguaggio di programmazione FORTRAN77.

Mediante l'utilizzo iTOUGH2 è anche possibile effettuare l'*analisi di sensitività* e l'*analisi di propagazione degli errori* (vedi §4.1.3.2.1 Interpretazione), operazioni che permettono di ricavare informazioni utili per studiare la capacità del modello di riprodurre il sistema reale e analizzare l'incertezza delle previsioni effettuate dal modello ¹⁷.

Lo schema di funzionamento di iTOUGH2 è illustrato in Figura 21.

Simulatori per sistemi geotermici

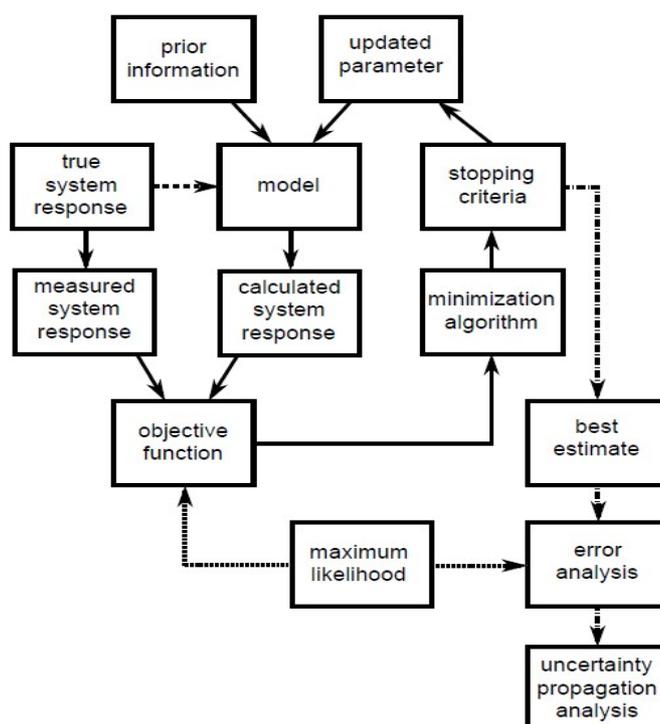


Figura 21: Diagramma di flusso delle operazioni eseguite da iTOUGH2 (da iTOUGH2 User's Guide, Finsterle, 2007)

iTOUGH2 è stato sviluppato in modo da consentirne il funzionamento con PVM, Parallel Virtual Machine, ovvero attraverso un sistema di distribuzione delle operazioni di calcolo su più computer, interconnessi tramite una rete, permettendo la risoluzione di problemi più complessi con costi computazionali e tempistiche ridotte^{18 19}.

L'input di iTOUGH2 dev'essere composto da uno o più file, in formato ASCII, di input di TOUGH2, necessari ad eseguire la simulazione in avanti, e di un file di input specifico di iTOUGH2, anch'esso in formato ASCII, contenente i parametri da stimare ed i dati osservati a partire dai quali effettuare il processo di calibrazione ed altre opzioni.

L'output del modello numerico è invece composto da un file di output standard di TOUGH2 e uno o più file di output di iTOUGH2.

Se l'obiettivo del lavoro non è la calibrazione del modello ma la simulazione, si può fornire ad iTOUGH2 un file di input di TOUGH2 ed un file speciale, "dummy", che permette di saltare le operazioni di calibrazione, analisi di sensibilità ed analisi di propagazione degli errori ed eseguire unicamente la simulazioni in avanti con TOUGH2.

Il codice sorgente di iTOUGH2 è strutturato in moduli, ovvero il codice è suddiviso in parti, in modo tale che i dettagli di ciascuna parte del codice non interferiscano con lo sviluppo del programma nel suo complesso.

Il codice di TOUGH2 rappresenta un modulo all'interno del codice di iTOUGH2; la necessità di interfacciamento tra i due moduli ha reso però necessaria la modifica del codice di TOUGH2, rispetto alla versione che funziona autonomamente.

Le procedure di ottimizzazione necessarie per risolvere il problema inverso in iTOUGH2 interagiscono con TOUGH2 mediante blocchi di memoria, condivisi da entrambi i moduli,

istruzione COMMON del linguaggio Fortran . Tale architettura consente di aggiornare i due moduli quasi indipendentemente¹⁷.

5.1.1 TOUGH2

Come anticipato nel paragrafo precedente, TOUGH2 è un programma di simulazione numerica del flusso multidimensionale di fluidi e calore, per fluidi multifase e miscele multicomponente, in mezzi porosi e fratturati.

Alcuni settori di impiego di tale simulatore sono l'ingegneria di sistemi geotermici, studi di stoccaggio di rifiuti radioattivi, risanamento del sottosuolo, ingegneria degli acquiferi, stoccaggio della CO₂.

Il codice originale è stato rilasciato da Pruess nel 1991 ed è un'evoluzione dei precedenti programmi MULKOM e TOUGH (Pruess, 1987).

TOUGH2 è corredato di programmi satelliti che agevolano le operazioni di pre e post elaborazione, quali ad esempio l'inserimento di dati di input, la creazione facilitata di griglie e la visualizzazione grafica dei risultati.

TOUGH2 risolve le equazioni di bilancio di massa e energia nel sottosuolo (vedi §4.2 Modelli matematici di sistemi geotermici).

Il flusso avvevativo di fluidi è descritto mediante la legge di Darcy estesa al caso polifase ed è in grado di simulare anche il trasporto diffusivo di sostanze.

Il flusso di calore avviene per conduzione e convezione: nella modellazione del trasporto per convezione, sono considerati sia il calore latente (scambio di calore durante il processo isoteramico di cambio di fase di una sostanza) che quello sensibile (scambio di calore durante un processo che prevede la variazione di temperatura di un corpo, del quale non varia però lo stato fisico).

La descrizione delle condizioni termodinamiche si basa sull'ipotesi di equilibrio delle fasi.

I parametri dei fluidi e della matrice porosa possono essere funzioni nonlineari delle variabili termodinamiche primarie, pressione e temperatura.

5.1.1.1 *Discretizzazione del dominio spazio-temporale*

Come descritto nel paragrafo 4.2.3 Discretizzazione delle equazioni analitiche e 4.2.4 Discretizzazione del dominio temporale, la risoluzione delle equazioni analitiche di bilancio richiede la discretizzazione del dominio spazio-temporale continuo.

La discretizzazione dello spazio in TOUGH2 avviene mediante l'adozione del *metodo delle differenze finite integrali* (IFDM) che permette di creare griglie regolari e non, in tre dimensioni: è inoltre possibile implementare metodi di doppia e multipla porosità per rappresentare mezzi fratturati²⁰.

Il metodo delle IFDM quanto consente la creazione di griglie irregolari, con raffittimenti limitati alle zone d'interesse, senza risentire delle difficoltà degli elementi finiti per la descrizione dei fluidi ad alta comprimibilità²¹.

Il tempo è discretizzato con metodi totalmente impliciti, con differenze finite all'indietro, del primo ordine.

La discretizzazione del dominio spazio-temporale genera un sistema di equazioni algebriche fortemente non lineari, che ha come incognite le proprietà termodinamiche primarie in ogni blocco

del dominio spaziale. Le equazioni sono risolte in forma residuale:

$$\{\text{residuo}\} \equiv \{\text{termine sinistro}\} - \{\text{termine destro}\} = 0$$

L'equazione viene risolta mediante iterazioni di Newton-Raphson; i passi temporali sono modificati automaticamente durante la simulazione a seconda della velocità di convergenza del processo iterativo: ciò rende più efficiente la simulazione del flusso multifase, durante la quale i passi di tempo possono variare di vari ordini di grandezza.

La risoluzione di equazioni lineari, che si presentano ad ogni passo temporale, è realizzabile con più metodi, selezionabili dall'utente: alcuni metodi sono i gradienti coniugati ed il metodo di risoluzione diretta delle matrici sparse. I metodi diretti sono più prevedibili ed hanno prestazioni che risentono in misura ridotta dallo specifico problema da risolvere; tuttavia solo i metodi iterativi consentono la soluzione di problemi con griglie molto larghe, ad esempio con più di 10000 blocchi.

5.1.1.2 Bilanci di massa ed energia

Le equazioni di bilancio di massa ed energia, in forma integrale, per ogni componente ed energia, risolte da TOUGH2, hanno formulazione generale identica; tale formulazione è:

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n}_{\text{accumulo}} = \underbrace{\int_{S_n} (\vec{F}^k \cdot \vec{n}) dS_n}_{\text{flusso}} + \underbrace{\int_{V_n} q^k dV_n}_{\text{produzione}} \quad (5.1.1.2.1)$$

ove V_n è il volume del sottodominio spaziale di flusso del sistema analizzato, S_n è la superficie esterna di V_n , n è la normale entrante di S_n , M rappresenta massa o energia per unità di volume (a seconda che il bilancio sia di massa od energia), $k=1\dots NK$ (ove NK è il numero di componenti e nel caso si consideri anche l'equazione del calore, assume il valore $NK+1$), F rappresenta i flussi di calore o massa ($\text{Kg}/(\text{m}^2\text{s})$ o $\text{J}/(\text{m}^2\text{s})$), q rappresenta la portata massica o la potenza termica proveniente da sorgenti o pozzi per unità di volume (Kg/m^3 o J/m^3).

La massa totale del componente k , presente in V_n , si ottiene sommando i contributi di tutte le fasi β :

$$M^k = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^k \quad (5.1.1.2.2)$$

ove β è la fase, S_{β} saturazione della fase β , ρ_{β} densità della fase β , X_{β}^k frazione massica del componente k nella fase β .

Il termine che considera l'accumulo di calore in un sistema multifase è:

$$M^{NK+1} = (1-\phi) \rho_R C_R T + \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} u_{\beta} \quad (5.1.1.2.3)$$

ove T è la temperatura, C_R è il calore specifico della roccia, ρ_R densità dei grani solidi, u_{β} energia interna della fase β .

Il flusso avveztivo di massa è:

$$\vec{F}^k = \sum_{\beta} \vec{F}_{\beta} X_{\beta}^k \quad (5.1.1.2.4)$$

e

$$\vec{F}_\beta = \rho_\beta \vec{v}_\beta = -k \frac{k_{r\beta} \rho_\beta}{\mu_\beta} (\nabla P_\beta - \rho_\beta \vec{g}) \quad (5.1.1.2.5)$$

ove il vettore \vec{v}_β rappresenta la velocità di Darcy, k permeabilità assoluta, $k_{r\beta}$ permeabilità relativa della fase β , μ_β viscosità della fase β e

$$P_\beta = P + P_{c\beta} \quad (5.1.1.2.6)$$

ove P_β è la pressione nella fase β , somma della pressione P di una fase di riferimento e della pressione capillare $P_{c\beta}$, \vec{g} è il vettore accelerazione.

Il flusso di calore conduttivo e convettivo è modellizzato come:

$$\vec{F}^{NK+1} = -[\lambda] \nabla T + \sum_\beta \vec{F}_\beta h_\beta \quad (5.1.1.2.7)$$

ove $[\lambda]$ è il tensore di conduttività termica, h_β è l'entalpia specifica nella fase β .

Il trasporto per diffusione e dispersione è modellizzato come segue:

$$\vec{F}_{DISP}^k = - \sum_\beta \rho_{beta} \vec{D}_\beta^k \nabla X_\beta^k \quad (5.1.1.2.8)$$

ove D^k tensore di dispersione

$$\vec{D}_\beta^k = D_{\beta,T}^k \vec{I} + k \frac{D_{\beta,L} - D_{\beta,T}}{u_\beta^2} \vec{u}_\beta \vec{u}_\beta \quad (5.1.1.2.9)$$

con $D_{\beta,L}$ e $D_{\beta,T}$ coefficienti di dispersione longitudinale e trasversale, \vec{I} vettore identità, u_β vettore velocità della fase β .

5.1.1.2.1 Metodo delle differenze finite integrali

L'equazione (5.1.1.2.1) è discretizzata nello spazio utilizzando le IFDM.

Introducendo le medie volumetriche, il termine d'accumulo risulta

$$\int_{V_n} M dV = V_n M_n \quad (5.1.1.2.1.1)$$

ove M è una quantità estensiva per unità di volume e M_n è il suo valor medio su V_n .
L'integrale di superficie approssimato è

$$\int_{S_n} (\vec{F}^k \cdot \vec{n}) dS = \sum_m A_{nm} F_{nm} \quad (5.1.1.2.1.2)$$

ove F_{nm} è il valor medio della componente di F normale alla superficie A_{nm} , A_{nm} superficie di contatto fra i volumi V_n e V_m , n indice del volume considerato, m indice dei volumi a contatto col volume V_n , come illustrato in Figura 22.

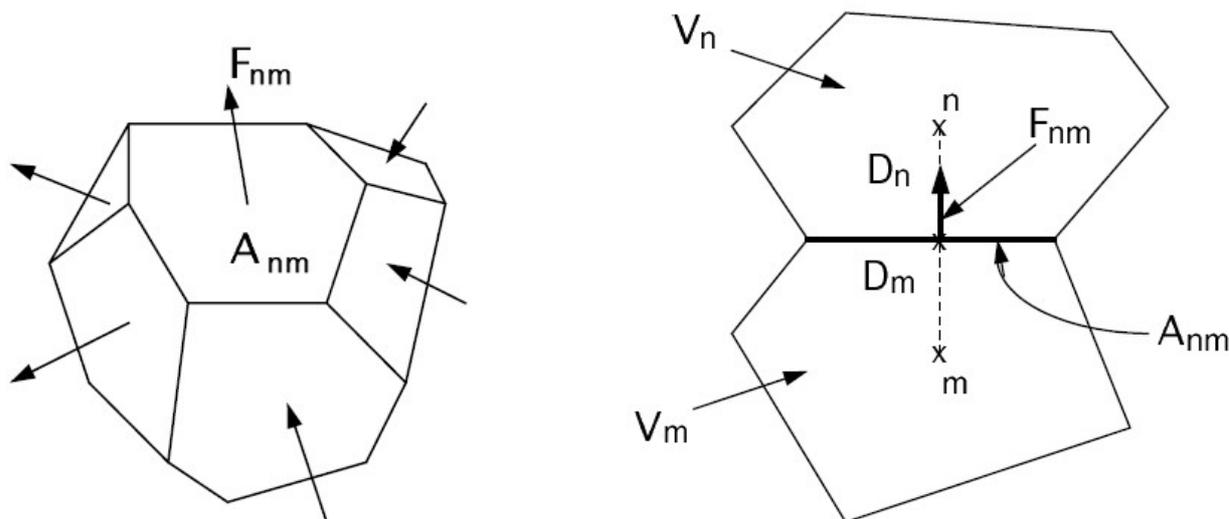


Figura 22: Discretizzazione spaziale e dati geometrici nel metodo delle differenze finite integrali (da TOUGH2 User's Guide, Pruess, 1999)

L'equazione (5.1.1.2.5) viene discretizzata come:

$$F_{\beta, nm} = -k_{nm} \left[\frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \right]_{nm} \left[\frac{P_{\beta, n} - P_{\beta, m}}{D_{nm}} - \rho_{\beta, nm} g_{nm} \right] \quad (5.1.1.2.1.3)$$

ove il pedice nm indica la media del valore sull'interfaccia tra i blocchi n e m , $D_{nm} = D_n + D_m$ distanza fra i punti nodali n e m , g_{nm} componente dell'accelerazione di gravità rispetto al segmento congiungente il nodo m con il nodo n .

Sostituendo l'equazione (5.1.1.2.1.1) e (5.1.1.2.1.2) nell'equazione (5.1.1.2.1) si ottiene :

$$\frac{dM_n^k}{dt} = \frac{1}{V_n} \sum_m A_{nm} F_{nm}^k + q_n^k \quad (5.1.1.2.1.4)$$

Il tempo è discretizzato come differenza finita del primo ordine ed i termini legati a flussi e sorgenti a destra dell'uguale sono valutati al passo temporale $t^{j+1} = t^j + \Delta t$, per ottenere stabilità numerica ed un calcolo efficiente del flusso multifase.

Tale discretizzazione temporale è detta "completamente implicita" poiché i flussi sono espressi in funzione di parametri termodinamici incogniti, al tempo t^{j+1} .

Simulatori per sistemi geotermici

La discretizzazione spazio-temporale genera il sistema di equazioni algebriche non lineari:

$$R_n^{k,j+1} = M_n^{k,j+1} - M_n^{k,j} - \frac{\Delta t}{V_n} \left[\sum_m A_{nm} F_{nm}^{k,j+1} + V_n q_n^{k,j+1} \right] = 0 \quad (5.1.1.2.1.5)$$

ove il termine al primo membro rappresenta il residuo (vedi 5.1.1.1 Discretizzazione del dominio spazio-temporale).

Per ogni blocco V_n avremo NEQ equazioni, che in un sistema discretizzato in NEL blocchi, generano un totale di NEQ*NEL equazioni non lineari, le cui incognite sono le NEL*NEQ variabili primarie al tempo t^{j+1} .

Il metodo di Newton-Raphson implementato su tali equazioni, ove p è l'indice dell'iterazione, dopo lo sviluppo in serie di Taylor, all'iterazione $p+1$, diviene:

$$R_n^{k,j+1}(x_{i,p+1}) = M_n^{k,j+1}(x_{i,p}) + \sum_i \left[\frac{\partial R_n^{k,j+1}}{\partial x_i} \right]_p (x_{i,p+1} - x_{i,p}) + \dots = 0 \quad (5.1.1.2.1.6)$$

Conservando solo i termini superiori al primo ordine si ottiene un sistema di NEL*NEQ equazioni per gli incrementi $(x_{i,p+1} - x_{i,p})$:

$$R_n^{k,j+1}(x_{i,p}) = - \sum_i \left[\frac{\partial R_n^{k,j+1}}{\partial x_i} \right]_p (x_{i,p+1} - x_{i,p}) \quad (5.1.1.2.1.7)$$

Tutti i termini $\partial R_n^{k,j+1} / \partial x_i$ presenti nella matrice Jacobiana sono valutati tramite differenziazione numerica.

L'equazione (5.1.1.2.1.7) è risolta tramite il metodo diretto delle matrici sparse o iterativamente tramite i gradienti coniugati preconditionati.

Le iterazioni si arrestano solo quando i residui raggiungono la seguente condizione di convergenza relativa prestabilita:

$$\left| \frac{R_{n,p+1}^{k,j+1}}{M_{n,p+1}^{k,j+1}} \right| \leq \varepsilon_1 \quad (5.1.1.2.1.8)$$

Se i termini d'accumulo sono inferiori a ε_2 un criterio di convergenza assoluta è imposto:

$$\left| R_{n,p+1}^{k,j+1} \right| \leq \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \quad (5.1.1.2.1.9)$$

ove ε_1 e ε_2 hanno valori di default di 10^{-5} e 1, ma sono modificabili dall'utente.

La convergenza si ottiene generalmente entro 3-4 iterazioni. Se la convergenza non è ottenuta entro un numero prestabilito di iterazioni (8 di default), il passo di tempo viene ridotto e si ricomincia il calcolo iterativo.

Per un sistema di griglie a blocchi regolari l'equazione (5.1.1.2.1.5) è identica alla formulazione ottenuta mediante il metodo alle differenze finite.

5.1.1.3 Struttura di TOUGH2

TOUGH2, così come iTOUGH2 ha una struttura modulare.

Le equazioni di flusso di calore e di fluidi hanno la stessa formulazione matematica, indipendentemente dalla composizione chimica e dal numero di fasi dei componenti in gioco.

La risoluzione delle equazioni di bilancio richiede però la conoscenza della composizione e delle proprietà delle miscele di fluidi.

Tali parametri termofisici, quali densità, viscosità, entalpia, ecc..., sono valutati in funzione delle variabili termodinamiche in moduli denominati EOS (Equation Of State), vedi §5.1.1.6 Moduli EOS.

Grazie alla struttura modulare di TOUGH2, un modulo può essere dedicato al solo assemblaggio delle equazioni di bilancio, valide per qualsiasi composizione di fluidi e distribuzione delle fasi; successivamente tale modulo si interfaccia al modulo EOS specifico del problema in questione, per inserire i parametri termofisici nelle equazioni di bilancio.

Tale architettura conferisce a TOUGH2 l'abilità di gestire un'ampia varietà di situazioni, quali sistemi multicomponenti e polifase.

In Figura 23 è illustrato il diagramma di flusso della struttura di TOUGH2.

Il codice di TOUGH2 è strutturato sulla base di due array principali che contengono rispettivamente:

- le variabili termodinamiche primarie per tutti i blocchi,
- i parametri termofisici secondari necessari ad assemblare le equazioni di flusso a scambio di calore.

Tali array sono monodimensionali e contengono i dati di tutti i blocchi della griglia, in sequenza.

Ogni array contenente informazioni distribuite spazialmente è contenuto in blocchi COMMON: tale struttura è conveniente per l'adeguamento della dimensione degli array alle diverse dimensioni dei problemi, ovvero alla dimensione della griglia.

Simulatori per sistemi geotermici

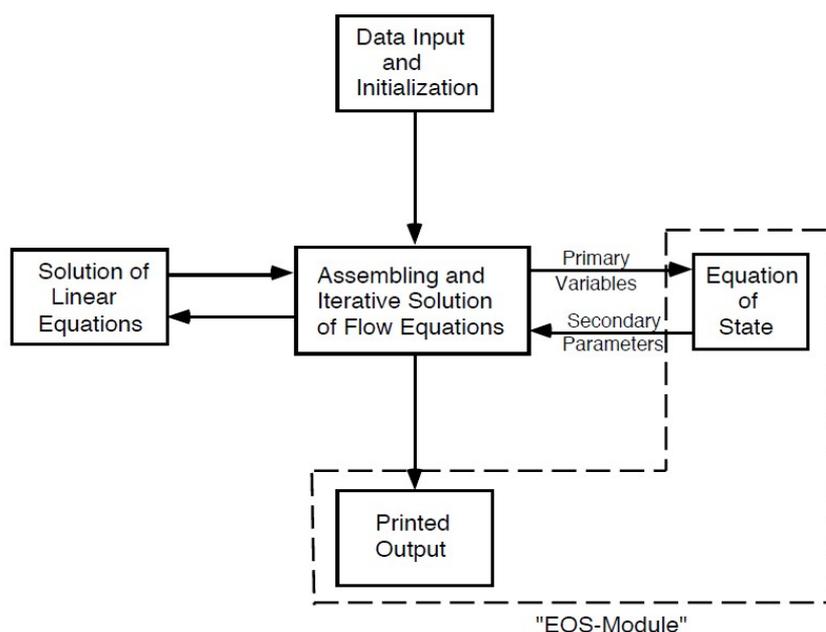


Figura 23: Architettura in moduli di TOUGH2 (da TOUGH2 User's Guide, Pruess, 1999)

Le subroutine principali del codice di TOUGH2 sono illustrate in Figura 24.

subroutine(s)	function
TOUGH2 (main program)	executive routine; define problem-size dependent arrays, generate internal documentation
INPUT, RFILE (and satellite routines, including MESHMaker)	problem initialization
CYCIT	executive routine for time stepping
EOS (and satellites)	thermophysical properties and phase diagnostics
MULTI (and satellites)	assembly of mass and energy balance equations
QU (and satellites)	sink and source terms
LINEQ (and satellites)	solution of linear equations, provisional updating of thermodynamic variables
CONVER	conclusion of converged time steps, updating of thermodynamic variables and iteration counters
WRIFI, OUT, BALLA	output of results

Figura 24: Subroutine principali di TOUGH2 (da TOUGH2 User's Guide, Pruess, 1999)

L'inizializzazione della simulazione avviene tramite le subroutine INPUT e RFILE, che definiscono i dati di input del modello; la sequenza iterativa per il controllo del passo di tempo è gestita dalla subroutine CYCIT.

Al primo passo, tutte le proprietà termofisiche sono inizializzate dalla subroutine EOS e vengono definiti i contatori dei time step (KCYC), delle iterazioni (ITER) e l'indicatore di convergenza (KON).

Il contatore di iterazioni viene incrementato di un'unità e la subroutine MULTI assembla i termini di accumulo e flusso, nelle equazioni di bilancio energetico e di massa: se vi sono sorgenti o pozzi, MULTI chiama la subroutine QU, la quale può richiamare diverse subroutine satelliti, per eseguire funzioni quali il calcolo della composizione dei fluidi prodotti, interpolare tabelle o ottenere correzioni, per le pressioni di pozzi in produzione.

In MULTI avviene anche il calcolo dei residui, l'identificazione dell'indice degli elementi (NER) e delle equazioni (KER) per i residui maggiori e la verifica della convergenza.

Se la convergenza è raggiunta (KON=2), viene richiamata la subroutine CONVER, che aggiorna i valori delle variabili primarie; in caso contrario, viene chiamata LINEQ, che stabilisce quale risolutore di equazioni lineari adottare, in base alla scelta dell'utente.

In funzione del valore di KON, il programma procede alla iterazione successiva (KON=1) od al passo di tempo successivo (KON=2).

La stampa dell'output è effettuata dalle subroutine OUT e BALLA.

Se qualche operazione fallisce (il calcolo dei parametri termofisici, la risoluzione delle equazioni lineari, la convergenza non avviene entro un numero predefinito di iterazioni), queste vengono ripetute riducendo il passo temporale.

L'esecuzione termina quando uno dei criteri di arresto (o massimo numero di passi temporali o tempo finale di simulazione) è raggiunto.

Nei casi di raggiungimento dello stato stazionario o scelta di passi di tempo troppo piccola, le soluzioni delle equazioni raggiungono la convergenza già alla prima iterazione (ITER=1): ciò accade perchè i criteri di convergenza sono verificati senza dover richiedere l'aggiornamento delle variabili termodinamiche primarie. TOUGH2 riconosce tale situazione e se la condizione di ITER=1 si ripete per dieci passi di tempo consecutivi, si assume di aver raggiunto lo stato stazionario e TOUGH2 viene terminato.

Un altro criterio di arresto è utilizzato quando il controllo automatico dei passi di tempo è attivato; in questo caso l'esecuzione viene terminata quando la convergenza fallisce, dopo che per due passi di tempo consecutivi si era presentata la condizione di ITER=1. Ciò è motivato dal fatto che quando ci si avvicina allo stato stazionario, la velocità di variazione delle variabili termodinamiche primarie è bassa, provocando l'incremento dei passi di tempo a valori molto alti, a causa del controllo automatico dei passi temporali. Gli elementi non diagonali della matrice Jacobiana sono proporzionali alla durata dei passi temporali e possono divenire talmente grandi da non permettere più la convergenza nella soluzione delle equazioni lineari, a causa dell'arrotondamento numerico.

Quindi nonostante sia raggiunta la convergenza senza dover richiedere la risoluzione di alcun sistema lineare, la problematica di non raggiungere la convergenza si presenta quando è richiesta la soluzione di un'equazione lineare.

Dettagli aggiuntivi sulle subroutine saranno forniti nel paragrafo *Errore: sorgente del riferimento non trovata* *Errore: sorgente del riferimento non trovata*.

5.1.1.4 Variabili termodinamiche primarie

TOUGH2 assume che localmente tutte le fasi siano in equilibrio termodinamico.

Si consideri ora il numero di variabili termodinamiche necessarie per determinare univocamente lo stato termodinamico di un sistema composto da NK componenti, distribuite in NPH fasi all'equilibrio.

Il numero di gradi di libertà (ν) di un sistema all'equilibrio termodinamico si può determinare mediante la legge di Gibb's:

$$\nu = NK + 2 - NPH$$

Altri $(NPH - 1)$ gradi di libertà sono forniti dalle saturazioni, sapendo che

$$\sum_{\beta=1}^{NPH} S_{\beta} = 1$$

Il numero totale di gradi di libertà è dunque:

$$NKL = \nu + (NPH - 1) = NK + 2 - NPH + (NPH - 1) = NK + 1$$

ed è pari al numero di equazioni di bilancio di massa per ogni blocco: NK bilanci di massa di componenti più un bilancio di massa totale.

Lo stato termodinamico di un sistema discretizzato in NEL blocchi, o elementi, è completamente determinato da un sistema di $NEL \cdot NKL$ variabili termodinamiche, al quale deve corrispondere un egual numero di bilanci di massa ed energia.

In sistemi non in equilibrio, queste variabili termodinamiche primarie dipendono dal tempo e rappresentano l'incognita da determinare.

5.1.1.4.1 Scelta delle variabili termodinamiche primarie

Nella modellazione di processi di flusso di calore e fluidi con cambio di fase, la scelta delle variabili primarie che definiscono lo stato termodinamico è essenziale.

In caso di flusso monocomponente e monofase ($\nu = 2$), di acqua liquida o vapore, le variabili termodinamiche più adeguate alla descrizione del problema sono pressione e temperatura.

Quando invece il sistema è bifase, temperatura e pressione sono legate dalla pressione di vapore $P = P_{\text{sat}}(T)$.

Si può quindi operare due modalità operative:

- Si adottano come variabili primarie delle grandezze indipendenti in caso di cambio di fase, quali pressione e entalpia oppure densità ed energia interna, così che possano essere utilizzate sia in caso di sistema monofase che bifase; tale approccio ha il difetto che spesso le correlazioni fra parametri sono espresse in funzione di pressione e temperatura, comportando la soluzione di equazioni implicite o la diminuzione di accuratezza delle soluzioni.
- Si adottano pressione e temperatura quali variabili primarie in caso di sistema monofase per poi adottare pressione e saturazione quali variabili primarie per la descrizione del sistema bifase; tale metodo sembra più stabile nella descrizione dei sistemi bifase monocomponente ed è quello adottato in TOUGH2.

La scelta delle variabili primarie adottate varia a seconda del modulo EOS utilizzato.

5.1.1.5 *Input*

I dati necessari a caratterizzare il modello numerico comprendono:

1. definizione della griglia,
2. parametri idrogeologici (es. presenza di fratture)
3. relazioni costitutive dei mezzi porosi (permeabilità assoluta e relativa, porosità, pressione capillare, ecc...),
4. proprietà termofisiche dei fluidi (generalmente fornite all'interno di TOUGH2),
5. sorgenti e pozzi,

Simulatori per sistemi geotermici

6. condizioni iniziali ed al contorno,
7. parametri computazionali,
8. informazioni sui passi temporali.

I dati di input possono essere forniti a TOUGH2 mediante uno o più file in formato ASCII, di massimo 80 caratteri per riga.

Il formato del file di input di TOUGH2 è a campo fisso ed impiega unità di misura del sistema internazionale (SI) MKS (Metri, Kilogrammi, Secondi e loro derivati, quali Pascal, Joule, Newton, ecc.).

Nel file di input i dati sono organizzati in blocchi di righe, definiti da parole chiave o keywords di 5 caratteri ciascuna.

Keyword	Function
TITLE (first record)	one data record (single line) with a title for the simulation problem
MESHM	optional; parameters for internal grid generation through MESHMaker
ROCKS	hydrogeologic parameters for various reservoir domains
MULTI	optional; specifies number of fluid components and balance equations per grid block; applicable only for certain fluid property (EOS) modules
SELEC	used with certain EOS-modules to supply thermophysical property data
START	optional; one data record for more flexible initialization
PARAM	computational parameters; time stepping and convergence parameters; program options
DIFFU	diffusivities of mass components
FOFT	optional; specifies grid blocks for which time series data are desired
COFT	optional; specifies connections for which time series data are desired
GOFT	optional; specifies sinks/sources for which time series data are desired
RPCAP	optional; parameters for relative permeability and capillary pressure functions
TIMES	optional; specification of times for generating printout
*ELEM	list of grid blocks (volume elements)
*CONNE	list of flow connections between grid blocks
*GENER	optional; list of mass or heat sinks and sources
INDOM	optional; list of initial conditions for specific reservoir domains
*INCON	optional; list of initial conditions for specific grid blocks
NOVER (optional)	optional; if present, suppresses printout of version numbers and dates of the program units executed in a TOUGH2 run
ENDCY (last record)	one record to close the TOUGH2 input file and initiate the simulation
ENDFI	alternative to "ENDCY" for closing a TOUGH2 input file; will cause flow simulation to be skipped; useful if only mesh generation is desired

Figura 25: Keywords del file di input e loro funzioni (da TOUGH2 User's Guide, Pruess, 1999)

La prima riga del file di input dev'essere un titolo, l'ultima dev'essere ENDCY oppure ENDFI, nel caso non venga eseguita la simulazione ma ci si limiti alla sola realizzazione della griglia.

Blocchi di dati quali ROCKS, ELEM, CONNE e GENER hanno un numero variabile di righe ed il

Simulatori per sistemi geotermici

termine delle righe associate a tali keyword è indicato tramite una riga vuota.

I blocchi di dati possono essere forniti in ordine arbitrario, escluso ELEME, che, se presente, deve precedere CONNE.

L'assegnazione delle condizioni iniziali avviene tramite la keyword INCON se ciò è fatto per ogni blocco, oppure tramite la keyword INDOM se dipende dal tipo di roccia definito in ROCKS, oppure viene assegnato tramite condizioni prestabilite nella keyword PARAM.

Alcuni dati di input possono essere forniti tramite file esterni:

1. file di nome "MESH": informazioni sulla griglia,
2. file di nome "GENER": informazioni su pozzi e sorgenti,
3. file di nome "INCON": informazioni su condizioni iniziali.

TOUGH2 è in grado di creare griglie tridimensionali regolari cartesiane oppure cilindriche, tramite un modulo chiamato MESHMaker.

Grazie all'adozione del metodo delle IFDM, TOUGH2 può gestire griglie irregolari.

Le informazioni per la creazione della griglia sono definite dalla keyword MESHM oppure devono essere fornite tramite il file esterno MESH.

In Figura 26 e Figura 27 sono riportati gli schemi per la redazione del file di input nel formato corretto.

Simulatori per sistemi geotermici

TOUGH2 INPUT FORMATS												
TITLE												
ROCKS												
MAT	NAD	DROK		POR	PER (1)	PER (2)	PER (3)	CWET	SPHT			
COM		EXPAN		CDRY	TORTX	GK	XKD3	XKD4				
IRP		RP (1)	RP (2)	RP (3)	RP (4)	RP (5)	RP (6)	RP (7)				
ICP		CP (1)	CP (2)	CP (3)	CP (4)	CP (5)	CP (6)	CP (7)				
MULTI (optional)												
NK	NEQ	NPH	NB	NIKIN								
START (optional)												
MOP: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4												
PARAM												
NOTE		MCYC	ASEC	MCYPR	MOP (i), i=1,24			TEXP	BE			
METATA		TSTART	TIMAX	DELTEN or NDLT		DELTMX	ELST	GF	REDLT	SCALE		
		DLT (1)		DLT (2)		DLT (3)		DLT (4)		(MSB*NDLT)		
		RE1	RE2	U	WUP	WNR	DEAC					
		DEP (1)		DEP (2)		DEP (3)		DEP (4)				
SOLVR (optional)												
MATSEV		RITMAX		CLOSUR								
ZPROCS												
CPROCS												
RPCAP (optional)												
IRP		RP (1)	RP (2)	RP (3)	RP (4)	RP (5)	RP (6)	RP (7)				
ICP		CP (1)	CP (2)	CP (3)	CP (4)	CP (5)	CP (6)	CP (7)				
ELEME												
EL	NE	NSEQ	NADD	MATMAX	VOLX	AHTX	PAX	X	Y	Z		
CONNE												
EL1	NE1	EL2	NE2	NSEQ	NAD1	NAD2	ISOT	D1	D2	AREAX	BETAX	SIGX
GENER												
EL	NE	SL	NS	NSEQ	NADD	NADS	LTAB	TYPE	GX	EX	HX	
F1 (1)		F1 (2)		F1 (LTAB)								
F2 (1)		F2 (2)		F2 (LTAB)								
F3 (1)		F3 (2)		F3 (LTAB)								
INCON												
EL	NE	NSEQ	NADD	PORX								
V1			V2			V3			V4			

Figura 26: Schema del file di input di TOUGH2, 1/2 (da TOUGH2 User's Guide, Pruess, 1999)

Simulatori per sistemi geotermici

TOUGH2 INPUT FORMATS (continued)															
INDOM <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
MAT															
X1				X2				X3				X4			
DI FFU <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
FDDIAG(I,1), I=1, NPH															
FDDIAG(I,2), I=1, NPH															
S ELEC <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
IE(1)	IE(2)	IE(3)	IE(4)	IE(5)	IE(6)	IE(7)	IE(8)	IE(9)	IE(10)	IE(11)	IE(12)	IE(13)	IE(14)	IE(15)	IE(16)
FE(1)	FE(2)	FE(3)	FE(4)	FE(5)	FE(6)	FE(7)	FE(8)								
FE(9)	FE(10)	FE(11)	FE(12)	FE(13)	FE(14)	FE(15)	FE(16)								
FE(17)															FE(8*IE(1))
T IMES <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
ITI	ITE	DELAF	TINTER												
TIS (1)	TIS (2)	TIS (3)								TIS (ITI)					
MESH M <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
FOFT <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
EOFT															
COFT <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
ECOFT															
GOFT <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
EGOFT															
NOVER <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
END F I <small>optional</small> 1 2 3 4 5 6 7 8															
ENDCY 1 2 3 4 5 6 7 8															

Figura 27: Schema del file di input di TOUGH2, 2/2 (da TOUGH2 User's Guide, Pruess, 1999)

Maggiori informazioni sulla redazione del file di input si possono trovare sul manuale di TOUGH2²⁰.

5.1.1.6 Moduli EOS

I moduli EOS calcolano sulla base delle variabili termodinamiche le proprietà termofisiche delle miscele di fluidi necessarie ad assemblare le equazioni di bilancio d'energia e massa. Inoltre le EOS gestiscono, in funzione delle condizioni termodinamiche, la scomparsa o la formazioni delle fasi.

Le proprietà delle miscele raccolte nei vari EOS sono qui riassunte:

1. EOS1: acqua mono e bifase;
2. EOS2: acqua e CO₂,
3. EOS3: acqua e aria,
4. EOS4: acqua e aria, con abbassamento della pressione di vapore, per capillarità ed

- adsorbimento,
5. EOS5: acqua e idrogeno,
 6. EOS7: acqua, acqua salata e aria,
 7. EOS7R: acqua, acqua salata, “radionuclide padre”, “radionuclide figlio” e aria,
 8. EOS8: acqua, olio e aria,
 9. EOS9: acqua in acquifero saturo e insaturo,
 10. EWASG: acqua, NaCl, gas non condensabili,
 - 11.

In questo testo sarà descritto solo il modulo EOS1, utilizzato nella realizzazione di un caso pratico, rimandando al manuale di TOUGH2²⁰ per l'esegesi degli altri moduli.

5.1.1.6.1 EOS1 (acqua e acqua tracciante)

E' il modulo più semplice e descrive acqua pura, allo stato liquido o vapore o bifase.

Tutte le proprietà (densità, entalpia specifica, viscosità, pressione di vapore) sono calcolate mediante le equazioni fornite da International Formulation Committee (1967).

Variazioni di pressione di vapore per capillarità ed assorbimento sono trascurati.

Con EOS1 è possibile simulare il trasporto di traccianti, tramite la definizione di un secondo componente fittizio, chiamato acqua tracciante; con tale opzione si può ad esempio osservare il comportamento dell'acqua iniettata in un sistema geotermico tramite pozzi. Tale opzione si ottiene specificando (NK, NEQ,

NPH, NB) = (2, 3, 2, 6) nel blocco MULTI; se si vuole considerare il trasporto per diffusione dell'acqua tracciante, bisogna specificare (NK, NEQ, NPH, NB) = (2, 3, 2, 8).

Le variabili primarie sono pressione e temperatura per sistemi monofase, mentre sono pressione e saturazione gas per sistemi bifase.

La determinazione del numero di fasi, realizzata nel modulo EOS1, verrà ora spiegata.

Ogni blocco viene inizializzato con 2 variabili primarie (X1, X2); X1 è la pressione, mentre il significato di X2 dipende dal valore numerico: se >1.5 è la temperatura, altrimenti è la saturazione in fase gas (i valori di saturazione variano da 0 a 1, ma è necessario ampliarne il dominio per la corretta esecuzione delle iterazioni Newton-Raphson).

Se X2 è la temperatura, ciò significa che il sistema è monofase gas; in caso contrario se $P > P_{sat}(T)$, il sistema sarà monofase liquido.

Durante l'inizializzazione la condizione delle fasi è basata sul valore di Sg definito nell'array PAR.

Il cambiamento di fase è descritto, in caso monofase, dal confronto della pressione attuale del fluido con la pressione di vapore: affinché la fase vapore non condensi è richiesto che $P < P_{sat}$, altrimenti al prossimo passo temporale, $P = P_{sat}(T)$ e $S_g = 0.999999$.

Nel passaggio di fase, fra una iterazione e la successiva viene conservata la temperatura piuttosto che la pressione, poiché nella maggior parte dei problemi la temperatura ha una velocità di variazione più lenta rispetto alla pressione.

5.1.1.7 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno, assegnate sul bordo del dominio spaziale, possono essere di due tipi:

- Neumann, quando è fissato il flusso di fluidi o calore,
- Dirichlet, quando è fissato il valore di variabili (pressione, temperatura,,ecc..).

Le condizioni di Neumann sono assegnate inserendo nei blocchi più esterni una sorgente/pozzo. Le condizioni di Dirichlet sono implementate assegnando valori molto alti di volume ai blocchi più esterni, esempio $V = 10^{50} \text{ m}^3$, che equivale ad imporre che le condizioni termodinamiche non subiscano modifiche a seguito di flussi di massa o calore.

5.1.1.8 *Sorgenti e pozzi*

Informazioni dettagliate saranno fornite ai paragrafi 6.2.3 Opzione DELV o Deliverability Model e 6.2.4 Opzione f-type e accoppiamento esterno.

5.1.1.9 *Output*

TOUGH2 crea un file di testo di output al termine della simulazione, con lo stesso nome del file di input ed estensione “.out” assieme a diversi altri file.

In tale file vengono stampati i parametri di simulazione, come specificati nella keyword PARAM e l'EOS utilizzato; ogni modulo EOS ha il proprio formato di stampa del file di output.

E' possibile richiedere la stampa di informazioni sulle iterazioni ed i passi di tempo.

In generale il file di output riporta una serie di parametri e variabili termodinamiche, elemento per elemento, in funzione del tempo.

Per ulteriori informazioni si rimanda al manuale di TOUGH2 ²⁰.

5.2 Simulatori di pozzo

I simulatori di pozzo sono programmi che riproducono il comportamento all'interno dei pozzi dei fluidi emunti od iniettati: in particolare calcolano le cadute di pressione lungo il pozzo, le portate emunte, la composizione dei fluidi a testapozzo e la loro temperatura, in base ai parametri costruttivi del pozzo e di emungimento.

Dettagli ulteriori relativi alle procedure di calcolo eseguite dai software saranno forniti al paragrafo 5.2.1.4 (Risoluzione numerica delle equazioni di flusso bifase in pozzo).

Esistono diversi simulatori di pozzo in commercio. Quelli considerati in questo lavoro sono HOLA (Bjornsson, 1987), GWELL (Aunzo, 1999) e GWNACL, sviluppati dal Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL).

HOLA è un simulatore di pozzi geotermici inclinati, con flusso monofase o bifase di acqua e vapore, in grado di simulare le operazioni sia d'emungimento che d'iniezione, su più strati produttivi.

GWELL e GWNACL sono versioni modificate di HOLA, ai quali è stata aggiunta la possibilità di simulare produzione e iniezione, rispettivamente, di acqua ed anidride carbonica e acqua e NaCl.

In questo lavoro viene trattato principalmente il software HOLA, in quanto non è considerata la presenza di CO₂ o NaCl nel reservoir simulato.

5.2.1 Modelli di flusso in pozzo

Si illustrano ora le equazioni che governano il flusso di fluidi all'interno di pozzi, utilizzate da HOLA, GWELL e GWNACL.

In bacini geotermici, come nei pozzi, il flusso è generalmente bifase, con una fase liquida composta da acqua (che può contenere sali e CO₂) ed una fase gassosa composta da vapore e CO₂.

Per descrivere matematicamente il flusso di fluidi in pozzi, si sfruttano tre equazioni di bilancio:

- bilancio di massa
- bilancio d'energia
- bilancio della quantità di moto

Questi bilanci hanno espressioni differenti a seconda che si consideri le parti di pozzo finestate, ove avviene scambio di materia fra pozzo e reservoir, e la parte non finestrata, ove non vi è scambio di materia.

5.2.1.1 Flusso in porzione di pozzo non finestrata

5.2.1.1.1 Bilancio di massa

Ove il pozzo non è finestrato non vi è variazione di portata massica lungo il pozzo, quindi:

$$\frac{d \dot{m}_i}{dL} = 0 \quad (5.2.1.1.1)$$

ove i rappresenta un componente o la massa totale, \dot{m} è la portata massica, L è la profondità

lungo il pozzo.

5.2.1.1.2 Bilancio della quantità di moto

Il gradiente di pressione totale si può scomporre in tre componenti:

- frizione
- accelerazione
- potenziale

$$\left[\frac{dP}{dL} \right]_{TOT} - \left[\frac{dP}{dL} \right]_{FRIZ} - \left[\frac{dP}{dL} \right]_{ACC} - \left[\frac{dP}{dL} \right]_{POT} = 0 \quad (5.2.1.1.2.1)$$

ove

$$\begin{aligned} \left[\frac{dP}{dL} \right]_{FRIZ} &= \phi_{FLO}^2 \left[\frac{dP}{dL} \right]_{LO} \\ \left[\frac{dP}{dL} \right]_{ACC} &= \frac{d(Fv_m)}{dL} \\ \left[\frac{dP}{dL} \right]_{POT} &= \rho g \sin \theta \end{aligned} \quad (5.2.1.1.2.2)$$

$\left[\frac{dP}{dL} \right]_{LO}$ è la caduta di pressione del liquido, considerato monofase; ϕ_{FLO}^2 è un coefficiente moltiplicativo da utilizzare se la perdita di pressione è in un fluido bifase; F è il flusso di massa ($\text{Kg/m}^2\cdot\text{s}$); v_m è la velocità media del fluido; θ è l'angolo di deviazione del pozzo dalla verticale; ρ è la densità del fluido bifase.

Nel capitolo 5.2.1.3 (Flusso bifase in tubazioni verticali ed inclinate) saranno fornite maggiori dettagli per il calcolo dei singoli componenti che provocano cadute di pressione.

5.2.1.1.3 Bilancio di energia

All'interno della tubazione del pozzo, le variazioni d'energia sono provocate dalla variazione d'energia del fluido e da scambi di calore, per conduzione con le rocce del reservoir a contatto col rivestimento del pozzo.

$$\frac{d E_T}{dL} \pm \dot{Q}_T = 0 \quad (5.2.1.1.3.1)$$

E_T è la potenza scambiata dal pozzo (W), \dot{Q}_T è la perdita/accumulo di calore del fluido per conduzione per unità di lunghezza del pozzo (W/m).

Si può riscrivere E_T come prodotto fra la portata di fluido e l'energia specifica del fluido .

$$\frac{d E_T}{dL} = \frac{d}{dL}(\dot{m}e) = \dot{m} \frac{d}{dL} \left[h_m + \frac{v_m^2}{2} + g(L_w - D) \right] \quad (5.2.1.1.3.2)$$

dato che $\frac{d\dot{m}}{dL}=0$ per il bilancio di massa.

e = energia specifica (J/Kg); h_m è l'entalpia specifica del fluido bifase (J/Kg); v_m velocità media del fluido bifase (m/s); L_w lunghezza totale del pozzo (m); D profondità misurata della zona considerata (m).

Il flusso di calore per conduzione \dot{Q}_T può essere calcolato tramite la seconda equazione di Fourier:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\Omega} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.2.1.1.3.3)$$

che in coordinate cilindriche diviene

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \frac{1}{\Omega} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.2.1.1.3.4)$$

ove T = temperatura (K), r = distanza radiale dal pozzo (m), Ω = diffusività termica (m^2/s), t = tempo (s).

L'equazione (5.2.1.1.3.4) può essere risolta analiticamente imponendo condizioni iniziali ed al contorno. Si assuma che la temperatura del reservoir al tempo $t=0$ sia T_∞ , che la temperatura del reservoir a ridosso del rivestimento sia identica a quella all'interno del pozzo T_w e che a distanza infinita dal pozzo la temperatura T_∞ resti costante nel tempo, ossia non risenta degli scambi termici del pozzo. Le condizioni iniziali ed al contorno sono le seguenti:

C.I.: $T(r,0) = T_\infty$

C.C.: $T(r_w,t) = T_w$

C.C.: $T(\infty,t) = T_\infty$

Si ottiene una soluzione approssimata per il flusso di calore \dot{Q}_T , valida se $\Omega t / r_w^2 \gg 1$ (Carslaw and Jaeger, 1959):

$$\dot{Q}_T \approx 4 \pi \tau (T_w - T_r) \left[\ln \left[\frac{4 \Omega t}{r_w^2} - 2 \eta \right] \right]^{-1} \quad (5.2.1.1.3.5)$$

ove η è la costante di Eulero (0.577216...), Ω è la diffusività termica, τ è la conduttività termica della roccia, T_r è la temperatura del reservoir.

L'equazione (5.2.1.1.3.5) è approssimata in quanto non tiene conto del transitorio durante la scarico del pozzo e di perdite di calore per convezione. Comunque generalmente $dE_T/dL \gg \dot{Q}_T$, e ciò rende giustificabili l'assunzione di tali approssimazioni.

5.2.1.2 Flusso nelle porzioni di pozzo finestate

Considerando il pozzo in emungimento, è ipotizzato che nelle zone finestate del pozzo, il mescolamento fra la portata di fondo pozzo e quella proveniente dal reservoir avvenga

istantaneamente ed alla pressione interna del pozzo.

5.2.1.2.1 Bilancio di massa totale e parziale

Nell'equazione di bilancio di massa nella parte finestrata del pozzo si impone che la somma della portata entrante da una finestratura e della portata proveniente dalla parte sottostante del pozzo siano pari a quella uscente da testapozzo; si esegue il bilancio di massa di tutti i componenti

Bilancio di massa totale:

$$\dot{m}_{testa} = \dot{m}_{res} + \dot{m}_{fondo} \quad (5.2.1.2.1.1)$$

ove \dot{m}_{testa} è la portata che arriva in testa al pozzo, \dot{m}_{res} è la portata proveniente dal reservoir, \dot{m}_{fondo} è la portata proveniente da fondo pozzo.

La portata è una grandezza vettoriale, in quanto può essere sia in direzione verticale che orizzontale, sia inclinata.

Parziale del componente:

Se il flusso è multicomponente, si considera la portata di un solo componente, come una quota parte della portata totale, tramite la frazione massica α_i :

$$\text{acqua: } \dot{m}_{testa} (1 - \alpha_{testa}) = \dot{m}_{res} (1 - \alpha_{res}) + \dot{m}_{fondo} (1 - \alpha_{fondo})$$

$$\text{CO}_2 \text{ o NaCl: } \dot{m}_{testa} (\alpha_{testa}) = \dot{m}_{res} (\alpha_{res}) + \dot{m}_{fondo} (\alpha_{fondo})$$

ove $\alpha_{i,testa}$ $\alpha_{i,res}$ $\alpha_{i,fondo}$ sono le frazioni di massa del componente i (es. CO_2 o NaCl).

La portata dal reservoir può essere calcolata tramite l'equazione di Darcy per flusso bifase:

$$\dot{m}_{res} = k A \left[\frac{k_{rl} \rho_l}{\mu_l} + \frac{k_{rv} \rho_v}{\mu_v} \right] \left[\frac{dP}{dr} \right] \quad (5.2.1.2.1.2)$$

con k_{rl} e k_{rv} permeabilità relative delle fasi liquida e vapore, calcolate in funzione della saturazione.

5.2.1.2.2 Bilancio d'energia

$$\dot{m}_{testa} h_{testa} = \dot{m}_{res} h_{res} + \dot{m}_{fondo} h_{fondo}$$

ove h_i è l'entalpia del fluido.

E' stato ipotizzato che il pozzo sia in emungimento, tuttavia queste relazioni sono valide anche in caso di pozzo in iniezione. A seconda delle direzioni delle portate, nella zona di miscelazione di fronte alla finestratura del pozzo si hanno 6 configurazioni differenti, riportate in Figura 28, ove i simboli \dot{m}_m , \dot{m}_f , \dot{m}_i stanno per \dot{m}_{fondo} , \dot{m}_{res} , \dot{m}_{testa} , mentre H_i rappresenta l'entalpia specifica (J/Kg).

<p>Case 1 $\dot{m}_i > 0 > \dot{m}_f$</p> <p>$\dot{m}_m = \dot{m}_i - \dot{m}_f$ $H_m = H_i = H_f$</p>	<p>Case 4 $\dot{m}_i > \dot{m}_f > 0$</p> <p>$\dot{m}_m = \dot{m}_i - \dot{m}_f$ $H_m = \frac{H_i \dot{m}_i - H_f \dot{m}_f}{\dot{m}_m}$</p>
<p>Case 2 $\dot{m}_i < \dot{m}_f < 0$</p> <p>$\dot{m}_m = \dot{m}_i - \dot{m}_f$ $H_m = H_i = H_f$</p>	<p>Case 5 $\dot{m}_f > 0 > \dot{m}_i$</p> <p>$\dot{m}_m = \dot{m}_i - \dot{m}_f$ $H_m = \frac{H_i \dot{m}_i - H_f \dot{m}_f}{\dot{m}_m}$</p>
<p>Case 3 $\dot{m}_f < \dot{m}_i < 0$</p> <p>$\dot{m}_m = \dot{m}_i - \dot{m}_f$ $H_m = \frac{H_f \dot{m}_i - H_i \dot{m}_f}{\dot{m}_m}$</p>	<p>Case 6 $\dot{m}_f > \dot{m}_i > 0$</p> <p>$\dot{m}_m = \dot{m}_i - \dot{m}_f$ $H_m = H_i = H_f$</p>

Figura 28: Configurazioni di flusso in pozzo in corrispondenza degli strati finestrati (da Bjornsson 1987)

5.2.1.3 Flusso bifase in tubazioni verticali ed inclinate

La modellazione del flusso bifase in pozzi è complessa, anche se il problema viene analizzato sotto condizioni limitate. Le considerazioni teoriche derivano dagli studi sul moto di fluidi in tubazioni, grazie all'analogia fra il manufatto pozzo e una tubazione generica.

In alcune condizioni il gas si muove a velocità vistosamente superiore a quella del liquido; la velocità del liquido può poi variare notevolmente lungo il pozzo, così come in altre circostanze il liquido è circondato da gas, contribuendo in minima parte alle perdite per frizione.

Le perdite di carico nel flusso bifase sono influenzate fortemente dalla differenza di velocità delle fasi e dalla loro distribuzione geometrica.

Pertanto l'approccio seguito generalmente è di considerare prima il flusso monofase, ampiamente studiate nella meccanica dei fluidi, per poi estendere le relazioni al flusso bifase, mediante correlazioni empiriche (Metodo dei flussi separati²²).

Le correlazioni empiriche utilizzate derivano da Crisholm (1983)²³ e Bjornsson (1987)²².

5.2.1.3.1 Flusso monofase

Sono presentate qui le correlazioni per le perdite di pressione nel caso di flusso di un fluido monofase, per poi estenderle al caso bifase, come riportato al paragrafo 5.2.1.3.2 Flusso bifase:

$$\begin{aligned} \left[\frac{dP}{dL} \right]_{FRIZ} &= \frac{fF^2}{4r_w \rho} \\ \left[\frac{dP}{dL} \right]_{ACC} &= \frac{d(Fv)}{dL} \\ \left[\frac{dP}{dL} \right]_{POT} &= \rho g \sin \theta \end{aligned} \quad (5.2.1.3.1.1)$$

ove f è il fattore di frizione, r_w è il raggio del pozzo, u è la velocità media del fluido.

Per il calcolo del fattore di frizione sono poi disponibili le seguenti relazioni:

- Se $Re < 2400$, $f = 2400 / Re$
- Se $Re > 2400$

$$\frac{1}{f} = -2 \log_{10} \left[\frac{\frac{\epsilon}{2r_w}}{3.7} + \frac{2.51}{Re f^{0.5}} \right]$$

ove ϵ è la scabrezza della tubazione (mm), Re è il numero di Reynolds = $\rho v d / \mu$

5.2.1.3.2 Flusso bifase

Si illustra ora come ricavare i valori di perdite di pressione per frizione, accelerazione e potenziale in caso di flusso bifase, dalle equazioni (5.2.1.3.1.1) del flusso monofase.

Tutte le proprietà fisiche del vapore e del liquido sono funzioni della pressione.

Di seguito vengono elencate brevemente le grandezze necessarie a caratterizzare il flusso bifase ed il regime di flusso, all'interno del pozzo, mediante correlazioni empiriche, che saranno illustrate nel capitolo successivo.

Frazione massica

$$x = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_v + \dot{m}_L}$$

ove \dot{m}_i rappresenta la portata del componente vapore o liquido

Saturazione

$$S = \frac{A_v}{A} = \frac{A_v}{A_v + A_L}$$

ove A è la sezione retta della tubazione, A_v è la sezione retta occupata da gas, A_L è la sezione retta occupata da liquido.

Flusso di massa

$$F = \frac{\dot{m}_v + \dot{m}_l}{A_v + A_l}$$

Portate

$$\begin{aligned}\dot{m}_v &= v_v \rho_v A_v = v_v \rho_v A S \\ \dot{m}_l &= v_l \rho_l A_l = v_l \rho_l A (1 - S)\end{aligned}$$

Coefficiente di velocità

$$K = \frac{v_v}{v_l} \quad \text{con } v_i \text{ velocità della fase } i$$

Velocità superficiali

Rappresentano le velocità fittizie che avrebbero le due fasi se fluissero da sole:

$$\begin{aligned}v_{vs} &= \frac{x \dot{m}}{\rho_v A} \\ v_{ls} &= \frac{(1-x) \dot{m}}{\rho_l A}\end{aligned}$$

spesso il flusso bifase è specificato tramite tali quantità, in quanto i termini a secondo membro sono facilmente misurabili a boccapozzo ²².

Densità del fluido bifase

$$\rho_{mix} = S \rho_v + (1 - S) \rho_l = \frac{x + K(1-x)}{\left[\frac{x}{\rho_v} + \frac{K(1-x)}{\rho_l} \right]}$$

Portate volumetriche

$$\begin{aligned}q_v &= A_v v_v = \frac{x F A}{\rho_v} \\ q_l &= A_l v_l = \frac{x F A}{\rho_l}\end{aligned}$$

ove q_v e q_l sono le portate volumetriche rispettivamente di vapore e liquido

Rapporto di portata volumetrica gassosa

$$\beta = \frac{Q_v}{Q_v + Q_l} = 1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho_v}{\rho_l}$$

5.2.1.3.3 Regimi di flusso bifase

Ora utilizzeremo le nozioni introdotte nei paragrafi precedenti per caratterizzare il flusso dei fluidi emunti durante la risalita all'interno del pozzo.

Il flusso bifase è in genere suddiviso in quattro regimi di flusso, che dipendono dal comportamento macroscopico delle due fasi.

I quattro regimi, illustrati in Figura 29, sono:

- “bubble”, a bolla
- “slug”, a pallottola
- “annular slug transtion” (o churn)
- “annular mist” (o annular)
- “choked flow” o flusso soffocato

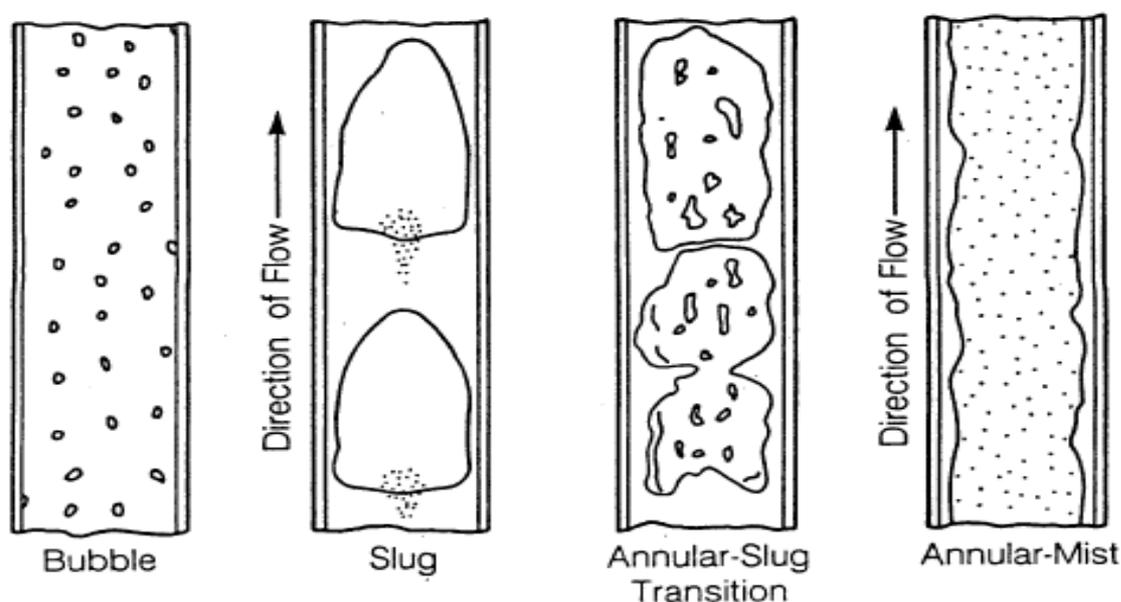


Figura 29: Differenti regimi di flusso (da HOLA, GWELL, GWNACL User's Guide, LBNL, 2008)

Un esempio di regime “bubble” è la risalita delle bollicine della birra, dovuta alla spinta di galleggiamento e rallentata dalla viscosità del liquido.

La velocità delle bollicine, rispetto alla velocità del liquido v_b è espressa dalla relazione ²²:

$$v_b = 1.53 \left[\frac{g \sigma (\rho_v - \rho_l)}{\rho_l^2} \right]^{1/4}$$

ove σ è la tensione superficiale acqua-vapore.

Il regime Slug avviene quando le piccole bolle si congiungono, formando bolle a forma di pallottola, dette di Taylor, con un diametro simile a quello del pozzo. La fase liquida resta continua. La loro velocità v_r delle bolle, rispetto a quella del fluido è ²³:

$$v_T = 0.35 \left[2r_w g \left[1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$

I regimi “anular” avvengono quando la fase gas è continua, mentre la fase liquida fluisce o sottoforma di goccioline nel vapore (anular slug), o come uno strato lungo le pareti del pozzo (annular mist). Un esempio del regime “annular slug” è dato dalla pioggia.

Esiste inoltre un ulteriore regime di flusso, detto “choked flow” o flusso soffocato, che avviene quando la portata raggiunge il valore massimo possibile all'interno della tubazione. Tale condizione è raggiunta quando il gradiente di pressione viene uguagliato dalle perdite di carico per frizione.

La velocità del flusso bifase in tale regime è ²⁴:

$$v_{ch} = \left[\frac{k_{c,m}}{\rho_{mix}} \right]$$

$$\frac{1}{k_{c,m}} = \frac{S}{k_{c,v}} + \frac{1-S}{k_{c,l}}$$

ove $k_{c,i} = \rho \frac{dP}{d\rho}$ è l'incompressibilità del fluido (Pa), liquido o vapore.

Si considera il flusso in regime di choked flow quando $v_{ch} > v_h$,

$$v_h = F \left[\frac{x}{\rho_v} + \frac{(1-x)}{\rho_l} \right]$$

ove v_h è detta velocità del fluido omogeneo.

5.2.1.3.3.1 Determinazione del regime di flusso

In un pozzo geotermico si identificano differenti regimi di flusso al variare della profondità: un'accurata descrizione del flusso dipende fortemente dall'identificazione del regime ai vari livelli del pozzo.

Per l'identificazione del regime di flusso sono state sviluppate delle correlazioni empiriche ²², illustrate in Figura 30.

Flow regime	Limits
Bubble	$\beta < L_B$
Slug	$\beta > L_B$ and $v_{gD} < L_S$
Transition	$L_S < v_{gD} < L_M$
Mist	$L_M < v_{gD}$

$$v_{gD} = \frac{x G}{\rho_g} \left(\frac{\rho_l}{g \sigma} \right)^{0.25}$$

$$v_t = G \left[\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right]$$

$$L_B = 1.071 - 0.676 \frac{v_t^2}{2 r_w} \quad \text{and} \quad L_B > 0.13$$

$$L_S = 50 + 36 v_{gD} \frac{Q_l}{Q_g}$$

$$L_M = 75 + 84 \left(v_{gD} \frac{Q_l}{Q_g} \right)^{0.75}$$

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l}$$

Figura 30: Differenti tipi di flusso e criteri per la loro determinazione (da Bjornsson, 1987)

5.2.1.3.4 Perdite di pressione per frizione

Le relazioni che sono illustrate in questo paragrafo valgono per tubazioni verticali, tuttavia un largo numero di esperimenti fatti su tubazioni inclinati con flusso bifase acqua-vapore, ha dimostrato la scarsa influenza dell'inclinazione del pozzo.

Le perdite di pressione per frizione in flusso bifase sono calcolate mediante la correlazione illustrata nel paragrafo 5.2.1.1.2 Bilancio della quantità di moto ed al paragrafo 5.2.1.3.1 Flusso monofase.

Riassumendo :

$$\left[\frac{dP}{dL} \right]_{FRIZ} = \phi_{FLO}^2 \left[\frac{dP}{dL} \right]_{LO} = \phi_{FLO}^2 \left[\frac{f F^2}{4 r_w \rho} \right] \quad (5.2.1.3.4.1)$$

E' stata ricavata una correlazione per ϕ_{FLO}^2 ²³ (Chrisholm, 1973):

$$\phi_{FLO}^2 = 1 + (\Gamma^2 - 1) \left[B_s x^{\frac{2-\xi}{\xi}} (1-x)^{\frac{2-\xi}{\xi}} + x^{2-\xi} \right] \quad (5.2.1.3.4.2)$$

ove Γ^2 è un parametro di proprietà fisiche, ξ esponente di Blasius (0.25 per tubazioni lisce, 0 per tubazioni scabre, come i pozzi geotermici). B_s è un coefficiente semi empirico, funzione di F e Γ , con valori riassunti in Figura 30.

Γ	G (kg/m ² s)	B_B
≤ 9.5	≤ 500	4.8
	$500 \leq G \leq 1900$	2400/G
	≥ 1900	$55/G^{1/2}$
$9.5 < \Gamma < 28$	≤ 600	$520/(\Gamma G^{1/2})$
	> 600	$21/\Gamma$
≥ 28		$15000/(\Gamma^2 G^{1/2})$

Figura 31: Valori di B_s per tubazioni lisce (da Chisholm, 1983), ove G sta per F ovvero flusso di massa (Kg/m²s⁻¹)

Γ^2 è il rapporto fra la perdita di pressione del fluido monofase gas e monofase liquido, espresso come:

$$\Gamma^2 = \frac{\left[\frac{dP}{dL_{GO}} \right]}{\left[\frac{dP}{dL_{LO}} \right]} = \left[\frac{\mu_v}{\mu_L} \right]^\xi \left[\frac{\rho_L}{\rho_v} \right]$$

ove LO e GO indicano “liquid-only” e “gas-only”; ξ è l'esponente di Blasius.

Per pozzi geotermici, ove $n=0$, l'equazione (5.2.1.3.4.2) può essere riscritta come:

$$\phi_{FLO}^2 = 1 + (\Gamma^2 - 1) [B_R x(1-x) + x^2]$$

ove B_R si ricava da:

$$\frac{B_R}{B_s} = \left\{ 0.5 \left[1 + \left(\frac{\mu_v}{\mu_L} \right)^2 + 10^{(-330 \epsilon / r_w)} \right] \right\}^{\frac{0.25 - \xi}{\xi}}$$

con ϵ è la scabrezza del pozzo.

5.2.1.4 Risoluzione numerica delle equazioni di flusso bifase in pozzo

In questo paragrafo è illustrata la risoluzione numerica delle equazioni descritte nei paragrafi 5.2.1.1 Flusso in porzione di pozzo non finestrata e 5.2.1.2 Flusso nelle porzioni di pozzo finestate, operata dal software HOLA.

Una delle informazioni richieste da HOLA per la risoluzione del flusso in pozzo è la definizione di una griglia monodimensionale, che suddivida il pozzo in blocchi verticali, sui quali discretizzare le equazioni.

HOLA limita la scelta dell'altezza dei blocchi ad un sottomultiplo della profondità del pozzo; la profondità delle zone finestate deve inoltre corrispondere alla profondità di un nodo della griglia.

HOLA opera la risoluzione delle equazioni secondo due schemi (detti OPTION 1 e 2), lasciando all'utente la scelta di quale adottare, all'inizio dell'esecuzione del programma:

- OPTION 1: richiede come input le condizioni a testa pozzo (pressione, frazione di massa in CO₂, temperatura ed entalpia); il simulatore procede poi a calcolare i profili di temperatura e pressione da testapozzo a fondopozzo.
- OPTION 2: richiede l'inserimento di pressione di testapozzo, pressione di fondopozzo e indice di produttività (vedi §5.2.1.4.2); HOLA procede poi a calcolare i profili di temperatura e pressione, risalendo dal fondopozzo verso testapozzo; calcola poi entalpia, portata, temperatura e composizione a testapozzo. Questa opzione è utile nel caso si vogliano prevedere le prestazioni di un nuovo pozzo, quando sono noti i parametri di pozzi adiacenti.

Come per le equazioni analitiche, sono discusse separatamente le porzioni di pozzo non finestrate da quelle finestrate.

5.2.1.4.1 Porzioni non finestrate

La perdita di pressione e il bilancio di energia sono discretizzati:

$$\frac{P_i - P_{i-1}}{\Delta L} - \left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_{FRIZ} - \left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_{ACC} - \left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_{POT} = 0$$

$$\frac{E_{T,i} - E_{T,i-1}}{\Delta L} \pm \dot{Q}_T = 0$$

ove ΔL rappresenta l'altezza di un blocco della griglia, mentre i pedici sono gli indici dei blocchi in cui è suddiviso il pozzo.

I tre componenti della caduta di pressione, l'energia del fluido ed il flusso di calore sono discretizzati come segue:

$$\left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_{FRIZ} = \frac{\left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_{i-1} + \left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_i}{2}$$

$$\left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_{ACC} = \frac{(Fv_m)_{i-1} - (Fv_m)_i}{\Delta L}$$

$$\left[\frac{\Delta P}{\Delta L} \right]_{POT} = \frac{g(\rho_{m,i-1} \sin \theta_{i-1} + \rho_{m,i} \sin \theta_i)}{2}$$

$$E_{T,i} = \dot{m}_i \left[h_m + \frac{x u_v^2 + (1-x) u_l^2}{2} + g(L_w - D) \right]_i$$

$$\dot{Q}_T = 4 \pi \tau \left[\ln \left[\frac{4 \Omega t}{r_w^2} - 2 \eta \right] \right]^{-1} (T_{w,m} - T_{r,m})$$

ove $T_{w,m}$ è la temperatura media fra i due blocchi contigui; $T_{r,m}$ è la temperatura media del reservoir fra due blocchi contigui.

5.2.1.4.2 Porzioni finestrate

La portata di fluido entrante dal bacino è valutata tramite l'equazione:

$$\dot{m}_{res} = \frac{k A}{r} \left[\frac{k_{rl} \rho_l}{\mu_l} + \frac{k_{rv} \rho_v}{\mu_v} \right] (P_r - P_w) = PI_H \left[\frac{k_{rl} \rho_l}{\mu_l} + \frac{k_{rv} \rho_v}{\mu_v} \right] (P_r - P_w)$$

ove P_r è la pressione nel reservoir; P_w è la pressione nel pozzo; r è la distanza fra pozzo e reservoir alla pressione P_r .

PI_H è chiamato indice di produttività.

5.2.1.5 Input

I dati di input necessari al funzionamento di HOLA sono forniti o mediante file esterni o direttamente da tastiera.

E' fondamentale specificare all'avvio del programma quale opzione di simulazione utilizzare, vedi §5.2.1.4 Risoluzione numerica delle equazioni di flusso bifase in pozzo.

OPTION 1 INPUT DECK

LINE	VARIABLE(S)
1	TEXT1
2	TEXT2
3	TEXT3
4	PTOP
5	HTOP
6	QTOP
7	XCTOP
8	LENGTH
9	THCON
10	RHOR
11	HCAP
12	TIME
13	NUSEC
14	SECL(i), RAD(i), EPS(i), DELZ(i), DEV(i)
:	: : : : :
13+ NUSEC	SECL(NUSEC), RAD(NUSEC), EPS(NUSEC), DELZ(NUSEC), DEV(NUSEC)
14+ NUSEC	NUPO
15+ NUSEC	T_DEPTH(i), TEMP(i)
:	: :
14+ NUSEC+ NUPO	T_DEPTH(NUPO), TEMP(NUPO)
15+ NUSEC+ NUPO	NUFEED
16+ NUSEC+ NUPO	F_DEPTH(i), FLOW(i), ENTH(i), XC(i)
:	: : : :
15+ NUSEC+ NUPO+ NUFEEED	F_DEPTH(NUFEED-1), FLOW(NUFEED-1), ENTH(NUFEED-1), XC(NUFEED-1)

Figura 32: Schema del formato di input di HOLA (da GWELL, GWNACL and HOLA user's guide)

Simulatori per sistemi geotermici

Il formato dell'input per l'opzione 1 è fornito in Figura 32, e la relativa legenda in Figura 33 e Figura 34.

VARIABLE	UNIT	REMARKS
DELZ(i)	m	Distance between two adjacent grid nodes for pipe section i
DEV(i)	degree (°)	Deviation angle measured from horizontal for pipe section i
ENTH(i)	°C or J/kg	Temperature or enthalpy of fluid at feedzone i
EPS(i)	m	Pipe roughness of section i
FLOW(i)	kg/s	Flow rate at feedzone i; + means producing (For Option 1 only) - means injecting
F_DEPTH(i)	m	Depth of feedzone i
HCAP	J/kg-°C	Heat capacity
HTOP	°C or J/kg	Option 1: Wellhead fluid temperature or enthalpy Option 2: Bottomhole pressure
LENGTH	m	Well measured depth
NUFEED		Number of feedzones; max. = 10
NUPO		Number of reservoir temperature data points max. = 20
NUSEC		Number of pipe sections; max. = 50
PTOP	Pa abs	Wellhead pressure
QTOP	kg/s	Option 1: Wellhead flow rate
	Pa abs	Option 2: Max. error in wellhead pressure (difference between required and calculated wellhead pressures)
RAD(i)	m	Pipe radius
RESV(1,i)	Pa abs	Reservoir Pressure (For Option 2 only)
RESV(3,i)	°C or J/kg	Temperature or enthalpy of fluid at feedzone i (For Option 2 only)
RESV(4,i)	m ³	Productivity index of feedzone i; see Eqn. 3.13 for definition (For Option 2 only)
RESV(6,i)		Mass fraction of CO ₂ or NaCl of feedzone i
TEXT1		Character string; max. length = 80

Figura 33: Legenda dei dati di input di HOLA 1/2 (da GWELL, GWNACL and HOLA user's guide)

TEXT2		Character string; max. length = 80
TEXT3		Character string; max. length = 80
THCON	W/m-°C	Thermal conductivity
TIME	s	Time since initial discharge
T_DEPTH(i)	m	Depth of temperature data point i
XC(i)		Mass fraction CO ₂ or NaCl of fluid at feedzone i
XCTOP		Mass fraction in total discharge of CO ₂ or NaCl at the wellhead Note that for Option 2, the fluid composition at the wellhead can be calculated. For Option 2, XCTOP may not be specified

Figura 34: Legenda dei dati di input di HOLA 2/2 (da GWELL, GWNACL and HOLA user's guide)

5.2.1.6 Output

L'output di HOLA, di cui un esempio è fornito in Figura 35, riporta i dati di:

Simulatori per sistemi geotermici

1. pressione, temperatura, composizione, entalpia e portata a testapozzo;
2. profondità, portata entalpia, pressione del reservoir, saturazione e indice di produttività dei blocchi ai quali corrisponde uno strato produttivo;
3. profondità, pressione, temperatura, composizione, entalpia (del liquido, del vapore e totale), velocità (del liquido e del vapore), densità (del liquido e del vapore), raggio del pozzo dei blocchi ai quali non corrisponde uno strato produttivo.

Sample 3 for Simulator HOLA
- Option 2 used -

```
Wellhead pressure ( bar abs. ) :    31.00
Wellhead temperature ( C )    :    235.66
Wellhead dryness              :    0.241
Wellhead enthalpy ( kJ/kg )   :    1446.98
Wellhead total flow ( kg/s )  :    37.41
```

Feedzone no:	Depth (m)	Flow (kg/s)	Enthalpy (kJ/kg)	Res.Pres (Bar)	Satur.	Prod. Ind. (m ³)
1	1110.0	10.5567	1600.0	100.000	0.68	0.500000E-12
2	2010.0	16.7768	1200.0	135.000	0.00	0.800000E-12
3	2530.0	10.0761	1284.4	153.500	0.00	0.500000E-12

```
*****
Depth (m) Press (Pa) Temp (C) Dryness Hw (J/kg) Hs (J/kg) Vw (m/s) Vs (m/s) Dw (kg/m3) Ds (kg/m3) H_t (J/kg) Rad (m) Reg
0.0 3099696. 235.66 0.24084 1016960. 2802465. 14.31 16.26 819.65 15.51 1446980. 0.110 Sl
25.0 3130763. 236.22 0.23985 1019604. 2802469. 14.13 16.05 818.88 15.66 1447233. 0.110 Bu
50.0 3161868. 236.77 0.23887 1022233. 2802468. 13.96 15.84 818.11 15.82 1447485. 0.110 Bu
75.0 3193015. 237.32 0.23790 1024848. 2802461. 13.80 15.64 817.35 15.98 1447737. 0.110 Bu
100.0 3224207. 237.87 0.23692 1027451. 2802448. 13.63 15.43 816.59 16.14 1447989. 0.110 Bu
125.0 3255450. 238.41 0.23595 1030040. 2802429. 13.47 15.24 815.83 16.29 1448241. 0.110 Bu
150.0 3286747. 238.96 0.23499 1032617. 2802404. 13.31 15.05 815.08 16.45 1448493. 0.110 Bu
175.0 3318103. 239.49 0.23402 1035183. 2802374. 13.15 14.86 814.33 16.61 1448744. 0.110 Bu
200.0 3349522. 240.03 0.23306 1037737. 2802339. 13.00 14.67 813.57 16.77 1448996. 0.110 Bu
225.0 3381007. 240.56 0.23210 1040282. 2802297. 12.85 14.49 812.82 16.93 1449247. 0.110 Bu
250.0 3412564. 241.09 0.23114 1042816. 2802251. 12.70 14.31 812.07 17.09 1449498. 0.110 Bu
275.0 3444194. 241.62 0.23019 1045340. 2802199. 12.55 14.13 811.33 17.25 1449749. 0.110 Bu
300.0 3475904. 242.14 0.22924 1047855. 2802141. 12.41 13.96 810.58 17.41 1450000. 0.110 Bu
```

Figura 35: Esempio dell'output di HOLA (da GWELL, GWNACL and HOLA user's guide)

6 Simulazione accoppiata

iTOUGH2 trascura i processi termodinamici legati al flusso di fluidi all'interno di pozzi: si limita cioè a considerare i processi che avvengono nel giacimento, mantenendo costante la pressione in pozzo davanti allo strato produttivo, con entalpia e portata variabili nel tempo; ciò si ottiene mediante l'opzione DELV (vedi 6.2.3 Opzione DELV o Deliverability Model) nella keyword GENER del file di input di TOUGH2.

Nei sistemi geotermici si opera in genere a pressione di testa pozzo (WHP “Well Head Pressure”) costante ed il legame fra WHP e pressione a fondo pozzo (BHP o “Bottom Hole Pressure”) dipende dal comportamento dei fluidi nella risalita all'interno del pozzo.

La BHP fissata con DELV potrebbe quindi non essere sufficiente ad erogare alla pressione di testa pozzo necessaria: quest'ultima è imposta dalla pressione di separazione del vapore dall'acqua, a monte della turbina e dalla pressione di ingresso nella turbina della centrale geotermoelettrica.

Per superare questo problema è stata introdotta l'opzione F-type in TOUGH2, che permette l'*accoppiamento esterno* con software di simulazione di pozzo.

L'opzione F-type (vedi 6.2.4 Opzione f-type e accoppiamento esterno) sfrutta una tabella di BHP in funzione di portata e entalpia dei fluidi nello strato produttivo. Tale tabella è ricavata usando un simulatore di pozzo (nel nostro caso specifico HOLA), calcolando la BHP corrispondente ad una serie di valori di portate e entalpie, fissando vari parametri del pozzo, fra cui WHP e portata a testa pozzo desiderate.

Usando l'opzione F-type si produce quindi a WHP costante e la BHP viene modificata ad ogni passo di tempo e iterazione, affinché sia quella necessaria per portata ed entalpia erogate dal pozzo.

La tabella di BHP in funzione di portata ed entalpie deve essere determinata per una composizione dei fluidi fissata. Il problema non è secondario se si produce ad esempio da un serbatoio bifase con alto contenuto di CO₂: in questo caso sarebbe necessario fornire più tabelle, ricavate per diverse composizioni. Tale implementazione non è ad oggi disponibile in TOUGH2.

Benché in TOUGH2 esiste la possibilità di accoppiamento esterno, in bibliografia non sono stati trovati precedenti tentativi di accoppiamento esterno di iTOUGH2, considerazione che è stata confermata dallo sviluppatore stesso di iTOUGH2.

Il lavoro svolto è stata quindi la verifica della possibilità di accoppiamento esterno per iTOUGH2 ed il confronto dei risultati con quelli ottenuti con TOUGH2.

L'analisi dell'input sarà concentrata principalmente sulla keyword GENER, in quanto in tale keyword si definisce se utilizzare una pressione di fondo pozzo costante o effettuare l'accoppiamento esterno.

6.1 Accoppiamento interno o “Fully coupled”

L'accoppiamento esterno non è l'unica modalità di interfacciamento di simulatori di pozzo con simulatori di reservoir.

Sarebbe infatti possibile modificare il codice di iTOUGH2, integrandolo con le equazioni che

Simulazione accoppiata

simulano il comportamento all'interno dei pozzi.

Questa tipologia di accoppiamento è detta interna o “fully coupled”.

Questa possibilità tuttavia richiede una modifica radicale del codice del simulatore, come è stato fatto da Hadgu et al. (1995), i quali hanno accoppiato TOUGH (Pruess, 1987) al simulatore di pozzo WFSA (Hadgu and Freestone, 1990).

Benchè l'accoppiamento interno permetta una maggiore accuratezza nei calcoli, in quanto i valori di pressione di fondo pozzo non devono essere estrapolati da una tabella, è preferibile mantenere separata l'esecuzione dei due simulatori (Murray and Gunn, 1993) ²⁰.

L'accoppiamento esterno tramite una tabella di valori di pressioni di fondo pozzo, in funzione di portata ed entalpia, aumenta infatti l'efficienza di calcolo e la stabilità di TOUGH2, comportando un aumento insignificante del costo computazionale ²⁰, rispetto al caso in cui si considera una pressione di fondo pozzo costante. L'accoppiamento esterno è tuttavia limitato ad un solo strato di emungimento.

6.2 Ipotesi del problema affrontato

Per poter verificare i risultati delle simulazioni accoppiate su iTOUGH2, è stato scelto di riprodurre un caso citato in bibliografia, presente nel manuale di TOUGH2 ²⁰, il quale a sua volta è stato creato per ripetere un esempio realizzato da Hadgu et al. (1995) ²⁵.

In tale esempio si confronta una simulazione che adotta una pressione di fondo pozzo costante, con una simulazione che invece prevede l'accoppiamento esterno (vedi §6.2.4 Opzione f-type e accoppiamento esterno) di TOUGH2, su un reservoir geotermico di forma cilindrica, nel quale è presente un pozzo di emungimento di acqua e vapore.

Il file di input (in Figura 36 e Figura 37) riportato nel manuale di TOUGH2, contiene i dettagli per definire i parametri idrogeologici, le condizioni iniziali ed al contorno, i parametri computazionali (vedi §6.2.2 Condizioni al contorno, tempi di simulazione e altri parametri) ed i parametri di funzionamento dei pozzi (vedi §6.2.3 Opzione DELV o Deliverability Model e §6.2.4 Opzione f-type e accoppiamento esterno).

Il file input necessario alla creazione della griglia cilindrica tramite il modulo Meshmaker di TOUGH2 è in Figura 38 (vedi §6.2.1 Griglia e parametri idrogeologici),

Simulazione accoppiata

```

*riq* --- 1-D radial test problem for flowing wellbore pressure
ROCKS---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
POMED      2600.      .10      1.e-13      1.e-13      1.e-13      2.0      1000.0

START---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
---*---1 MOP: 123456789*123456789*1234 ---*---5---*---6---*---7---*---8
PARAM---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
  1 100      100100  000000002 30 0 3
          1.e9      -1.
          1.E5
          1.E-5      1.E00                      1.E-7
          60.E5                      0.10
RPCAP---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
  3      .30      .05
  1          1.
FOFT ---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
A1  1

GOFT ---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8

INCON---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8

GENER---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
A1  1wel 1          DELV  4.64e-11 .5737E+07

ENDCY---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8

```

Figura 36: File di input del problema 5, con opzione DELV nella keyword GENER, per l'uso di una pressione di fondo pozzo costante.

```

GENER---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
A1  1wel 1          f725d  4.64e-11

ENDCY---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8

```

Figura 37: Keyword GENER modificata per l'uso dell'opzione f-type, per l'accesso al file esterno generato da un simulatore di pozzo

6.2.1 Griglia e parametri idrogeologici

La griglia è costruita mediante la subroutine RZ2D per la generazione di griglie cilindriche. I nodi della griglia sono posti nel punto di mezzo del segmento che congiunge le due interfacce della corona circolare.

Il file di input da utilizzare per la creazione della griglia è in Figura 38.

Simulazione accoppiata

```
*r1q* --- 1-D radial test problem for flowing wellbore pressure
MESHMAKER1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
RZ2D
RADII
  2
  0.      100.
EQUID
  20      10.
LOGAR
  30      1.E3
LOGAR
  30      1.E4
EQUID
  1       0.0
LAYER---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
  1
  500.
ENDFI---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
```

Figura 38: File di input per la creazione della griglia cilindrica

La griglia è costituita da 80 corone cilindriche concentriche, di sezione crescente col raggio, con uno spessore di 500 (m). La griglia si estende fino ad un raggio massimo di 10000 (m). Il pozzo è definito in un blocco centrale, di raggio nullo, mentre il secondo blocco è un cilindro di raggio 100 (m), che serve a rappresentare un forte “skin factor” negativo.

E' stato definito solo uno strato di blocchi cilindrici, quindi il modello risulta monodimensionale.

E' stato creato un blocco esterno fittizio, di volume nullo, per imporre le condizioni al contorno, come illustrato nel paragrafo 6.2.2 Condizioni al contorno, tempi di simulazione e altri parametri.

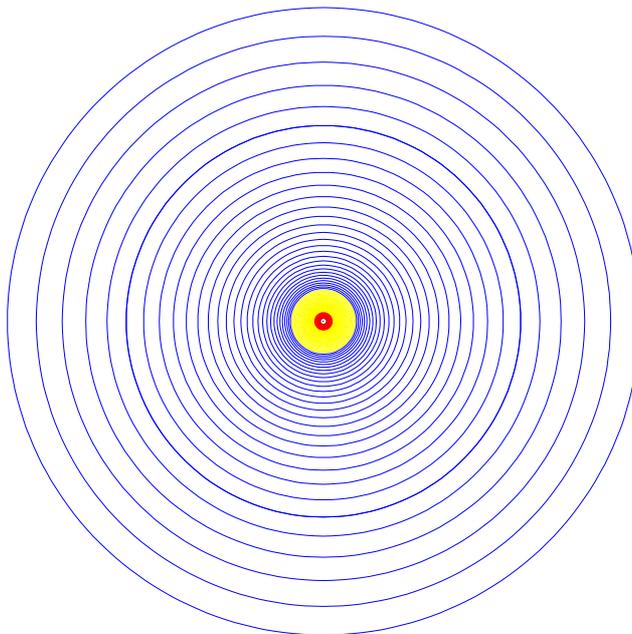


Figura 39: Rappresentazione della griglia utilizzata

Simulazione accoppiata

I valori iniziali dei parametri idrogeologici assegnati ai blocchi della griglia sono riassunti nella Tabella 3.

Densità matrice [Kg/m3]	2600
Pressione reservoir [Pa]	6E+06
Saturazione gas iniziale	0,10
Porosità	0,10
Permeabilità in direzione x,y,z [m2]	1E-13
Conducibilità termica matrice completamente satura [W/(m °C)]	2,00
Capacità termica della matrice [J/(Kg °C)]	1000,00
PI [m3]	4,64E-11
tempo totale [anni]	31,70

Tabella 3: Valori iniziali dei parametri idrogeologici e di simulazione

Per determinare le permeabilità relative di vapore e acqua sono utilizzate le curve di Corey (1954), selezionabili dall'utente tramite il parametro IRP della keyword ROCKS. La pressione capillare è nulla.

6.2.2 Condizioni al contorno, tempi di simulazione e altri parametri

La creazione di un elemento finale di volume nullo serve per definire le condizioni al contorno di Dirichlet al problema. Se un blocco ha infatti volume nullo, le variabili primarie, definite nel modulo EOS utilizzato, saranno mantenute costanti in tale blocco.

Dunque nel nostro caso la pressione e la saturazione del vapore sono mantenute costanti per tutto il periodo di simulazione nell'ultimo blocco

Il numero massimo di passi temporali è 100 selezionabili dall'utente tramite il parametro MCYC della keyword PARAM; la simulazione parte al tempo 0 secondi e termina dopo 10^9 secondi, che corrispondono a circa 32 anni.

Il primo passo temporale è di 10^5 secondi, mentre i successivi sono calcolati automaticamente dal simulatore in base alle iterazioni di Newton-Raphson.

Il criterio di convergenza per gli errori relativi è 10^{-5} , mentre è 1 per gli errori assoluti.

6.2.3 Opzione DELV o Deliverability Model

Con questa opzione il pozzo opera con una pressione di fondo pozzo costante (P_{wb} o BHP) e nel nostro caso è pari a $5.737E+07$ (Pa) e indice di produttività (PI) definito ²⁰. Sono stati assegnati tali valori per riprodurre gli esempi, trovati in bibliografia, di accoppiamento esterno. La portata della fase β , da un blocco del reservoir a pressione $P_{\beta} > P_{wb}$, è:

$$\dot{m}_{\beta} = \frac{k_{r\beta}}{\mu_{\beta}} \rho_{\beta} \cdot PI \cdot (P_{\beta} - P_{wb}) \quad (6.2.3.1)$$

Simulazione accoppiata

L'indice di produttività, per flusso allo stato stazionario, è definito come ²⁶ :

$$PI_l = \frac{2\pi(k \Delta z_l)}{\ln(r_e/r_w) + s - 1/2} \quad (6.2.3.2)$$

ove z_l è lo spessore dello strato produttivo l ; k è la permeabilità dello strato produttivo l , r_e è il raggio del blocco della griglia; r_w è il raggio del pozzo; s è lo "skin factor".

Se il pozzo produce da un blocco di forma non cilindrica, r_e dev'essere calcolata tramite:

$$r_e = \sqrt{A/\pi} \quad (6.2.3.3)$$

ove A è l'area del blocco.

La portata estratta del componente k è calcolata tramite:

$$\dot{m}_\beta^k = \sum_\beta X_\beta^k \dot{m}_\beta \quad (6.2.3.4)$$

ove X_β^k è la frazione di massa del componente k nella fase β .

In pozzi con più strati produttivi, la pressione BHP viene corretta, per considerare l'effetto della gravità sulla densità.

La BHP dello strato produttivo l è ottenuta tramite questo calcolo:

$$P_{wb,l} = P_{wb,l+1} + \frac{g}{2} (\rho_l^f \Delta z_l + \rho_{l+1}^f \Delta z_{l+1}) \quad (6.2.3.5)$$

ove le densità ρ_l^f sono calcolate da una procedura fornita da Coats:

$$\rho_l^f = \frac{\sum_b q_{l\beta}^T \rho_{l,\beta}}{\sum_b q_{l\beta}^T} \quad (6.2.3.6)$$

Se la pressione di pozzo è nulla, la portata volumetrica, emunta dallo strato l , sarebbe:

$$q_{l,\beta} = \frac{\dot{m}_{l,\beta}}{\rho_{l,\beta}} = \left(\frac{k_{r\beta}}{\mu_\beta} \right)_l \cdot PI_l \cdot P_{l,\beta} \quad (6.2.3.7)$$

e la portata volumetrica totale q_β^T della fase β , da tutti gli strati superiori a l è:

$$q_\beta^T = \sum_{m=1}^l q_\beta^m \quad (6.2.3.8)$$

Questa quantità va inserita nell'equazione (6.2.3.6) per ricavare ρ_l^f .

6.2.4 Opzione f-type e accoppiamento esterno

Tramite l'opzione f-type (o F-type), della keyword GENER, si deve fornire una tabella esterna di pressioni di fondo pozzo, in funzione di portata ed entalpia dei fluidi uscenti/entranti dallo/nello strato produttivo. Tale tabella è realizzata mediante simulatori di pozzo. Imponendo:

- pressione di testapozzo,
- il raggio del pozzo in funzione della profondità,
- profondità e spessore dello strato produttivo

e ripetendo la simulazione per differenti valori di portata ed entalpia, si ricava una tabella che riporta $P_{wb} = P_{wb}(\dot{m}, h)$.

La tabella è fornita a TOUGH2 mediante un file esterno.

All'inizio della simulazione si ricava una portata di tentativo, mediante la soluzione dell'equazione (6.2.4.1), con il metodo di Newton-Raphson, e dall'interpolazione dei valori di P_{wb} forniti nella tabella ed inserendo l'indice di produttività ($PI=4.64E-11$), come definito nella keyword GENER:

$$R(\dot{m}_\beta) = \dot{m}_\beta - \left(\frac{k_{r\beta}}{\mu_\beta} \rho_\beta \right) \cdot PI \cdot (P_\beta - P_{wb}(\dot{m}_\beta, h)) = 0 \quad (6.2.4.1)$$

ove i valori di entalpia h sono calcolati dal simulatore di reservoir.

I successivi valori di portata saranno ricavati dalla soluzione dell'equazione:

$$\dot{m}_\beta = \frac{k_{r\beta}}{\mu_\beta} \rho_\beta \cdot PI \cdot (P_\beta - P_{wb}(q, h)) \quad (6.2.4.2)$$

ove $P_{wb}(\dot{m}, h)$ è ricavata sempre dalla tabella esterna.

L'accoppiamento esterno a TOUGH2 è possibile solo per pozzi con un solo strato produttivo. Inoltre non è possibile considerare gli effetti della variazione di composizione dei fluidi ²⁰.

6.2.4.1 Formato della tabella esterna

Il file esterno deve avere un nome del tipo f n n n L e tale è l'opzione da inserire nei due record; f è una lettera fissa, n indica che i caratteri sono numeri, L indica che il carattere è una lettera (es. f725d).

I dati forniti nel file esterno devono avere un formato predefinito, col sistema di codifica in caratteri ASCII da 80 caratteri per riga.

La prima riga contiene un titolo a piacere; la seconda contiene il numero di dati di portata (NG) ed entalpia (NH) dello strato produttivo, forniti nel formato 2I5 (2 set di dati, ciascuno costituito da numeri interi "I", di 5 cifre ciascuno).

Nelle righe successive seguono le NG portate, nel formato 8E10.4 (2 set di dati, in notazione scientifica, di 10 cifre ciascuno, con al massimo 4 cifre decimali); seguono gli NH valori di entalpia, in formato 8E10.4.

Sono quindi scritti in formato 8E10.4 gli NG serie di NH valori di pressione di fondo pozzo.

Il file riportato nel manuale di TOUGH2 ed usato nel nostro lavoro è fornito in Figura 40:

Simulazione accoppiata

```

*f725d* - (q,h) from ( .5000E+00, .1000E+07) to ( .9050E+02, .1400E+07)
  11   9
.5000E+00 .1050E+02 .2050E+02 .3050E+02 .4050E+02 .5050E+02 .6050E+02 .7050E+02
.8050E+02 .9050E+02      1.e3
.1000E+07 .1050E+07 .1100E+07 .1150E+07 .1200E+07 .1250E+07 .1300E+07 .1350E+07
.1400E+07
.1351E+07 .1238E+07 .1162E+07 .1106E+07 .1063E+07 .1028E+07 .9987E+06 .9740E+06
.9527E+06
.1482E+07 .1377E+07 .1327E+07 .1299E+07 .1284E+07 .1279E+07 .1279E+07 .1286E+07
.1292E+07
.2454E+07 .1826E+07 .1798E+07 .1807E+07 .1835E+07 .1871E+07 .1911E+07 .1954E+07
.1998E+07
.4330E+07 .3199E+07 .2677E+07 .2280E+07 .2322E+07 .2376E+07 .2434E+07 .2497E+07
.2559E+07
.5680E+07 .4772E+07 .3936E+07 .3452E+07 .2995E+07 .2808E+07 .2884E+07 .2967E+07
.3049E+07
.6658E+07 .5909E+07 .5206E+07 .4557E+07 .4158E+07 .3746E+07 .3391E+07 .3402E+07
.3511E+07
.7331E+07 .6850E+07 .6171E+07 .5627E+07 .5199E+07 .4814E+07 .4465E+07 .4208E+07
.3957E+07
.7986E+07 .7548E+07 .7140E+07 .6616E+07 .6256E+07 .5908E+07 .5634E+07 .5399E+07
.5128E+07
.8621E+07 .8177E+07 .7820E+07 .7560E+07 .7234E+07 .6814E+07 .6624E+07 .6385E+07
.6254E+07
.8998E+07 .8732E+07 .8453E+07 .8124E+07 .7925E+07 .7671E+07 .7529E+07 .7397E+07
.7269E+07
.5555e+08 .5555e+08 .5555e+08 .5555e+08 .5555e+08 .5555e+08 .5555e+08 .5555e+08
.5555e+08

```

Figura 40: File f725d di valori pressioni di fondo pozzo, in funzione di 11 valori di portata e 9 d'entalpia, per parametri di pozzo definiti.

La tabella in figura è stata ricavata tramite simulazioni con HOLA per un pozzo di 0.2m di diametro interno, profondo 1500m, di cui gli ultimi 500m sono uno strato produttivo; la pressione a testa pozzo è di 7 bar; si è ipotizzato che la temperatura del terreno aumenti dai 25 °C del piano campagna fino a 275.5°C a 750m di profondità. Le portate simulate variano da 0.5 a 90.5 Kg/s, mentre i 9 valori di entalpia variano fra 1000 e 1400 KJ/Kg. Gli ultimi 9 valori di pressione sono pari a 55.55 MPa, in funzione di una portata molto alta pari a 1000 Kg/s: ciò è stato fatto per evitare il fallimento delle iterazioni Newton-Raphson nel calcolo della portata di tentativo, nell'Errore: sorgente del riferimento non trovata.

Una rappresentazione grafica di tale tabella di valori è fornita in Figura 41.

Simulazione accoppiata

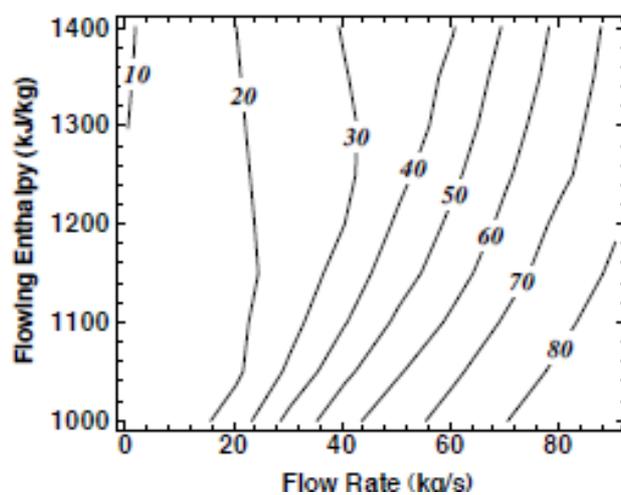


Figura 41: Rappresentazione grafica della tabella di valori di pressione di fondo pozzo in funzione di portata ed entalpia (da TOUGH2 User's Guide, Pruess, 1999)

Una stessa tabella di $P_{wb}(q,h)$ può essere utilizzata per più pozzi.

6.3 Lavoro svolto

Durante le simulazioni del problema su iTOUGH2 sono stati riscontrati problemi nella gestione del file esterno di pressioni di fondo pozzo in funzione di portata ed entalpia

Utilizzando la versione 6.2 di iTOUGH2 (Finsterle, 2005), non è stato infatti possibile realizzare l'accoppiamento esterno.

Nonostante il file di input utilizzato fosse identico, eccetto per quanto riguarda la modifica dei nomi dei blocchi, a quello riportato sul manuale di TOUGH2, nel corso della simulazione veniva riportato il seguente messaggio d'errore: “*forrtl: severe (24): end-of-file during read, unit 9, file PERCORSO_FILE_ESTERNO f725d*”.

Si è ritenuto che tale messaggio fosse generato da un errore durante la lettura del file esterno da parte di iTOUGH2.

A seguito di ripetuti tentativi di cercare quale errore fosse stato compiuto durante l'inserimento manuale dei dati nel file f725d, è stata esclusa la possibilità che i valori ed il loro formato fossero sbagliati.

L'attenzione è stata posta quindi nell'analisi del codice sorgente di iTOUGH2, in particolare nella parte di codice ove risiedono i comandi che eseguono la lettura del file esterno f725d.

iTOUGH2 ha una struttura modulare; il programma principale è iTOUGH2Wrapper, il quale richiama la subroutine iTOUGH2, che gestisce in toto le operazioni eseguite dal programma: sia il programma principale che la subroutine TOUGH2 risiedono all'interno del file sorgente *it2main.f*. Il codice è contenuto in più file, i quali vengono ora descritti brevemente:

1. **It2main.f**: contiene la subroutine principale TOUGH2, varie subroutine di inizializzazione e dimensionamento degli arrays, di lettura dei file INCON e file MESH, di calcolo di matrici Jacobiane ed Hessiane, di simulazione di MonteCarlo, di calcolo del numero di cifre significative per numeri Floating Point,
2. **It2global.f** : contiene subroutine per l'ottimizzazione globale degli algoritmi,
3. **It2gslib.f**: contiene subroutine per eseguire funzioni di kringing, creazione griglie, ecc....
4. **It2input.f**: contiene subroutine per l'assegnazione di numeri alle unità e di parametri di risoluzione numerica e per la stampa di dati di input,
5. **It2lhs.f**: contiene subroutine per l'assegnazione di parametri numerici, quale la decomposizione di Cholesky per matrici di risoluzione di sistemi lineari,
6. **It2pvm.f** : contiene subroutine per l'uso di iTOUGH2 su PVM (Parallelized Virtual Machine),
7. **It2stubs.f** : contiene subroutine raramente usate in iTOUGH2,
8. **It2user.f** : contiene subroutine per operazioni che dipendono da scelte specifiche degli utenti, quali la scelta di condizioni al contorno,
9. **It2xxx.f** : contiene subroutine per la soluzione dei minimi quadrati tramite il procedimento di Levenberg-Marquardt, per la fattorizzazione LU di matrici, per il calcolo del determinante di matrici dopo fattorizzazione LU, per l'inversione di matrici, per operazioni generiche su matrici, interpolazioni di dati, operazioni di trasformazione dei formati di date,
10. **It2cg22.f**: contiene subroutine per la risoluzione di equazioni lineari tramite gradienti coniugati,

Simulazione accoppiata

11. **It2cg1.f** : contiene subroutine per la risoluzione di equazioni lineari,
12. **T2solv.f**: contiene subroutine per la risoluzione di equazioni in TOUGH2,
13. **Wells.inc**: è un blocco contenente dati per pozzi/sorgenti,
14. **Co2tab3.f** : contiene correlazioni per il calcolo di proprietà della CO2,
15. **Meshm.f**: contiene subroutine per la creazione delle griglie,
16. **t2f.f** : vedi dopo

Nel file “*t2f.f*”, che era già presente in TOUGH del 1991, sono scritte le subroutine INPUT, RFILE e MULTI (e varie altre subroutine), le più importanti per l'analisi del problema da noi affrontato. La gestione dell'input della simulazione è infatti operata dalle subroutine INPUT e RFILE. La subroutine INPUT scrive i file esterni di input (tra cui il file GENER), nel caso in cui questi siano forniti dall'utente solamente all'interno del file *.inp. RFILE legge i file di input nei file esterni, tra cui quelli generati dalla subroutine INPUT.

E' all'interno della subroutine RFILE che avviene il riconoscimento dell'opzione f-type e la successiva lettura della tabella esterna di correlazione fra portata ed entalpia con pressioni di fondo pozzo.

E' in tale subroutine che è stato riscontrato un errore nella gestione della lettura del file esterno f725d: dopo la lettura, tale file non viene chiuso, provocando l'errore citato in precedenza. E' stata aggiunta la chiusura del file esterno, tramite l'aggiunta di una riga contenente il comando *CLOSE(9)* alla subroutine RFILE, ove 9 sta per l'unità associata al file esterno f725d. Il codice FORTRAN può essere consultato sotto, ove è stata evidenziato sia il comando *CLOSE* aggiunto, sia un'ulteriore parte del codice modificata, discussa in seguito.

```
C*****READ SINKS/SOURCES FROM FILE GENER.*****
```

```
C
```

```
REWIND 3
NOGN=0
READ(3,5020,END=1415,IOSTAT=IOS) DENT,IDUM
IF (IDUM.NE.0.AND.IOS.EQ.0) IELL=IDUM
NGL=0
NGL3=0
KF=0
KIJ=0
```

```
CFGENER=('Ax,A5,Iyy,5X,A4,A1,3G10.4,I2')
WRITE(CFGENER(3:3),'(I1)' IELL
WRITE(CFGENER(9:10),'(I2)' 25-IELL
```

```
C
```

```
1483 CONTINUE
IF(NOGN.LT.MAXSS-1) GOTO 44
WRITE(66,45) MAXSS
45 FORMAT(' NUMBER OF SINKS/SOURCES SPECIFIED IN DATA BLOCK "GENER",
&' EXCEEDS ALLOWABLE MAXIMUM OF ',I4/
&' INCREASE PARAMETER *MAXSS* IN maxsize.inc, AND RECOMPILE//
&' ----- SKIP FLOW SIMULATION -----')
```

Simulazione accoppiata

```

IS=IS+1
RETURN
44 CONTINUE
C
N=NOGN+1
IF (IDEOS.EQ.99) THEN
  READ(3,CFGENER) ELEG(N),SOURCE(N),LTABG(N),
&      TYP,ITABG(N),G(N),EG(N),HG(N),NTRQ
  IF(ELEG(N):(5).EQ.'+++ ') GOTO 1482
  IF(ELEG(N):(IELL).EQ.CBLANK(:IELL)) GOTO 1406
  IF (NTRQ.NE.NTRACR) THEN
    WRITE(66,6011) NTRQ,SOURCE(N),NTRACR
6011 FORMAT(//,20('ERROR-'),//,T33,
&      ' SIMULATION ABORTED',/,
&      T11,'The # of tracers NTRQ = ',i2,' in source/sink "',
&      a,'" differs from NTRACR = ',i2,
&      '. Reset NTRQ in GENER',
&      //,T33,' CORRECT AND TRY AGAIN',
&      //,20('ERROR-'))
    STOP
  ENDIF
ELSE
  READ(3,CFGENER) ELEG(N),SOURCE(N),LTABG(N),
&      TYP,ITABG(N),G(N),EG(N),HG(N)
C
ENDIF
TYPE(N)=TYP//ITABG(N)
TYPEN=TYPE(N)
TYP=TYPEN(1:4)
TY1=TYPEN(1:1)
IF(TY1.EQ.CHAR(70).OR.TY1.EQ.CHAR(102)) THEN
C.....COME HERE WHEN FIRST CHARACTER OF A TYPE DESIGNATION
C IS AN UPPER OR LOWER-CASE F; SIGNIFYING A WELL ON
C DELIVERABILITY WITH FLOWING WELLBORE PRESSURE CORRECTION
C
DO 140 I=1,5
  IF(TYPEN(I:I).EQ.' ') THEN
    FFI=TYPEN(1:I-1)
    GOTO 141
  ENDIF
140 CONTINUE
  FFI=TYPEN
141 CONTINUE
C
OPEN(9,FILE=FFI,STATUS='OLD',ERR=142)
GOTO 149
C.....IF FILE SPECIFIED IN THE F-TYPE GENER ITEM IS NOT
C AVAILABLE; IGNORE THE ITEM

```

Simulazione accoppiata

```
142 CONTINUE
  WRITE(66,138) FFI
138 FORMAT(' INVALID F-TYPE GENER ITEM; FILE *',A5,'* IS',
  X' NOT AVAILABLE')
  GOTO 139
C
149 CONTINUE
C.....COME HERE FOR VALID F-TYPE ITEM
  LCOM(N)=NK1+2
  PRDIND(N)=G(N)
C
C.....CHECK WHETHER THE CURRENT WELLBORE PRESSURE FILE HAS
C  ALREADY BEEN READ.
  IF(KF.GE.1) THEN
    DO 143 K=1,KF
    IF(FFI.EQ.FNAM(K)) GOTO 144
143  CONTINUE
    GOTO 145
144  CONTINUE
C.....ASSIGN INDEX OF PREVIOUSLY READ WELLBORE PRESSURE
C  FILE TO CURRENT GENER ITEM
  NFTAB(N)=K
  GOTO 1483
C
  ENDIF
C
145 CONTINUE
C.....READ NEW WELLBORE PRESSURE FILE
  KF=KF+1
  FNAM(KF)=FFI
  NFTAB(N)=KF
  READ(9,146) TITL
146  FORMAT(A80)
  READ(9,147) NG,NH
  IFTIT(KF)=NG
  JFTIT(KF)=NH
147  FORMAT(2I5)
  READ(9,148) (PW(KIJ+I),I=1,NG)
148  FORMAT(8E10.4)
  READ(9,148) (PW(KIJ+NG+J),J=1,NH)
  DO136 I=1,NG
136 READ(9,148) (PW(KIJ+NG+NH+(I-1)*NH+J),J=1,NH)
  IJF(KF)=KIJ
  KIJ=KIJ+NG+NH+NG*NH
  ENDIF
```

CLOSE(9)

Simulazione accoppiata

```

C
C.....END OF INITIALIZING F-TYPE GENER ITEMS

  IF (IDEOS.EQ.99) THEN
    IF (NTRQ.GT.0.AND.G(N).GT.0.0D0.AND.LTABG(N).LE.1)
    &   READ(3,'(4E20.13)') (TMFQ(N,I), I=1,NTRQ)

  END IF
  IF(ELEG(N)(:5).EQ.'+++ ') GOTO 1482
  IF(ELEG(N)(:IELL).EQ.CBLANK(:IELL)) GOTO 1406
  NOGN=NOGN+1

```

```

C
  NGIND(N)=NGL

```

LCOM(N)=0

```

IF(TYP.EQ.'WATR') TYP='COM2'
IF(TYP.EQ.'NACL') TYP='COM1'
IF(TYP.EQ.'HEAT') LCOM(N)=NK1
IF(TYP.EQ.'MASS') LCOM(N)=1
IF(TYP.EQ.'WATE') LCOM(N)=1
IF(TYP.EQ.'AIR ') LCOM(N)=2
IF(TYP.EQ.'SALT') LCOM(N)=3
IF(TYP(:3).EQ.'COM') THEN
  READ(TYP(4:4),'(I1)') LCOM(N)
ELSE IF(TYP(:2).EQ.'CO') THEN
  READ(TYP(3:4),'(I2)') LCOM(N)
ENDIF
IF(TYP.EQ.'DELV') LCOM(N)=NK1+1
IF(TYP.EQ.'VOL.') LCOM(N)=NK1+2

```

CBuB Some new well types

```

IF((TYP.EQ.'RECH').AND.(G(N).GT.0.0D0).AND.
1 (IABS(LTABG(N)).LE.1)) THEN

```

```

C   RECharge boundary condition. Inflow only.

```

```

C   q = a(p-pr)

```

```

C   G(N) is a (positive)

```

```

C   EG(N) is the enthalpy for the inflow

```

```

C   HG(N) is pr

```

```

C   Flow zero for negative time

```

```

C   At time 0, set HG(N) to be the block pressure

```

```

  LCOM(N)=NK1+3

```

```

  PRDIND(N)=G(N)

```

```

ENDIF

```

```

IF((TYP.EQ.'DELG').AND.(G(N).LT.0.0D0).AND.
1 (IABS(LTABG(N)).LE.1)) THEN

```

```

1 (IABS(LTABG(N)).LE.1)) THEN

```

```

C   Geothermal deliverability. Production only.

```

```

C   G(N) is the steady state flow rate (<0)

```

```

C   EG(N) is the cut-off pressure

```

Simulazione accoppiata

```
C   HG(N) is the productivity index (positive)
C   Flow is G(N) for negative time
C   At time 0, HG(N) is chosen so that  $G(N)=HG(N)*(p-EG(N))$ 
    LCOM(N)=NK1+4
    PWB(N)=EG(N)
    HG(N)=1.0D0
    ENDIF
```

È stato compilato un nuovo file eseguibile, chiamato “VB2.exe”, contenente l'istruzione CLOSE nel codice sorgente.

Ripetendo la simulazione con l'opzione f-type, con VB2.exe, non si è presentato alcun errore di lettura, tuttavia il file di output generato conteneva errori.

In particolare si presentava il messaggio “ *IGNORE UNKNOWN GENERATION OPTION *f725* AT ELEMENT * 1 1* SOURCE *wel 1* ”*, che indica l'impossibilità di riconoscere la presenza di un pozzo, sul quale si vuole sfruttare la possibilità di accoppiamento esterno.

Si è dunque cercato all'interno del codice ove potesse essere la causa di tale ulteriore errore; è stato identificato un solo punto nel quale viene eseguita la stampa di tale messaggio; tale porzione di codice è riportata qui:

```
IF (LCOM(N).NE.0) GOTO 13
  139 WRITE(66,14) TYP,ELEG(N):(IELL),SOURCE(N)
    WRITE(99,14) TYP,ELEG(N):(IELL),SOURCE(N)
  14 FORMAT(' IGNORE UNKNOWN GENERATION OPTION *',A4,'* AT ELEMENT *',
    1 A,'* SOURCE *',A5,'*')
    NOGN=NOGN-1
    GOTO 1483
  13 CONTINUE
```

La scrittura del messaggio è eseguita all'interno di un ciclo IF, a condizione che l'array LCOM(N), ove N è un contatore, sia un array nullo.

E' stato quindi analizzato ove venisse l'assegnazione di valori a tale array, constatando la presenza del comando LCOM(N)=0 a monte del ciclo IF, ma a valle del riconoscimento dell'uso dell'opzione f-type e della lettura del file esterno: ciò comporta che sebbene il file esterno venga letto correttamente, iTOUGH2 è costretto ad interrompere la simulazione con accoppiamento esterno e stampa il messaggio d'errore “ *IGNORE UNKNOWN GENERATION OPTION *f725* AT ELEMENT * 1 1* SOURCE *wel 1* ”*.

Tale struttura del programma non inficiava tuttavia sull'esecuzione della simulazione con opzione DELV, in quanto il riconoscimento dell'opzione DELV modifica il valore di LCOM, a valle dell'assegnazione dei valori 0 all'array.

E' stato quindi rimossa la riga contenente il comando LCOM(N)=0.

Tale modifica ha permesso di evitare il messaggio di errore nel file di output, consentendo un corretto riconoscimento del pozzo in emungimento.

La lettura del file di output, ha tuttavia mostrato come i valori delle variabili di tutti i blocchi restassero costanti per l'intero periodo della simulazione, indicando che, nonostante la modifica del codice apportata, non venisse gestita adeguatamente la presenza di un pozzo e l'accoppiamento esterno.

Simulazione accoppiata

A seguito di tali tentativi, è stato ritenuto utile il consulto dello sviluppatore di iTOUGH2, dott. Stefan Finsterle, di LBNL, al quale sono stati inviati i file di input utilizzati e sono state illustrate le varie problematiche incontrate nella sperimentazione dell'accoppiamento esterno di iTOUGH2.

Il dott. Finsterle ha inviato il codice sorgente della versione 6.5 di iTOUGH2: dopo una breve procedura di verifica, è stato accertato che tale versione esegue in modo corretto l'accoppiamento esterno.

Il dott. Finsterle ha affermato di avere dovuto appositamente modificare il codice sorgente, sostituendo un comando REWIND con un CLOSE.

Dall'analisi del codice della versione 6.5 si evince inoltre come, rispetto alla versione 6.2, sia stata rimossa l'assegnazione LCOM(N)=0, così come realizzato nella versione utilizzata dal DICAM.

Le modifiche apportate nella versione 6.5 appaiono dunque equivalenti a quelle eseguite dal dipartimento DICAM.

La presenza di notevoli differenze in molti punti del codice fra la versione 6.2 in uso al DICAM e la 6.5, ha reso impossibile determinare la causa che impediva alla versione di iTOUGH2 6.2, modificata presso il DICAM, di funzionare correttamente con accoppiamento esterno.

Si riporta la parte di codice della versione 6.5 di iTOUGH2, che opera correttamente la lettura del file esterno, per mostrare le differenze dalla versione precedente:

```
C*****READ SINKS/SOURCES FROM FILE GENER.*****
C
  NUGEN=GETFREEUNIT()
  OPEN (NUGEN,FILE=TMPDIR(:LTD)//CDIR(1:1)//'GENER')
  NOGN=0
  READ(NUGEN,5020,END=1415,IOSTAT=IOS) DENT,IDUM
  IF (IDUM.GE.5.AND.IDUM.LE.9.AND.IOS.EQ.0) IELL=IDUM
  NGL=0
  NGL3=0
  KF=0
  KIJ=0
CYJB
  IGC=0
  IELC=1
  IF(IGSPAR.NE.0) THEN
    CFGENER2=(Ax,A5,Iyy,5X,A4,A1,3E10.4,E10.4)'
    WRITE(CFGENER2(3:3),'(I1)') IELL
    WRITE(CFGENER2(9:10),'(I2)') 25-IELL
    GOTO1483
  ENDIF
  CFGENER=(Ax,A5,Iyy,5X,A4,A1,3E10.4,I2)'
CYJE
  WRITE(CFGENER(3:3),'(I1)') IELL
  WRITE(CFGENER(9:10),'(I2)') 25-IELL
C
1483 CONTINUE
```

Simulazione accoppiata

```

IF(NOGN.LT.MAXSS-1) GOTO 44
WRITE(66,45) MAXSS
45 FORMAT(' NUMBER OF SINKS/SOURCES SPECIFIED IN DATA BLOCK "GENER"',
&' EXCEEDS ALLOWABLE MAXIMUM OF ',I4/
&' INCREASE PARAMETER *MAXSS* IN maxsize.inc, AND RECOMPILE'//
&' ----- SKIP FLOW SIMULATION -----')
IS=IS+1
CLOSE(NUGEN)
RETURN
44 CONTINUE
C
N=NOGN+1
IF (IDEOS.EQ.99) THEN
  READ(NUGEN,CFGENER) ELEG(N),SOURCE(N),LTABG(N),
&      TYP,ITABG(N),G(N),EG(N),HG(N),NTRQ
  IF(ELEG(N)(:5).EQ.'+++ ') GOTO 1482
  IF(ELEG(N)(:IELL).EQ.CBLANK(:IELL)) GOTO 1406
  IF (NTRQ.NE.NTRACR) THEN
    WRITE(66,6011) NTRQ,SOURCE(N),NTRACR
6011 FORMAT(//,20('ERROR-'),//,T33,
&      ' SIMULATION ABORTED',/,
&      T11,'The # of tracers NTRQ = ',i2,' in source/sink "',
&      a,'" differs from NTRACR = ',i2,
&      '. Reset NTRQ in GENER',
&      //,T33,' CORRECT AND TRY AGAIN',
&      //,20('ERROR-'))
    STOP
  ENDIF
CYJB
ELSE IF (IGSPAR.NE.0) THEN
  READ(NUGEN,CFGENER2) ELEG(N),SOURCE(N),LTABG(N),
&      TYP,ITABG(N),G(N),EG(N),HG(N),GMOD(N)
  IF(ELEG(N)(:5).EQ.'+++ ') GOTO 1482
  IF(ELEG(N)(:IELL).EQ.CBLANK(:IELL)) GOTO 1406
  IF(GMOD(1).EQ.0.0D0) GMOD(N)=0.0D0
  IF(NGSPAR.NE.0.AND.NEWFORWARDRUN) THEN
    IF(TYP(:3).EQ.'COM') THEN
      IELC=1
1303  CONTINUE
      IF (ELEG(N).EQ.ELEM(IELC)) THEN
        IGC=IGC+1
        IF(IGC.GT.NZGM) IGC=1
        GMOD(N)=-ABS(ZGM(IGC,MATX(IELC)))
      ELSE
        IELC=IELC+1
        GOTO 1303
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF

```

Simulazione accoppiata

```

        ENDIF
    CYJE
        ELSE
            READ(NUGEN,CFGENER) ELEG(N),SOURCE(N),LTABG(N),
            &          TYP,ITABG(N),G(N),EG(N),HG(N)
    CYJB
        IF(ELEG(N)(:5).EQ.'+++ ') GOTO 1482
        IF(ELEG(N)(:IELL).EQ.CBLANK(:IELL)) GOTO 1406
    CYJE
        ENDIF
    C
    C --- Read sink/source region information
    C
        IF (SOURCE(N)(:3).EQ.'XYZ') THEN
            LSSREG=.TRUE.
            CALL READREGION(NUGEN,ISSREG(N))
        ENDIF
    C
        TYPE(N)=TYP//ITABG(N)
        TYPEN=TYPE(N)
        TYP=TYPEN(1:4)
        TY1=TYPEN(1:1)
        IF(TY1.EQ.CHAR(70).OR.TY1.EQ.CHAR(102)) THEN
    C.....COME HERE WHEN FIRST CHARACTER OF A TYPE DESIGNATION
    C  IS AN UPPER OR LOWER-CASE F; SIGNIFYING A WELL ON
    C  DELIVERABILITY WITH FLOWING WELLBORE PRESSURE CORRECTION
    C
        DO 140 I=1,5
            IF(TYPEN(I:I).EQ.' ') THEN
                FFI=TYPEN(1:I-1)
                GOTO 141
            ENDIF
        140 CONTINUE
            FFI=TYPEN
        141 CONTINUE
    C
        NUWELL=GETFREEUNIT()
        OPEN(NUWELL,FILE=FFI,STATUS='OLD',ERR=142)
        GOTO 149
    C.....IF FILE SPECIFIED IN THE F-TYPE GENER ITEM IS NOT
    C  AVAILABLE; IGNORE THE ITEM
        142 CONTINUE
            WRITE(66,138) FFI
        138 FORMAT(' INVALID F-TYPE GENER ITEM; FILE *,A5,* IS',
            X' NOT AVAILABLE')
            GOTO 139
    C
        149 CONTINUE

```

Simulazione accoppiata

```
C.....COME HERE FOR VALID F-TYPE ITEM
      LCOM(N)=NK1+2
      PRDIND(N)=G(N)
C
C.....CHECK WHETHER THE CURRENT WELLBORE PRESSURE FILE HAS
C  ALREADY BEEN READ.
      IF(KF.GE.1) THEN
          DO 143 K=1,KF
          IF(FFI.EQ.FNAM(K)) GOTO 144
143     CONTINUE
          GOTO 145
144     CONTINUE
C.....ASSIGN INDEX OF PREVIOUSLY READ WELLBORE PRESSURE
C  FILE TO CURRENT GENER ITEM
      NFTAB(N)=K
      GOTO 1483
C
      ENDIF
C
      145 CONTINUE
C.....READ NEW WELLBORE PRESSURE FILE

      KF=KF+1
      FNAM(KF)=FFI
      NFTAB(N)=KF
      READ(NUWELL,146) TITL
146   FORMAT(A80)
      READ(NUWELL,147) NG,NH
      IFTIT(KF)=NG
      JFTIT(KF)=NH
147   FORMAT(2I5)
      READ(NUWELL,148) (PW(KIJ+I),I=1,NG)
148   FORMAT(8E10.4)
      READ(NUWELL,148) (PW(KIJ+NG+J),J=1,NH)
      DO136 I=1,NG
136   READ(NUWELL,148) (PW(KIJ+NG+NH+(I-1)*NH+J),J=1,NH)
      IJF(KF)=KIJ
      KIJ=KIJ+NG+NH+NG*NH
      CLOSE(NUWELL)
      ENDIF
C
C.....END OF INITIALIZING F-TYPE GENER ITEMS

      IF (IDEOS.EQ.99) THEN
          IF (NTRQ.GT.0.AND.G(N).GT.0.0D0.AND.LTABG(N).LE.1)
&      READ(NUGEN,'(4E20.13)') (TMFQ(N,I), I=1,NTRQ)

      ENDIF
```

Simulazione accoppiata

```

CYJ IF(ELEG(N)(:5).EQ.'+++ ') GOTO 1482
CYJ IF(ELEG(N)(:IELL).EQ.CBLANK(:IELL)) GOTO 1406
  NOGN=NOGN+1
C
  NGIND(N)=NGL
  IF(TYP.EQ.'WATR') TYP='COM2'
  IF(TYP.EQ.'NACL') TYP='COM1'
  IF(TYP.EQ.'HEAT') LCOM(N)=NK1
  IF(TYP.EQ.'MASS') LCOM(N)=1
  IF(TYP.EQ.'WATE') LCOM(N)=1
  IF(TYP.EQ.'AIR ') LCOM(N)=2
  IF(TYP.EQ.'SALT') LCOM(N)=3
  IF(TYP(:3).EQ.'COM') THEN
    READ(TYP(4:4),'(I1)') LCOM(N)
  ELSE IF(TYP(:2).EQ.'CO') THEN
    READ(TYP(3:4),'(I2)') LCOM(N)
  ENDIF
  IF(TYP.EQ.'DELV') LCOM(N)=NK1+1
  IF(TYP.EQ.'VOL.') LCOM(N)=NK1+2
CBuB Some new well types
  IF((TYP.EQ.'RECH').AND.(G(N).GT.0.0D0).AND.
  1 (IABS(LTABG(N)).LE.1)) THEN
C   RECHarge boundary condition. Inflow only.
C    $q = a(p-pr)$ 
C   G(N) is a (positive)
C   EG(N) is the enthalpy for the inflow
C   HG(N) is pr
C   Flow zero for negative time
C   At time 0, set HG(N) to be the block pressure
  LCOM(N)=NK1+3
  PRDIND(N)=G(N)
  ENDIF
  IF((TYP.EQ.'DELG').AND.(G(N).LT.0.0D0).AND.
  1 (IABS(LTABG(N)).LE.1)) THEN
C   Geothermal deliverability. Production only.
C   G(N) is the steady state flow rate (<0)
C   EG(N) is the cut-off pressure
C   HG(N) is the productivity index (positive)
C   Flow is G(N) for negative time
C   At time 0, HG(N) is chosen so that  $G(N)=HG(N)*(p-EG(N))$ 
  LCOM(N)=NK1+4
  PWB(N)=EG(N)
  HG(N)=1.0D0
  ENDIF
CBuE
CRNT
  IF (IDEOS.EQ.77.AND.TYP.EQ.'AIR ') LCOM(N)=5
CRNT

```

Simulazione accoppiata

```

C
  IF (LCOM(N).NE.0) GOTO 13
139 WRITE(66,14) TYP,ELEG(N)(:IELL),SOURCE(N)
  WRITE(99,14) TYP,ELEG(N)(:IELL),SOURCE(N)
14 FORMAT(' IGNORE UNKNOWN GENERATION OPTION *',A4,'* AT ELEMENT *',
  1 A,'* SOURCE *',A5,'*')
  NOGN=NOGN-1
  GOTO 1483
13 CONTINUE
C
  IF(LCOM(N).EQ.NK1+1) GOTO 11
  GOTO 10
11 CONTINUE
C-----COME HERE FOR TYP = DELV, IN WHICH CASE A PRODUCTIVITY INDEX
C (PRDIND) AND A FLOWING WELLBORE PRESSURE (PWB) ARE SPECIFIED.
  PRDIND(N)=G(N)
  PWB(N)=EG(N)
10 CONTINUE
  IF(TYP.EQ.'VOL.') GOTO 12
  GOTO 20
C
12 CONTINUE
C-----COME HERE IF VOLUMETRIC PRODUCTION RATE IS SPECIFIED.
  GVOL(N)=G(N)
20 CONTINUE
C
  LTABA=IABS(LTABG(N))
CGESALIF(LTABA.LE.1.OR.TYPE.EQ.'DELV') GOTO1483
  IF(LTABA.LE.1.OR.(TYPE.EQ.'DELV'.AND.LTABG(N).GE.0)) GOTO1483
  IF(NGL+LTABA.LE.MAXSS*MAVTAB) GOTO 46
  WRITE(66,47) MAXSS*MAVTAB
47 FORMAT(' NUMBER OF TABULAR GENERATION DATA SPECIFIED IN DATA',
  &' BLOCK "GENER" EXCEEDS ALLOWABLE MAXIMUM OF ',I5/
  &' INCREASE PARAMETER *MAVTAB* IN maxsize.inc, AND RECOMPILE//
  &' ----- SKIP FLOW SIMULATION -----')
  IS=IS+1
  CLOSE(NUGEN)
  RETURN
46 CONTINUE
C
  READ(NUGEN,36) (F1(NGL+L),L=1,LTABA)
  READ(NUGEN,36) (F2(NGL+L),L=1,LTABA)
  IF (IDEOS.EQ.99) THEN
    NGG33=NGL3+LTABA*NTRACR
    IF(NGG33.GT.MAXSS*MAVTAB) THEN
      WRITE(66,47) MAXSS*MAVTAB
      STOP
    END IF
  
```

Simulazione accoppiata

```

IF(NTRACR.GT.0) THEN
  DO I5=1,NTRACR
    IGG=NGL3+(i5-1)*LTABA
    READ(NUGEN,36) (F3(igg+i6), i6 = 1,LTABA)
  END DO
END IF
NGL3=NGL3+LTABA
ELSE
  IF(ITABG(N).NE.' ') READ(NUGEN,36) (F3(NGL+L),L=1,LTABA)
END IF
NGL=NGL+LTABA
GOTO 1483
1482 CONTINUE
IF(NOGN.EQ.0) GOTO 1415
C
  READ(NUGEN,'(A)',IOSTAT=IOS) LINE
  IF (LINE(5:5).NE.' ' .AND.LINE(6:6).EQ.' ') THEN
C --- GENER probably created using TOUGH2
  CFORMAT='(16I5)'
  ELSE
C --- GENER probably created using iTOUGH2
  CFORMAT='(10I8)'
  ENDIF
  BACKSPACE(NUGEN)
  READ(NUGEN,CFORMAT) (NEXG(N),N=1,NOGN)
  GOTO1415
C
1406 BACKSPACE NUGEN
  WRITE(NUGEN,1508)
  DO37 N=1,NOGN
    EL=ELEG(N)
    IF (SOURCE(N)(:3).EQ.'MAT'.OR.
& SOURCE(N)(:3).EQ.'XYZ') THEN
      ELEG(N)='N/A '
      NEXG(N)=0
      GOTO 37
    ENDIF
  DO38 J=1,NEL
    IF(ELEM(J)(:IELL).NE.EL(:IELL)) GOTO38
    NEXG(N)=J
    GOTO37
38 CONTINUE
  NEXG(N)=0
  WRITE(66,128) EL(:IELL),N
  IF (ICALL.EQ.1) WRITE(99,128) EL(:IELL),N
128 FORMAT(30H REFERENCE TO UNKNOWN ELEMENT ,A,10H AT SOURCE,I5,
&' --- WILL IGNORE SOURCE')
37 CONTINUE

```

```

C
 39 WRITE(NUGEN,1505) (NEXG(N),N=1,NOGN)
    ENDFILE NUGEN
1415 CONTINUE
CFiB
  IF (ICALL.EQ.1) THEN
    DO 1101 I=1,NOGN
      IF (IWELLG(I).EQ.0) THEN
        MWELLG=MWELLG+1
        SWELLG(MWELLG)=SOURCE(I):(3)
        DO 1102 J=1,NOGN
          IF (SOURCE(J):(3).EQ.SOURCE(I):(3)) THEN
            IWELLG(J)=MWELLG
            NWELLG(MWELLG)=NWELLG(MWELLG)+1
            QWELLG(MWELLG)=QWELLG(MWELLG)+G(J)
          ENDIF
        1102 CONTINUE
      ENDIF
      IF (QWELLG(IWELLG(I)).EQ.0.0D0) THEN
        AWELLG(I)=0.0D0
      ELSE
        AWELLG(I)=G(I)/QWELLG(IWELLG(I))
      ENDIF
    1101 CONTINUE
  ENDIF

```

6.4 Risultati

Utilizzando l'eseguibile ottenuto compilando la versione 6.5 del codice sorgente, fornitoci dal dott. Finsterle, è stato possibile utilizzare l'accoppiamento esterno di iTOUGH2 con il simulatore di pozzo HOLA e confrontarne i risultati con il caso a pressione costante, pari a 57,37 (bar).

I risultati ottenuti per il blocco della griglia dove è situato il pozzo, sono analoghi a quelli riportati sul manuale di TOUGH2 (Figura 43) e sono riportati in Figura 42: un confronto numerico non è possibile poiché i dati dei vari parametri sono riportati sul manuale di TOUGH2 su un diagramma, senza che vi siano valori espliciti dei risultati.

Simulazione accoppiata

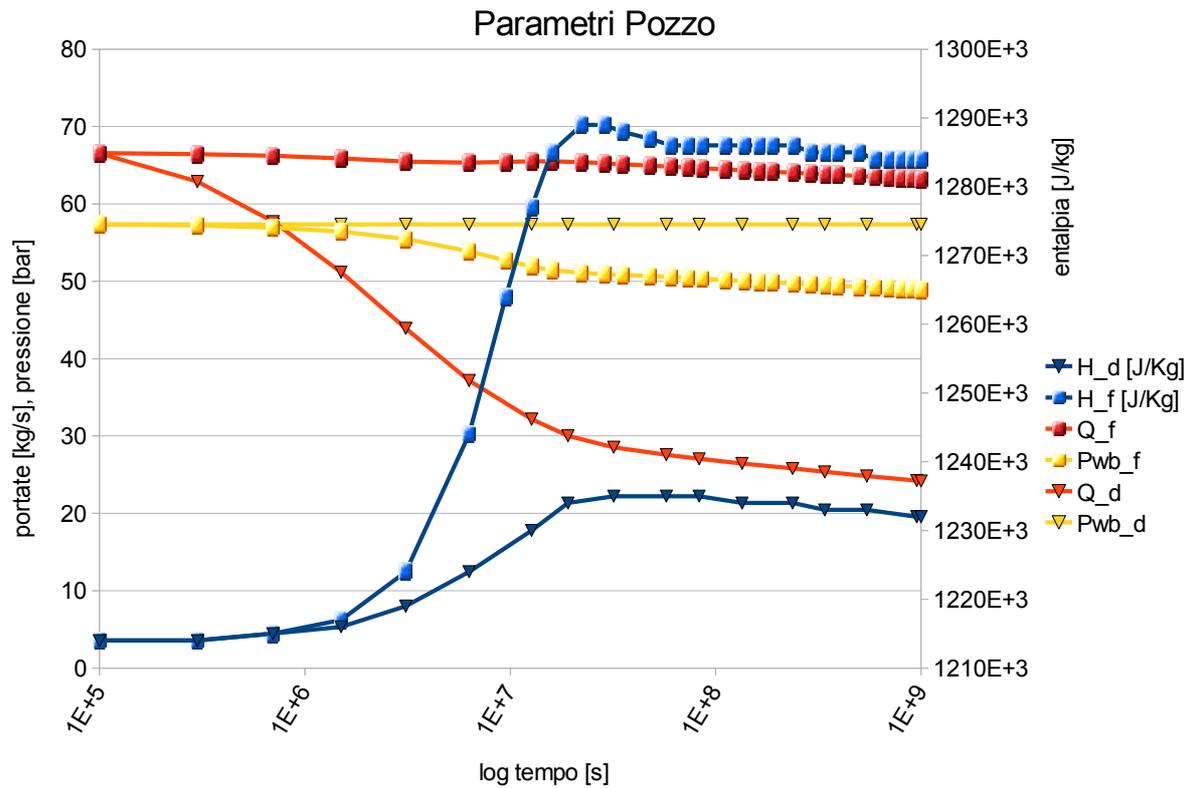


Figura 42: Confronto globale fra uso dell'opzione DELV e F-type, per il blocco del pozzo, sul simulatore di bacino iTOUGH2

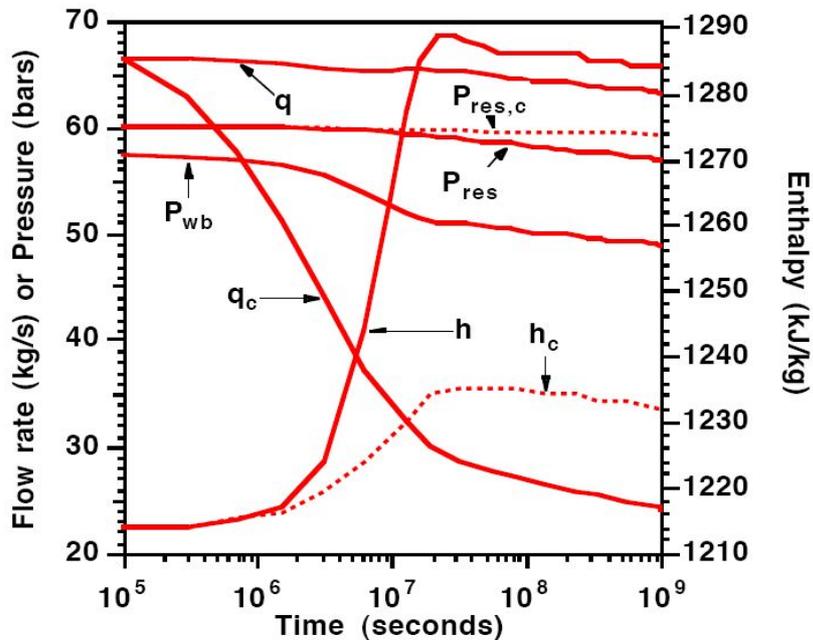


Figura 43: Confronto globale fra uso dell'opzione DELV e F-type, per il blocco del pozzo, sul simulatore di bacino TOUGH2, da TOUGH2 User's Guide, Pruess 1999

Simulazione accoppiata

E' indubbio tuttavia notare evoluzioni temporali molto simili.

I risultati ottenuti con iTOUGH2 differiscono da quelli ottenuti con TOUGH2 essenzialmente per il valore di pressione di reservoir, nel caso non si consideri l'accoppiamento esterno; con iTOUGH2 infatti la pressione del reservoir rimane costante e pari a quella iniziale di 57.37 (bar), mentre TOUGH2 prevede una pressione iniziale di circa 60 (bar) ed un lieve calo nel periodo finale della simulazione.

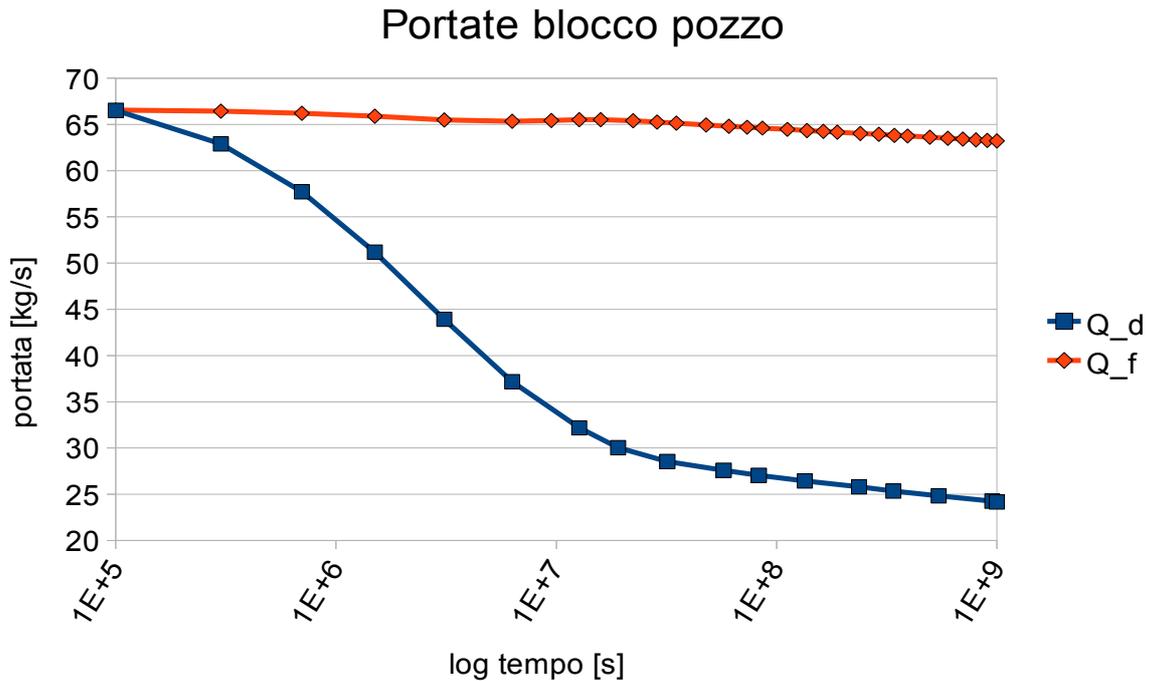


Figura 44: Confronto fra i valori di portata nel blocco del pozzo fra l'uso dell'opzione DELV e f-type

Per quanto riguarda il confronto delle portate fra l'uso dell'opzione DELV e F-type, è facile osservare in Figura 44 come la portata abbia valori tre volte maggiori nel caso di accoppiamento esterno. La portata iniziale è uguale in entrambi i casi, ma la diversa evoluzione del bacino si manifesta già dopo i primi passi temporali; nel caso di uso dell'opzione DELV, la portata continua a decrescere per tutto il tempo della simulazione, indicando che il sistema non arriva allo stato stazionario. Si può cogliere tuttavia una linea di tendenza delle portate a stabilizzarsi su valori compresi fra 25 e 20 Kg/s. La portata simulata tramite l'opzione f-type ha invece scarse variazioni, che variano meno di 5 Kg/s, su tutto l'arco di tempo coperto dalla simulazione, ovvero poco meno di 32 anni.

Mediante l'opzione f-type vengono simulati valori di portata emunta superiore, permettendo di sostenere una coltivazione del giacimento più produttiva.

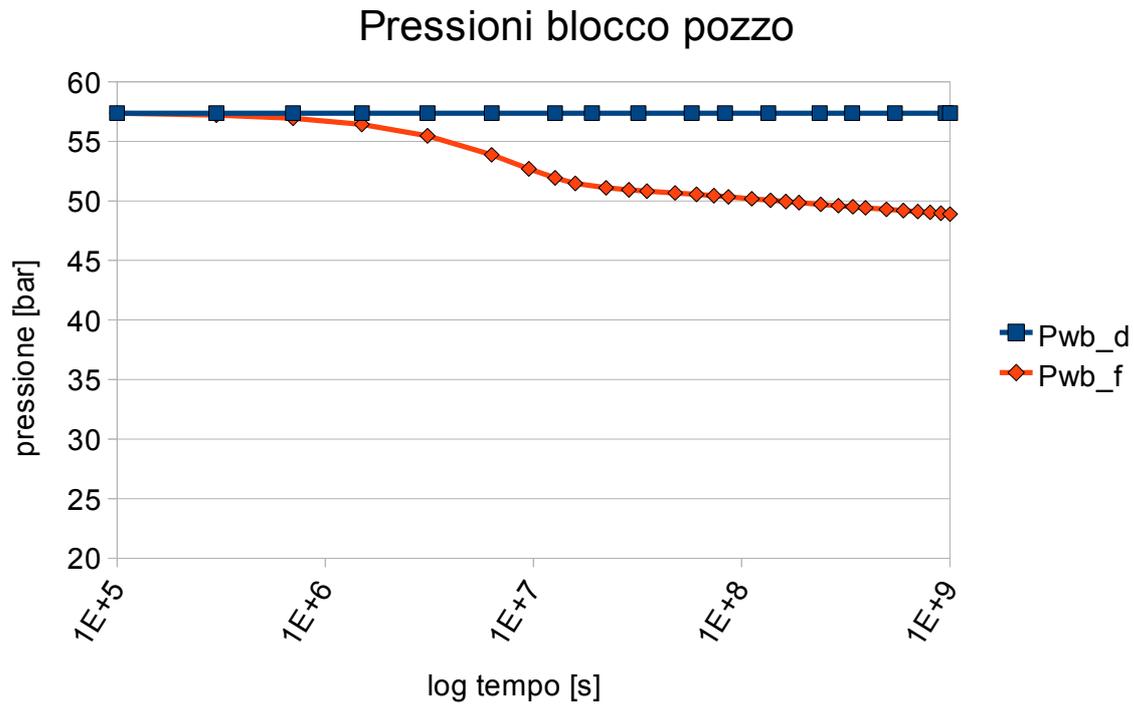


Figura 45: Confronto fra i valori di pressione a fondo pozzo fra l'uso dell'opzione DELV e f-type

Maggiori valori di portata nel caso di uso dell'opzione f-type si verificano nonostante vi sia un calo della pressione del reservoir, come illustrato in Figura 45: in tale figura si evince che, mentre con l'opzione DELV la BHP rimane costante e pari al valore iniziale di 57,37 (bar), con l'opzione f-type la pressione passa dai 57,37 (bar) a valori inferiori ai 50 (bar).

E' probabilmente proprio il calo di pressione nel reservoir che provoca l'aumento di portata, in quanto viene indotta la vaporizzazione di acqua, con conseguente aumento della portata di vapore e dell'entalpia della miscela.

Riscontro di tale comportamento è evidenziato dal grafico dell'evoluzione temporale del rapporto fra portata di vapore e portata totale, riportato in Figura 46. Si osserva come, nel caso di impiego dell'opzione f-type, la frazione di gas della portata emunta sia molto superiore rispetto all'uso dell'opzione DELV; dopo circa 10^7 s la frazione di gas aumenta in entrambe le simulazioni, ma mentre raggiunge valori superiori al 5%, nel caso dell'opzione f-type, utilizzando DELV la frazione rimane inferiore al 2%.

E' interessante notare la forte correlazione fra variazione temporale dell'entalpia, in Figura 47, e rapporto fra portata di gas e portata di liquido.

Simulazione accoppiata

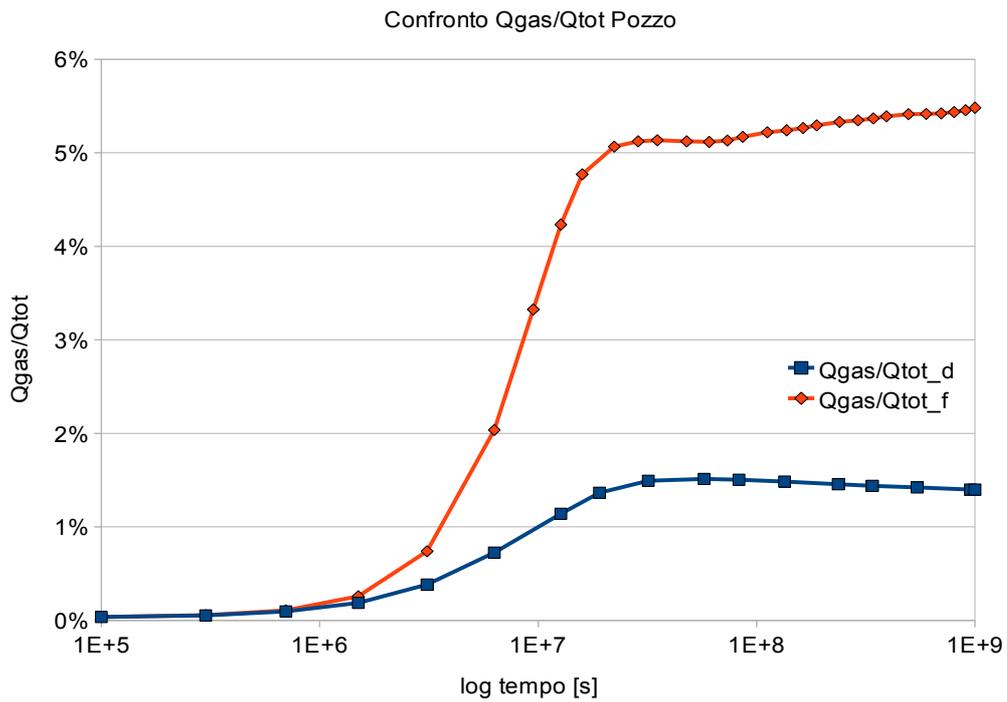


Figura 46: Confronto dei valori del rapporto fra portata di vapore e portata totale a fondo pozzo, fra l'uso dell'opzione DELV e f-type

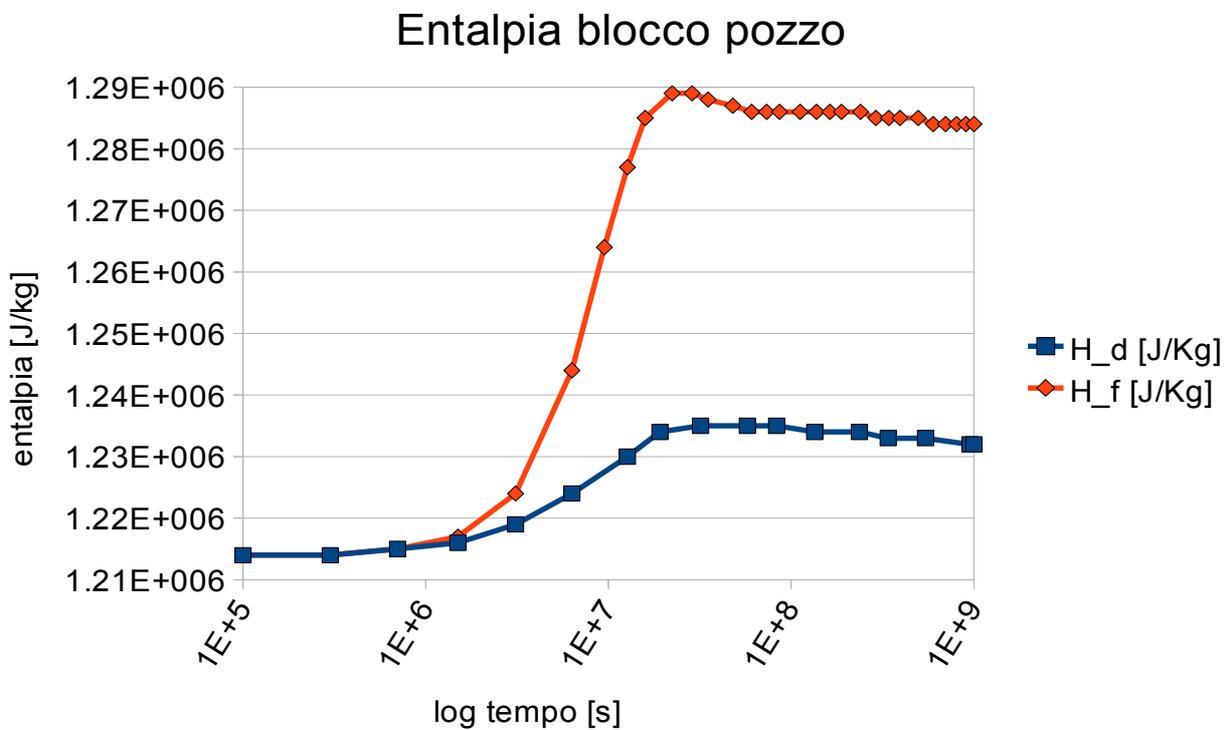


Figura 47: Confronto del valore di entalpia a fondo pozzo, fra l'uso dell'opzione DELV e f-type

7 Conclusioni

La domanda crescente d'energia a livello mondiale, congiunta alla richiesta di produzione d'energia da fonti rinnovabili richiede uno sfruttamento delle risorse che sia sempre più intensa, efficiente ma che tenga conto anche della sostenibilità nel tempo delle stesse.

La produzione d'energia da fonte geotermoelettrica, benché rappresenti solamente una quota marginale dell'intera produzione elettrica mondiale, in alcuni paesi, quali l'Islanda è divenuta una delle due fonti principali d'energia elettrica. Nonostante non tutti i paesi dispongano delle condizioni geologiche adatte ad un impiego su larga scala di tali risorse, sono ancora molti i bacini geotermici che possono essere coltivati e dai quali si può ricavare energia, per moltissimi anni.

Affinchè le risorse geotermiche siano sfruttate al meglio è bene conoscere più a fondo possibile i processi che avvengono all'interno dei sistemi geotermici ed i possibili esiti di programmi di coltivazione del giacimento: è in questo ambito che la simulazione numerica trova il suo impiego più utile.

La simulazione numerica di un sistema geotermico diventa così un metodo di analisi del giacimento, che utilizza e s'affianca alle prove di laboratorio, prove geofisiche e studio dell'idrogeologia del sottosuolo.

La maggior parte dei software di simulazione geotermica, quale iTOUGH2, difficilmente considerano i processi di flusso e scambio di calore che avvengono all'interno dei pozzi, ma si limitano a considerare i pozzi come blocchi che producono con una pressione di fondo pozzo costante nel tempo.

Questa assunzione è tuttavia inverosimile nella produzione geotermica, in quanto è in genere la pressione a testapozzo che rimane costante, per necessità di funzionamento del separatore di vapore a monte della turbina della centrale di generazione di energia elettrica.

Una corretta simulazione non può prescindere da questa considerazione, perciò è importante accoppiare il modello di giacimento con il modello di pozzo.

Tale accoppiamento può essere considerato essenzialmente mediante due approcci: l'accoppiamento interno, in cui vengono integrate le equazioni del pozzo all'interno del simulatore geotermico stesso, che si può fare solo a costo di imponenti modifiche al codice sorgente del simulatore, o l'accoppiamento esterno, che grazie all'uso di tabelle create in precedenza da simulatori di pozzo, consentono di sfruttare correlazioni fra portata ed entalpia e pressioni di fondo pozzo, mantenendo costante la pressione di testa pozzo.

Il secondo approccio oltre che più semplice, non richiede prestazioni aggiuntive e consente l'uso di più simulatori di pozzo.

Sapendo che l'accoppiamento esterno era disponibile in TOUGH2, in questo lavoro è stato provato l'accoppiamento di iTOUGH2, cercando di riprodurre lo stesso problema riportato in bibliografia per TOUGH2.

L'accoppiamento esterno in iTOUGH2 è stato assunto come risucito quando si è riusciti a riprodurre gli stessi risultati ottenuti con TOUGH2.

Per fare ciò è stato necessario modificare diverse parti del codice sorgente del programma per permettere una corretta lettura del file esterno di pressione di fondopozzo in funzione di portate ed entalpia.

Questo ha prodotto la realizzazione di una nuova release di iTOUGH2, da parte dello sviluppatore del software, versione 6.5 (Finsterle, 2011).

Conclusioni

Il confronto fra i risultati forniti da iTOUGH2 e TOUGH2 sono consistenti entro gli errori sperimentali.: questo permette di concludere che i propositi che hanno portato alla realizzazione di questo lavoro sono raggiunti.

Inoltre sono stati confrontati i risultati della simulazione tramite l'impiego dell'accoppiamento esterno e di pressioni di fondo pozzo costanti, nello studio di un caso semplificato di bacino geotermico: ciò ha permesso di osservare una marcata differenza nell'evoluzione temporale delle variabili termofisiche e termodinamiche.

Tali risultati avvalorano il fatto che una buona simulazione non può prescindere dall'utilizzo di un modello dedicato per il pozzo.

8 Bibliografia

1. Casati, P. *Scienze della Terra*. Elementi di geologia generale, Vol.1, (CittàStudi: Milano, 2005).
2. Risorse e consumo di energia nel mondo - Wikipedia. a
<http://it.wikipedia.org/wiki/Risorse_e_consumo_di_energia_nel_mondo>
3. Gradiente geotermico - Wikipedia. a <http://it.wikipedia.org/wiki/Gradiente_geotermico>
4. Permafrost - Wikipedia. a <<http://it.wikipedia.org/wiki/Permafrost>>
5. Sommaruga, C. *Elementi di geotermia, Principi-metodi di ricerca, produzione e utilizzazione*. (CUSL: Milano, 1991).
6. Regione Toscana: Miniere e geotermia. a
<http://www.regione.toscana.it/regione/export/RT/sito-RT/Contenuti/sezioni/ambiente_territorio/energia/rubriche/piani_progetti/visualizza_asset.html_1789905080.html#geo>
7. Landsvirkjun *Annual Report 2009*. (2009).
8. Regione Toscana: Le leggi che disciplinano l'attività geotermoelettrica. a
<http://www.regione.toscana.it/regione/export/RT/sito-RT/Contenuti/minisiti/pier/visualizza_asset.html_127367120.html>
9. Teoria dei sistemi - Wikipedia. a <http://it.wikipedia.org/wiki/Teoria_dei_sistemi>
10. Chierici, G.L. *Principi di ingegneria dei giacimenti petroliferi*. (ENI: 2004).
11. Bedient, P. *Ground water contamination : transport and remediation*. (Prentice Hall PTR: Upper Saddle River NJ, 1999).
12. Michelin, R. & Munari, A. *Fondamenti di chimica per le tecnologie*. (CEDAM: Padova, 2002).
13. Hadgu, T., Zimmerman R. W. & BODVARSSON GUDMUNDUR S. Coupled reservoir-wellbore simulation of geothermal reservoir behavior. *Geothermics* **24**, 145-166 (1995).
14. Freedon, W., Nashed, M.Z. & Sonar, T. *Handbook of Geomathematics*. **2**, (Springer: Berlin;Heidelberg, 2010).
15. Gottardi, G. Modello numerico per i giacimenti di gas naturale col metodo di Galerkin. (1986).
16. Monegato, G. *Calcolo Numerico*. (Levrotto&Bella: Torino,).
17. Finsterle, S. *iTOUGH2 User's Guide*. (Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratories: Berkeley, CA 94720, 2007).
18. Parallel Virtual Machine - Wikipedia, the free encyclopedia. a
<http://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_Virtual_Machine>
19. Finsterle, S. *iTOUGH2 PVM User's Guide*. (Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratories: Berkeley, CA 94720, 1998).
20. Pruess, K., Curt, O. & George Moridis *TOUGH2 User's Guide*. (Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratories: Berkeley, California, 1999).
21. Pruess, K. *Mathematical modeling of fluid flow and heat transfer in geothermal systems - an introduction in five lectures* Karsten Pruess. (United Nations University Geothermal Training Programme: Reykjavik Iceland, 2002).
22. Bjornsson, G. *A multi-feedzone geothermal wellbore simulator*. (1987).a
<<http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/6569407-PP2Lju/>>
23. Chisholm, D. Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **16**, 347-358 (1973).
24. Aunzo, Z.P., Bjornsson, G. & Bodvarsson, G.S. Wellbore Models GWELL, GWNACL, and

Bibliografia

- HOLA-User's Guide. (1991).
25. Hadgu, T., Zimmerman R. W. & BODVARSSON GUDMUNDUR S. Coupling the reservoir simulator TOUGH and the wellbore simulator WFSA.
 26. Thomas, G. *Principles of hydrocarbon reservoir simulation*. (International Human Resources Development Corp.: Boston, 1982).
 27. Counihan, M. & Ebooks Corporation. *Fortran 95*. (Taylor & Francis Ltd.,: Hoboken :, 1996).
 28. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C.; "Conduction of heat in solids" Oxford University Press, 2nd Edition, 1959.

Altri riferimenti bibliografici:

- Huenges, E. *Geothermal energy systems : exploration, development, and utilization*. (Wiley-VCH: Weinheim, 2010).
- Tabak, J. *Solar and geothermal energy*. (Facts On File: New York, 2009).
- Gupta, H. & Roy, S. *Geothermal Energy, an alternative resource for the 21th century*. (Elsevier: Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2007).
- DiPippo, R. *Geothermal Power Plants: principles, applications, case studies and environmental impact*. (2007).
- Grant, M.A. Review no. 1 Geothermal reservoir modeling. *Geothermics* **12**, 251-263 (1983).
- Zimmerman R. W., CHEN GANG & Hadgu, T. Numerical_Dual-Porosity_Model_With_Semianalytical_Treatment_of_Fracture/Matrix_Flow.
- Tokita, H., Lima, E. & Hashimoto, K. Power Output Prediction by coupling wellbore simulator with reservoir simulator. 8 (2005).
- Timlin, M. SUPERWELL - A SIMPLE WELL BORE FLOW SIMULATOR IN SPREADSHEET FORMAT. (2008).
- PRITCHETT J. W. & GARG S. K. Determination of Effective Well Block Radii for Numerical Reservoir Simulations.
- Ouyang, L., Arbabi, S. & Aziz, K. General Wellbore Flow Model for Horizontal, Vertical, and Slanted Well Completions. *SPEJ* **3**, (1998).
- Manuel Alejandro Rivera Ayala Coupled_geothermal_reservoir-wellbore_simulation_with_a_case_study_for_the_Namafjall_field_N-Iceland.PDF. (2010).
- Ibragimov Mathematical Frame-Work For Productivity Index of The Wellfor Fast Forchheimer (non-Darcy) Flow in Porous Media. (2006).
- Elmi, D. & Axelsson, G. APPLICATION OF A TRANSIENT WELLBORE SIMULATOR TO WELLS HE-06 AND HE-20IN THE HELLISHEIDI GEOTHERMAL SYSTEM, SW-ICELAND. 5 (2009).
- Butler, S.J. & Eneedy, S.L. Numerical Reservoir-Wellbore-Pipeline Simulation Model of The Geysers Geothermal Field, California, USA. 6 (2010).
- bhat, svenson & gosavi
COUPLING_THE_HOLA_WELLBORE_SIMULATOR_WITH_TOUGH2. (2005).
- Battistelli, A. PROFILI wellbore flow simulator :from geothermal wells to GHG and acid gas injection wells. 1 (2010).
- Graf, T. & Alberta Geological Survey.;Alberta. Simulation of geothermal flow in deep sedimentary

Bibliografia

basins in Alberta. (2009).

Renewable energy in Iceland — Nordic Energy Solutions. a

<<http://www.nordicenergysolutions.org/performance-policy/iceland/renewable-energy-in-iceland>>

Pahud, D. Geothermal energy and heat storage. (2002).

International Energy Agency - Energy Publications. a

<http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2282>