
4
1
2ej.

TRANSITORIOS TERMODINAMICOS EN FRACTURAS

GEOTERMICAS BAJO EXPLOTACION

por

Fernando Ascencio Cendejas

División de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería

UNAM

(Noviembre, 1991)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO:

RESUMEN	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
1. GENERALIDADES	1
2. INTRODUCCION	2
3. MODELO CONCEPTUAL Y FORMULACION MATEMATICA	4
3.1 ECUACIONES DE CONSERVACION	7
3.2 RELACIONES ADICIONALES	11
3.2.1 EL FLUJO DE RECARGA (\tilde{w}_r)	11
3.2.2 EL FLUJO DE CALOR (q^*)	12
3.2.3 CONDICIONES DE PRODUCCION (\tilde{w}_{pl} , \tilde{w}_{pv})	14
4. SOLUCION NUMERICA	15
5. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD	19
6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS	29
7. APLICACION ADICIONAL	31
8. CONCLUSIONES	32
DESCRIPCION DE SIMBOLOS	33
REFERENCIAS	36
APENDICE A: CODIGO DE SIMULACION	40

RESUMEN

En este trabajo de tesis se propone un modelo numérico para analizar el comportamiento termodinámico de una fractura geotérmica bajo explotación. Para tal propósito, y como principales características del modelo conceptual de funcionamiento del sistema, se considera que el medio es de conductividad infinita, que el agua y el vapor se encuentran segregados y en equilibrio termodinámico y que la alimentación de masa y energía hacia el sistema proviene de la matriz de roca que lo limita.

Las ecuaciones de conservación de masa y energía se plantearon para cada fase en particular, siendo el flujo evaporado el término de acople entre uno y otro conjunto de ecuaciones, y de su solución numérica, análisis de sensibilidad se realizaron para conocer la respuesta del sistema a excitaciones externas tanto como a la influencia de los principales parámetros que intervienen en las ecuaciones de descripción; y aunque no se establecen reglas generales de explotación porque cada sistema real muestra peculiaridades propias, se sugieren criterios para su mejor explotación.

De las principales conclusiones del estudio -no nuevas pero si verificadas- es la fuerte dependencia de la zona de líquido si el sistema es explotado en la región de vapor, dado que el flujo evaporado proveniente de la zona de líquido actúa como un término fuente de masa y energía localizado en la interfase. Por otro lado, si el sistema es explotado en la zona de líquido, éste depende de la constante de recarga y de la temperatura de los fluidos que proceden de la zona de alimentación.

Asimismo, y siguiendo la línea de las técnicas de balance de materia, se proponen relaciones para evaluar de manera aproximada el volumen poroso de la fractura, y de este modo, pronosticar las caídas principales de la presión y la temperatura, que inicialmente ocurren por la expansión de fluidos del sistema, al considerar otros esquemas de explotación.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Modelo conceptual simplificado del sistema en estudio.

Figura 5.1. Comportamiento del sistema por la extracción de fluido de la zona de vapor (o).

Figura 5.2. Comportamiento del sistema por la extracción de fluido de la zona de líquido (•).

Figura 5.3. Efecto de la Temperatura de Recarga (T_r). Extracción de agua (•) o vapor (o) del sistema.

Figura 5.4. Efecto del la Constante de Recarga (α_r). Extracción de agua (•) o vapor (o) del sistema.

Figura 5.5. Efecto del Coeficiente de Calor (U). Extracción de agua (•) o vapor (o) del sistema.

Figura 5.6. Efecto del Nivel de Líquido Inicial (z). Extracción de agua (•) o vapor (o) del sistema.

Figura 5.7. Flujo lineal de calor matriz-fluido bajo condiciones transitorias y para las condiciones de frontera exterior: sistema infinito, adiabático y temperatura constante.

1. GENERALIDADES

Actualmente México cuenta con una capacidad eléctrica instalada de 20 000 MWe, de los cuales el 3.5 % corresponden a plantas geotermoeléctricas (725 MWe). En el contexto internacional, nuestro país ocupa el tercer lugar en generación de energía geotermoeléctrica después de Estados Unidos de Norteamérica (2800 MWe) y Filipinas (900 MWe).

En cuanto a costos, los \$/kW-h son similares respecto a plantas generadores convencionales y en algunos casos inferiores, como lo es la geotermoeléctrica de Cerro Prieto con 133.28 \$/kW-h y la de los Azufres con 141.09 \$/kW-h contra 172 \$/kW-h de una planta termoeléctrica convencional (CFE [1991]), y más todavía, si es comparado con una planta nucleoelectrica mejorada en los EUA que es de 187.61 \$/kW-h.

Por otra parte, los yacimientos geotérmicos generalmente están asociados a dos medios de origen distinto: los sedimentarios, como es el caso de Cerro Prieto Baja California; y los de origen volcánico, como por ejemplo, Los Azufres Michoacán y Los Humeros Puebla. En estos últimos, la red de fallas conductoras y el fracturamiento natural del medio son los principales mecanismos de conducción de fluidos hacia los pozos, y de ahí, la importancia que reviste un conocimiento adecuado de éstos. Para tales propósitos, en el presente trabajo de tesis, se plantea un modelo numérico de simulación que describe el comportamiento termodinámico de una fractura geotérmica bajo explotación.

2. INTRODUCCION

Los modelos matemáticos de simulación juegan un papel principal en la definición de las estrategias de desarrollo de un yacimiento geotérmico. Permiten conocer *a priori* el comportamiento de un yacimiento cuando es sometido a un determinado ritmo de extracción y de esta manera definir los criterios óptimos para su mejor desarrollo así como el de evitar situaciones que lo afecten irreversiblemente.

Los modelos de simulación consisten básicamente en un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales que expresan la conservación de la masa y la energía (†), de leyes fenomenológicas, y de ecuaciones de estado, que junto con las condiciones iniciales y de frontera, son resueltas numéricamente.

Existen dos principales vertientes en las que se clasifican los modelos matemáticos: los modelos de dimensión cero y los modelos de parámetros distribuidos.

Los modelos de dimensión cero consideran que las propiedades de la roca y del fluido son uniformes e independientes de las coordenadas espaciales, y al suponer que la permeabilidad del medio es infinita, cualquier disturbio termodinámico se propaga instantáneamente. En estos modelos el tiempo es la variable independiente y el sistema es caracterizado por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que expresan el balance de masa y de energía.

Los modelos de parámetros distribuidos, a diferencia de los de dimensión cero, son modelos complejos que toman en cuenta la distribución espacial y temporal de las propiedades de la roca y el fluido. Las ecuaciones de masa y energía son discretizadas en el tiempo y en el espacio y resueltas a partir de técnicas numéricas.

† Detalladas explicaciones y deducciones han sido discutidas por distintos autores en la literatura, por ejemplo, *Brownell et al* [1975, 1977], *Garg et al* [1975] y *Garg y Pritchett* [1977].

Los modelos de dimensión cero fueron originalmente propuestos en la industria petrolera (*Schilthuis* [1936]), y en esta área, *Craft y Hawkins* [1959] desarrollaron la conocida técnica del *P/Z comportamiento* para estimar las reservas de hidrocarburos. Los primeros en aplicar los modelos de dimensión cero en yacimientos geotérmicos fueron *Whiting y Ramey* [1969] quienes a su vez estudiaron el campo geotérmico de líquido dominante de Wairakei, Nueva Zelanda. De igual manera, *Brigham y Neri* [1980] proponen un modelo para yacimientos de vapor dominante y realizan estudios del campo geotérmico Larderello, Italia. Otros estudios sobresalientes han sido realizados por *Grant* [1977], *Sorey y Fradkin* [1979] y *Castanier et al* [1980].

Respecto a los modelos de parámetros distribuidos sobresale el simulador clásico desarrollado por *Faust y Mercer* [1979 a,b] que simula el flujo de agua y vapor a través de un medio poroso; el simulador considera como variables independientes la presión y entalpía y simula sistemas geotérmicos en dos y tres dimensiones. A la fecha, los simuladores mas completos han sido desarrollados en los Laboratorios de Lawrence Berkeley, por ejemplo, los simuladores SHAFT79 (Simultaneous Heat and Fluid Transport) y el MULKOM (acrónimo de "Multi-component") que utilizan la técnica de diferencias finitas integradas en la discretización del sistema de ecuaciones, y por las cuales, permiten simular geometrías geológicas complejas; estos simuladores han sido ampliamente descritos en los trabajos de *Pruess* [1983,1987,1988].

El modelo matemático aquí propuesto analiza el comportamiento termodinámico de una fractura geotérmica que contiene agua y vapor segregados y en equilibrio termodinámico y considera que la permeabilidad del medio es infinita, por lo cual, queda clasificado dentro de los modelos de dimensión cero. A su vez, el modelo considera interacciones de masa y energía del sistema con sus alrededores.

Los modelos de dimensión cero fueron originalmente propuestos en la industria petrolera (*Schilthuis* [1936]), y en esta área, *Craft* y *Hawkins* [1959] desarrollaron la conocida técnica del *P/Z comportamiento* para estimar las reservas de hidrocarburos. Los primeros en aplicar los modelos de dimensión cero en yacimientos geotérmicos fueron *Whiting* y *Ramey* [1969] quienes a su vez estudiaron el campo geotérmico de líquido dominante de Wairakei, Nueva Zelanda. De igual manera, *Brigham* y *Neri* [1980] proponen un modelo para yacimientos de vapor dominante y realizan estudios del campo geotérmico Larderello, Italia. Otros estudios sobresalientes han sido realizados por *Grant* [1977], *Sorey* y *Fradkin* [1979] y *Castanier et al* [1980].

Respecto a los modelos de parámetros distribuidos sobresale el simulador clásico desarrollado por *Faust* y *Mercer* [1979 a,b] que simula el flujo de agua y vapor a través de un medio poroso; el simulador considera como variables independientes la presión y entalpía y simula sistemas geotérmicos en dos y tres dimensiones. A la fecha, los simuladores más completos han sido desarrollados en los Laboratorios de Lawrence Berkeley, por ejemplo, los simuladores SHAFT79 (Simultaneous Heat and Fluid Transport) y el MULKOM (acrónimo de "Multi-component") que utilizan la técnica de diferencias finitas integradas en la discretización del sistema de ecuaciones, y por las cuales, permiten simular geometrías geológicas complejas; estos simuladores han sido ampliamente descritos en los trabajos de *Pruess* [1983,1987,1988].

El modelo matemático aquí propuesto analiza el comportamiento termodinámico de una fractura geotérmica que contiene agua y vapor segregados y en equilibrio termodinámico y considera que la permeabilidad del medio es infinita, por lo cual, queda clasificado dentro de los modelos de dimensión cero. A su vez, el modelo considera interacciones de masa y energía del sistema con sus alrededores.

3. MODELO CONCEPTUAL Y FORMULACION MATEMATICA

La mayor parte de los yacimientos geotérmicos explotados comercialmente están relacionados a rocas fracturadas de origen volcánico en los que la red de fallas y el fracturamiento natural del medio son los principales responsables del transporte de masa y energía hacia los pozos. En estos, la matriz de roca de porosidad primaria es la principal almacenadora de masa y energía del sistema, mientras que las fracturas de porosidad secundaria solamente contienen del orden del 1% de fluido y energía (*Pruess y Narasimhan [1982]*). Asimismo, si el fracturamiento es intenso, los bloques de matriz actúan como fuentes de fluido y de calor uniformemente distribuidas en el medio hacia el sistema fisurado (†). En otros casos, la presencia de fallas regionales y/o locales, estas últimas naturales o inducidas por fracturamiento hidráulico, son las que aportan principalmente el fluido hacia los pozos que las intersectan (†). Aunque una combinación de estos dos últimos situaciones suele presentarse, es decir, un intenso fracturamiento y un sistema productor relacionado con fracturas o fallas conductoras. (§).

Por otra parte, el fluido en la fractura puede encontrarse en una o dos fases, distribuidas uniformemente o segregadas, para este último situación, si la permeabilidad de la fractura es grande y las condiciones termodinámicas del fluido están próximas a la zona de saturación, la segregación gravitacional suele presentarse (*Grant [1982]*).

† Este concepto es el usado en el desarrollo de los denominados modelos de Doble Porosidad, véase por ejemplo el clásico artículo de *Warren y Root [1963]* o el trabajo desarrollado por *Cinco y Samaniego [1982]*.

† En este caso los modelos denominados de fractura única han sido desarrollado para caracterizar este tipo de sistemas, véase por ejemplo los trabajos de *Gringarten [1975]* y *Cinco Ley [1982]*.

§ Recientemente *Cinco y Meng [1988]* presentaron un modelo matemático para estos medios compuestos.

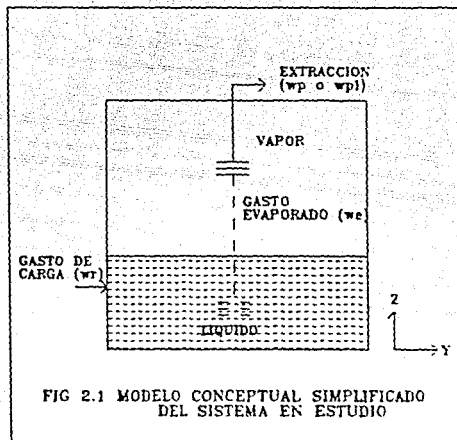
Por lo anterior, la complejidad de estos sistemas es grande, y aquí se analiza un caso particular de una fractura geotérmica con las siguientes principales características del modelo conceptual de funcionamiento:

- El aporte de calor hacia la fractura proviene de la matriz de roca que la limita.
- El fluido de recarga proviene de la parte más profunda de la fractura.
- El agua y el vapor se encuentran segregados y en equilibrio termodinámico.

Para el formulamiento matemático, que en la siguiente sección se presenta, a continuación se muestran las simplificaciones consideradas:

- La matriz de roca es impermeable y la permeabilidad de la fractura es infinita.
- Efectos gravitacionales despreciables y equilibrio térmico entre el fluido en la fractura y los sólidos contenidos en ésta.
- El agua y el vapor se encuentran en estado puro.

La figura 2.1 muestra una idealización del sistema físico en estudio.



3.1 ECUACIONES DE CONSERVACION

La ecuación de conservación de masa para la fase líquida contenida en la fractura está representada por:

$$\frac{d}{dt}m_l = \bar{w}_r - \bar{w}_e - \bar{w}_{pl} \quad (1)$$

donde

m_l es la masa del líquido

\bar{w}_r es el flujo másico de recarga

\bar{w}_e es el flujo másico evaporado

\bar{w}_{pl} es la producción másica de líquido

Si consideramos que la fractura tiene un espesor b , longitud L y nivel de líquido inicial z (en la base de la fractura $z = 0$), la ecuación (1) puede ser expresada en términos de la densidad del líquido por

$$\phi L b \frac{d}{dt}(z \rho_l) = \bar{w}_r - \bar{w}_e - \bar{w}_{pl} \quad (2)$$

donde

ρ_l es la densidad de la fase líquida

ϕ es la relación del volumen del fluido al volumen total de la fractura

Similarmente, para la fase vapor la ecuación de conservación de masa es

$$\phi L b \frac{d}{dt} \{(z_t - z) \rho_v\} = \dot{w}_e - \dot{w}_{pv} \quad (3)$$

donde

ρ_v es la densidad del vapor

z_t es la altura de la fractura

\dot{w}_{pv} es la producción másica de vapor

La ecuación de conservación de energía planteada para la fase líquida está dada por

$$\frac{d}{dt} (m_s u_s + m_l u_l) = \dot{w}_r h_r - \dot{w}_e h_v + q^* \quad (4)$$

donde

u_s es la energía interna específica de los sólidos en la fractura

u_l es la energía interna específica de la fase líquida

h_v es la entalpía específica de la fase vapor

h_r es la entalpía específica del fluido de recarga

q^* es la transferencia de calor por conducción de la matriz de roca al fluido

m_s es la cantidad de sólidos en la fractura

Si consideramos que $u_l \approx h_l$ y además de que u_s puede ser expresado por $c_{ps} T$ la ecuación (4) puede ser escrita como

$$\phi Lb \frac{d}{dt} \left\{ \frac{(1-\phi)}{\phi} z \rho_s c_{ps} T + z \rho_l h_l \right\} = \bar{w}_r h_r - \bar{w}_e h_v + q \quad (5)$$

donde

ρ_s es la densidad de los sólidos en la fractura

c_{ps} es el calor específico de los sólidos

h_l es la entalpía de la fase líquida

Debido a la suposición de equilibrio termodinámico entre la fase líquido y la fase vapor, sólo se necesita una variable intensiva para describir el estado termodinámico del sistema. Seleccionando como variable libre la temperatura, las siguientes relaciones funcionales pueden establecerse para las variables termodinámicas ρ_l , ρ_v , h_l y h_v

$$\rho_l = f(T), \quad \rho_v = f(T), \quad h_l = f(T) \quad \text{y} \quad h_v = f(T)$$

en base a lo anterior y al uso de la regla de la cadena, las ecuaciones de conservación pueden ser representadas alternativamente por

- Ecuación de conservación de masa para el líquido:

$$\phi Lb \left(z \rho_l' \frac{dT}{dt} + \rho_l \frac{dz}{dt} \right) = \bar{w}_r - \bar{w}_e \quad (6)$$

- Ecuación de conservación de masa para el vapor:

$$\phi Lb \left\{ (z_l - z) \rho_v' \frac{dT}{dt} - \rho_v \frac{dz}{dt} \right\} = \bar{w}_e - \bar{w}_r \quad (7)$$

- Ecuación de conservación de energía para el líquido:

$$\phi L b \left\{ z \left(\frac{1-\phi}{\phi} \rho_s c_{ps} + \rho_l h_i + \rho_l' h_i \right) \frac{dT}{dt} + \left(\frac{1-\phi}{\phi} \rho_s c_{ps} T + \rho_l h_l \right) \frac{dz}{dt} \right\} = \tilde{w}_r h_r - \tilde{w}_e h_e + q^* \quad (8)$$

donde el operador ' ' denota la derivada con respecto a la temperatura.

3.2 RELACIONES ADICIONALES

3.2.1 EL FLUJO DE RECARGA (\bar{w}_r)

Si consideramos que en cualquier tiempo la presión en la zona de alimentación (P_0) se mantiene constante y que el flujo de recarga proveniente de ésta se induce bajo condiciones estacionarias, el flujo de recarga es evaluado simplemente por

$$\bar{w}_r = \alpha_R(P_0 - P') \quad (9)$$

donde α_R es el parámetro de recarga el cual depende de la geometría del sistema y de la resistencia del flujo a través de las fronteras de la fractura; mientras que P' es determinada por

$$P' = P + \bar{\rho}_f g z' \quad (10)$$

donde

P es la presión de la fase vapor

g es la aceleración de la gravedad

$\bar{\rho}_f$ es la densidad promedio del líquido.

z' es un punto donde se considera $P_0 = P'$ a un tiempo $t = 0$.

3.2.2 EL FLUJO DE CALOR (q^*)

El flujo de calor matriz-fluido (q^*) es evaluado para condiciones estacionarias y transitorias:

- Para para condiciones estacionarias:

$$q^* = 2xLU(T_r - T) \quad (11)$$

en donde U es el coeficiente de transferencia de calor y T_r es la temperatura de la matriz de roca. Si el coeficiente de película en el contacto matriz-fluido se considera despreciable, el coeficiente de transferencia de calor es determinado simplemente por κ/x_L , siendo κ la conductividad térmica de la roca y x_L es la distancia en donde T_r se mantiene invariable.

- El flujo de calor para condiciones transitorias, y para la situación de temperatura variable en el contacto fluido-matriz ($x = 0$), es evaluado a partir del uso del teorema de Superposición de Duhamel,

$$q^* = 2 \int_0^t \frac{\partial \Delta T(\tau)}{\partial \tau} q_1(t - \tau) d\tau \quad (12)$$

en donde q_1 es el flujo de calor asociado a una caída de temperatura unitaria (función de influencia).

Considerando que el patrón de flujo de calor matriz-fluido es unidireccional y perpendicular a las caras de la fractura, las siguientes funciones de influencia fueron consideradas para la evaluación del flujo de calor q^* ,

- Para un medio lineal infinito, $T(x, t) = T(x, 0)$:

$$q_1 = \frac{zL\kappa}{x_L} \frac{1}{\sqrt{\pi t_D}} \quad (13)$$

- Para un medio lineal finito con $Tr(x, t) = Tr(x, 0)$ en $x = x_L$:

$$q_1 = \frac{zL\kappa}{x_L} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 t_D} \right\} \quad (14)$$

- Para un medio lineal finito con $\frac{\partial Tr}{\partial x} = 0$ en $x = x_L$:

$$q_1 = \frac{zL\kappa}{x_L} \left\{ 2 \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 t_D / 4} \right\} \quad (15)$$

donde la variable t_D es definida por

$$t_D = \frac{\kappa t}{\rho_R c_{pR} x_L^2}$$

y

ρ_R es la densidad de la roca

c_{pR} es el calor específico de la roca

$x_L = 1$ para un sistema lineal infinito

Las soluciones anteriores del problema de flujo lineal de calor han sido ampliamente tratadas en la teoría de conducción de calor en sólidos (Carslaw y Jaeger [1970]); y para este tipo de geometría, Nabor y Barham [1964] y Miller [1962] analizan el problema de entrada de agua a yacimientos petroleros para distintas condiciones de frontera interior y exterior.

3.2.3 CONDICIONES DE PRODUCCION (\tilde{w}_{pv} , \tilde{w}_{pl})

Los siguientes criterios fueron tomados para la extracción de agua o vapor de la fractura,

- La extracción de fluidos de la zona de líquido (\tilde{w}_{pl}) se considera bajo condiciones isoentálpicas de manera que la entalpía de la mezcla en superficie a la presión de admisión de la turbina ($P_{v adm}$) es igual a la entalpía de la fase líquida a las condiciones de presión (o temperatura) en la fractura (h_l). Bajo este criterio la calidad de la mezcla en superficie es evaluada según,

$$x = \frac{h_l - h_{l\ sup}}{h_{fg}} \quad (16)$$

donde

$h_{l\ sup}$ es la entalpía del líquido a la Presión $P_{v adm}$

h_{fg} es el calor latente de vaporización a la presión $P_{v adm}$

Como los requerimientos del vapor de admisión a la turbina ($\tilde{w}_{v adm}$) se consideran constantes, la extracción de líquido de la fractura es cuantificada por

$$\tilde{w}_{pl} = \tilde{w}_{v adm} / x \quad (17)$$

- Para la extracción de la zona de vapor se considera simplemente que el vapor de admisión a la turbina es igual al extraído de la zona de vapor de la fractura (\tilde{w}_{pv}).

Los criterios anteriores de extracción de agua o vapor de la fractura, no toman en cuenta los mecanismos para la extracción de estos, por ejemplo, número, diámetro o profundidades de los pozos.

4. SOLUCION NUMERICA

Las ecuaciones de conservación (6), (7) y (8) son resueltas simultaneamente para las incógnitas $\frac{dT}{dt}$, $\frac{dz}{dt}$ y \bar{w}_ϵ , obteniendo:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{a_T \bar{w}_{pv} + b_T \bar{w}_{pl} + c_T \bar{w}_r + d_T q^*}{V_p \epsilon} \quad (18)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{a_z \bar{w}_{pv} + b_z \bar{w}_{pl} + c_z \bar{w}_r + d_z q^*}{\phi L b \epsilon} \quad (19)$$

$$\bar{w}_\epsilon = \frac{a_{\bar{w}_\epsilon} \bar{w}_{pv} + b_{\bar{w}_\epsilon} \bar{w}_{pl} + c_{\bar{w}_\epsilon} \bar{w}_r + d_{\bar{w}_\epsilon} q^*}{\phi \epsilon} \quad (20)$$

donde

V_p es el volumen poroso de la fractura e igual a $\phi z_l L b$

$$\epsilon = \frac{z}{z_l}$$

y

$$a_T = \rho_l h_{fg} - \alpha T$$

$$b_T = \rho_v h_{fg} - \alpha T$$

$$c_T = \rho_l (h_l - h_r) + \alpha T$$

$$d_T = \rho_v - \rho_l$$

$$\alpha = \frac{(1-\phi)}{\phi} \rho_s c_{ps}$$

$$a_z = \epsilon (\rho_l h_l' - \rho_l' h_{fg} + \alpha)$$

$$b_z = \rho'_v h_{fg} + \epsilon(\rho_l h'_l - \rho'_v h_{fg} - \alpha)$$

$$c_z = z_l \{ (h_v - h_r) \rho'_v + \epsilon(\rho_l h'_l + \rho'_l (h_l - h_r) - \rho'_v (h_v - h_r) + \alpha) \}$$

$$d_z = \rho'_v + \epsilon(\rho'_l - \rho'_v)$$

$$a_{\bar{w}_\epsilon} = \epsilon \{ \rho_l (\rho_l h'_l + \alpha) - \rho'_l \alpha T \}$$

$$b_{\bar{w}_\epsilon} = \epsilon(\rho_l \rho_v h'_l + \rho_v \alpha - \rho'_v \alpha T) + \rho'_v \alpha T$$

$$c_{\bar{w}_\epsilon} = \epsilon \{ \rho_l \rho'_l (h_l - h_r) - \rho_l \rho_v h'_l - \rho_v \alpha + \rho'_v \alpha T \} - \rho_l \rho'_l (h_l - h_r) - \rho'_v \alpha T$$

$$d_{\bar{w}_\epsilon} = \rho_l \rho'_v (1 - \epsilon)$$

$$e = \rho_l \rho'_v h_{fg} - \rho_v \alpha T + \epsilon \{ \rho_l^2 h'_l - \rho_l \rho'_v h_{fg} + (\rho_l + (\rho'_v - \rho'_l) T) \alpha \}$$

Las ecuaciones (18) y (19) se integran numéricamente por medio del método de Runge-Kutta según el esquema convencional de cuarto orden (Carnahan [1969]); en el intervalo de integración, las propiedades termodinámicas y sus derivadas con respecto a la temperatura se consideran constantes pero revaluadas al siguiente incremento de tiempo.

La evaluación del flujo de calor q^* para condiciones transitorias se efectúa por la discretización de la integral de Convolución según el siguiente esquema numérico:

$$q^*(t) = q^*(n\Delta t) = \sum_{i=1}^n \Delta T(i\Delta t) q_1^*[(n-i+1)\Delta t] \quad (21)$$

en donde n es el nivel de tiempo y Δt es la magnitud de la etapa de integración.

Los tiempos de ejecución de la integral de convolución para los patrones de flujo de

calor con las condiciones de frontera exterior a temperatura constante y adiabática pueden optimizarse si consideramos la siguiente variante para la evaluación de q^* ,

$$q^*(t) = q^*(n\Delta t) = \sum_{i=1}^n \Delta T(i\Delta t) L^{-1}\{\tilde{q}_i^*(s)\} \quad (22)$$

donde

$$\tilde{q}_i^*(s) = L\{q_i^*(t)\}$$

L Operador de Laplace

L^{-1} Operador inverso de Laplace

s es el parámetro de Laplace

donde las soluciones en el espacio de Laplace para el caso de temperatura constante y condiciones adiabáticas son respectivamente

$$\tilde{q}_1^*(s) = \frac{2zL\kappa}{x_L} \frac{e^{-\sqrt{s}} + e^{\sqrt{s}}}{\sqrt{s}\{e^{-\sqrt{s}} - e^{\sqrt{s}}\}} \quad (23)$$

$$\tilde{q}_1^*(s) = \frac{2zL\kappa}{x_L} \frac{e^{-\sqrt{s}} - e^{\sqrt{s}}}{\sqrt{s}\{e^{-\sqrt{s}} + e^{\sqrt{s}}\}} \quad (24)$$

La inversión al espacio real es realizada numéricamente usando el algoritmo de Stehfest (1970), el cual se aplica según el siguiente procedimiento:

$$q_i^*(t) = \frac{\ln 2}{t} \sum_{i=1}^N v_i \tilde{q}_i^*\left(\frac{\ln 2}{t} i\right) \quad (25)$$

y los coeficientes v_i , que son independientes del tiempo, son evaluados a partir de

$$v_i = (-1)^{N/2+i} \sum_{k=(\frac{i+1}{2})}^{\text{Min}(i, N/2)} \frac{k^{N/2} (2k)!}{(N/2 - k)! k! (k-1)! (i-k)! (2k-i)!} \quad (26)$$

De acuerdo al planteamiento anteriormente presentado para la solución del problema, se desarrolló un código de simulación en Fortran 77 y autodocumentado para su utilización. Las subrutinas de integración de Runge-Kutta fueron tomadas de *Franks* [1972] y las propiedades termodinámicas para el agua y el vapor se evaluaron según las ecuaciones presentadas por *Irvine y Liley* [1984]. Un valor de $N = 10$ fue considerado para la generación de los coeficientes v_i .

5. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

Con el propósito de conocer el comportamiento del sistema a las principales variables contempladas por el modelo, se analiza un ejemplo sintético. La siguiente información fue considerada y tomada como referencia para realizar el estudio de sensibilidad.

Valores dimensionales de la Fractura:

$$L = 1000 \text{ m}$$

$$z_t = 1000 \text{ m}$$

$$b = 0.1 \text{ m}$$

Características de producción:

$$P_{v \text{ adm}} = 0.8 \text{ MPa}$$

$$\tilde{w}_{v \text{ adm}} = 5 \text{ kg/s}$$

Condiciones iniciales:

$$T_{inicial} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$z_{inicial} = 500 \text{ m}$$

Propiedades de la matriz de roca (†):

$$\rho_R = \rho_s = 2600 \text{ kg m}^{-3}$$

$$c_{pR} = c_{ps} = 0.9 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

† Excepto para la porosidad, los valores fueron tomados de Keppelmeyer y Haenel (1974) y como representativos de rocas ígneas.

$$\phi = 0.15$$

$$\kappa = 0.001 \text{ kJ m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$x_L = 0.1 \text{ m}$$

Características de la zona de alimentación:

$$\alpha_r = 10 \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$$

$$T_r = 250 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_r = f(T_r)$$

$$P_0 = P + \bar{p}_{fg} z_{inicial} \text{ a } t = 0.$$

De acuerdo a la información anteriormente expuesta, se realizaron las corridas de simulación siguientes, con los propósitos anotados:

i. Comportamiento del sistema por la extracción de fluido de la zona de vapor.

La figura 5.1 muestra los resultados de la evolución de la temperatura, presión, nivel de líquido y las tasas de recarga y evaporación.

ii. Comportamiento del sistema por la extracción de fluido de la zona de líquido.

Idem figura 5.2.

iii. Efecto de la Temperatura de Recarga (T_r). Extracción de agua o vapor del sistema. $T_r = 150, 200$ y 250 grados centígrados.

Idem figura 5.3.

iv. Efecto del la Constante de Recarga (α_r). Extracción de agua o vapor del sistema. $\alpha_r = 1, 6$ y $10 \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ si se extrae en la zona de líquido, $\alpha_r = 1, 2$

y $10 \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ si se extrae en la zona de vapor.

Idem figura 5.4.

v. Efecto del Coeficiente de Transferencia de Calor (U). Extracción de agua o vapor del sistema. $U = 0.001, 0.0005$ y $0.0001 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Idem figura 5.5.

vi. Figura 5.6 Efecto del Nivel de Líquido Inicial (z). Extracción de agua o vapor del sistema. $z_i = 400, 500$ y 600 m .

Idem figura 5.6.

vii. Flujo lineal de calor matriz-fluido bajo condiciones transitorias y para las condiciones de frontera exterior: sistema infinito, adiabático y temperatura constante.

Idem figura 5.7.

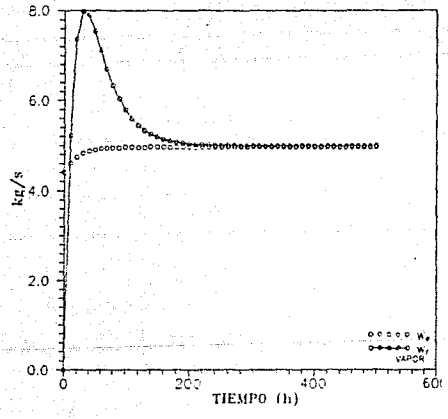
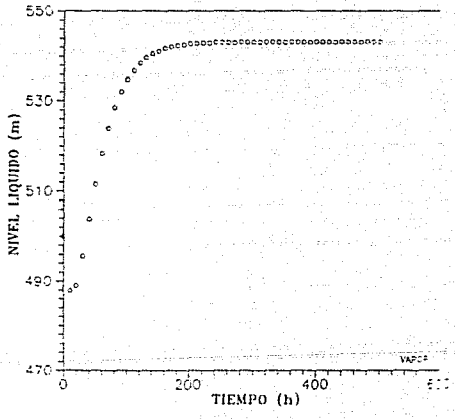
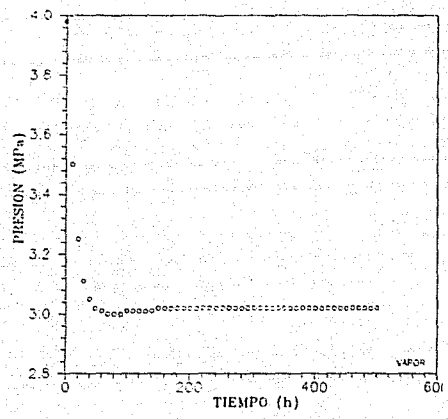
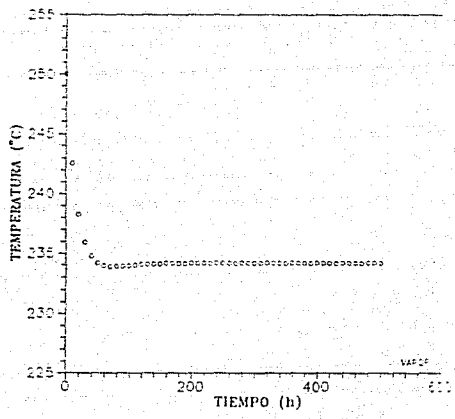


Figura 5.1. Comportamiento del sistema por la extracción de fluido de la zona de vapor (o).

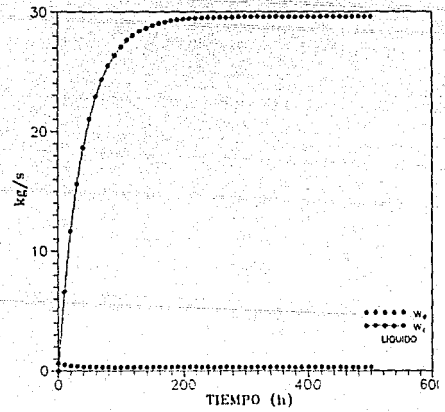
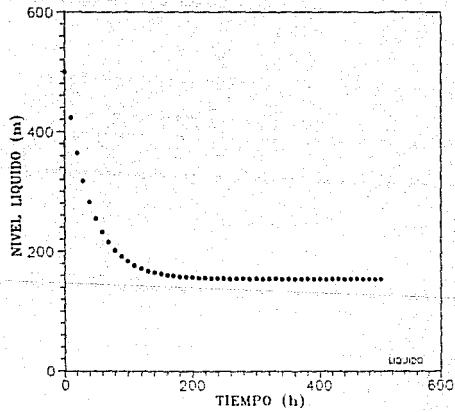
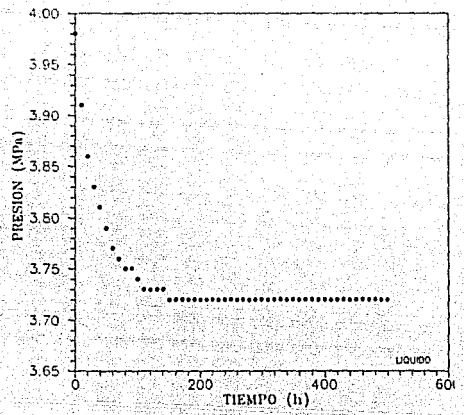
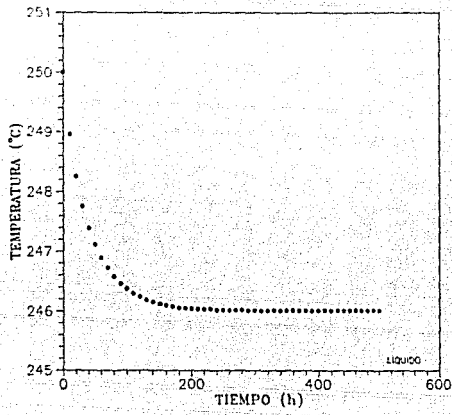


Figura 5.2. Comportamiento del sistema por la extracción de fluido de la zona de líquido (●).

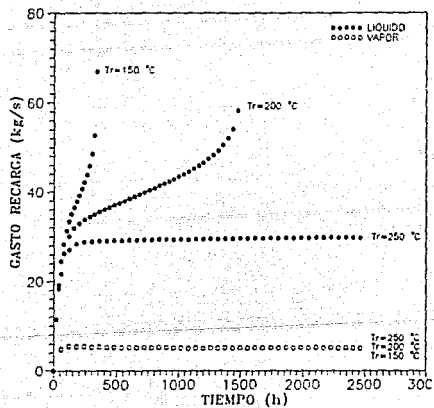
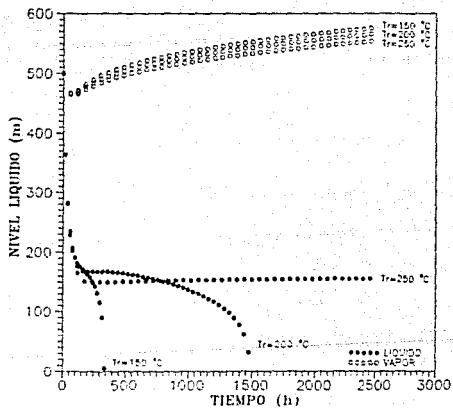
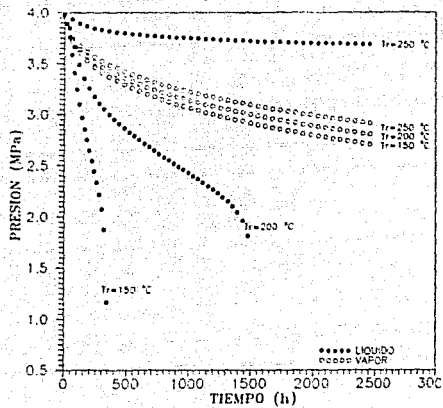
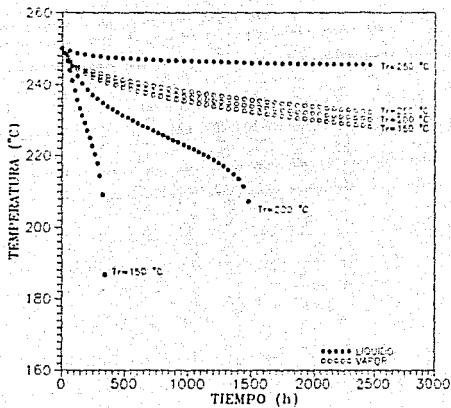


Figura 5.3. Efecto de la Temperatura de Recarga (T_r). Extracción de agua (●) o vapor (○) del sistema.

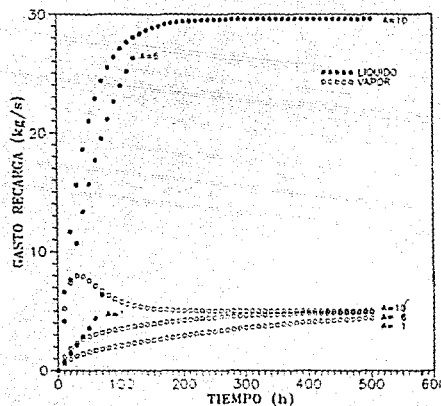
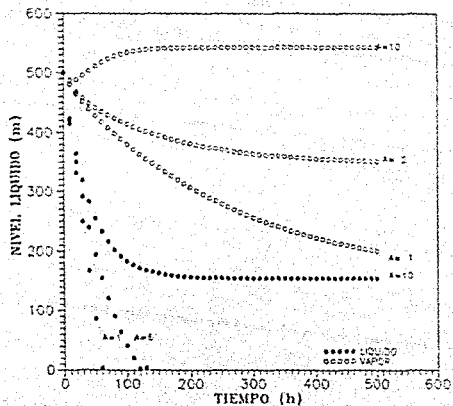
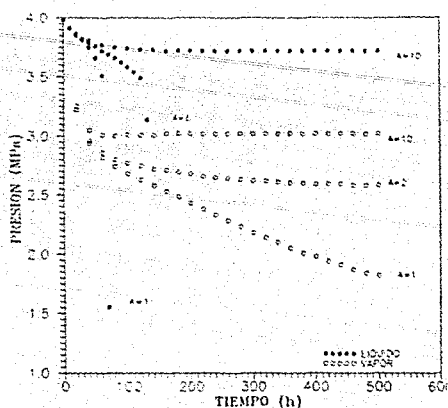
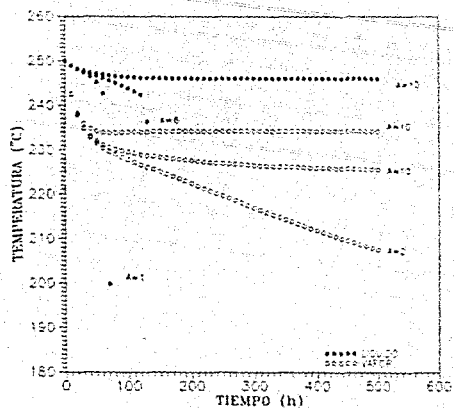


Figura 5.4. Efecto de la Constante de Recarga (α_r). Extracción de agua (●) o vapor (○) del sistema.

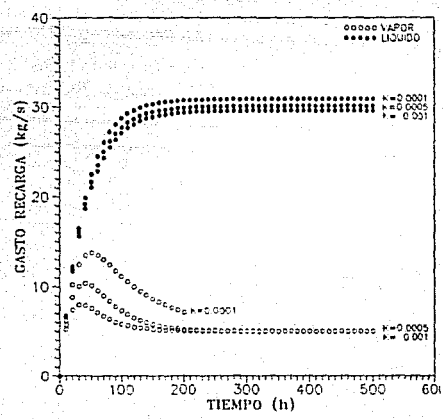
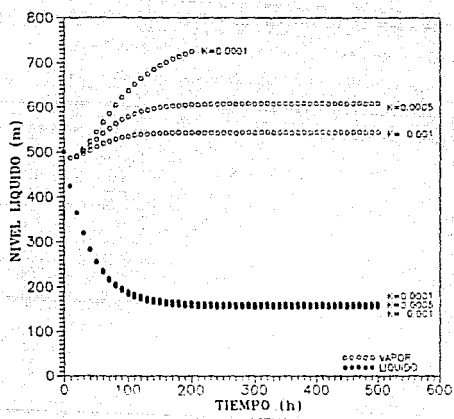
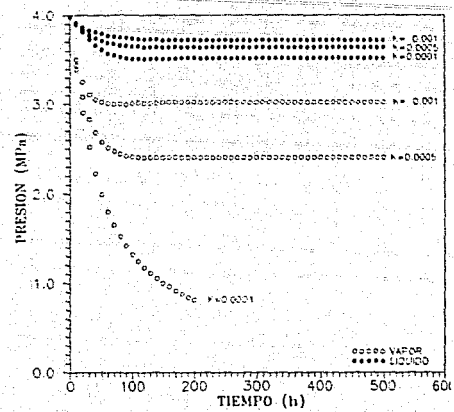
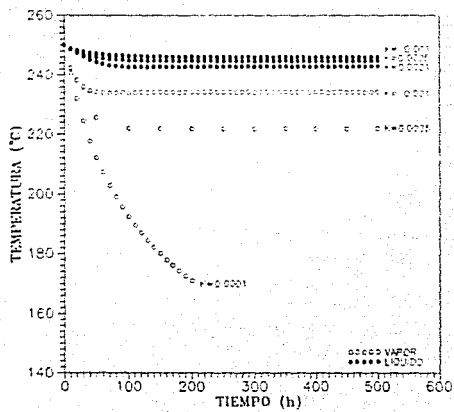


Figura 5.5. Efecto del Coeficiente de Calor (U). Extracción de agua (●) o vapor (○) del sistema.

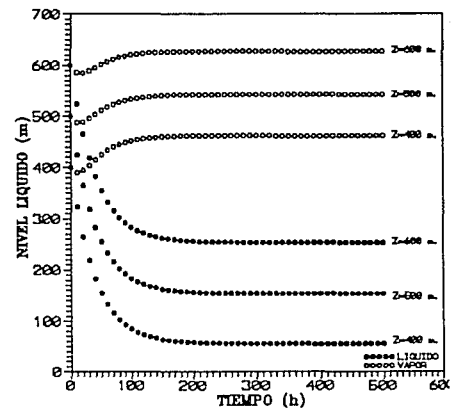
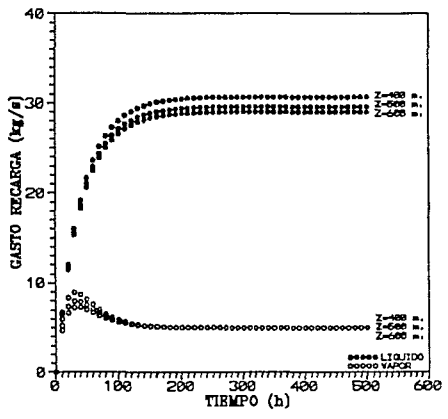
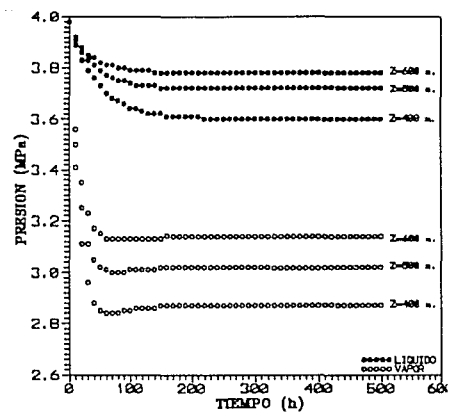
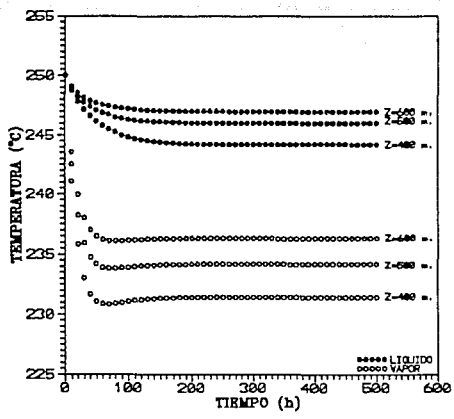


Figura 5.6. Efecto del Nivel de Líquido Inicial (z). Extracción de agua (●) o vapor (○) del sistema.

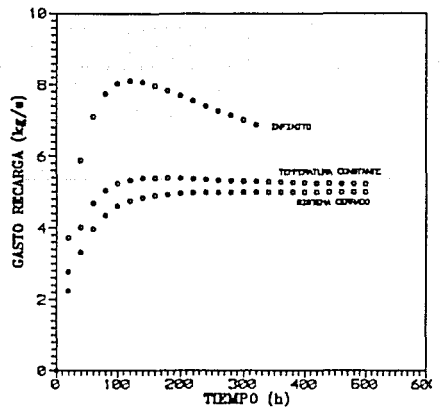
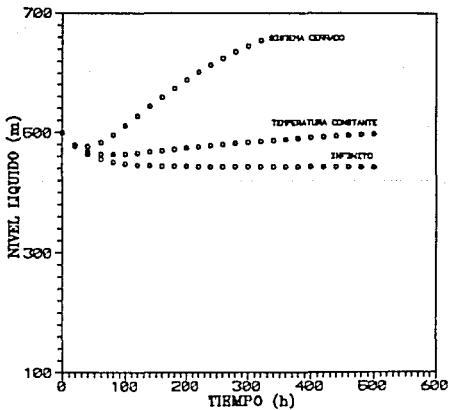
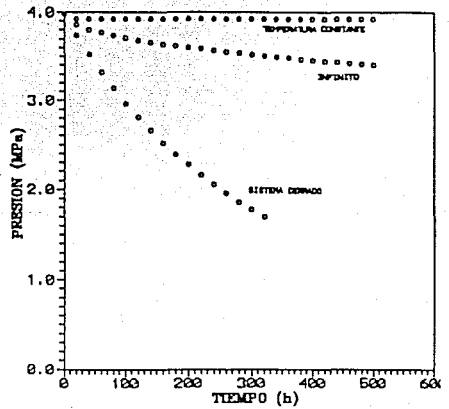
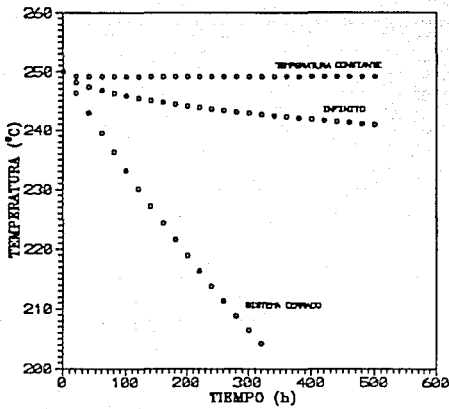


Figura 5.7. Flujo lineal de calor matriz-fluido bajo condiciones transitorias y para las condiciones de frontera exterior: sistema infinito, adiabático y temperatura constante.

6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

De acuerdo a los resultados de las corridas de simulación realizadas anteriormente, en esta sección se discute el comportamiento que este tipo de sistemas exhibe bajo explotación. Asimismo, la discusión deberá enmarcarse en el contexto de las simplificaciones y aproximaciones consideradas para el planteamiento matemático del modelo de simulación aquí tratado:

i. Inicialmente, el sistema se encuentra en equilibrio térmico e hidráulico con los alrededores, pero debido a los disturbios creados por la explotación, se originan gradientes de temperatura y de presión, y como consecuencia de esto, se establecen flujos de masa (\dot{w}_r) y energía (q^*) para tratar de estabilizarlo (Figs 5.1-5.7).

ii. El gasto evaporado (\dot{w}_e), que ocurre como respuesta del sistema por la disminución de la presión al producir en la zona de vapor, actúa como término fuente localizado en la interfase y es el mecanismo principal para su estabilización. Este tiende rápidamente hacia el valor del gasto extraído (\dot{w}_{pv}).

iii. El flujo de recarga (\dot{w}_r), y a diferencia del gasto evaporado, se incrementa rápidamente hasta un valor máximo y después decrecer y estabilizarse si se extrae en la zona de vapor; si la extracción es en la zona de líquido, este simplemente se incrementa para después igualarse a la cantidad de masa extraída del sistema (Figs 5.1-5.2).

iv. El coeficiente de transferencia de calor es un parámetro importante en el sostenimiento de una zona explotada en la zona de vapor, debido a que es el que suministra el calor latente de vaporización requerido durante el proceso de evaporación (Fig 5.5 y Fig 5.7).

v. Los sistemas que son explotados en la zona de líquido son más sensibles a temperaturas del fluido de recarga inferiores a las de la temperatura del fluido en la fractura, que los explotados en la zona de vapor. (Fig. 5.3).

vi. La constante de recarga juega un papel importante para el mantenimiento de sistemas explotados en la zona de líquido; por ejemplo, para el valor de $\alpha_r = 2 \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ un sistema explotado en la zona de vapor llega a condiciones estacionarias, no así para un sistema que produce en la zona de líquido que requiere valores de α_r superiores a $6 \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ para lograrlo (Fig 5.4).

vii. El comportamiento termodinámico de un yacimiento bajo explotación, suele seguir las siguientes trayectorias: líquido comprimido, líquido saturado, dos fases en equilibrio, vapor saturado y finalmente vapor sobrecalentado; sin embargo, si los sistemas son explotados en la región de vapor, el nivel de líquido puede eventualmente subir e intersectar la tubería de producción del pozo y producir en superficie dos fases, cuando originalmente el sistema producía exclusivamente vapor.

Este mecanismo es explicado por el equilibrio hidráulico que debe de existir entre el empuje creado por la zona de alimentación y las características del fluido en la fractura.

viii. Se observa de las figuras generadas (figs 1-7) que para el tipo de sistema aquí estudiados los efectos y tendencias se amplifican en el tiempo con respecto a la extracción de fluidos de yacimientos en medios porosos relativamente grandes.

7. APLICACION ADICIONAL

El abatimiento inicial de la presión (temperatura) de este tipo de sistemas bajo condiciones de explotación está directamente relacionado con la magnitud del flujo másico extraído, y en relación inversa, a la del fluido contenido dentro del volumen poroso (V_p), en esta etapa el sistema se comporta como "tanque" y la evaluación del volumen poroso puede realizarse al simplificar la ecuación (18) al considerar w_r y q^* iguales a cero para así obtener:

$$T = T_{inicial} + m \bar{w} t \quad (27)$$

en donde m es igual a $(a_T \epsilon^{-1} V_p^{-1})$ o $(b_T \epsilon^{-1} V_p^{-1})$ si se extrae en la zona de vapor o de líquido, respectivamente.

La evaluación del volumen poroso es un parámetro importante para definir las características de extracción de fluidos de la fractura. Para lo anterior, se sugiere el siguiente procedimiento:

a) *vía* una extracción inicial de fluidos evaluar el volumen poroso, b) *vía* el conocimiento del volumen poroso evaluar la caída principal de la presión (temperatura) del sistema bajo un nuevo esquema de explotación.

Por ejemplo, la pendiente de la línea recta que sigue el abatimiento de la temperatura para el caso de la figura 5.1 es de $m = 0.83 \text{ } ^\circ\text{C h}^{-1}$, y el volumen poroso de la fractura calculado es de $15,663 \text{ m}^3$ (†), mientras que el volumen teórico considerado fue de 15.0000 m^3 ; y de (27), otras extracciones de fluido de la fractura pueden ser consideradas.

† Los coeficientes a_T y c requeridos para evaluar V_p fueron evaluados considerando la temperatura inicial del yacimiento y sus valores son de 1.3×10^6 y 1.8×10^6 , respectivamente.

8. CONCLUSIONES

Se propone un modelo de simulación para conocer el comportamiento termodinámico de sistemas caracterizados por la presencia de agua y vapor segregados dentro de una fractura geotérmica.

Del estudio de sensibilidad realizado se concluye que cuando el sistema es explotado en la zona de líquido los factores más importantes para su sostenimiento son la temperatura y la constante de recarga; mientras que si es explotado en la zona de vapor, lo es el flujo de calor aportado por la matriz de roca, puesto que estos son los que determinan el mantenimiento del sistema en su nuevo *status quo* bajo condiciones de explotación.

Debido a la gran susceptibilidad de estos sistemas, se recomienda un minucioso monitoreo de su evolución termodinámica para identificar los principales mecanismos que actúan sobre él, y de esta manera, definir las estrategias más adecuadas para su explotación.

6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

De acuerdo a los resultados de las corridas de simulación realizadas anteriormente, en esta sección se discute el comportamiento que este tipo de sistemas exhibe bajo explotación. Asimismo, la discusión deberá enmarcarse en el contexto de las simplificaciones y aproximaciones consideradas para el planteamiento matemático del modelo de simulación aquí tratado:

i. Inicialmente, el sistema se encuentra en equilibrio térmico e hidráulico con los alrededores, pero debido a los disturbios creados por la explotación, se originan gradientes de temperatura y de presión, y como consecuencia de esto, se establecen flujos de masa (\dot{w}_r) y energía (q^*) para tratar de estabilizarlo (Figs 5.1-5.7).

ii. El gasto evaporado (\dot{w}_e), que ocurre como respuesta del sistema por la disminución de la presión al producir en la zona de vapor, actúa como término fuente localizado en la interfase y es el mecanismo principal para su estabilización. Este tiende rápidamente hacia el valor del gasto extraído (\dot{w}_{pu}).

iii. El flujo de recarga (\dot{w}_r), y a diferencia del gasto evaporado, se incrementa rápidamente hasta un valor máximo y después decrecer y estabilizarse si se extrae en la zona de vapor; si la extracción es en la zona de líquido, este simplemente se incrementa para después igualarse a la cantidad de masa extraída del sistema (Figs 5.1-5.2).

iv. El coeficiente de transferencia de calor es un parámetro importante en el sostenimiento de una zona explotada en la zona de vapor, debido a que es el que suministra el calor latente de vaporización requerido durante el proceso de evaporación (Fig 5.5 y Fig 5.7).

v. Los sistemas que son explotados en la zona de líquido son más sensibles a temperaturas del fluido de recarga inferiores a las de la temperatura del fluido en la fractura, que los explotados en la zona de vapor. (Fig. 5.3).

vi. La constante de recarga juega un papel importante para el mantenimiento de sistemas explotados en la zona de líquido; por ejemplo, para el valor de $\alpha_r = 2 \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ un sistema explotado en la zona de vapor llega a condiciones estacionarias, no así para un sistema que produce en la zona de líquido que requiere valores de α_r superiores a $6 \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ para lograrlo (Fig 5.4).

vii. El comportamiento termodinámico de un yacimiento bajo explotación, suele seguir las siguientes trayectorias: líquido comprimido, líquido saturado, dos fases en equilibrio, vapor saturado y finalmente vapor sobrecalentado; sin embargo, si los sistemas son explotados en la región de vapor, el nivel de líquido puede eventualmente subir e intersectar la tubería de producción del pozo y producir en superficie dos fases, cuando originalmente el sistema producía exclusivamente vapor.

Este mecanismo es explicado por el equilibrio hidráulico que debe de existir entre el empuje creado por la zona de alimentación y las características del fluido en la fractura.

viii. Se observa de las figuras generadas (figs 1-7) que para el tipo de sistema aquí estudiados los efectos y tendencias se amplifican en el tiempo con respecto a la extracción de fluidos de yacimientos en medios porosos relativamente grandes.

7. APLICACION ADICIONAL

El abatimiento inicial de la presión (temperatura) de este tipo de sistemas bajo condiciones de explotación está directamente relacionado con la magnitud del flujo másico extraído, y en relación inversa, a la del fluido contenido dentro del volumen poroso (V_p), en esta etapa el sistema se comporta como "tanque" y la evaluación del volumen poroso puede realizarse al simplificar la ecuación (18) al considerar w_r y q^* iguales a cero para así obtener:

$$T = T_{inicial} + m \bar{w} t \quad (27)$$

en donde m es igual a $(a_T e^{-1} V_p^{-1})$ o $(b_T e^{-1} V_p^{-1})$ si se extrae en la zona de vapor o de líquido, respectivamente.

La evaluación del volumen poroso es un parámetro importante para definir las características de extracción de fluidos de la fractura. Para lo anterior, se sugiere el siguiente procedimiento:

a) *via* una extracción inicial de fluidos evaluar el volumen poroso, b) *via* el conocimiento del volumen poroso evaluar la caída principal de la presión (temperatura) del sistema bajo un nuevo esquema de explotación.

Por ejemplo, la pendiente de la línea recta que sigue el abatimiento de la temperatura para el caso de la figura 5.1 es de $m = 0.53 \text{ } ^\circ\text{C h}^{-1}$, y el volumen poroso de la fractura calculado es de 15.663 m^3 (†), mientras que el volumen teórico considerado fue de 15.0000 m^3 ; y de (27), otras extracciones de fluido de la fractura pueden ser consideradas.

† Los coeficientes a_T y ϵ requeridos para evaluar V_p fueron evaluados considerando la temperatura inicial del yacimiento y sus valores son de 1.3×10^6 y 1.8×10^6 , respectivamente.

8. CONCLUSIONES

Se propone un modelo de simulación para conocer el comportamiento termodinámico de sistemas caracterizados por la presencia de agua y vapor segregados dentro de una fractura geotérmica.

Del estudio de sensibilidad realizado se concluye que cuando el sistema es explotado en la zona de líquido los factores más importantes para su sostenimiento son la temperatura y la constante de recarga; mientras que si es explotado en la zona de vapor, lo es el flujo de calor aportado por la matriz de roca, puesto que estos son los que determinan el mantenimiento del sistema en su nuevo *status quo* bajo condiciones de explotación.

Debido a la gran susceptibilidad de estos sistemas, se recomienda un minucioso monitoreo de su evolución termodinámica para identificar los principales mecanismos que actúan sobre él, y de esta manera, definir las estrategias más adecuadas para su explotación.

DESCRIPCION DE SIMBOLOS

b	Espesor de la fractura (m)
c_{ps}	Calor específico del sólido ($kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
c_{pR}	Calor específico de la roca ($kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
g	Aceleración de la gravedad ($9.81\ m\ s^{-2}$)
h_{fg}	Calor latente de vaporización ($kJ\ kg^{-1}$)
$h_{l\ sup}$	Entalpía fase líquida a la presión $P_{v\ adm}$ ($kJ\ kg^{-1}$)
h_l	Entalpía de la fase líquida ($kJ\ kg^{-1}$)
$h_{v\ adm}$	Entalpía del vapor de admisión a la turbina ($kJ\ kg^{-1}$)
h_v	Entalpía de la fase vapor ($kJ\ kg^{-1}$)
h_r	Entalpía del fluido de recarga ($kJ\ kg^{-1}$)
L	Longitud de la fractura (m)
L	Operador de Laplace
L^{-1}	Operador inverso de Laplace
m_s	Masa de sólidos en la fractura (kg)
m_l	Masa del líquido (kg)
n	Nivel de tiempo
P	Presión del agua o vapor a condiciones de Saturación (MPa)
P_0	Presión de la zona de alimentación (MPa)

$P_{v adm}$	Presión del vapor de admisión turbina (MPa)
q^*	Transferencia de calor por conducción matriz-fluido ($kJ s^{-1}$)
q_1	Función de influencia ($kJ s^{-1} °C^{-1}$)
s	Parámetro de Laplace (s^{-1})
t	Tiempo, variable independiente (s)
T	Temperatura del agua o el vapor en la fractura (°C)
T_r	Temperatura del fluido de recarga (°C)
u_s	Energía interna de los sólidos en la fractura ($kJ kg^{-1}$)
u_l	Energía interna de la fase líquida ($kJ kg^{-1}$)
U	Coefficiente de Transferencia de Calor ($kJ m^{-2} s^{-1} °C^{-1}$)
V_p	Volumen poroso de la fractura (m^3)
x	Calidad del vapor, sin dimensiones (fracción)
x_L	Distancia a la frontera exterior de la matriz de roca (m)
z	Nivel del líquido, tomando como referencia la base de la fractura (m)
z_t	Altura de la fractura (m)
\dot{w}_r	Flujo másico de recarga ($kg s^{-1}$)
\dot{w}_e	Flujo másico evaporado ($kg s^{-1}$)
\dot{w}_{pl}	Producción másica de líquido ($kg s^{-1}$)
\dot{w}_{pv}	Producción másica de vapor ($kg s^{-1}$)

-
- Δt Magnitud de la etapa de integración (s)
- α_r Constante de recarga ($kg\ s^{-1}\ MPa^{-1}$)
- ϵ Relación nivel de líquido a la altura total de la fractura, sin dimensiones (fracción)
- κ Conductividad térmica ($kJ\ m^{-1}\ s^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
- $\bar{\rho}_f$ Densidad promedio del líquido ($kg\ m^{-3}$)
- ρ_r Densidad del fluido de recarga ($kg\ m^{-3}$)
- ρ_R Densidad de la matriz de roca ($kg\ m^{-3}$)
- ρ_v Densidad del vapor ($kg\ m^{-3}$)
- ρ_s Densidad de los sólidos en la fractura ($kg\ m^{-3}$)
- ρ_l Densidad de la fase líquida ($kg\ m^{-3}$)
- ϕ Relación del volumen del fluido al volumen total de la fractura ()
- ' Denota la derivada de alguna propiedad termodinámica con respecto a la temperatura.

REFERENCIAS

Craft B C y Hawkins M F Jr (1959): *Applied Petroleum Reservoir Engineering*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.

Brigham W E y Neri G (1980): *A Depletion Model for the Gabbro Zone (Northern Part of Larderello Field)*. Proc., Second DOE-ENEL Workshop Cooperative Research Geothermal Energy, Berkeley, CA, pp 434-463.

Brownell D H, Garg S K y Pritchett J W (1977): *Governing Equations for Geothermal Reservoir*. Water Resources Research, 13(6), pp 929-935.

Cinco-Ley H (1982): *Evaluation Of Hydraulic Fracturing By Transient Pressure Analysis Methods*. Paper SPE 10043 presented at the International Petroleum Exhibition and Technical Symposium of the SPE. Beijing, China, 18-26 March.

Cinco-Ley H y Samaniego-V F (1982): *Pressure Transient Analysis for Naturally Fractured Reservoir*. Paper SPE 11026 presented at the SPE 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, Sept. 26-29.

Cinco-Ley H y Meng H (1988): *Pressure Transiente Analysis of Well With Finite Conductivity Vertical Fractured in Double Porosity Reservoir*. Paper SPE 18172 presented at the SPE 63rd Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Tx. Oct. 2-5.

Carslaw H S y Jaeger J C (1959): *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, Oxford, England.

Carnahan B, Luther H A, y Wilkes J O (1970): *Applied Numerical Methods*. Wiley, New York.

Castanier L M, Sanyal S K y Brigham W E (1980): *A Practical Analytical Model*

for *Geothermal Reservoir Simulation*. Paper SPE 8887, SPE California Regional Meeting, Los Angeles, CA.

Comisión Federal de Electricidad (1991): *Costos y Parámetros de Referencia Para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico*. CFE.

Faust C R y Mercer J W (1979a): *Geothermal Reservoir Simulation, 1. Mathematical Models for Liquid and Vapor Dominated Hydrothermal Systems*. Water Resources Research, 15(1), pp 23-30.

Faust C R y Mercer J W (1979b): *Geothermal Reservoir Simulation, 2. Mathematical Models for Liquid and Vapor Dominated Hydrothermal Systems*. Water Resources Research, 15(1), pp 31-46.

Franks R G E (1972): *Modeling and Simulation in Chemical Engineering*. Wiley-Interscience, New York.

Garg S K, Pritchett J W y Brownell D H (1975): *Transport of Mass and Energy in Porous Media*. Presented at Second United National Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco.

Garg S K, Pritchett J W (1977) : *On Pressure-work, Viscous Dissipation and the Energy Balance Relation for Geothermal Reservoir*. Advances in Water Resources, 1(1), pp 41-47.

Grant M A (1977): *Broadlans: A Gas-Dominated Field*. Geothermics, 6(1), pp 9-29.

Grant M A, Donaldson I G y Bixley P F (1982): *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press, New York.

Irvine T F, Peter E. Liley (1984): *Steam and Gas Tables with Computer Equations*.

Academic Press, Orlando.

Kappelmeyer O y Haenel R (1974): *Geothermics with Special Reference to Application*. Geopublications Associates, Berlin, Stuttgart.

Miller F G (1962): *Theory of Unsteady-State Influx of Water in Linear Reservoir*. Journal of Institute of Petroleum, 48, pp 365- 379

Nabor G W y Barham R H (1964): *Linear Aquifer Behavior*. May, Journal Petroleum Technology, Trans. AIME, 231, pp 561-563.

Pruess K (1983): *Development of the General Purpose Simulator MULKOM*. Annual Report 1982, Earth Sciences Division, report LBL- 15500, Lawrence Berkeley Laboratory.

Pruess K (1987): *TOUGH User's Guide*. Nuclear Regulatory Commission, Report NUREG/CR 4644.

Pruess K (1988): *SHAFT, MULKOM, THOUGH: A Set of Numerical Simulators for Multiphase Fluid and Heat Flow*. Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía, 4(1), pp 185-202.

Schilthuis R J (1936): *Active Oil and Reservoir Energy*. Trans. AIME, 118, pp 33-52.

Sorey M L y Fradkin L J (1979): *Validation and Comparison of Different Models of the Wairakei Geothermal Reservoir*. Fifth Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, pp 215-220.

Stehfest H (1970): *Numerical Inversion of Laplace Transforms*. Communications of the ACM, January, 13(1), pp 47-99.

Whiting R L y Ramey H J Jr. (1969): *Application of Material and Energy Balances to Geothermal Steam Production*. Journal of Petroleum Technology, July,21(7),pp 893-900.

APENDICE:

CODIGO DE SIMULACION

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

TRANSITORIOS TERMODINAMICOS EN FRACTURAS GEOTERMICAS BAJO EXPLOTACION

CODIGO DE SIMULACION DESARROLLADO POR:

FERNANDO ASCENCIO CENDEJAS

Nota: En la subroutine LECTOR se describen variables de entrada

```
PROGRAM MAIN
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON/GINT/T,DT,JS,JN,DXA(500),XA(500),IO,JS4
COMMON/CPR/NPR
DIMENSION DELTF(1000),Z(1000),TIEMPO(1000),ZP(20)
REAL*8 L,K
CHARACTER*20 INPUT,OUTPUT
DATA G,PHI/9.81D0,3.14159D0/

WRITE(*,1000)
READ(*,1100) INPUT
WRITE(*,1200)
READ(*,1100)OUTPUT

OPEN(UNIT=5,FILE=INPUT,STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=6,FILE=OUTPUT,STATUS='NEW')

T=0.
TPRNTF=0.
I=0
CALL LECTOR(TMAX,TRUNGE,TPRINT,TF,HR,WVADM,HLADM,HVADM,ZT,Z,ZP,
*      L,XL,B,ALFA,PO,PADM,K,DR,POR,CPROC,IQ,NZP)
BETA=(1.-POR)/POR
TR=TF
TFTEMP=TF

CONTINUE
I=I+1
CALL WATER(TF,P,DL,DV,HL,HV,DERDL,DERDV,DERHL)
IF(P.LE.PADM)STOP

WPLT=0.
WPVT=0.
DO 100 J=1,NZP
IF(ZP(J).LT.Z(I))
*      CALL PRLIQ(FLAGL,FLAGV,HL,WVADM,HLADM,HVADM,WPL,HM)
IF(ZP(J).GE.Z(I)) CALL PRVAP(FLAGL,FLAGV,WVADM,WPV,HV,HM)
WPLT=WPL*FLAGL+WPLT
WPVT=WPV*FLAGV+WPVT

100 CONTINUE
```

100 CONTINUE

```

C
EPS=Z(I)/ZT
P1=P+1.0E-6*G*Z(I)*DL
WR=ALFA*(PO-P1)
HFG=HV-HL
TEMP1=DL*DERDV*HFG-DV*BETA*TF
TEMP2=EPS*(DL**2*DERHL-DL*DERDV*HFG+(DL+(DERDV-DERDL)*TF)*BETA)
TERM=TEMP1+TEMP2

C
C
C
TEMP1=(DL*HFG-BETA*TF)*WPVT*1
TEMP2=(DV*HFG-BETA*TF)*WPLT*1
TEMP3=(DL*(HL-HR)+BETA*TF)*WR
TEMP4=-DL*Q
DERT=- (TEMP1+TEMP2+TEMP3+TEMP4)/(POR*L*B*ZT*TERM)

C
C
C
TEMP1=-EPS*(BETA+DL*DERHL-DERDL*HFG)*WPVT*1
TEMP2=- (DERDV*HFG+EPS*(DL*DERHL-BETA-DERDV*HFG))*WPLT*1
TEMP3=((HV-HR)*DERDV+EPS*(BETA+DL*DERHL+DERDL*(HL-HR)-
* DERDV*(HV-HR)))*WR
TEMP4=- (DERDV+EPS*(DERDL-DERDV))*Q
DERZ=(TEMP1+TEMP2+TEMP3+TEMP4)/(POR*L*B*TERM)

C
C
C
TEMP1=EPS*(DL*(BETA+DL*DERHL)-DERDL*BETA*TF)*WPVT*1
TEMP2=(DERDV*BETA*TF-EPS*(DERDV*BETA*TF-DV*BETA-DL*DV*DERHL))*
* WPLT*1
TEMP3=- (DL*DERDV*(HL-HR)+DERDV*BETA*TF-EPS*(DL*DERDV*(HL-HR)-
* DL*DV*DERHL-DV*BETA+DERDV*BETA*TF))*WR
TEMP4=DL*DERDV*(1.-EPS)*Q
WE=(TEMP1+TEMP2+TEMP3+TEMP4)/TERM

C
CALL PRNFT(TPRNFT,TPRINT,TMAX,NF,T,TF,P,Z(I),WE,WR,Q,HM,
* WPLT,WPVT,O.DO,O.DO,O.DO)
GOTO(6,7),NF

6
CONTINUE
TFTEMP=TF
CALL INTI(T,TRUNGE,1)
TIEMPO(I)=T
CALL INT(TF,DERT)
ZZ=Z(I)
CALL INT(ZZ,DERZ)
Z(I+1)=ZZ
DELTF(I)=TFTEMP-TF
IF(IQ.GE.1)CALL QQQ(IQ,I,DELTF,K,DR,CPROC,XL,Z,L,TIEMPO,Q)
IF(IQ.LE.0)Q=K*L*Z(I)*(TR-TF)
GOTO 5

7
CONTINUE

C
C
C
C
CLOSE(5)
CLOSE(6)
1000 FORMAT(5X,'INPUT FILE:')
1100 FORMAT(A20)
1200 FORMAT(5X,'OUTPUT FILE:')

```

```

C      SUBROUTINE LECTOR(TMAX,TRUNGE,TPRINT,TF,HR,WVADM,HLADM,HVADM,
*      ZT,Z,ZP,L,XL,B,ALFA,PO,PADM,K,DR,POR,CPROC,IQ,NZP)
C
C      --LEE PARAMETROS DE ENTRA DEL SIMULADOR--
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C      DIMENSION Z(1000),ZP(20)
C      CHARACTER*60 TITULO
C      REAL*8 L,K
C      DATA G/9.81D0/
C      TITULO DE LA CORRIDA DE SIMULACION:
C      READ (5,0900)TITULO
C      TIEMPO MAXIMO DE SIMULACION:
C      READ (5,1000)TMAX:
C      DELTA DE TIEMPO
C      READ (5,1000)TRUNGE:
C      FRECUENCIA DE IMPRESION DE RESULTADOS:
C      READ (5,1000)TPRINT
C      TEMPERATURA DEL FLUIDO EN LA FRACTURA:
C      READ (5,1000)TF
C      TEMPERATURA DEL FLUIDO DE RECARGA:
C      READ (5,1000)TR
C      CONSTANTE DE RECARGA:
C      READ (5,1000)ALFA
C      CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA MATRIZ DE ROCA:
C      READ (5,1000)K
C      DENSIDAD DE LA ROCA:
C      READ (5,1000)DR
C      POROSIDAD DEL MEDIO:
C      READ (5,1000)POR
C      CALOR ESPECIFICO DE LA ROCA:
C      READ (5,1000)CPROC
C      FLUJO DE CALOR MATRIZ FLUIDO: IQ=0 ESTACIONARIO;
C      IQ=1, 2 o 3 TRANSITORIO INFINITO, CERRADO o TEMPERATURA CONSTANTE.
C      READ (5,0100)IQ
C      PRESION DE ADMISION TURBINA:
C      READ (5,1000)PADM
C      FLUJO MASICO DE ENTRADA TURBINA:
C      READ (5,1000)WVADM
C      ALTURA DE LA FRACTURA:
C      READ (5,1000)ZT
C      ESPESOR DE LA FRACTURA:
C      READ (5,1000)B
C      LONGITUD DE LA FRACTURA:
C      READ (5,1000)L
C      DISTANCIA A LA FRONTERA EXTERIOR:
C      READ (5,1000)XL
C      NIVEL DE LIQUIDO INICIAL:
C      READ (5,1000)Z(1)
C      READ (5,0100)NZP
C      DO 200 I=1,NZP
C      READ (5,1000)ZP(I)
200  CONTINUE
C
C      WRITE(*,1050)TITULO
C      WRITE(*,1100)TMAX
C      WRITE(*,1200)TRUNGE
C      WRITE(*,1300)TPRINT

```

```

WRITE(*,1400)TF
WRITE(*,1500)TR
WRITE(*,1600)ALFA
WRITE(*,1700)K
WRITE(*,1800)DR
WRITE(*,2000)CPROC
WRITE(*,2050)IQ
WRITE(*,2100)IQDM
WRITE(*,2200)WVADM
WRITE(*,2300)ZT
WRITE(*,2400)B
WRITE(*,2500)L
WRITE(*,2550)XL
WRITE(*,2600)Z(1)
DO 300 I=1,NZP
    WRITE(*,2700)ZP(I)
300    CONTINUE

```

```

READ (*,1000)HOLA

```

```

C
TADM=TLIQ(PADM)
HLADM=HLIQ(TADM)
CALL PTVAP(PADM,TADM,HVADM,VV,SV)
HR=HLIQ(TR)
P=PLIQ(TF)
DL=1./VLIQ(TF)
PO=P+G*Z(1)*1.E-6*DL

```

```

C
0100 FORMAT(21X,I1)
0900 FORMAT(A60)
1000 FORMAT(10X,D12.4)
1050 FORMAT(1X,A60)
1100 FORMAT(5X,'TMAX (SEG)           :',D12.4)
1200 FORMAT(5X,'TRUNGE (SEG)          :',D12.4)
1300 FORMAT(5X,'TPRINT (SEG)         :',D12.4)
1400 FORMAT(5X,'TF (GRAD C)          :',D12.4)
1500 FORMAT(5X,'TR (GRAD C)           :',D12.4)
1600 FORMAT(5X,'ALFA (...)'          :',D12.4)
1700 FORMAT(5X,'K (KJ/M/S/GRAD C)    :',D12.4)
1800 FORMAT(5X,'DR (KG/M^3)          :',D12.4)
1900 FORMAT(5X,'POR ( )'              :',D12.4)
2000 FORMAT(5X,'CPR (KJ/KG/GRAD C)   :',D12.4)
2050 FORMAT(5X,'IQ (1,2,0 3)         :',11X,I1)
2100 FORMAT(5X,'PADM (MPA)           :',D12.4)
2200 FORMAT(5X,'WVADM (KG/S)         :',D12.4)
2300 FORMAT(5X,'ZT (M)                :',D12.4)
2400 FORMAT(5X,'B (M)                 :',D12.4)
2500 FORMAT(5X,'L (M)                 :',D12.4)
2550 FORMAT(5X,'XL (M)                :',D12.4)
2600 FORMAT(5X,'Z (M)                 :',D12.4)
2700 FORMAT(5X,'ZP (M)                :',D12.4)

```

```

C
RETURN
END

```

```

C
SUBROUTINE QQQ(IQ,I,DELTF,K,DR,CPROC,XL,Z,L,TIEMPO,Q)

```

```

C --EVALUA LA INTEGRAL DE CONVOLUCION PARA EL CALCULO DEL FLUJO DE CALOR MATRIZ FLUIDO--

```

```

C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

```

```

REAL*8 L,K
DIMENSION DELTF(1000),Z(1000),TIEMPO(1000)
Q=0
II=I
DO 100 J=1,I
CALL QQ1(IQ,K,DR,CPROC,XL,II,TIEMPO,Q1)
Q=Q+DELT(J)*Q1*Z(J)*L
C      WRITE(6,8888)J,I,TIEMPO(I),DELT(J),Q1,DELT(J)*Q1,Q
C8888  FORMAT(5X,2I5,5F12.4)
      II=II-1
100    CONTINUE

RETURN
END

C
SUBROUTINE QQ1(IQ,K,DR,CPROC,XL,II,TIEMPO,Q1)
C --EVALUA EL FLUJO DE CALOR MATRIZ FLUIDO--
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
DIMENSION V(10),TIEMPO(1000)
REAL*8 L,K
DATA PHI/3.14159D0/
DLOGTW=0.6931471805599D0
9  NSTPS=10
V( 1)= 0.08333333333D0
V( 2)=-32.0833333333D0
V( 3)=1279.00000000D0
V( 4)=-15623.666666D0
V( 5)=84244.166666D0
V( 6)=-236957.50000D0
V( 7)=375911.66666D0
V( 8)=-340071.66666D0
V( 9)=164062.50000D0
V(10)=-32812.50000D0
IF (IQ .EQ. 1)XL=1
TD=K*TIEMPO(II)/(DR*CPROC*XL**2)

C
GOTO(1,2,3),IQ
C
1  Q1=2.*K/DSQRT( PHI*TD)
C
RETURN
C
2  CONTINUE
P=0.0
A=DLOGTW/TD
DO 100 J=1,NSTPS
S=A*J
SS=DSQRT(S)
PL=( DEXP(-SS)-DEXP(SS) )/( SS*(DEXP(-SS)+DEXP(SS) ) )
P=P+V(J)*PL
100  CONTINUE
Q1=- ( 2.*K/XL ) *P*A
RETURN

C
C
3  CONTINUE
P=0.0
A=DLOGTW/TD
DO 200 J=1,NSTPS
S=A*J

```

```

      SS=DSQRT(S)
      PL=( DEXP(-SS)+DEXP(SS) )/( SS*(DEXP(-SS)-DEXP(SS)) )
      P=P+V(J)*PL
200  CONTINUE
      Q1=- ( 2.*K/XL ) *P*A
      END
C
      SUBROUTINE PRVAP(FLAGL, FLAGV, WVADM, WPV, HV, HM)
C --EVALUA EXTRACCION DE MASA DE LA FRACTURA SI SE EXTRAE EN LA ZONA DE VAPOR--
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      FLAGV=1.
      FLAGL=0.
      WPV=WVADM
      WM=WPV
      HM=HV
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE PRLIQ(FLAGL, FLAGV, HL, WVADM, HLADM, HVADM, WPL, HM)
C --EVALUA EXTRACCION DE MASA DE LA FRACTURA SI SE EXTRAE EN LA ZONA DE LIQ.--
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      FLAGV=0.
      FLAGL=1.
      X=(HL-HLADM)/(HVADM-HLADM)
      WPL=WVADM/X
      WM=WPL
      HM=HL
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE WATER(TF, P, DL, DV, HL, HV, DERDL, DERDV, DERHL)
C --EVALUA LAS PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL AGUA Y VAPOR--
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DELTEM=1.0E-4
      DL=1./VLIQ(TF)
      HL=HLIQ(TF)
      P =PLIQ(TF)
      CALL PTVAP(P, TF, HV, VV, SV)
      DV=1./VV
C
      TFF =TF+DELTEM
      DLF=1./VLIQ(TFF)
      HLF=HLIQ(TFF)
      PF =PLIQ(TFF)
      CALL PTVAP(PF, TFF, HVF, VVF, SV)
      DVF=1./VVF
      DERDL=(DLF-DL)/DELTEM
      DERDV=(DVF-DV)/DELTEM
      DERHL=(HLF-HL)/DELTEM
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE INT (X,DX)
C --SUBROUTINA DE INTEGRACION POR EL METODO DE RUNGE-KUTTA--
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      COMMON/CINT/T,DT,JS, JN, DXA(500), XA(500), IO, JS4

```



```

JN=JN+1
GO TO (9,8,3,3),IO
9 X=X+DX* DT
RETURN
8 GO TO (1,2),JS
1 DXA(JN)=DX
X=X+DX* DT
RETURN
2 X=X+(DX-DXA(JN))*DT/2.
RETURN
3 GO TO (4,5,6,7),JS4
4 XA(JN)=X
DXA(JN)=DX
X=X+DX* DT
RETURN
5 DXA(JN)=DXA(JN)+2.* DX
X=XA(JN)+DX* DT
RETURN
6 DXA(JN)=DXA(JN)+2.* DX
X=XA(JN)+DX* DT
RETURN
7 DXA(JN)=(DXA(JN)+DX)/6.
X=XA(JN)+DXA(JN)* DT
RETURN
END

```

C
C
C

```

SUBROUTINE INTI(TD,DTD,IOD)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON/CINT/T,DT,JS,JN,DXA(500),XA(500),IO,JS4
IO = IOD
JN = 0
GO TO (6,5,1,1),IO
6 JS = 2
GO TO 7
5 JS = JS + 1
IF (JS .EQ. 3) JS=1
IF (JS .EQ. 2) RETURN
7 DT = DTD
3 TD = TD + DT
T = TD
RETURN
1 JS4 = JS4 + 1
IF (JS4 .EQ. 5) JS4 = 1
IF (JS4 .EQ. 1) GO TO 2
IF (JS4 .EQ. 3) GO TO 4
RETURN
2 DT = DTD/2.
GO TO 3
4 TD = TD + DT
DT = 2.* DT
T = TD
RETURN
END

```

C
C
C

```

FUNCTION PLIQ(T)
--EVALUA LA PRESION DE SATURACION EN FUNCION DE LA TEMPERATURA--
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

```

```

DIMENSION A(9)
DATA A/
1-7.691234564D0,-2.608023696D1,-1.681706546D2,6.423285504D1,
2-1.189646225D2,4.167117320D0,2.097506760D1,1.D9,6.DO/
TC=(T+273.15)/647.3
SC=0.
DO 5 J=1,5
5 SC=SC+A(J)*(1.-TC)**J
PC=DEXP(SC/(TC*(1.+A(6)*(1.-TC)+A(7)*(1.-TC)**2)))-(1.-TC)/(A(8)*
1(1.-TC)**2+A(9)))
PLIQ=PC*2.212E1
RETURN
END

```

C

```

FUNCTION TLIQ(P)
C --EVALUA LA TEMPERATURA DE SATURACION EN FUNCION DE LA PRESION--
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
P=P*145.0377
IF( P .LT. 2. .OR. P .GT. 3206.2 ) GOTO 1
IF( P .LT. 450. ) GOTO 20
A=DLOG(P)
TL=11545.164+A*(-8386.0182+A*(2477.7661+A*(-363.44271+A*(
*26.690978-A*0.78073813))))
GOTO 3
20 A=DLOG(10.0*P)
TL=35.15789+A*(24.592588+A*(2.1182069+A*(-.3414474+A*(
*.15741642+A*(-.031329585+A*(3.8658282D-3+A*(-2.4901784D-4
**A*6.8401559D-6))))))
3 CONTINUE
P=P/145.0377
TL=(TL-32.)/1.8
TLIQ=TL
RETURN
1 WRITE(*,2)P
2 FORMAT(9X,'PRESION= ',D12.4,'FUERA DE RANGO EN TSAT(P)')
STOP
END

```

C

```

FUNCTION VLIQ(T)
C --EVALUA EL VOLUMEN ESPECIALFICO DEL AGUA SATURA--
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
T=T*1.8+32.
IF( T .GT. 600. .OR. T .LT. 32. ) GOTO 50
IF( T .LT. 100. ) GOTO 10
VW=0.015852859+T*(2.603053D-6+T*(-7.238563D-9+T*(1.0972684
*D-10+T*(-2.5342969D-13+T*2.3071255D-16))))
VW= VW/16.01846
VLIQ=VW
T=(T-32)/1.8
GOTO 20
10 VW=.01601+.00000176*(T-32.)
VW=VW/16.01846
VLIQ=VW
T=(T-32)/1.8
20 RETURN
50 WRITE(*,1)T
1 FORMAT(9X,'TEMPERATURA= ',D12.4,'FUERA DE RANGO EN VSAT')
STOP
END

```

```

C      FUNCTION HLIQ(T)
C  --EVALUA LA ENTALPIA DE SATURACION DEL AGUA--
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      T=T*1.8+32.
      IF( T .GT. 600. .OR. T .LT. 32. ) GOTO 50
      HW=-32.459904+T*(1.0249349+T*(-4.1497723D-4+T*(3.0776818D
*-6+T*(-1.2602857D-8+T*(3.065809D-11+T*(-3.8340495D-14+T*(
*1.9906834D-17))))))
      HW=HW*2.326
      HLIQ=HW
      T=(T-32)/1.8
      RETURN
50    WRITE(*,1)T
      1    FORMAT(9X,'TEMPERATURA= ',D12.4,'FUERA DE RANGO EN HSAT')
      STOP
      END

C
      SUBROUTINE PTVAP(P,T,H,V,S)
C  --EVALUA LAS PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL VAPOR SATURADO--
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      REAL I,J,K,L,M
      P=P*145.0377
      T=T*1.8+32.
30    IF(P.LT..02.OR.P.GT.5501..OR.T.LT.50..OR.T.GT.1601.)GOTO 50
      A=0.0303166667*(T+459.688)
      B=-DLOG(A)/.048615207
      C=.1286073 *P
      D=DLOG(C)
      E=A*A/.79836127
      F=3.722501654D-3/E
      G=1.862100562D5*F+D-DLOG(A)+4.3342998
      G=DEXP(G)
      V=F*(G-C)**2
      H=V*V
      I=V*(-4.432721036D3/A+41.273)
      J=H*(A-1.7321882D3/A)
      K=2.0 *I+4. *J
      L=V*(3.4643764D3*V+4.432721036D3)/A
      IF(A .GT. 18.8131323+(14.3582702+5.0113763*D)*D/9.07243502)GOTO 7
      M=(F*F/.141431346D-10)**6
      Q=-H**3*(G-C)/24.0*(M-6.71076923D-4)
      J=J+Q
      L=L+H**3*(G-C)*M
      K=K+13.0*Q
7     VL=.0302749643*(K-G+C+83.47150448*A)/C
      IF( VL .LT. .1603) GOTO 50
      R=G+G*3.724201124D5*F
      U=R*K/(G-C)+K-L-R
      HL=835.41753-B+A/.0862139787+.04355685*(I+E-G+C+U)
      SL=.73726439-.0170952671*B-D/9.07243502
      SL=SL-1.32049845D-3*(472.24937+J-U-2.0*E)/A
10    H=HL*2.326
      V=VL/16.01846
      S=SL*1.8*2.3
      T=(T-32.)/1.8
      P=P/145.0377
      RETURN

```

```

50  WRITE(*,150)P,T
150  FORMAT(9X,'PRES.=' ,D12.4,'TEMP.=' ,D12.4,'FUERA RANGO  PTVAP')
      STOP
      END
C
C  SUBROUTINE PRNTF(TPRNT,PRI,FNR,NF,A,B,C,D,E,F,G,O,P,Q,A1,A2,A3)
C  --IMPRESION DE RESULTADOS DE SALIDA DEL CODIGO DE SIMULACION--
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      COMMON/CINT/T,DT,JS,JN,DXA(500),XA(500),IO,JS4
      COMMON/CPR/NPR
C 100  FORMAT(10F10.2)
100  FORMAT(1X,F7.0,1X,F7.2,1X,F5.2,1X,F6.1,1X,F5.2,1X,F5.2,1X,F7.1,
*      1X,F6.1,1X,F5.1,1X,F5.1)
      NPR = 0
      IF(TPRNT .LT. PRI) GO TO 4
      IF((T.GE.FNR-DT/2.).AND.({JS.EQ.2}.OR.{JS4.EQ.4}))GOTO 6
      IF((T.GE.TPRNT-DT/2.).AND.({JS.EQ.2}.OR.{JS4.EQ.4}))GOTO 5
      RETURN
4  NF = 1
5  TPRNT = TPRNT + PRI
8  WRITE(*,100)A/3600.,B,C,D,E,F,G,O,P,Q
      WRITE(6,100)A/3600.,B,C,D,E,F,G,O,P,Q
C  WRITE(*,100)A/3600.,G,O,P,Q,A1,A2,A3
      NPR = 1
      RETURN
6  T = 0.
      TPRNT = 0.
      NF = 2
      DO 7 J = 1,500
7  XA(J) = 0.
      GO TO 8
      END

```