

REVISION BIBLIOGRAFICA.

LA GEOTERMIA EN MEXICO

La importancia de conocer a fondo el comportamiento de los yacimientos geotérmicos en nuestro país, es que México es uno de los más importantes en cuanto a la producción de energía eléctrica mediante explotación geotérmica. Cuenta con un gran número de sitios con alteraciones hidrotermales con posibilidades de explotación económica.

Actualmente México ocupa el tercer lugar en el mundo en la generación geotermoeléctrica, precedido de Filipinas y los Estados Unidos [**Hiriart, 1994**].

Aún considerada como un energético complementario a los combustibles fósiles, la geotermia ocupa un lugar cada vez más importante; así lo demuestra el constante incremento en la capacidad instalada mundial de las plantas geotermoeléctricas. Hasta 1995 se tenía una capacidad instalada alrededor de los 6711 MW. Distribuida principalmente en 17 países [**Moridis y Pruess, 1995**].

De acuerdo a los estudios realizados más recientes [**Hiriart, 1994**], se concluye que las reservas geotérmicas del país son de la siguiente magnitud:

Reservas Probadas : 1340 MW.
Reservas probables: 4600 MW.
Reservas Posibles : 6000 MW.

Las reservas probadas corresponden básicamente a los tres campos actualmente en desarrollo:

Cerro Prieto
Los Azufres
Los Humeros

Las reservas probables corresponden a nuevos campos en los que se están realizando perforaciones exploratorias como en la Primavera, Ixtlán de los Hervores, Los Negritos, o ampliaciones de los actuales campos en desarrollo.

Las reservas posibles corresponden a una estimación de los 550 focos terminales que se conocen en el país.

Actualmente, la Comisión Federal de Electricidad tiene una capacidad total instalada de generación de energía eléctrica de más de 23,000 MW, por lo cual, los 725MW instalados mediante explotación geotérmica, representan el 3% del total. Este porcentaje se puede ampliar alrededor del 5% a mediano plazo puesto que se cuenta con más de 11,000 MW de reservas potenciales en sistemas de alta entalpia. La contribución geotérmica como energético, será cada vez más importante. Por otra parte, la industria geotérmica ha permitido el desarrollo de tecnología mexicana en cuanto a producción de vapor y fabricación de equipo en el país.

La comprensión de los fenómenos encontrados en los sistemas geotérmicos, es de gran importancia hoy en día, esto nos permitirá estar a la vanguardia tecnológica y de

investigación para el aprovechamiento de manera eficiente de nuestros recursos geotérmicos. Una de las formas de entender los fenómenos geotérmicos es trabajando con simuladores numéricos, los cuales nos permiten adquirir un amplio conocimiento en esta área.

-Simuladores Geotérmicos.

La simulación numérica del flujo de fluidos y calor en un medio poroso es una técnica que es aceptada a nivel mundial para la evaluación y estudio de yacimientos geotérmicos y otros sistemas de flujo subterráneo. Los laboratorios de Lawrence Berkeley (LLB) han desarrollado varios códigos de simulación con la capacidad de modelar flujo multifásico y efectos de cambios de fase [Pruess, 1988].

En 1973 el Departamento de Energía de los Estados Unidos inició un número de programas con el fin de perfeccionar las tecnologías energéticas las cuales pudieran proporcionar ciertas alternativas al empleo de combustibles hidrocarbonados. Los principales esfuerzos fueron aplicados en el campo de la energía geotérmica, donde se desarrollaron varios simuladores capaces de interpretar el comportamiento de los yacimientos geotérmicos en su estado natural y en explotación. Lo que se esperaba con esto es que una simulación computarizada pudiera ayudar a entender y perfeccionar los conocimientos de los recursos geotérmicos como un auxiliar en la ingeniería de yacimientos para determinar las reservas de fluido y calor y también para conocer el comportamiento de los yacimientos tanto en el presente como en el futuro bajo diferentes esquemas de extracción e inyección. Como resultado de los estudios numéricos los yacimientos podrían ser explotados con mayor eficiencia.

La simulación de yacimientos geotérmicos se ha convertido en una herramienta completamente aceptada para estudiar el flujo de fluido y calor en sistemas geotérmicos. Aún más, este tipo de técnicas ha encontrado aplicaciones en otras áreas, tales como el estudio de los desechos nucleares de alto nivel. El flujo de fluido en los yacimientos geotérmicos, a diferencia de los yacimientos de gas y petróleo, es no isotérmico [Lapidus y Schiesser, 1976]. El proceso de la evaporación de agua y condensación de vapor implica un intercambio de grandes cantidades de calor entre el fluido y la matriz rocosa. Debido a que el flujo de agua y vapor modifican la distribución de masa y energía en el yacimiento, es necesario considerar en la descripción de un yacimiento geotérmico en dos fases, las ecuaciones de transporte de masa y energía en forma simultánea.

Para que un simulador numérico proporcione resultados confiables, es necesario conocer todos los datos de campo posibles, como son las propiedades del yacimiento (permeabilidades y porosidades), el estado termodinámico del fluido geotérmico (presión, temperatura) y la historia de explotación del campo (flujos, entalpías, características químicas y presión del yacimiento). Si todos estos datos son conocidos, es posible construir un modelo conceptual que pueda predecir la conducta a futuro del sistema en forma confiable, siendo estrictamente necesario un proceso de calibración de prueba y error de este modelo [Pruess y Zersan, 1979]. Durante la explotación del campo geotérmico, el simulador numérico también se utiliza para determinar la colocación óptima, espaciamiento y rapidez de producción del pozo [Bodvarsson y Pruess, 1994].

Las diferencias existentes en el planteamiento del modelo físico entre los diferentes simuladores para yacimientos geotérmicos, consiste en la definición de la geometría del sistema (una, dos o tres dimensiones y la forma regular o irregular de esta), la elección de las variables termodinámica que controlarán el proceso y las técnicas numéricas utilizadas para la solución de las ecuaciones de transporte de masa y energía [**Lapidus y Schiesser 1976**].

Una vez planteado el modelo numérico, este generará grandes sistemas de ecuaciones no lineales que por lo general se resuelven utilizando métodos directos o iterativos. El de solución más precisa está basado en métodos directos, pero estos requieren de un almacenamiento excesivo en la memoria de la máquina y de mayor tiempo de CPU. Las técnicas iterativas exhiben problemas específicamente en el desempeño y falta de confiabilidad comparándolos con los directos [**Faust y Mercer 1980**].

En la actualidad existe un gran número de simuladores numéricos capaces de manejar flujos de uno o varios componentes, con cambio de fase. A continuación se describen alguno de los códigos elaborados en los Laboratorios de Lawrence Berkeley. Se toman como ejemplo a estos simuladores porque de ellos se parte en la presente tesis para fijar la estructura básica en la elaboración del simulador GEO.

SHAFT79

El simulador del transporte simultáneo de fluido y calor (SHAFT, de sus siglas en inglés), se basa en lo siguiente. Los yacimientos geotérmicos fueron definidos como sistemas de roca porosa con fluido de un solo componente (agua). El fluido se puede presentar en estado líquido o vapor, o bien como una mezcla bifásica de líquido y vapor. Los procesos físicos considerados por este modelo incluyen flujo de fluido y flujo de calor vía conducción y convección. La roca y el fluido se consideran que están en equilibrio termodinámico [**Pruess y Schroeder, 1980**]. Los procesos físicos se discuten por medio de balances de masa y energía con una versión de la Ley de Darcy en fases múltiples, Para la solución numérica de las ecuaciones, estas fueron discretizadas por medio de la técnica de diferencias finitas integradas. El conjunto de este sistema de ecuaciones resuelve de manera completamente acoplada. Los términos de flujo se evalúan en el nivel de tiempo incrementado. El sistema de ecuaciones es un sistema no lineal y para tratar esto, se utiliza la técnica de Newton. Las ecuaciones lineales originadas por Newton en cada etapa de tiempo se resuelven por medio de métodos directos de matrices. La solución de las ecuaciones lineales se realiza con el paquete MA28 el cual perfecciona una versión de la descomposición LU.

SHAFT79 debido a los métodos matemáticos y numéricos empleados puede tomar etapas de tiempo mucho muy grandes y puede llevar a cabo transiciones entre condiciones mono y bifásicas de manera estable y eficiente.

Existe un pequeño inconveniente en el manejo de las variables de estado (energía interna específica y densidad de mezcla), debido a la interpolación de datos tabulados de la tabla de vapor de agua que emplea este simulador. Dada la compresibilidad del agua líquida, los cambios de poca magnitud ocurridos en la densidad dan lugar a grandes incrementos de presión. El iniciar un problema de flujo en términos de las variables de estado ya definidas, regresará entonces una presión ligeramente diferente a la esperada (cerca de 0.1 bar).

Otro problema que se tiene es que SHAFT79 está escrito para fluidos de un sólo componente, mientras que los flujos geotérmicos son mezclas por lo general de varios componentes, conteniendo cantidades apreciables de gases no-condensables y sólidos disueltos.

SHAFT79 asume que el sistema físico es un sistema de roca porosa saturada con un fluido de un sólo componente de forma bifásica. Con excepción de la porosidad, la cual puede variar con la presión y temperatura, todas las demás propiedades del medio poroso (densidad, calor específico, conductividad térmica, permeabilidad absoluta), son independientes de la presión, temperatura o saturación de vapor. El líquido, vapor y el medio poroso se encuentran en un equilibrio termodinámico (igual temperatura y presión en todo el tiempo).

El manual de usuario de SHAFT79 [Pruess y Schroeder, 1980] explica de manera amplia la técnica numérica empleada y describe con detalle el conjunto de entrada de datos (input) para poder manipular el programa. La aplicación de SHAFT79 se ilustra por medio de ejemplos sencillos.

MULKOM

Es un simulador numérico que puede tratar fluidos de multicomponentes en estado multifásico en medios porosos o con fracturas [Pruess, 1988]. Las ecuaciones a resolver, los métodos matemáticos y numéricos empleados son similares a los manejados por SHAFT79. Las ecuaciones son formuladas de una manera completamente implícita, lo cual proporciona una gran estabilidad en etapas grandes de tiempo. Todas las ecuaciones de balance de masa y energía se resuelven simultáneamente, empleando la técnica de Newton. Las diferencias entre SHAFT79 y MULKOM, se encuentran en la arquitectura del código, el cual permite un manejo flexible de módulos que representan diferentes mezclas de fluidos. Desde el punto de vista matemático, un yacimiento conteniendo una mezcla de agua/bióxido de carbono, difiere solo en que los sistemas de ecuaciones de balance de masa requieren de ecuaciones adicionales, una para cada componente; también las propiedades termodinámica de las mezclas, son diferentes de las correspondientes sustancias puras.

El cálculo de las propiedades termofísicas en una base de datos como lo hace SHAFT79, puede conducir a requerimientos de almacenamiento excesivo cuando se tiene más de dos variables de estado (existe más de un componente). MULKOM para evitar esto, emplea expresiones en forma cerrada tales como correlaciones o de regresión. Las transiciones de fase son manejadas por medio de un cambio de variables independientes. Como ejemplo, para agua pura, la presión y temperatura se emplean como variables de estado para todas las regiones en un medio monofásico. Una transición de líquido a condiciones bifásicas se detecta cuando la presión desciende por debajo de la presión del vapor saturado a la temperatura reinante. En cada caso la segunda variable de estado temperatura, se cambia a saturación de vapor, siendo esta iniciada ligeramente mayor que cero cuando la transición ocurre desde un estado líquido, y ligeramente más pequeño que uno cuando la transición ocurre desde un estado de vapor. Una transición de condiciones bifásicas a fases líquida o vapor, ocurre cuando la variable saturación de vapor sale fuera del rango ($0 < S_v < 1$), en este caso la segunda variable de estado se cambia a temperatura y la presión se ajusta a un valor ligeramente arriba para líquidos, o abajo para vapor de la correspondiente presión de vapor

saturado. Procedimientos análogos son empleados para mezclas de fluidos con más de dos fases.

MULKOM ha sido usado para estudiar yacimientos geotérmicos, campos de gas y petróleo, depósitos de desechos nucleares y para el diseño y análisis de experimentos de laboratorio.

TOUGH

Este simulador fue creado como un módulo de MULKOM para flujo no isotérmico de una mezcla agua-aire para modelar las condiciones termohidrológicas de los desechos nucleares localizados en depósitos de aguas parcialmente saturadas en formaciones geológicas. A esta versión particular de MULKOM le fue dado el nombre de TOUGH [Pruess, 1988], que significa de sus siglas en ingles, transporte de agua no saturada y calor en un sistema subterráneo. Se ha utilizado principalmente para evaluar sistemas subterráneos como medios de almacenamiento de desechos nucleares de alto nivel.

El manual de usuario TOUGH [Pruess, 1978], incluye una descripción técnica del código y de su arquitectura así como e las ecuaciones gobernantes que son resultas por este simulador son vista con gran detalle. También proporciona la documentación completa para preparar el input (datos de entrada) e incluye un conjunto de ejemplos los cuales ilustran las aplicaciones del programa. TOUGH puede adaptarse para su uso en simulaciones de yacimientos geotérmicos considerados de agua pura, con sólo tomar como cero la fracción másica de aire en los datos de entrada.

Las ecuaciones básicas de balance de masa y energía para SHAFT79, MULKOM y TOUGH son las utilizadas en el simulador GEO y se presentan en el capítulo uno de esta tesis.