



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELADO INICIAL PARA YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS
DURANTE LA ETAPA DE EXPLORACIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO
MECÁNICO**

PRESENTAN:

ANDRACA GUTIÉRREZ FABIÁN HUEMATZIN

RODRÍGUEZ MARIAN JOSÉ ROBERTO

Director de Tesis: José Luis Fernández Zayas

México D.F. 08 de Marzo de 2012





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

ÍNDICE

Índice de Tablas	3
Índice de Figuras.....	4
Introducción.....	5
CAPITULO I.....	9
I. Antecedentes.....	9
1.1 Geotermia	9
1.2 Clasificación de la Energía Geotérmica en Función de la Temperatura.....	12
1.3 Tipos de Sistemas Geotérmicos.....	12
1.4 La Geotermia en el Mundo	16
1.5 La Geotermia en México	17
CAPITULO II.....	21
II. Campos geotérmicos	21
2.1 Pozo Geotérmico.....	21
2.2 Yacimiento Geotérmico.....	23
2.2.1 Fuente de Calor	24
2.2.2 Comportamiento del Reservorio.....	26
2.3 Fluidos Geotérmicos.....	27
CAPITULO III.....	29
III. Tipos de Centrales Geotermoeléctricas	29
3.1 Descripción Básica del Proceso de Utilización del Fluido Geotérmico.....	29
3.2 Tipos de Centrales de Generación.....	35
3.2.1 Centrales a Contrapresión.....	35
3.2.2 Centrales a Condensación	36
3.2.3 Centrales de Ciclo Binario	38
CAPITULO IV.....	41
IV. Etapas de un Proyecto Geotérmico	41
4.1 Estudio de Reconocimiento Geotérmico	41
4.2 Estudio de Prefactibilidad	43
4.3 Factibilidad Geotérmica	46
4.4 Etapa de Desarrollo	52
CAPÍTULO V.....	54
Metodologías para la Evaluación Preliminar de un Campo Geotérmico ...	54

5.1 Modelo de Calor Remanente GEOCOST.....	56
5.2 Modelo Volumétrico	57
5.3 Modelo Termodinámico.....	58
5.31 Extracción de Vapor	58
5.32 Extracción de Líquido (Agua caliente)	59
5.33 Extracción Mezcla Homogénea (agua-vapor)	61
5.4 Modelo USGS (Heat in Place)	62
5.5 Metodología propuesta denominada: Descompresión Gradual	64
CAPÍTULO VI.....	72
VI. Validación de los Modelos de Evaluación Preliminar.....	72
6.11 Modelo de Calor Remanente	73
Sensibilidad del Modelo de Calor Remanente	73
6.12 Modelo Volumétrico	74
Sensibilidad del Modelo Volumétrico	75
6.13 Modelo Termodinámico.....	76
Sensibilidad del Modelo Termodinámico.....	76
6.14 Modelo USGS (Heat in Place)	77
Sensibilidad del Modelo USGS	77
6.15 Modelo de Descompresión Gradual (propuesto en esta Tesis).....	78
Sensibilidad del Modelo de Descompresión Gradual	79
CONCLUSIONES	81
ANEXO I.....	83
Caso A) Expansión Adiabática	83
Caso B) Expansión con Transferencia de Calor de la Roca al Fluido Sin Recarga de Masa.	85
Caso C) Considerando Expansión con Recarga de Fluido pero sin Transferencia de Calor.	88
Caso D) General: Expansión con Transferencia de Calor y Recarga de Masa	90
ANEXO II.....	93
Análisis de Sensibilidad Considerando Expansión con Recarga- Sin Transferencia de Calor..	93
ANEXO III.....	98
EL RÉGIMEN JURÍDICO DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO	98
BIBLIOGRAFÍA	100

Índice de Tablas

Tabla 1	Clasificación y Uso de la Energía Geotérmica
Tabla 1.1	Capacidad Geotermoeléctrica Instalada a Mayo 2010, Congreso Geotérmico Mundial 2010
Tabla 1.2	Generación de Electricidad por Fuente, CFE, Agosto 2011
Tabla 1.3	Capacidad Efectiva Instalada CFE, Agosto del 2011
Tabla 1.4	Capacidad Instalada por Campo Geotérmico CFE, Agosto 2011
Tabla 5.1	Extracción de Vapor
Tabla 5.2	Extracción de Líquido
Tabla 5.3	Extracción Homogénea (líquido-vapor)
Tabla 5.4	Parámetros de Explotación
Tabla 5.5	Escenario de Simulación Base
Tabla 6.11	Resultados del Modelo de Calor Remanente
Tabla 6.12	Sensibilidad a la Temperatura del Modelo de Calor Remanente
Tabla 6.13	Sensibilidad al Área del Modelo de Calor Remanente
Tabla 6.14	Sensibilidad al Espesor del Modelo de Calor Remanente
Tabla 6.15	Sensibilidad a la Porosidad del Modelo Calor Remanente
Tabla 6.16	Resultados Modelo Volumétrico
Tabla 6.17	Sensibilidad a la Temperatura del Modelo Volumétrico
Tabla 6.18	Sensibilidad al Área del Modelo Volumétrico
Tabla 6.19	Sensibilidad al Espesor del Modelo Volumétrico
Tabla 6.20	Sensibilidad a la Porosidad del Modelo Volumétrico
Tabla 6.21	Resultados Modelo Termodinámico
Tabla 6.22	Sensibilidad a la Temperatura del Modelo Termodinámico
Tabla 6.23	Sensibilidad al Área del Modelo Termodinámico
Tabla 6.24	Sensibilidad al Espesor del Modelo Termodinámico
Tabla 6.25	Sensibilidad a la Porosidad del Modelo Termodinámico
Tabla 6.26	Resultados Modelo USGS
Tabla 6.27	Sensibilidad a la Temperatura del Modelo USGS
Tabla 6.28	Sensibilidad al Área del Modelo USGS
Tabla 6.29	Sensibilidad al Espesor del Modelo USGS
Tabla 6.30	Sensibilidad a la Porosidad del Modelo USGS
Tabla 6.31	Resultados del Modelo de Descompresión Gradual
Tabla 6.32	Sensibilidad a la Temperatura del Modelo de Descompresión Gradual
Tabla 6.33	Sensibilidad al Área del Modelo de Descompresión Gradual
Tabla 6.34	Sensibilidad al Espesor del Modelo de Descompresión Gradual
Tabla 6.35	Sensibilidad a la Porosidad del Modelo de Descompresión Gradual
Tabla 6.36	Resultados del Análisis de Sensibilidad

Índice de Figuras

- Figura 1 Esquema Origen de los Sistemas Geotérmicos
- Figura 1.1 Esquema de un Sistema Geotérmico
- Figura 1.2 Campos Geotérmicos Localizados en México
- Figura 1.3 Capacidad Geotermoeléctrica Instalada en el Mundo
- Figura 1.4 Esquema Yacimiento Geotérmico
-
- Figura 2 Diagrama Árbol de válvulas, Fotografía de Los Azufres, Michoacán
- Figura 2.1 Modelo de un Sistema Geotérmico.
- Figura 2.2 Esquema Yacimiento Geotérmico
-
- Figura 3 Pozo geotérmico Cerro Prieto, B.C
- Figura 3.1 Separador Centrífugo, Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla
- Figura 3.1 Esquema Funcionamiento Central a Contrapresión
- Figura 3.2 Vapor-ducto, Central Generadora Los Humeros, Puebla
- Figura 3.3 Torre de Enfriamiento. Los Azufres, Mich.
- Figura 3.4 Separador de Gases, Los Azufres, Mich.
- Figura 3.5 Pozo Inyector de Salmuera Separada, Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C.
- Figura 3.6 Esquema Funcionamiento Central a Condensación
- Figura 3.7 Esquema Funcionamiento Centrales de Ciclo Binario
- Figura 3.8 Esquema de Funcionamiento de una Central de Ciclo Binario, Los Azufres, Mich.
-
- Figura 4 Plataforma de de perforación
-
- Figura 5.1 Grafica de Extracción de Vapor
- Figura 5.2 Gráfica de Extracción de Líquido
- Figura 5.3 Gráfica de Extracción Mezcla Homogénea
- Figura 5.4 Idealización del Yacimiento
-
- Figura 6.1 Comportamiento de la Presión del Yacimiento en el Tiempo
- Figura 6.2 Comportamiento de la Calidad y la Entalpía del Yacimiento en el Tiempo
-
- Gráfica c.1.1 Variación de la Calidad en el Yacimiento (X)
- Gráfica c.1.1 Variación de la Calidad de Extracción (Líquido, Vapor, Homogéneo)
- Gráfica c.2 Variación de la Potencia Instalada
- Gráfica c. 3 Variación Temperatura de Recarga
- Gráfica c. 4 Variación de la Recarga de Masa

OBJETIVO:

Desarrollar un Modelo Matemático Simplificado capaz de dar una estimación preliminar del tamaño (ó potencia) del yacimiento durante la etapa inicial de exploración antes de invertir en la perforación de pozos. Para ello se requiere, con una información geológica mínima, la modelación de un yacimiento geotérmico que proporcione información acerca del comportamiento del mismo, al ser sometido a extracción continua, en diferentes modalidades. Que además permita predecir ó estimar el tiempo que este puede ser explotado, tomando en consideración aspectos tales como: reinyección, transferencia de calor cedida de la roca al fluido, presión, volumen idealizado del yacimiento y porosidad.

Introducción

El presente trabajo consiste en la descripción de la termodinámica, las ecuaciones y la elaboración de un software para realizar la evaluación del potencial de generación eléctrica de un yacimiento geotérmico, con base en el modelo desarrollado por Hiriart y Sánchez (1985)¹.

El modelado de un yacimiento geotérmico requiere de un conocimiento profundo de los parámetros físicos de la zona de estudio o campo, tales como permeabilidad, porosidad, temperatura a la que se encuentra el recurso, así como propiedades termodinámicas del fluido, entre otros. El comportamiento que el yacimiento pueda tener durante su explotación, resulta de vital importancia e interés para la solución de problemas prácticos, así como para la toma de decisiones en etapas de prefactibilidad y la posterior implementación de una central que sea capaz de utilizar el recurso en la superficie, para la generación de electricidad.

Este modelo cuenta con los fundamentos teóricos necesarios para precisar sus resultados, su complejidad resulta menor que la de un modelo numérico completo (elemento finito), pero teniendo una precisión considerable, en comparación con un análisis volumétrico. Este modelo tiene como base la metodología desarrollada por Hiriart y Sánchez (1985), donde se resuelven las ecuaciones de conservación de masa y energía en función de las propiedades termodinámicas del fluido (agua-vapor), se plantean las ecuaciones diferenciales que simulan el comportamiento de un yacimiento geotérmico, considerándolo como un recipiente con permeabilidad infinita.

¹ Thermodynamic behaviour of simplified geothermal reservoirs, Gerardo Hiriart and Eduardo Sánchez, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad (CFE), Morelia, México, University, Stanford, California, January 1985

Para realizar los cálculos se utilizaron las tablas termodinámicas de precisión de vapor “REFPROP” en la plataforma de Microsoft Excel (Macros), para definir las propiedades correspondientes a cada estado termodinámico durante la simulación de la explotación del yacimiento geotérmico.

Se inicia considerando un volumen de yacimiento constante, en el que el fluido se encuentra en estado bifásico (agua-vapor) de saturación. Después se modela la extracción del fluido recalculando las condiciones termodinámicas del yacimiento debido a la descompresión asociada a la extracción de masa, cuyo comportamiento dependerá de la variación en la calidad de vapor en el yacimiento. Como resultado se obtiene la evolución de la presión del fondo, la temperatura y la entalpía como función de la potencia instalada, dentro de las condiciones que pueden ser definidas para el yacimiento se encuentran: porosidad, recarga de masa, densidad de la roca, recarga de calor, etc.

Finalmente se define el potencial geotérmico cuando se ajusta la potencia instalada para el yacimiento de tal forma que éste alcance las condiciones de abandono que serán definidas previamente, en el tiempo establecido para la vida útil del proyecto.

La tesis se encuentra dividida en seis capítulos teniendo en un principio los **Antecedentes**, donde se define a la geotermia, la clasificación de los distintos tipos de sistemas geotérmicos, se muestra la clasificación de los recursos según la temperatura y los principales usos o aplicaciones que éste puede tener en función de la misma. Posteriormente, se menciona el panorama de la generación eléctrica geotérmica a nivel mundial además de la producción o aportación que México tiene de este recurso en comparación con otros países, así como la presentación de un mapa con la ubicación de los campos geotérmicos que actualmente son explotados, con la información acerca de la potencia instalada actualmente en cada campo y el porcentaje que representa la Geotermia en el esquema de generación eléctrica nacional.

El segundo capítulo denominado como **Campos Geotérmicos** se enfoca en una breve descripción de las características principales de los yacimientos geotérmicos y las condiciones necesarias para su formación, se hace mención de los elementos que conforman a los pozos, en particular a los pozos productores, por medio de los cuales se realiza la explotación para generación eléctrica de los yacimientos y los cuales son considerados para las simulaciones y evaluación del potencial.

En el tercer capítulo, **Tipos de Centrales Geotermoeléctricas**, se describe el funcionamiento de las centrales que se han desarrollado para transformar el recurso Geotérmico en energía eléctrica, además de los diferentes

componentes y procesos por los cuales debe pasar el fluido geotérmico, que es extraído del subsuelo, para posteriormente recuperar la energía asociada del fluido y darle utilidad en superficie.

Las **Etapas de un Proyecto Geotérmico** se desarrollan en el cuarto capítulo, los estudios y etapas que se recomiendan cumplir para establecer que tan rentable resulta la exploración y futura explotación del yacimiento, cabe señalar que es a través de estos estudios que se toma la determinación de cuando suspender o continuar con el proceso de perforación para la explotación del recurso.

El capítulo quinto **Metodologías para la Evaluación Preliminar de un Campo Geotérmico** se enfoca a la parte del desarrollo matemático y en la Metodología propia del modelo de **Descompresión Gradual** (modelo propuesto en ésta tesis), así como de 4 métodos de evaluación rápida de yacimientos geotérmicos, que actualmente son utilizados.

Los modelos geotérmicos utilizados son: Geocost, Volumétrico, Termodinámico y USGS.

Cada modelo presenta consideraciones distintas e involucra diversos parámetros, por lo que la precisión y confiabilidad en la evaluación del potencial que puede ser instalado en un campo, dependerá de la posibilidad de realizar la evaluación con la mayor cantidad de parámetros que se encuentren involucrados en el proceso y sobre los cuales se tenga conocimiento.

Se desarrolló un programa en la plataforma de Microsoft Excel, para cada una de las metodologías ya mencionadas, con el fin de evaluar y simular el comportamiento de un yacimiento geotérmico considerando los mismos parámetros termodinámicos generales del yacimiento y de explotación para cada caso.

En el Capítulo sexto se realiza una comparación entre los diversos modelos que han sido desarrollados para la evaluación del potencial de un yacimiento geotérmico, para realizar la **Validación de los Modelos de Evaluación Preliminar** se presenta una tabla en donde se recopilan los resultados obtenidos de las simulaciones para cada modelo, analizados bajo los mismos parámetros generales y realizando un análisis de sensibilidad para determinar el escenario pesimista, el escenario optimista y el escenario esperado.

Finalmente en las **Conclusiones** se hace un análisis de los resultados obtenidos en la **Validación de los Modelos de Evaluación Preliminar**, se explica la utilidad del software desarrollado, los múltiples ahorros que puede representar y se define el grado de exactitud del modelo propuesto.

Capítulo I

Antecedentes

CAPITULO I

I. Antecedentes

1.1 Geotermia

La mayor parte de este calor se genera a partir de material fundido llamado magma. La mayoría del magma producido en la Tierra no llega a la superficie, sino que tiende acumularse a profundidades entre 5 y 10 km, en donde suele calentar grandes regiones de roca o reservorios de fluidos confinados, los cuales dan origen a la formación de los sistemas geotérmicos² (Armstead, 1983; Dickson & Fanelli, 2005).

Desde un punto de vista práctico, se denomina energía geotérmica o simplemente geotermia al estudio y utilización de la energía térmica que, transportada a través de la roca y/o de fluidos, se desplaza hacia los niveles superficiales de la misma.

Esta energía produce en la superficie terrestre manifestaciones tales como fumarolas, manantiales termales, géiseres, así como la manifestación más extraordinaria que son los volcanes.

El origen de los sistemas geotérmicos está relacionado con el movimiento de las placas tectónicas (Figura 1), las cuales al chocar o separarse constituyen regiones geológicamente activas en las cuales se presentan los fenómenos de subducción de placas (una de las placas se dobla con un ángulo pequeño introduciéndose por debajo de la otra) ó de debilidad cortical.

En el primer caso, la colisión e introducción de una placa por debajo de otra produce elevadas temperaturas, formándose magma (roca fundida) que puede llegar a la superficie para crear volcanes. En el segundo caso, al existir placas con movimientos divergentes (fenómeno que se presenta cuando dos placas se separan), el magma del manto puede llegar cerca de la superficie originando vulcanismo.

La existencia de este calor se manifiesta directamente en las erupciones volcánicas en las que hay una proyección de rocas fundidas y de gases, y en forma menos brutal, pero no por ello menos espectacular se presenta el fenómeno del geiser, que consiste en el ascenso de vapor de agua a presión a lo largo de una fractura, a una temperatura que varía entre los 200°C y 250°C.

² Armstead, 1983; Dickson & Fanelli, 2005

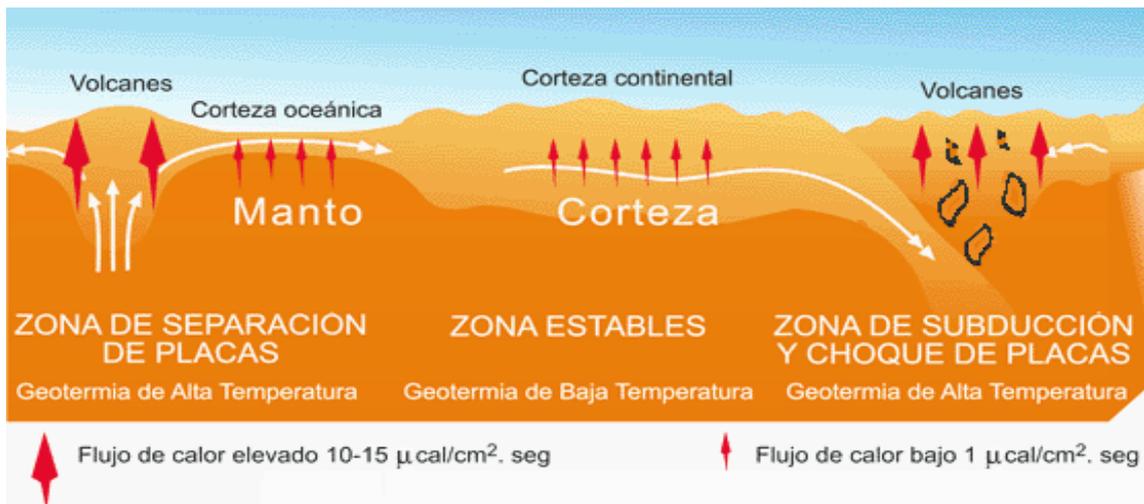


Figura 1 .Esquema Origen de los Sistemas Geotérmicos

Se sabe que la temperatura de la corteza terrestre aumenta a medida que se profundiza en la misma es decir existe un gradiente térmico (el cual se encuentra alrededor de 25 a 30 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$) y, por lo tanto un flujo de calor desde el interior de la Tierra hacia el exterior.

En determinados puntos de la Tierra el flujo de calor es, sin embargo, anormalmente elevado. Estas áreas con flujo elevado coinciden siempre con zonas de existencia de fenómenos geológicos singulares, como son una actividad sísmica elevada, la formación de cordilleras y una actividad volcánica actual ó muy reciente. Estos fenómenos geológicos representan distintas formas de liberación de la energía interna de la Tierra, cuya explicación puede darse a la luz de la tectónica de placas que rige la estructura de la corteza de la Tierra y su relación con el manto.

El flujo de calor anómalo ocasionado en estas áreas singulares da lugar a gradientes geotérmicos con valor de 15-30 $^{\circ}\text{C}$ cada 100 metros, por lo que a profundidades de 1,5 a 2 km se pueden encontrar temperaturas de 200-300 $^{\circ}\text{C}$.

³El calor requerido para la formación de un sistema geotérmico puede ser proporcionado por una masa de magma de alta temperatura situada en la corteza. Este calor puede almacenarse en la roca ó en acuíferos localizados a pocos kilómetros de profundidad dando origen a los sistemas geotérmicos.

³ Patricia Nuñez, Daniel Díaz Sáez, Pedro Velázquez Espinoza, Geotermia, 2008

En la actualidad los reservorios hidrotermales son los más aprovechados para fines energéticos, en particular en generación eléctrica. Los elementos esenciales que determinan su conformación son:

- Existencia de una fuente de calor no muy profunda y cercana al reservorio. Esta fuente de calor puede producirse por la actividad volcánica ó por la interacción entre dos placas tectónicas.
- Presencia de formaciones geológicas permeables que contenga el reservorio.
- Presencia de estructuras geológicas sobre el yacimiento, que actúen como una capa sello, impermeable, favoreciendo la conservación del calor y la presión del reservorio.
- Existencia de un área de recarga hídrica del reservorio, que condiciona la característica renovable del recurso geotérmico.

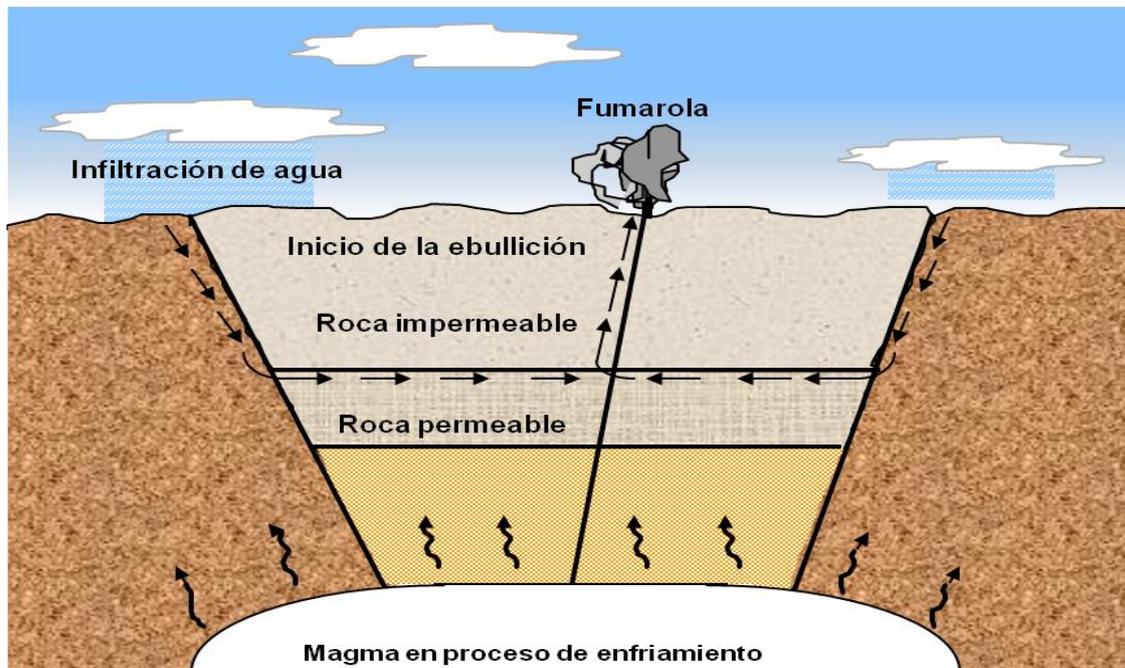


Figura 1.1. Esquema de un sistema geotérmico

1.2 Clasificación de la Energía Geotérmica en Función de la Temperatura

Tal y como se encuentran en la Tierra los recursos geotérmicos no pueden ser aprovechados por el hombre. Para ello es necesario convertirlo en una forma de energía directamente utilizable.

Esta conversión dependerá, sobre todo, del nivel térmico del recurso.

Energía Geotérmica	Temperatura [°C]	USO
E.G. Alta Temperatura	T >150 [°C]	Producción energía eléctrica.
E.G. Media Temperatura	90 - 150 [°C]	Producción energía eléctrica mediante el uso de plantas de ciclo binario.
E.G. Baja Temperatura	25 - 90 [°C]	Uso directo del calor: calefacción de viviendas, procesos industriales, usos agrícolas.
E.G. Muy baja Temperatura	T < 25 [°C]	Agua caliente sanitaria y aire acondicionado con el empleo de bombas de calor

Tabla 1. Clasificación y Uso de la Energía Geotérmica
Fuente: <http://www.girotgeotermia.com>

1.3 Tipos de Sistemas Geotérmicos

Un sistema geotérmico puede ser descrito esquemáticamente como "agua convectiva en la corteza superior de la Tierra la cual, en un espacio confinado, transfiere calor desde una fuente de calor hasta una abertura de calor, usualmente la superficie libre" (Hochstein, 1990)⁴

Los sistemas geotérmicos se pueden encontrar en:

- a) Regiones con un gradiente geotérmico normal ó ligeramente superior que se caracterizan por bajas temperaturas, normalmente inferiores a 100°C, a profundidades de (2-3 km)
- b) Regiones que rodean los bordes de las placas, donde el gradiente geotérmico puede ser significativamente más alto que el valor promedio,

⁴ Hochstein, 1990

de forma que las temperaturas cubren un amplio rango desde las más bajas hasta los 400°C.

Clasificaciones de los sistemas Geotérmicos

Los sistemas geotérmicos también se encuentran en la naturaleza en una variedad de combinaciones de características geológicas, físicas y químicas, dando así origen a diferentes tipos de sistemas.

Clasificación: **Instituto de investigaciones Eléctricas⁵(IIE)**

- Sistemas Hidrotermales

Estos sistemas están constituidos por: una fuente de calor, agua (líquido y/o vapor) y la roca en donde se almacena el fluido. El agua de los sistemas hidrotermales se origina en la superficie de la tierra en forma de lluvia, hielo ó de nieve. Se infiltra lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando a varios kilómetros de profundidad en donde es calentada por la roca alcanzando en algunas ocasiones temperaturas de hasta 400 °C.

Estos sistemas pueden clasificarse en tres tipos principales: vapor dominante, líquido dominante de alta entalpía y líquido dominante de baja entalpía.

- a) Vapor Dominante:
Son sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco.
- b) Líquido dominante (alta entalpía).
Sistemas de salmuera súper caliente, con temperaturas entre 200 °C y más de 300 °C.
- c) Líquido Dominante (baja entalpía).
Sistemas con salmueras (agua con una alta concentración de sal disuelta) calientes, con temperaturas entre de 100 °C y 200 °C aproximadamente.

- Sistemas de Roca Seca Caliente

Son sistemas rocosos con alto contenido energético pero con escasez de agua, conocidos como HDR (Hot Dry Rock). No se explotan comercialmente en la actualidad. El “U.S. Geological Survey” ha estimado que la energía almacenada en los yacimientos de roca seca caliente que se encuentran dentro de los 10 km superiores de la corteza terrestre, equivale a más de 500 veces la energía acumulada en todos los yacimientos de gas y de petróleo del mundo. Para la explotación se perfora un pozo hasta la profundidad en que se encuentra la formación de roca seca caliente de interés. Como esta roca es

⁵ Instituto de Investigaciones Eléctricas Gerencia de Geotermia.

esencialmente impermeable, se crea un yacimiento artificial mediante fracturamiento hidráulico, una técnica muy utilizada por las industrias del gas y del petróleo. Posteriormente se perfora otro pozo, por lo general a cientos de metros del primero, interceptando la red de fracturas creada artificialmente. A continuación se inyecta agua a presión en uno de los pozos. Al desplazarse por la red de fracturas, el agua se calienta por contacto con la roca de alta temperatura y el agua caliente es extraída por medio de los pozos.

- **Sistemas Geopresurizados**

Son sistemas que contienen agua y metano disuelto a alta presión (del orden de 700 bar) y mediana temperatura (aproximadamente 150 °C). Estos recursos ofrecen tres tipos de energía: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (fluidos a muy alta presión).

- **Sistemas Marinos**

Recursos geotérmicos de alta entalpía existentes en el fondo del mar y manifestados como descargas hidrotermales, chimeneas ó fumarolas. Los sistemas marinos han sido poco estudiados hasta ahora, aunque se han detectados ya algunos en México en el Golfo de California con temperaturas hasta de 350 °C (Mercado, 1988; Villanueva et al., 2006). En la actualidad no se explotan comercialmente.

- **Sistemas Magmáticos.**

Son sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos a gran profundidad en zonas de debilidad cortical. Posiblemente el atractivo más importante de este tipo de recurso sean las altísimas temperaturas disponibles (≥ 800 °C).

Por otro lado dentro de los **Sistemas Hidrotermales** existen clasificaciones diversas como la que presenta el documento **Manual de geotermia**⁶; a continuación se realiza una breve descripción de las características principales de cada uno de ellos.

Reservorios dominados por líquido:

Cabe señalar que este tipo de reservorio o sistema hidrotermal es de los más comunes. Donde en su estado natural se caracteriza por el hecho de que la fase líquida es la predominante. Por lo general, las manifestaciones superficiales

⁶ José Luis Quijano León, Manual de Geotermia “Ciencias de la tierra e Ingeniería de Reservorios”, 2007.

incluyen tanto fumarolas, en las zonas altas, así como manantiales hirvientes con alto contenido de Cloruro de Sodio en las zonas bajas.

Los pozos que producen en este tipo de reservorios es una mezcla de agua vapor, aunque en la zona de alimentación, solo fluye líquido hacia el pozo.

Reservorios dominados por líquido con capa de vapor:

Este tipo de reservorios son similares a los dominados por líquido con la diferencia de que existe una capa de vapor en la parte superior del mismo.

Debido a la presencia de la capa de vapor (compresible), el reservorio presenta un coeficiente de almacenaje alto por lo que la caída de presión al momento de realizarse la extracción del recurso es menor.

Los pozos alimentados por la zona de líquido se comportarán de manera similar al caso anterior mientras que los perforados a una menor profundidad o someros producirán vapor únicamente.

Reservorios dominados por vapor:

Las manifestaciones naturales de este tipo de reservorios consisten en fumarolas o suelos vaporizantes y no existe la presencia de manantiales. La fase dominante en el reservorio es vapor, que representa más del 50% en volumen, aunque en masa el porcentaje es mucho menor debido a la baja densidad (kg/m^3) del vapor.

El vapor se localiza en las fracturas y fallas principales mientras que el líquido se encuentra en los poros adherido a la matriz de la roca. Por ello, la fase móvil dentro del reservorio es el vapor y es la que fluye hacia el fondo de los pozos.

La fase líquida es una reserva importante de masa y al evaporarse por la transferencia de calor de la roca, contribuye a la producción de vapor.

Los Geysers en E.U. y Larderello en Italia son los ejemplos más conocidos de este tipo.

Reservorios de Baja permeabilidad (dominados por roca)

Este tipo de reservorios es también poco común. Se caracterizan por estar saturados de líquido en su condición natural. Otra característica es la ausencia de manifestaciones termales del tipo de fumarolas ó manantiales. En todo caso estas se limitan al tipo de suelos vaporizantes.

Conforme el fluido se mueve hacia el pozo, la presión pasa de una condición de líquido comprimido a una condición de saturación y se inicia el proceso de ebullición dentro del reservorio. El calor latente de ebullición es proporcionado por la roca. Cuando el fluido ingresa al fondo del pozo, es vapor casi en su totalidad.

1.4 La Geotermia en el Mundo

Aunque es una energía muy desconocida, en 2007 tenía una potencia instalada en el mundo de 10,000 MW, cuatro veces superior a los 2,393 MW de la energía fotovoltaica y ligeramente inferior a la eólica que en ese mismo año contaba con 15,145 MW.

Para calcular la energía anual generada por cada tecnología, se debe tener en cuenta el número de horas que se encuentra en funcionamiento, el denominado **Factor de planta** es la relación entre la generación real de una central eléctrica en un periodo de tiempo (usualmente un año) y la generación teórica que podría haber producido de acuerdo a su capacidad, de haber estado operando de manera ininterrumpida durante el mismo periodo de tiempo, así la tecnología fotovoltaica funciona únicamente durante las horas de sol (aproximadamente 6 horas al día: factor de planta entorno al 25%), la eólica, siempre y cuando la velocidad del viento se encuentre dentro de unos valores mínimos y máximos (factor de planta medio anual del 20%). Mientras la geotermia es considerada como la única energía renovable que se encuentra disponible las 24 horas del día, (factor de planta se encuentra entre el 80-90%), y un costo medio de la electricidad producida inferior a 5 c€/kWh.

A nivel mundial los 10 GW instalados de esta tecnología producen 70 TWh/año de electricidad (10 veces más que la obtenida en plantas fotovoltaicas y 2.5 veces la eólica), su contribución a la producción mundial de electricidad es del 2.29%.

Con respecto a la ocupación del terreno y el impacto visual ésta última tecnología es prácticamente nulo (edificio de turbinas, control, y poco más ya que el resto está bajo tierra), a lo que hay que añadir que mientras que la tecnología fotovoltaica y la eólica no se pueden almacenar (la electricidad debe consumirse en el momento en el que se genera), en la geotermia, su fuente de energía es a su vez su almacenamiento (el interior de la tierra).

País	Capacidad Instalada MW	Capacidad Mundial Instalada de Energía Geotérmica %
U.S.A.	3,093.5	28.87
Filipinas	1,904	17.77
Indonesia	1,197.3	11.17
México	958	8.94
Italia	842.5	7.86
Total	10,716.9	74.6

Tabla 1.1 Capacidad Geotermoeléctrica Instalada a Mayo del 2010, de Acuerdo a lo Informado en el Congreso Geotérmico Mundial 2010

1.5 La Geotermia en México

México desde 1973 aprovecha la energía geotérmica para producir electricidad. La geotermia representa casi el 3% de la energía eléctrica total producida en el país (Tabla 1.2) y es de los principales generadores a nivel mundial.

Actualmente se cuenta con 4 campos geotérmicos de alta producción (Figura 1.2), en los estados de Baja California, Baja California Sur, Puebla y Michoacán.

A continuación se presenta la Generación de electricidad por fuente y el porcentaje que cada una de ellas representa en la producción total de energía (Tabla 1.2), actualizado al mes de Agosto del 2011.

Tipo de generación	Porcentaje
Geotermia	2.29%
Carbón	6.44%
Nuclear	3.38%
Eólica	0.03%
Productores independientes	31.20%
Hidráulica	11.96%
Hidrocarburos	44.70%
Total	100%

Tabla 1.2. Generación de Electricidad por Fuente, CFE, Agosto del 2011
Fuente:www.cfe.gob.mx

Capacidad efectiva instalada por tipo de generación al mes de agosto de 2011

Tipo de generación	Capacidad efectiva en MW	Porcentaje
Termoeléctrica	23,124.37	45.2%
Hidroeléctrica	11,210.90	21.9%
Carboeléctrica	2,600	5.1%
Geotermoeléctrica	886.60	1.7%
Eolo eléctrica	86.75	0.2%
Nucleoeléctrica	1,364.88	2.7%
Termoeléctrica (Productores Independientes)	11,906.90	23.3%
Total	51,180.4	100%

Tabla 1.3 Capacidad efectiva instalada CFE, agosto del 2011
Fuente:www.cfe.gob.mx



Figura 1.2. Campos geotérmicos localizados en México
Fuente: <http://geotermia.org.mx>

El potencial geotérmico se encuentra distribuido en 4 campos, 7 centrales generadoras (Tabla 1.4), las cuales son operadas por Comisión Federal de Electricidad a continuación se presenta la Capacidad efectiva instalada al mes de agosto de 2011.

Nombre de la central	Número de unidades	Fecha de entrada en operación	Capacidad efectiva instalada (MW)	Ubicación
Cerro Prieto I	5	12-Oct-1973	105	Mexicali, Baja California
Cerro Prieto II	2	01-Feb-1984	220	Mexicali, Baja California
Cerro Prieto III	2	24-Jul-1985	220	Mexicali, Baja California
Cerro Prieto IV	4	26-Jul-2000	100	Mexicali, Baja California
Humeros	8	30-May-1991	40	Humeros, Puebla
Los Azufres	15	04-Ago-1982	192	Cd. Hidalgo, Michoacán
Tres Vírgenes	2	02-Jul-2001	10	Mulegé, Baja California Sur
TOTAL	38		887	México

Tabla 1.4 Capacidad Instalada por Campo Geotérmico
Fuente: <http://www.cfe.gob.mx>

Según datos de la IGA (International Geothermal Association) México ocupa el cuarto lugar mundial en capacidad geotermoeléctrica instalada, después de E.U.A. (3,093 MWe), Filipinas (1,904 MWe) e Indonesia (1,197 MWe).

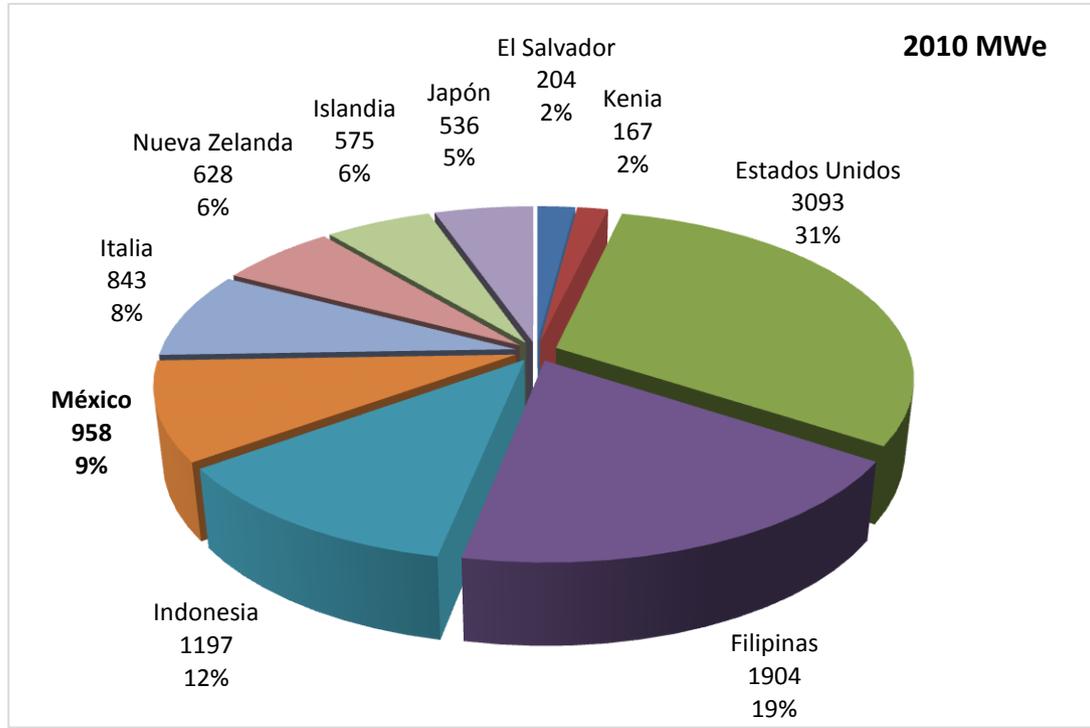


Figura 1.3. Grafica Capacidad Geotermoeléctrica Instalada en el Mundo (Fuente: International Geothermal Association)

Capítulo II

Pozo y Yacimiento Geotérmico

CAPITULO II

II. Campos geotérmicos

2.1 Pozo Geotérmico

Antes de la realización de un proyecto geotérmico es necesario un estudio de viabilidad que permita investigar el potencial real y los posibles riesgos que implica un sistema geotérmico.

Los aspectos más importantes son:

- ✓ Características hidrogeológicas del subsuelo.
- ✓ Tipo de acuíferos presentes.
- ✓ Calidad del agua subterránea.
- ✓ Posibles efectos en los alrededores.
- ✓ Permisos necesarios para su instalación.
- ✓ Costos de construcción, operación y mantenimiento.

Las etapas de reconocimiento, prefactibilidad, factibilidad y desarrollo requieren del concurso de diferentes disciplinas como son: geología, geofísica, geohidrología, geoquímica entre otras y son ellos quienes a través de análisis e interpretación de datos dan las directrices sobre las zonas de interés, ubicación de reservorios y de los sitios en donde se deben perforar tanto los pozos productores como reinyectores.

Diseño y realización

Una vez confirmada la existencia de recursos geotérmicos en una zona determinada, se perforan pozos con profundidades que oscilan entre 1,000 y 3,000 metros de profundidad, según la necesidad para conectar con el reservorio geotérmico.

El diseño de los pozos productores dependerá de la profundidad a la que se encuentre el yacimiento y del tipo de roca a perforar.

Generalmente un pozo productor consta de los siguientes elementos:

- Tubería de anclaje o conductora: 30" diámetro y 50 m de longitud
- Tubería superficial: 20" diámetro y 300 m de longitud
- Tubería intermedia: 13 3/8" diámetro y 1,000 m de largo
- Tubería de producción: 2,000 m de longitud
- Liner ranurado o tubería corta: 7" de diámetro

Esta última solo en caso de ser necesaria para un pozo productor se cuelga del extremo inferior de la tubería de producción, requiriéndose 500 m de tubería ranurada.

En el caso de los pozos exploratorios y productores es necesario realizar la instalación de un arreglo denominado árbol de válvulas cuya principal función es el manejo y control del pozo (figura 2).

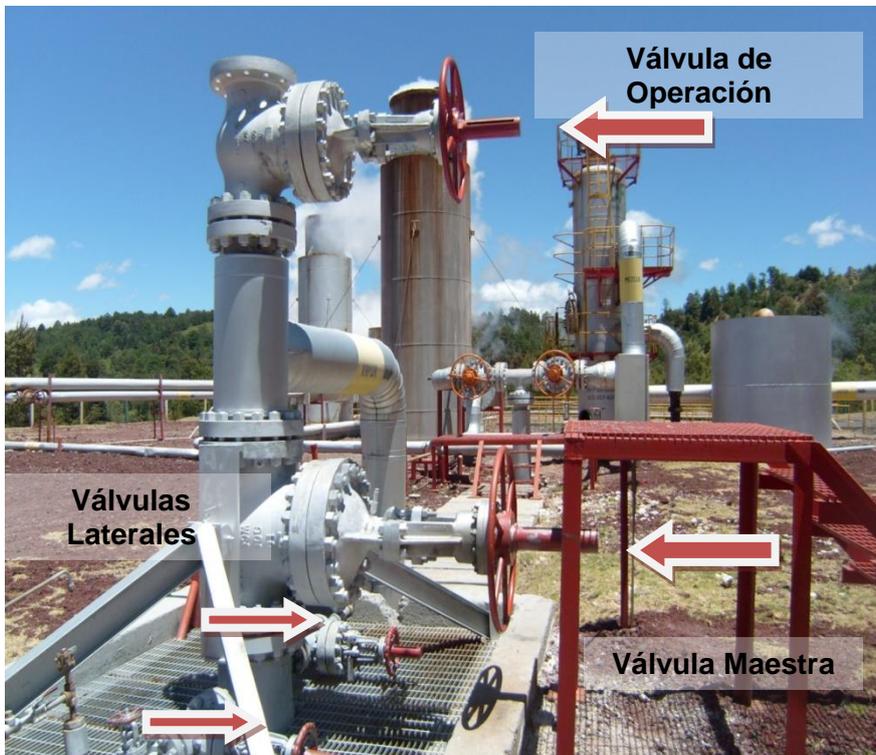
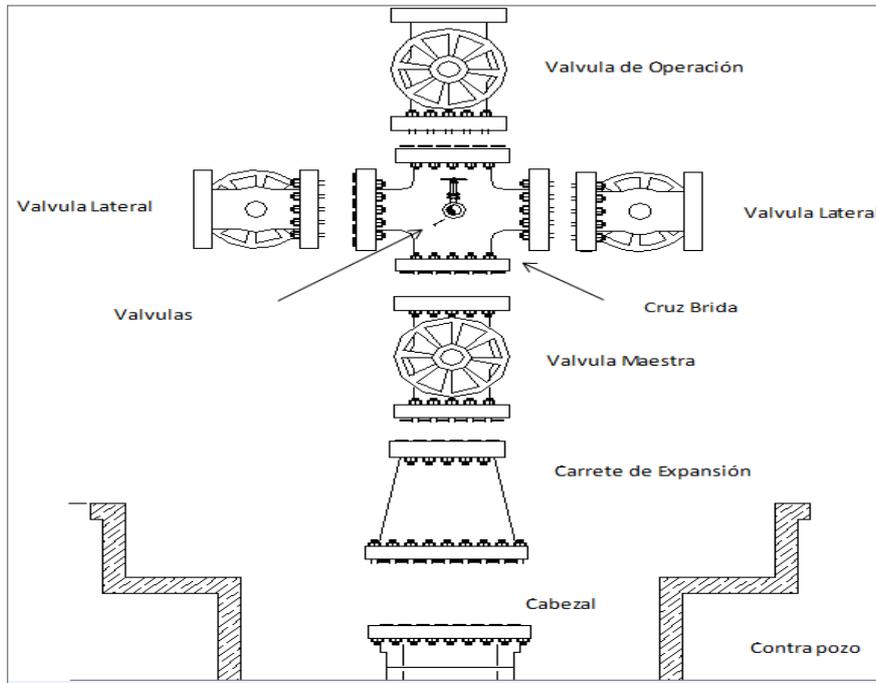


Figura 2. Diagrama Árbol de válvulas, Fotografía Los Azufres, Michoacán

En un campo geotérmico se cuenta con pozos, exploratorios o someros, reinyectores y productores. Los pozos productores por su perfil se dividen en pozos verticales y direccionales y su finalidad es producir o extraer del reservorio geotérmico el vapor y agua, insumo necesario para producir la electricidad.

Los pozos reinyectores tiene la finalidad de devolver al subsuelo la masa de agua que es extraída del reservorio con lo que se pretende prolongar el tiempo de explotación del mismo..

2.2 Yacimiento Geotérmico

El yacimiento geotérmico debe estar constituido por un volumen de rocas calientes permeables del cual los fluidos circulantes extraen el calor. Generalmente el reservorio está cubierto por rocas impermeables y está conectado a un área de recarga superficial a través de la cual el agua puede reemplazar los fluidos que se escapan del reservorio a través de las fuentes termales o que son extraídos mediante pozos.

El fluido geotermal es agua en la mayoría de los casos de origen meteórico (proveniente de fenómenos meteorológicos y ambientales, tales como la precipitación, la nieve o el granizo), ya sea en la fase líquida o en la fase de vapor, dependiendo de su temperatura y presión. Por lo general el agua contiene sustancias químicas disueltas y gases tales como CO₂, H₂S, etc.

El mecanismo que sustenta los sistemas geotérmicos está controlado fundamentalmente por convección de fluidos.

La convección tiene lugar debido al calentamiento y a la consecuente expansión termal de los fluidos; el calor, que es suministrado en la base del sistema de circulación, es la energía que acciona el sistema.

El fluido calentado de menor densidad tiende a ascender y a ser reemplazado por fluido frío de mayor densidad, proveniente de los márgenes del sistema.

Un yacimiento geotérmico está constituido por tres elementos principales:

- Una fuente de calor que puede ser una intrusión magmática a muy alta temperatura superior a 600 °C, emplazada a profundidades de 5 a 10 km.
- Un yacimiento; volumen de rocas calientes permeables del que el agua circundante extrae el calor, que está cubierto por rocas impermeables y conectado a una zona de recarga superficial a través de la cual el agua

meteórica reemplaza al agua geotérmica que escapa a través de las fuentes termales o que es extraída mediante pozos.

- Un fluido geotérmico que es el medio que transfiere el calor; en la mayoría de los casos es agua de origen meteórico, en fase líquida o en fase de vapor, dependiendo esto, de su temperatura y presión, que a menudo contiene sustancias químicas y gases disueltos.

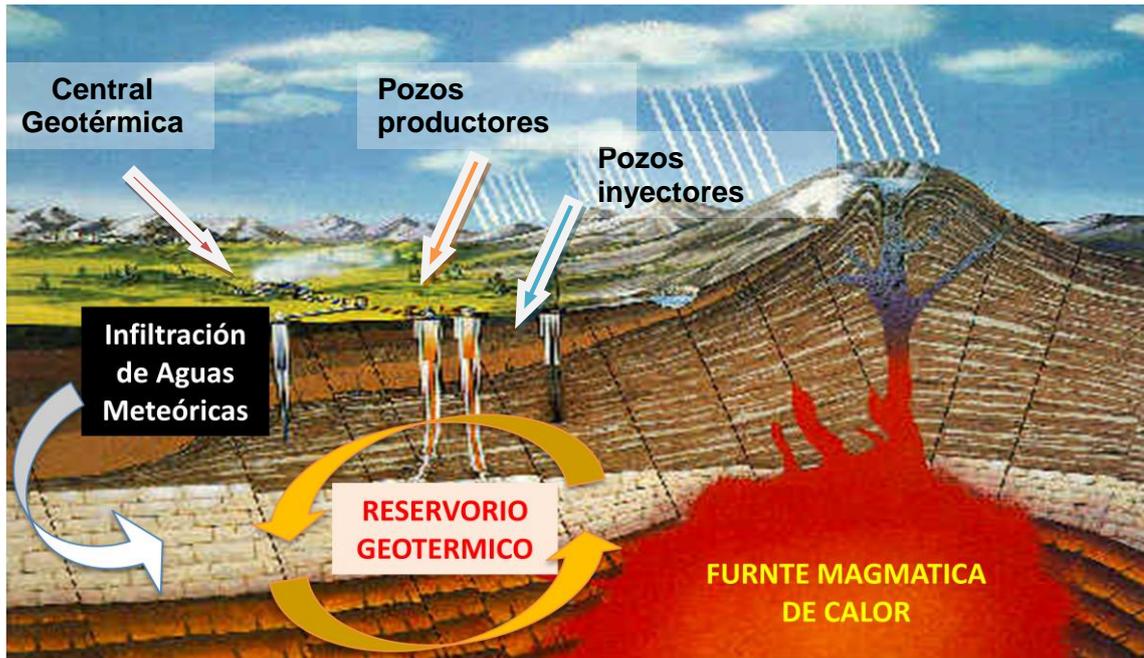


Figura 2.1 Esquema Yacimiento Geotérmico

2.21 Fuente de Calor⁷

La fuente de calor se relaciona con la presencia de una intrusión magmática dentro de la corteza terrestre, con una temperatura que varía de 600°C a 1000°C, frecuentemente a profundidades del orden de 5 a 10 km.

Esto se basa en el hecho notable que todos los campos geotérmicos "comerciales" están ubicados en regiones donde ha ocurrido actividad volcánica o está actualmente ocurriendo. Algunos campos están actualmente situados en o cerca a volcanes mientras otros no están directamente relacionados con centros de actividad volcánica reciente.

-
- ⁷ Formulación de un Plan de Desarrollo par alas Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE), Volumen 2- Diagnóstico de las FCNE en Colombia. Consorcio Energético Corpoema. Bogotá, Diciembre 30 de 2010.

En un volcán activo, una intrusión magmática puede alcanzar la superficie a través de un gran sistema de fallas. Un fallamiento presente en rocas duras y compactas puede proporcionar un canal para el ascenso del magma, mientras que rocas plásticas como la arcilla puede fluir por gravedad dentro del espacio de la falla, sellándola desde arriba. En este caso la energía de una intrusión magmática puede ser suficiente para penetrar el sistema de fallas pero insuficiente para superar la cobertura de rocas plásticas, llegando al límite entre las rocas plásticas y las densas. Este tipo de actividad puede ocurrir en rocas desprovistas de actividad volcánica reciente, como en los campos de vapor seco más grandes del mundo: Larderello (Italia) y The Geysers (Estados Unidos).

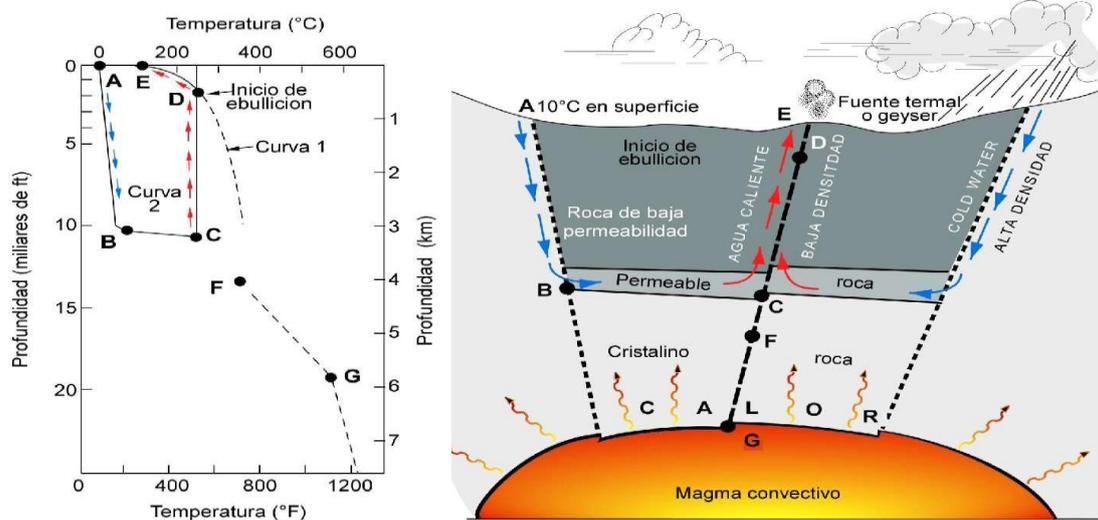


Figura 2.2 Modelo de un sistema geotérmico.

La curva 1 es la curva de referencia para el punto de ebullición del agua pura. La curva 2 muestra el perfil de temperatura a lo largo de una típica ruta de circulación desde la recarga en el punto A hasta la descarga en el punto E.⁸ (Según White, 1973)

⁸ White, D.E., 1973, Characteristics of geothermal Resources, Ch.4, geothermal Energy, Editors Kruger and Otte, Stanford Press.

2.22 Comportamiento del Reservorio

Es la parte explotable de un sistema de circulación más amplio y está constituido por la secuencia de rocas saturadas de fluido caliente.

Un yacimiento geotérmico debe estar formado por rocas permeables, con un volumen suficientemente grande para asegurar la explotación prolongada de fluidos termales. Además debe estar localizado dentro de un sistema hidrológico que permita la recarga hidráulica del área en explotación.

En la mayoría de los campos la permeabilidad está controlada por un fracturamiento penetrante o por fracturas concentradas en zonas de fallas. La temperatura de un reservorio geotérmico de alta entalpía corresponde normalmente a un rango entre 200°C y 350°C. Temperaturas más bajas no excluyen una explotación comercial del recurso, pero requieren de tecnologías adecuadas de conversión energética (como es el caso de las plantas de ciclo binario) o una utilización directa del calor (para calefacción, fabricación de papel, secado de semillas, etc.).

La cobertura impermeable de un reservorio puede estar constituida por una roca o una secuencia de rocas con nula o poca permeabilidad. Puede ser una roca sedimentaria o volcánica con impermeabilidad primaria (arcilla, limolita, toba, etc.), o una roca cerrada por autosellamiento debido a efectos prolongados de la actividad geotérmica. Para determinar dicha cobertura es necesario conocer la composición litológica de los horizontes subsuperficiales, lo cual se resuelve sobre bases puramente geológicas con el apoyo de estudios geofísicos que permitan determinar los espesores y posible permeabilidad de las diferentes unidades.

En regiones donde la cobertura está fracturada, los fluidos del reservorio pueden ascender directamente a la superficie produciendo manifestaciones termales (manantiales calientes, suelos de vapor, fumarolas etc.). La presencia de tales manifestaciones puede indicar la existencia de un reservorio geotérmico, pero estas no siempre están presentes y pueden existir yacimientos sin dichas manifestaciones.

El estudio de la cobertura y de las manifestaciones termales superficiales debe considerarse dentro del marco hidrológico general. Este estudio requiere del conocimiento hidrológico de la región (agua meteórica y agua subterránea) y el de las condiciones estructurales y estratigráficas que controlan los sistemas hidrológicos e hidrotermales.

2.3 Fluidos Geotérmicos

Se refiere a cualquier fluido producido por un pozo geotérmico. Las características de los fluidos descargados de los pozos varía considerablemente, puede ser vapor seco o sobrecalentado, mientras que en otras se produce líquido presurizado o una mezcla de líquido y vapor saturado (flujo bifásico). Frecuentemente el fluido producido contiene gases incondensables, principalmente CO_2 , H_2S , SO_2 , CH_4 y otros en muy pequeñas concentraciones que son constituyentes de los fluidos geotérmicos, como componentes gaseosos del vapor. Estos gases no se condensan a la temperatura normal de condensación del vapor y se acumulan en el condensador, reduciendo la generación de energía, a menos que se bombeen fuera del condensador. La proporción de gas puede llegar a ser tan alta que en ocasiones, no es factible la generación de energía eléctrica.

Antes de diseñar un sistema de recolección del fluido y transmisión, es necesario conocer las propiedades químicas de los fluidos producidos por los pozos, y para ellos existen diversas técnicas geoquímicas que se efectúan en los análisis de las aguas que pueden estar relacionadas al yacimiento (manantiales, las emisiones de las fumarolas, las descargas de gases y las aguas frías superficiales, ríos, lagos, lluvia, etc.) para hacer inferencias de las condiciones de los sistemas geotérmicos:

- La variación en composición del fluido termal a profundidad.
- La temperatura (y presión) del fluido a profundidad.
- Las rocas relacionadas con los fluidos termales a profundidad.
- El origen de los fluidos, la dirección de flujo en el área y los tiempos de residencia de los fluidos bajo la superficie.
- El gradiente geotérmico y la profundidad a la cual se presenta ebullición por primera vez en el sistema.
- Las zonas que presentan un alto flujo.
- La posibilidad de encontrar a profundidad fluidos ácidos, que pueden causar serios problemas por corrosión en la etapa de explotación.

Estos estudios además de aportar información durante la etapa prefactibilidad y exploración del campo, también permiten determinar durante la etapa de explotación los cambios que sufre el sistema debido a la extracción de los fluidos termales, como puede ser la entrada en el yacimiento de aguas subterráneas o superficiales frías.

Capítulo III

Tipos de Centrales de Generación

CAPITULO III

III. Tipos de Centrales Geotermoeléctricas

3.1 Descripción Básica del Proceso de Utilización del Fluido Geotérmico

Yacimiento Geotérmico:

La geotermia aprovecha el calor y el agua que se han concentrado en ciertos sitios del subsuelo, conocidos como yacimientos geotérmicos. La energía contenida en un yacimiento es extraída mediante la perforación de pozos profundos (un promedio de 2,000 metros), a través de los cuales ascienden fluidos, compuestos por una **mezcla de agua salina y vapor** a altas temperaturas.

Pozo:

Para hallar el lugar más conveniente donde perforar se realiza un proceso exploratorio, el cual es consistente en distintos estudios de carácter geoquímicos, geológicos, hidrológicos y geofísicos progresivamente crecientes en complejidad, y consecuentemente en inversión. La finalidad de los pozos es extraer del reservorio geotérmico el fluido (vapor, sales disueltas y/o líquidas), insumo necesario para producir la electricidad.



Figura 3. Pozo geotérmico Cerro Prieto, B.C. (Extracción de mezcla de vapor y agua proveniente de yacimiento geotérmico a profundidades mayores a 2000 metros)

Silenciador:

Recibe el exceso de fluido para soltarlo a la atmosfera. Cuando es necesario dar mantenimiento en alguna de las tuberías o en algún dispositivo, se envía todo el flujo que se extrae por este dispositivo, deben tomarse ciertas precauciones ya que el pozo no debe ser cerrado, debido a que ello implicaría un fenómeno en que el flujo se condense y al descender por el pozo este dejaría de fluir.

El separador centrífugo:

El separador centrífugo, por su diseño (entrada tangencial) genera que el flujo presente una rotación al rededor de la estructura del separador, por efecto de la diferencia de densidades, el líquido se adhiere a las paredes; mientras que el vapor se concentra en la parte central. El vapor es conducido a la turbina a través de los vapor-ductos; mientras que el líquido es reinyectado.

Mezcla de agua salina (salmuera geotérmica) y vapor:

Una vez en superficie la mezcla de agua salina y vapor, son conducidas a través de un separador centrífugo, en el cual se separa el agua del vapor (figura 3.1).



Figura 3.1 Separador centrífugo, campo geotérmico Los Humeros, Puebla. (La mezcla de vapor y agua proveniente del pozo geotérmico es separada en vapor y en agua)

Conducción del Agua Caliente:

Para el agua caliente que se obtiene del separador, en su punto de saturación, es necesario tomar varias precauciones al transportarla en caliente por tuberías para asegurar que la presión en todos los puntos de la misma sea más alta que la correspondiente al punto de ebullición, evitando de esta manera la formación de vapor.

Si la presión estuviera por debajo, se podría formar vapor en forma de burbujas o bolsas en el agua, y si ocurre un subsecuente ascenso en la presión, el colapso del vapor puede causar serios martilleos del agua con riesgo de ruptura en la tubería.

Para mantener un adecuado margen de presiones y suprimir la ebullición, se puede emplear el bombeo para incrementar la presión, o disminuir la temperatura por debajo del punto de ebullición introduciendo agua más fría. Una combinación de ambos métodos puede ser posible.

Vapor-ducto:

Son los encargados de la conducción del vapor como aislamiento térmico del pozo a la terminal generadora, fabricados de acero, con un recubrimiento como aislante térmico externo de fibra de vidrio y aluminio. Debido a los cambios de temperatura que ocurren al vaciado y llenado de vapor en el vapor ducto, se cuenta con modificaciones en la tubería en forma de omega " Ω ", las cuales la protegen y evitan que esta se fracture; razón por la cual se tiene un monitoreo constante.

En el diseño de los sistemas de transmisión, la determinación del diámetro de la tubería es de gran importancia para evitar la excesiva caída de presión entre el cabezal y el extremo de la tubería de envío.

Debe evitarse la entrada en el vapor, de cualquier cantidad de agua por pequeña que sea, ya que podría contener una insignificante cantidad de cloruro de sodio, el cual al alcanzar grandes concentraciones puede producir fenómenos de corrosión, con riesgo de agrietamiento para los álabes de las turbinas.

Las incrustaciones presentes en la tubería se retiran de manera mecánica cuando la tubería es obstruida de manera significativa, esto técnicamente es posible detectarlo cuando existe una alteración en el flujo que alimenta la turbina

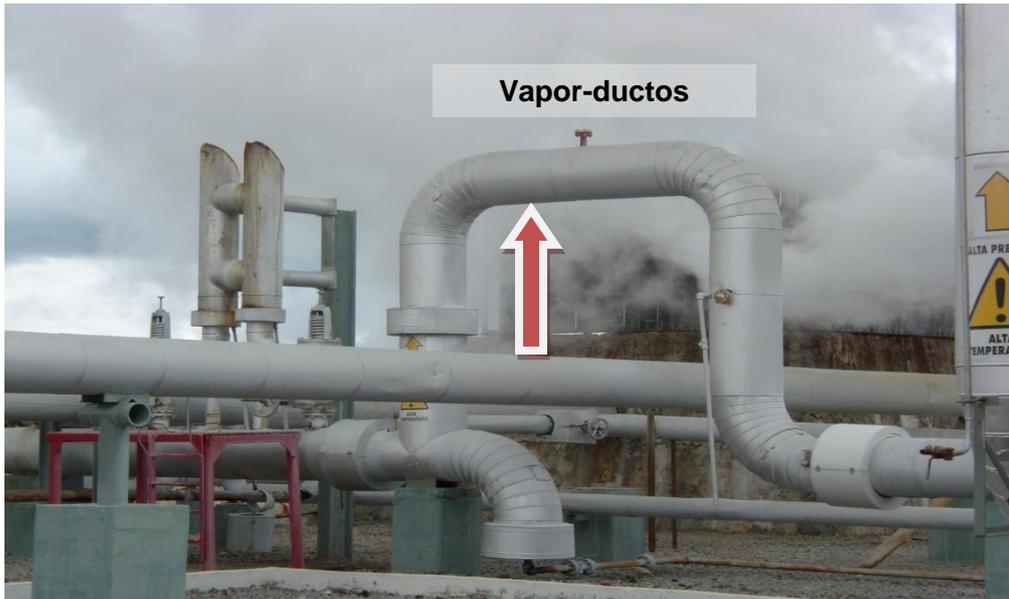


Figura 3.2 Vapor-ducto, Central generadora Los Humeros Puebla

Turbina:

El vapor a presión se conduce por los vapor-ductos hacia la turbina, el flujo de vapor se encuentra a una alta presión y es por medio de una válvula que el vapor se expande hasta la presión de operación de la turbina. Esta tiene acoplado un generador eléctrico que a su vez dirige la energía a las líneas de tensión.

Condensador (cámara de vacío):

Una vez que el vapor ha alimentado la turbina (se disminuye la presión y temperatura) es dirigido al condensador, donde en contacto directo con el agua proveniente del depósito de la torre de enfriamiento permite se condense. Dentro del condensador existen gases incondensables, que son separados y dirigidos a una cámara conocida como “separador de gases” para su posterior extracción y monitoreo.

Separación de gases:

Aquello que no logra condensarse es liberado a la atmosfera; pero antes de ello en este dispositivo se mide la cantidad de contaminantes producidos para tener un registro y cumplir con la normatividad preestablecida.



**Figura 3.4 Separador de gases Los Azufres Morelia
(Los gases no condensables son enviados a la atmosfera)**

Torre de enfriamiento:

En la torre de enfriamiento se libera el fluido proveniente del condensador con ayuda de un tipo de aspersores localizados en la parte superior; que al entrar en contacto directo con el aire permite el enfriamiento. Parte del líquido se evapora y el resto se almacena en un depósito localizado en la parte inferior de la torre.

Cabe destacar que del sobrante de agua, un porcentaje es redirigido al condensador para así, cerrar el ciclo; y el excedente de la torre de enfriamiento es reinyectado.



Figura 3.3 Torre de Enfriamiento. Los Azufres, Morelia

Proceso de Reinyección:

Dentro del campo geotérmico se cuenta con pozos utilizados específicamente para la reinyección del líquido obtenido del separador centrífugo y de la torre de enfriamiento. El fluido es redirigido a dichos pozos mediante una tubería de polietileno.

Este tipo de proceso se realiza por lo general en frío tomando en consideración que es benéfico para el pozo, ya que evita que en un futuro inmediato se obstruya.

Agua separada.

De la mezcla de agua y vapor proveniente del pozo y una vez que pasa a través del separador, el agua separada (salmuera geotérmica) usualmente es reinyectada al yacimiento en las mismas condiciones que en la extracción, (solo se utiliza parte de su energía térmica).



Figura 3.5 Pozo Inyector de Salmuera Separada, Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C.

3.2 Tipos de Centrales de Generación

Las tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos dependen del nivel térmico disponible y del tipo de fluido existente en el yacimiento. En los yacimientos de alta temperatura se produce electricidad mediante una diversidad de tipos de ciclos termodinámicos en función de las características del fluido: ciclo directo con o sin condensación, ciclo semidirecto con flash en una o varias etapas y condensación, ciclos binarios utilizando agua o algún fluido de bajo punto de ebullición.

Existen diversas configuraciones de centrales geotermoeléctricas en función de las condiciones en las que se encuentra el recurso así como de los elementos que las constituyen.

- Centrales a Contrapresión
- Centrales a Condensación
- Centrales de Ciclo Binario

3.2.1 Centrales a Contrapresión

Se utilizan para producir energía de yacimientos de vapor dominante. En este caso el vapor saturado o ligeramente sobrecalentado que se obtiene en la superficie, donde a través de una válvula es llevado a la presión de separación (cabe señalar que esta presión de separación depende directamente de la presión que se tenga en el yacimiento), con ello el vapor seco del pozo, o previa separación de agua si es vapor húmedo, se envía a la turbina y luego se descarga a la atmósfera.

Las turbinas a contrapresión con descarga libre a la atmósfera, a diferencia de las turbinas a condensación, se pueden usar cuando las primeras medidas de los fluidos geotérmicos registran un contenido alto de gases incondensables (es decir mayor de 10 a 12% en peso en el vapor de entrada a la turbina) o en todos los casos donde tiene que explotarse un campo, aún con baja eficiencia.

En este tipo de centrales el vapor utilizado en la turbina se descarga directamente a la atmósfera provocando que la eficiencia de la central disminuya.

Es el más simple y económico de todos los ciclos geotérmicos. Su rendimiento es bajo, el consumo varía entre 20 y 30 kg de vapor/kWh, principalmente por el hecho de que la turbina descarga directamente a la atmósfera, pero se adapta bien para plantas de pequeña capacidad. Se han desarrollado unidades de

turbina/generador simples y compactas, cuyos modelos para capacidades más limitadas se pueden transportar completamente ensambladas (con peso total entre 50 a 80 toneladas) y pueden ser instaladas a boca de pozo sin necesidad de construir casa de máquinas.

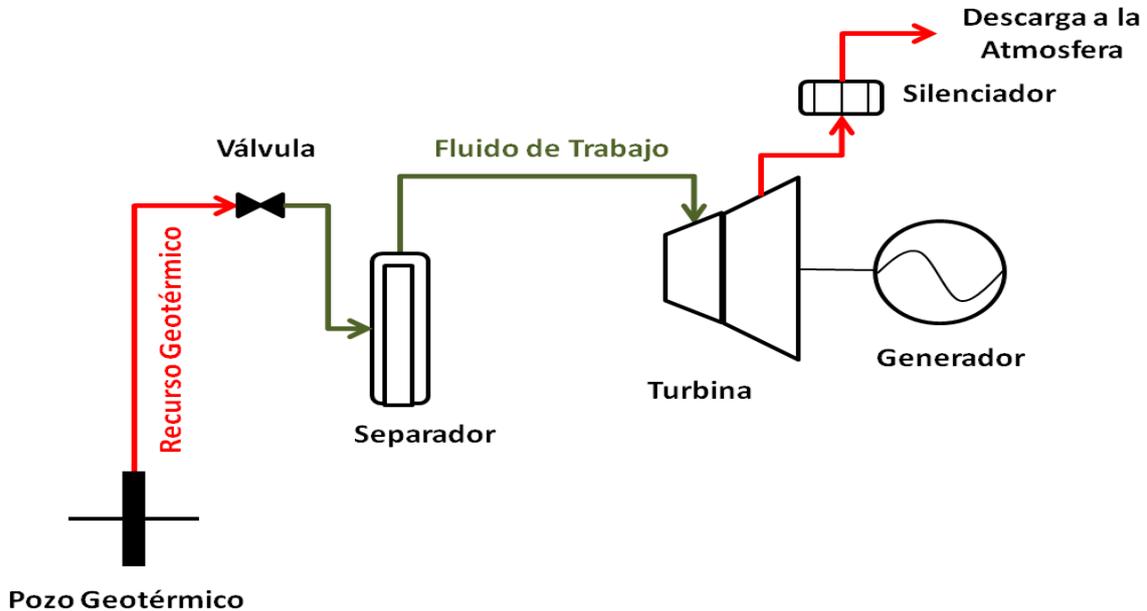


Figura 3.6 Esquema funcionamiento Central a contrapresión
Fuente: El autor

3.2.2 Centrales a Condensación

En todas las grandes plantas geotérmicas el vapor es utilizado para alimentar turbinas a condensación y una gran fracción de la generación entre 1/2 a 2/3 es desarrollada por debajo de la presión atmosférica.

En yacimientos geotérmicos dominados por líquido, los pozos generalmente producen una mezcla de agua y vapor en la superficie. Esto se debe a que el fluido del yacimiento sufre un proceso de ebullición en el interior del pozo, causado por la caída de presión a lo largo de la tubería.

En la superficie el vapor y agua geotérmica se separan por medio de un equipo denominado separador centrifugo, el agua es reinyectada nuevamente al subsuelo, mientras que el vapor (agua en estado gaseoso) es conducido a través de una red de tuberías hasta la central geotérmica, donde la presión y energía calorífica, es convertida en energía mecánica al hace girar la turbina, que a su vez mueve el generador convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica.

El vapor geotérmico, después de haber cumplido con la función de activar la turbina se condensa nuevamente y es reinyectado al subsuelo, para que en una forma reciclable se vuelva a calentar, y se convierta en vapor que podría ser extraído nuevamente con fines de generación de energía eléctrica.

Las plantas a condensación son más elaboradas que las que descargan a la atmósfera, necesitan atención más especializada e incluye extractores más permanentes, considerables niveles de provisión de agua de circulación y planta auxiliar, pero indudablemente son mucho más eficientes que las plantas a contrapresión.

La potencia de las unidades geotérmicas es dada principalmente por las características del campo. Gracias al descubrimiento de campos de mayor potencia, así como de avances graduales en los métodos de perforación y transporte de fluidos, ha sido posible desarrollar unidades desde 15-25 MW hasta llegar a unidades de 35-55 MW.

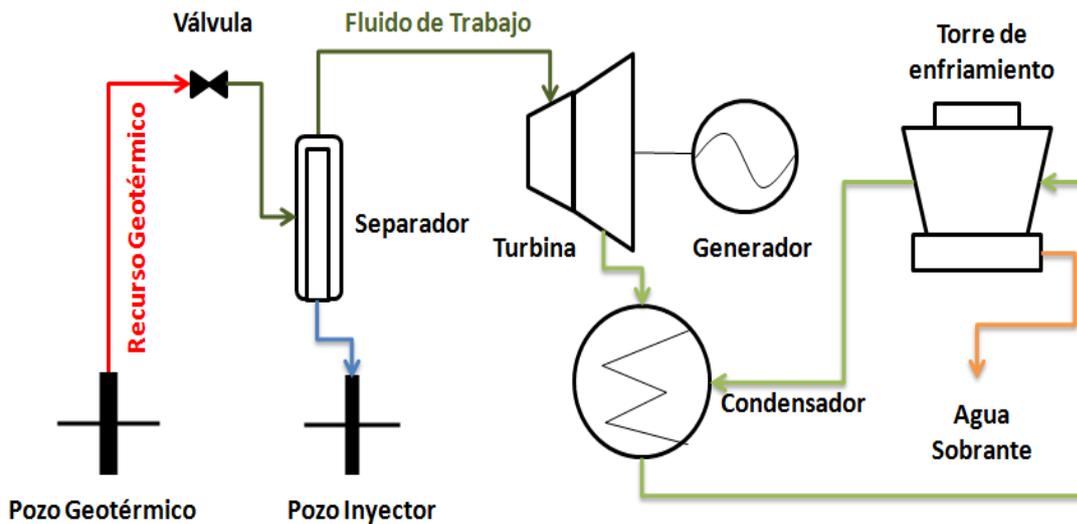


Figura 3.7 Esquema funcionamiento Central a condensación1 flash
Fuente: El autor

3.2.3 Centrales de Ciclo Binario

Las plantas de ciclo binario son apropiadas para la explotación de los sistemas geotérmicos de líquido dominante que no están lo suficientemente calientes como para producir una importante ebullición del fluido geotérmico, y para utilizar el calor contenido en los fluidos de desecho de las plantas de separación de vapor.

La aplicabilidad del ciclo Rankine con fluido orgánico se puede fijar entre los 90°C y 180°C. Con temperaturas mayores de 180°C resulta más conveniente la aplicación de un ciclo de vapor obtenido por evaporación del fluido geotérmico.

En estas plantas, el calor que se obtiene del fluido geotérmico se transmite por medio de un intercambiador de calor a un fluido de trabajo secundario con un menor punto de ebullición (por lo general es un refrigerante). El fluido de trabajo se expande en una turbina, se condensa y se recalienta en otro ciclo. Existen unidades de 1 a 25 MW.

Actualmente existe en el mundo una capacidad instalada de aproximadamente 300 MW en este tipo de plantas.

Se pueden destacar las siguientes ventajas:

- Para cada aplicación es posible elegir un fluido de trabajo que permita una buena eficiencia de la turbina.
- Las partes en contacto con el fluido geotérmico son todas estáticas, haciendo fácil la inspección de ellos y menos crítica su eventual constitución.
- El circuito de fluido de trabajo es cuidadosamente sellado para evitar pérdidas, resultando en una mayor duración, sin necesidad de continuos controles y correcciones que son típicos de las turbinas de vapor de agua.

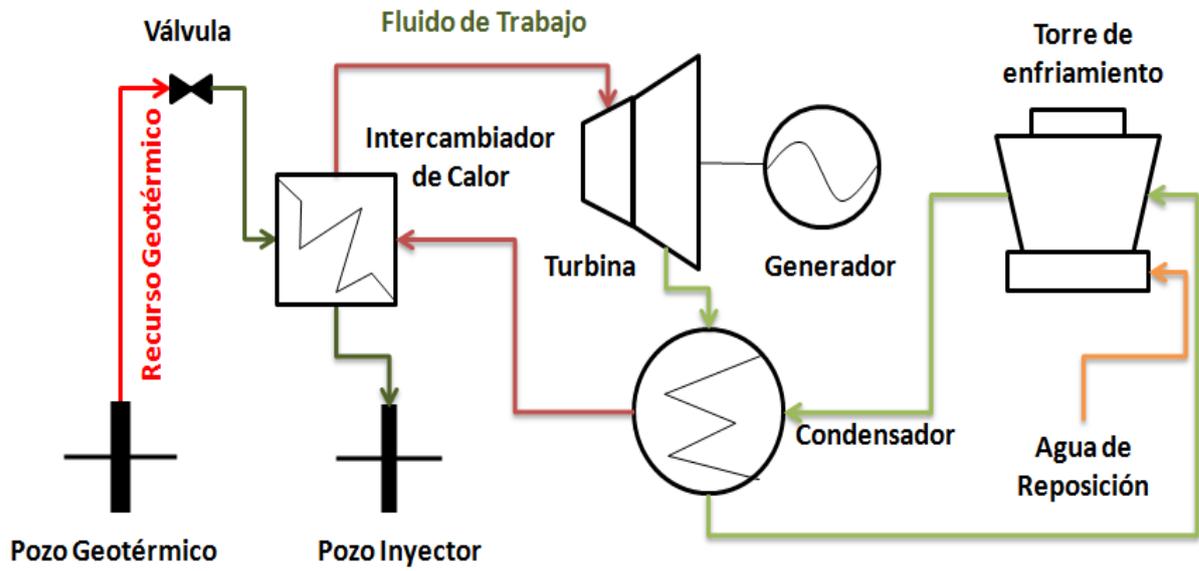


Figura 3.8 Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo Binario, (Los Azufres, Michoacán)

Capítulo IV

Etapas de un Proyecto Geotérmico

CAPITULO IV

IV. Etapas de un Proyecto Geotérmico

La ejecución de un proyecto geotérmico se puede dividir en dos partes principales, una de alto riesgo asociada a la exploración del energético, cuyo objetivo es la identificación del yacimiento y su grado de utilidad; y otra de menor riesgo relacionada con el desarrollo y explotación del mismo.

Desde el punto de vista práctico el estudio de un proyecto geotérmico se puede sub-dividir en cinco etapas:

Exploración:

1. Estudio de reconocimiento (área $\geq 1000 \text{ km}^2$)
2. Estudio de prefactibilidad (área=400 a 500 km^2)
3. Estudio de factibilidad (área= 10 a 100 km^2)

Explotación:

4. Desarrollo
5. Explotación

4.1 Estudio de Reconocimiento Geotérmico

Consiste en la evaluación preliminar de los recursos geotérmicos susceptibles de ser aprovechados con fines de generación eléctrica o en otros usos de una región determinada, identificando y delimitando áreas de mayor interés.

Objetivos generales:

- Evaluar en forma preliminar las posibilidades geotérmicas a nivel nacional o regional.
- Identificar las áreas de interés geotérmico.
- Definir un esquema geotérmico preliminar de cada área identificada y seleccionar las más atractivas para la ejecución de estudios de prefactibilidad.
- Elaborar un programa de explotación detallada para las áreas de interés.

Estos objetivos tienen el propósito de reunir información técnica que aunada a consideraciones socio-económicas y políticas, construyan la base para toma de decisiones respecto a:

- La prioridad que se debe dar a nivel nacional o regional a la geotermia en relación con otras fuentes de energía.
- La definición de áreas de máxima prioridad en la planeación de exploraciones futuras.

Fases de estudio

Se puede desglosar en 4 fases:

1. Recopilación de información disponible.
2. Evaluación de la información, trabajos de gabinete, preparación y ejecución de un programa de investigaciones geocientíficas de campo y laboratorio.
3. Interpretación integrada de los estudios, definición de las áreas de interés y estimación del potencial.
4. Preparación de un programa de estudios de prefactibilidad.

Aspectos ambientales

Partiendo de la premisa de que el responsable de un proyecto no tiene el derecho de utilizar los recursos naturales en forma tal que su uso signifique una pérdida mayor que lo que se gane en favor del bienestar nacional, se debe de realizar un estudio de impacto ambiental en un proyecto geotérmico, teniendo como propósito:

Identificar y describir los recursos naturales que podrían ser afectados en el proyecto; describir los efectos que el proyecto podría ocasionar sobre los recursos naturales incluyendo:

- Los efectos positivos que realzarán el valor o importancia del recurso natural, y los efectos negativos que le perjudicarán
- Los efectos directos o indirectos.
- Los efectos a corto y largo plazo.

Resultados

Además de la formación de un banco de datos que continuamente podrá ser actualizado, los trabajos de reconocimiento darán como resultado la integración de un informe final, esencialmente: una síntesis de los estudios realizados y sus conclusiones, una lista de las áreas de interés geotérmicos y las prioridades para los subsecuentes estudios de prefactibilidad, una evaluación preliminar del posible potencial energético de cada área y un programa de actividades para la etapa de prefactibilidad.

Estimación Preliminar del Potencial Energético

Basándose en la información recaudada e investigada, se utilizará alguno de los métodos de evaluación de potencial geotérmico propuesto; obviamente se escogerá en la mayoría de los casos el modelo más sencillo, ya que requiere menos información del yacimiento geotérmico y en ésta etapa se cuenta con poco conocimiento.

Preparación de un Proyecto para la Etapa de Prefactibilidad

Como conclusión de la etapa de reconocimiento se preparará un proyecto de estudios de prefactibilidad para las áreas de mayor interés. Se diseñará un Programa de investigaciones de geología, geoquímica, geofísica, hidrogeología, ambientales y de perforaciones de pozos de gradiente o de propósito múltiple, lo suficientemente completo para definir con mayor detalle el esquema geotérmico de cada área.

El objetivo del Programa será ratificar la interpretación sobre la existencia de un yacimiento y dar la localización de sitios para perforar pozos profundos de exploración que permitan la identificación del recurso.

En el proyecto se delinearé el área de estudio reducida a unos 400 km² y se presentará un programa mínimo de investigaciones con recomendaciones sobre la secuencia y forma de desarrollar los trabajos, así como los periodos de análisis de resultados preliminares y de decisión respecto a continuar o suspender los trabajos faltantes.

4.2 Estudio de Prefactibilidad

Objetivos generales:

1. Optimizar el esquema preliminar del área geotérmica investigada, el cual deberá aportar información sobre los siguientes aspectos:
 - Extensión y profundidad del posible yacimiento.
 - Presencia y características de la capa sello.
 - Sistema de circulación hídrico.
 - Caracterización del eventual yacimiento.
 - Presencia de anomalías térmicas a niveles superficiales.
2. Determinar sitios alternos para la perforación de pozos exploratorios profundos, basada en criterios técnico-científicos.

Estudios Específicos

Geología:

Se deberá realizar un modelo conceptual preliminar del yacimiento, para este propósito se deberá definir:

- La naturaleza de la fuente de calor, edad y posible extensión y profundidad.
- Estimar el posible gradiente de temperatura en el subsuelo.
- Las posibles geometrías de las formaciones en el subsuelo, determinando extensión, espesores y permeabilidades.
- Características litológicas del posible yacimiento.
- La posible recarga hidráulica.

Geoquímica

El objetivo específico del estudio geoquímico es aportar, para la formulación del modelo conceptual preliminar del sistema hidrotermal, información sobre la temperatura y salinidad del fluido en el posible yacimiento. Dirección general del flujo, ubicación de zonas de recarga termal y no termal, de ascenso de vapor, de ebullición y de descarga natural.

Geofísica

La investigación geofísica tiene el propósito de proveer información indirecta sobre el tridimensionamiento geológico del subsuelo, de suma importancia para la identificación del yacimiento, la estimación de su posible potencial energético y para la planificación de perforaciones exploratorias.

Hidrogeología

Este estudio está orientado a definir el modelo hidrogeológico del sistema geotérmico y tratar de estimar la recarga natural que podría recibir el sistema. Así mismo el estudio deberá dirigirse a realizar un inventario de fuentes y pozos de agua, caracterizar los acuíferos y establecer dentro de lo posible la cuenca hidrológica subterránea del sistema geotérmico. También se debe de cuantificar la precipitación, la escorrentía, la infiltración, la evaporación y estimar la recarga de la zona

Perforación Exploratoria de Diámetro reducido

Para obtener información que permita confirmar o modificar el modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico, se podrá tomar la decisión de

perforar pozos exploratorios de diámetro reducido de propósito múltiple, que tienen la ventaja de determinar las condiciones reales del subsuelo a mayor profundidad que la de los pozos de gradiente.

Pozos de Gradiente

En la fase final del estudio de prefactibilidad, antes de la perforación exploratoria profunda de factibilidad, es aconsejable la ejecución de pozos someros de gradiente para ampliar la información del subsuelo y disminuir el riesgo económico de una perforación profunda.

La ejecución de pozos de gradiente es un método directo de exploración, el cual mediante mediciones del gradiente térmico y la conductividad térmica de las rocas correlacionadas con la información proporcionada por los estudios de geología y geofísica puede aportar información adicional que ratifique, refuerce o rectifique la hipótesis de la presencia de una anomalía geotérmica de importancia en el subsuelo.

En términos generales, el objetivo es el de definir en tres dimensiones las temperaturas en la parte superior de una anomalía termal, con el propósito de coadyuvar a determinar la posible existencia de un yacimiento y delinear las zonas más someras del mismo.

En algunos casos, los resultados podrían ayudar a determinar la ubicación, profundidad y número de pozos exploratorios profundos que tendrán que perforarse en la etapa de factibilidad, para definir el potencial y las características de producción del yacimiento.

Perforación Profunda de Diámetro Reducido

Cuando con la información de superficie e incluso con los datos de gradiente de temperatura no sea factible interpretar con cierto grado de confiabilidad la existencia de un yacimiento geotérmico, antes de tomar la decisión de continuar el proyecto con perforaciones profundas de diámetros comerciales, podría ser necesaria o conveniente la perforación de pozos de propósito múltiple, que aportan información del subsuelo y de ser posible del yacimiento; ya sea ratificando, reforzando o modificando el modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico y que permita decidir con mayor seguridad el continuar o parar el proyecto sin realizar perforaciones que impliquen un mayor costo.

Resultados

El modelo tratará de definir la estructura tridimensional del yacimiento, cuantificando la extensión del mismo, el ciclo de descarga y recarga del acuífero y la profundidad y características de la fuente de calor.

La integración científica de la información generada por los estudios de superficie con la información generada por los pozos, llevará a la formulación de un modelo conceptual que señale los aspectos fundamentales para la estimación del potencial del recurso con fines energéticos.

Se deberá describir:

- El modelo de evolución geovulcanológica de la zona.
- La columna litológica y las propiedades petrofísicas.
- Los principales rasgos geológicos estructurales del lugar.
- La profundidad y límites del posible yacimiento.
- Las posibles temperaturas en el yacimiento.
- El modelo del flujo subterráneo, incluyendo la probable ubicación de las zonas de recarga, dirección general del fluido, la ubicación de las descargas de agua geotérmica y la ubicación de las zonas de ascenso de vapor.

Evaluación del Potencial Energético Probable

Dependiendo de los nuevos datos obtenidos en la etapa de prefactibilidad, se estimará el potencial geotérmico con uno de los métodos propuestos.

4.3 Factibilidad Geotérmica

Factibilidad de un recurso geotérmico para la generación de energía eléctrica se define como: la etapa de estudios en la cual se comprueba la existencia de un yacimiento mediante la perforación de pozos exploratorios profundos, se lleva a cabo la evaluación del potencial energético de un área seleccionada y se realiza el diseño preliminar de los sistemas de utilización del recurso detectado.

Un estudio de factibilidad se considera completo, cuando el sistema geotérmico es conocido en sus parámetros esenciales y se han determinado las características principales de la central, habiéndose precisado también su factibilidad económica.

Perforación y Evaluación de Pozos Exploratorios Profundos

Para la etapa de factibilidad se estima que se requiere perforar de tres a seis pozos exploratorios profundos de diámetro comercial. El número final de pozos a perforar dependerá del éxito que se vaya obteniendo con la perforación de los primeros. La Localización originalmente propuesta para ciertos pozos deberá ser modificada con base a los resultados obtenidos de la perforación de los primeros.

Durante ésta etapa deberá de darse continuidad a las investigaciones y estudios de tipo geológico, geofísico, geoquímico, etc., iniciados en la etapa de prefactibilidad, los cuales deberán llevarse en forma paralela a la perforación con el objeto de retroalimentar, ajustar criterios y conceptos técnicos y optimizar la información.

Geológico-estructurales: el conocimiento de las condiciones estructurales de una zona geotérmica y de su relación con el patrón de flujo de fluidos a profundidad, permitirá aumentar las probabilidades de éxito de los pozos exploratorios.

Estratigráficos:

- El conocimiento de la secuencia litológica local.
- La definición preliminar de los probables componentes litológicos que constituyen el sistema geotérmico (capa sello, yacimiento y basamento).
- La profundidad y límite de las unidades litológicas en las que se podría encontrar el yacimiento.

Hidrogeológicos: el conocimiento del régimen hidrogeológico de un campo geotérmico es un aspecto determinante en la ubicación de pozos.

Geoquímicos: el conocimiento adecuado de las condiciones geoquímicas de los fluidos geotérmicos muestreados en la superficie, permitirá conocer su procedencia, las interacciones con la roca y con otros fluidos que pueden haber sufrido durante su trayectoria, así como la temperatura de origen.

Geofísicos: La información geofísica permitirá identificar las estructuras geológicas y la posible unidad litológica en el subsuelo en las que se supone se encontrará el yacimiento geotérmico.

Diseño del Pozo

Para determinar las características de cada pozo se deberá considerar lo siguiente:

- Objetivo: Obtener el máximo caudal bajo condiciones económicamente atractivas, considerando los costos tanto de perforación como de su posible explotación y mantenimiento.
- Tipos de Formaciones Geológicas
- Profundidad
- Especificaciones de los Ademes
- Diámetro de Perforación
- Calidad de las tuberías de Ademe y Capacidad Mecánica
- Cementos
- Técnicas de perforación
- Criterios de terminación de pozos: existen tres tipos:
- Estimación de costos

Desarrollo pozos exploratorios

Ya construido el pozo se procede a determinar sus características:

- Observación: se pretende conocer la velocidad de recuperación térmica, así como el comportamiento de la presión en el pozo; se instalará equipo de observación, manómetros, registradores de presión e indicadores de la dilatación térmica axial de la tubería de revestimiento.
- Inducción: consiste en la estimulación de los pozos que no pueden fluir por si solos.
 - Método de presurización por medio de inyección de gases: utilizando los mismos gases producidos por el yacimiento o inyectando otro tipo de gas; el objetivo es desplazar la columna de agua hasta zonas en donde las formaciones se encuentren a mayor temperatura, calentando así dicha columna, provocando su ebullición y aumento de presión.
 - Método de cubeteo: la tubería se prepara con una válvula de no retorno en el fondo, introduciéndole una cubeta hecha de tubería por medio de una grúa. Se intenta que la columna de agua retirada sea sustituida por agua de mayor temperatura hasta que entre en ebullición.
 - Método de bombeo: se utiliza una bomba superficial o sumergible para extraer agua del pozo, está limitado éste uso por la temperatura.

- Método de inyección de fluidos geotérmicos: se inyecta a presión fluido de otro pozo, con el fin de calentar al primero hasta que fluya, también se puede usar vapor producido por una caldera.
- Método de inyección de aire: se busca aligerar la columna hidrostática con el aire, extraer agua y provocar la entrada de agua caliente al pozo.
- Calentamiento: mediante el flujo gradual del yacimiento, se intenta calentar las tuberías paulatinamente para evitar cambios bruscos de temperatura que dañen la tubería.
- Desarrollo: el pozo es llevado a una descarga máxima, con el fin de limpiarlo tanto de los materiales utilizados en la perforación como de todo tipo de material suelto que se encuentre, para evitar daños futuros en cualquier componente de la línea de producción.⁹



Figura 4. Plataforma de de perforación

⁹ Olade: Organización Latinoamericana de Energía; Guía para Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmica. Quito, Ecuador, 1994.

Evaluación de pozos

Se divide en tres fases:

- Determinación de la capacidad productiva de los pozos y características del fluido geotérmico.
- Evaluación de los parámetros hidráulicos.
- Establecimiento de las condiciones termodinámicas del flujo en el interior de los pozos y en el yacimiento.

Prueba de Producción por el método de James

El método de evaluación propuesto por R. James (1966) tiene por objetivo la evaluación de la capacidad productiva de los pozos, en flujo másico, midiendo los porcentajes de agua, vapor y gases que se producen bajo diferentes condiciones de presión en el cabezal, también se define la entalpía y composición química; éste método tiene dos variantes:

- Medición con Presión de Labio y Vertedor (MPLV).
- Medición con Presión de Labio y Descarga Atmosférica (MPLDA).

Método de Presión de Labio

Propuesto por G. Hiriart, el método consiste en medir la presión crítica a través de un orificio de 6.35 mm (1/4") de diámetro, perforado a 6.35 mm (1/4") de distancia del extremo final de la tubería de descarga. A este punto de medición se une un cuello de ganso con válvula de paso y un manómetro con glicerina, para minimizar vibraciones (James, 1962). Las terminales de la tubería deben estar libres de rebabas e irregularidades provocadas por la soldadura de la tubería y de la unión de las tomas de 6.35mm.

Q: Producción de vapor a través de una tubería de descarga de 0.1984m de diámetro interno (t/h).

P: Presión de labio (bar)

h: Entalpía de vapor (kJ/kg)

F: Factor de corrección

D: Diámetro interno de la tubería de descarga (m)

Lv: lectura en el vertedero triangular (mm)

$$Q = 20642 F \frac{P D^2}{\sqrt{h - 2000}}$$

Pruebas de Producción por el Método del Separador

Es el método más exacto, consiste en conducir el flujo geotérmico a un separador, donde las fases líquida y sólida son separadas a una presión establecida, para posteriormente ser medidas individualmente por medio de placas orificio, caudal y entalpía.

Estudios Geocientíficos de Superficie

Contemporáneamente a las actividades relacionadas con la perforación profunda, es necesario continuar los estudios geocientíficos para:

- Verificar y detallar el modelo geológico
- Precisar la extensión del yacimiento geotérmico
- Definir nuevos sitios de perforación
- Evaluar los problemas ambientales

Refinamiento del Modelo Conceptual

Con los nuevos datos de las propiedades del yacimiento obtenidos en la etapa de factibilidad se hará un reajuste integrando ésta nueva información en el modelo conceptual. El propósito es elaborar mapas y secciones transversales que muestren las unidades geológicas, fallas y zonas de fracturas más importantes, así como la distribución de temperaturas, presiones, saturación de vapor, características químicas de los fluidos y las zonas de alteración hidrotermal.

Potencial Geotérmico

Potencial Geotérmico Preliminar: Capacidad de Generación eléctrica, expresada en MWe por el tiempo del proyecto (25 años), que puede estimarse para un campo geotérmico basándose en los resultados finales de la etapa de reconocimiento y prefactibilidad.

Potencial Geotérmico: Capacidad de Generación eléctrica, expresada en MWe por el tiempo del proyecto (25 años), que puede estimarse para un campo geotérmico basándose en los resultados finales de la etapa de factibilidad.¹⁰

4.4 Etapa de Desarrollo

Para adelantar esta etapa se siguen las estrategias recomendadas en el estudio de factibilidad, realizando:

- La perforación de pozos de producción y de inyección, y la eventual instalación de unidades de boca de pozo a descarga libre (de 3 a 5 MW)
- El desarrollo del campo por etapas con grupos modulares de potencia media (de 15 a 30 MW) o unidades de gran potencia (55 MW).

El nivel de inversión es grande, dependiendo del número de pozos a perforar y de la potencia a instalar de la planta. En general a este nivel de los trabajos, el costo por KW instalado varía de US\$1.500 a US\$2.500.

4.5 Etapa de Operación y Mantenimiento.

Esta etapa involucra el estudio de la evolución del yacimiento y la producción de los pozos, los cuales constantemente tienen que ser monitoreados para detectar variaciones significativas y actualizar y calibrar el modelo matemático que ha sido propuesto. La correcta aplicación del modelo es un instrumento indispensable para interpretar los cambios y problemas observados en el comportamiento del recurso que permitan tomar una decisión sobre el programa de perforación de pozos de reposición y una eventual ampliación de la capacidad instalada de la planta. ¹¹

¹¹ Formulación de un Plan de Desarrollo para las Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE), Volumen 2- Diagnóstico de las FCNE en Colombia. Consorcio Energético Corpoema. Bogotá, Diciembre 30 de 2010.

Capítulo V
Metodologías para la Evaluación
Preliminar de un Campo Geotérmico

CAPÍTULO V

Metodologías para la Evaluación Preliminar de un Campo Geotérmico

5. Modelos de Evaluación de Yacimientos Geotérmicos

La evolución de un yacimiento geotérmico depende de diversos factores (volumen, temperatura, porosidad, porcentaje de vapor existente, presión del yacimiento, transferencia de calor cedido de la roca al fluido entre otros), dichos factores en diferentes proporciones modificarán la vida útil de éste y por lo tanto la potencia que puede ser instalada en la planta para el aprovechamiento óptimo del recurso geotérmico.

Calcular la vida útil de un yacimiento es una labor ardua y complicada que obliga a realizar simplificaciones importantes para facilitar el cálculo. Existen métodos sencillos ampliamente utilizados como el modelo volumétrico, sin embargo por su propia simplicidad representan una gran incertidumbre e imprecisión en las estimaciones. Por otro lado, si se requiere una estimación detallada es imprescindible recurrir a un estudio detallado de la geología, geofísica, geo-hidrología y termodinámica que indudablemente no se tiene al iniciar un nuevo proyecto; así entonces, el presente trabajo propone una herramienta simple pero con los fundamentos teóricos necesarios para precisar los resultados.

Con anterioridad se ha tratado de realizar la predicción del comportamiento de un yacimiento geotérmico ante la instalación de una central de generación, a continuación se presentan los fundamentos teóricos de cada modelo:

- **Calor remanente GEOCOST¹².**- Éste método es el más sencillo que existe para modelar un yacimiento geotérmico, el modelo es utilizado cuando se conoce poca información del reservorio. Se basa en calcular la energía cedida por la roca y el fluido, conociendo el volumen, la presión y la temperatura del yacimiento, y las respectivas densidades y calores específicos del agua y la roca, además de hacer una consideración del porcentaje de energía aprovechable considerando el tiempo deseado de explotación.

¹² **Espíndola S.**, (2006), Viabilidad Económica de Proyectos Geotermoeléctricos, un Enfoque Integral, Tesis de licenciatura, Facultad Ingeniería UNAM, México.

- Análisis Volumétrico.¹³- Calcula la energía asociada intrínsecamente al contenido en masa en un yacimiento, considera que el yacimiento entregará toda la materia que tiene contenida y esta se usará con un porcentaje de evaporación en el separador y un factor de transformación típico. es una de las formas más sencillas de tener una primera aproximación del potencial geotérmico que se puede encontrar en un yacimiento, éste tipo de análisis se utiliza cuando se carece de información específica del yacimiento, por lo que es necesario realizar varias suposiciones.
- Modelo Termodinámico.- se encuentra fundamentado en las ecuaciones fundamentales de la termodinámica, conservación de masa y energía; se define la presión inicial del yacimiento así como el porcentaje de líquido y vapor presentes, se considera que se encuentra en saturación y se calculan las propiedades termodinámicas bajo estas condiciones. Se propone un diferencial de presión ΔP , y se determina la masa que debe ser extraída del yacimiento para lograr ese ΔP , recalculando las propiedades termodinámicas en cada decremento hasta alcanzar las condiciones finales propuestas.
- Modelo USGS con Simulación de Montecarlo.- Este modelo determina el calor disponible en el sitio, posteriormente se evalúa la cantidad de calor recuperable, una vez determinando el calor disponible en el yacimiento y suponiendo que el recurso geotérmico (totalmente en fase líquida) es llevado hasta la superficie con una efectividad de recuperación R_g y luego es enfriado hasta temperatura ambiente (recuperación ideal). El modelo volumétrico, mejor conocido como método "Heat in Place" propone una forma simple para estimar el potencial de un yacimiento, muy útil en etapas tempranas del desarrollo de un proyecto geotérmico.
- Descompresión gradual.- Calcula el comportamiento del reservorio de forma continua planteando y resolviendo las ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno en un modelo simplificado, es posible evaluar el comportamiento con transferencia de calor (propone un factor de transferencia) y recarga de mas (reinyección), evalúa el potencial iterando la potencia instalable hasta alcanzar la presión de abandono en el yacimiento

¹³ Nathenson (1975), Geothermal Resources in Hydrothermal Convection Systems and Conduction-Dominated Areas

5.1 Modelo de Calor Remanente GEOCOST

Este método es el más sencillo que existe para modelar un yacimiento geotérmico y dar una idea del potencial que es posible instalar. El modelo es utilizado cuando son pocos los datos que se conocen del yacimiento¹⁴.

Datos necesarios:

Volumen total	V_t	[km ³]
Temperatura inicial	T_y	[°C]
Presión del yacimiento	P_y	[Bar _a]
Temperatura abandono	T_{ab}	[°C] _{sat@P_{ab}}
Presión de Trabajo del turbogenerador	P_{sep}	[Bar]
Presión de Abandono	P_{ab}	[Bar]
Porosidad	ϕ	
Tiempo de vida del proyecto	t	[s]

Roca

Volumen	$V_r = (1 - \phi) V_t$	[km ³]
Densidad	ρ_r	[kg/m ³]
Calor específico	C_r	[kJ/kg°C]
Masa	$M_r = V_r \rho_r$	

Agua caliente

Volumen	$V_a = \phi V_t$	[km ³]
Densidad	$\rho_a = f(T, P)$	[kg/m ³]
Calor específico	$Cp_a = f(T, P)$	[kJ/kg°C]
Masa	$M_a = V_a \rho_a$	

Al bajar la temperatura se obtiene:

Calor cedido por la roca	$Q_r = M_r C_r \Delta T$	[kJ]
Calor cedido por el agua (sin evaporarse)	$Q_a = M_a Cp_a \Delta T$	[kJ]
Total cedido por la roca	$Q_T = Q_r + Q_a$	[kJ]

Del calor que lleva el fluido geotérmico, al pasar por el separador se transformará en vapor solo una fracción X_{sep} , esta fracción se aprovechará dentro del ciclo con una eficiencia del la central η_c . Por lo tanto, sólo $\eta_r = X_{sep} \eta_c$ se aprovechará en electricidad.

$$\dot{W}_e = \frac{Q_T}{t} \eta_r \quad [kW_e]$$

Se considera la temperatura inicial del yacimiento, a lo largo del periodo de vida del proyecto (30 años), esta disminuirá hasta alcanzar la temperatura correspondiente a la presión de abandono en condiciones de saturación.

¹⁴ Espíndola (2006), Viabilidad Económica de Proyectos Geotermoeléctricos, un Enfoque Integral

5.2 Modelo Volumétrico

Esta es una forma sencilla para tener una primera aproximación del potencial que se podría instalar en el campo. Sí tomamos los siguientes datos del yacimiento:

Temperatura:	T	[°C]
Área:	A	[km ²]
Espesor:	e	[km]
Volumen total:	V _t = A*e	[km ³]
Tiempo de vida del proyecto	t	[años]
Porosidad:	φ	%
Presión de yacimiento:	P _y	[Bar]
Temperatura de yacimiento:	T _y	[°C]
Calidad inicial de yacimiento:	X _y	%
Volumen del agua:	V _a = φ V _t	[km ³]
Densidad del agua:	ρ _a	[m ³ /kg]
Entalpía del agua:	h _f	[kJ/kg]
Gasto de extracción:	Ḃ _a	[m ³ /h]
Flujo Másico:	ṁ _a	[ton/h]
Presión del separador:	P _{sep}	[MPa]
Entalpía de agua en el separador:	h _{f@sep}	[kJ/kg]
Entalpía de vapor en el separador:	h _{g@sep}	[kJ/kg]
Calidad en el separador:	X _{sep}	%
Gasto de vapor:	ṁ _v	[ton/h]
Consumo específico:	CE	[ton/MW h]

Se calcula el gasto másico necesario para agotar el volumen de agua en el periodo del proyecto con una taza de extracción constante.

$$\dot{m}_v = \dot{m}_a X_{sep} = \frac{V_a \rho_a}{t} X_{sep} = \frac{\phi V_t \rho_a}{t} X_{sep}$$

La potencia se estima determinando la calidad de vapor en el separador y con el valor de consumo específico de vapor en la central.

$$\dot{W}_e = \frac{\dot{m}_v}{CE}$$

5.3 Modelo Termodinámico

En base a las ecuaciones básicas de la termodinámica y la conservación de masa, se proponen tres casos:

- Extracción vapor (parte superior del yacimiento)
- Extracción de agua (parte inferior del yacimiento)
- Extracción agua- vapor “homogéneo”

Consideraciones para el análisis:

- Porosidad
- Sin Recarga (reinyección)
- Sin Transferencia de calor roca-fluido

Suponiendo que el sistema se encuentra en equilibrio termodinámico (idealización):

- Balance de energía(1)
- Conservación de masa(2)
- Proceso a volumen constante(3)

$$H_0 - H_s = H_1 \quad (1)$$

$$M_0 - M_s = M_1 \quad (2)$$

$$V_0 = V_1 \quad (3)$$

5.31 Extracción de Vapor

Para el caso en que se considera la extracción de la parte superior del yacimiento (Vapor Saturado) el modelo es el siguiente:

$$M_0 X_0 h_{g0} + M_0 (1 - X_0) h_{f0} - M_s h_{g0} = M_1 X_1 h_{g1} + M_1 (1 - X_1) h_{f1} \quad (1)$$

$$M_s = M_0 - M_1 \quad (2)$$

$$M_0 X_0 v_{g0} + M_0 (1 - X_0) v_{f0} = M_1 X_1 v_{g1} + M_1 (1 - X_1) v_{f1} \quad (3)$$

Se desarrolló el programa en una plataforma de Microsoft Excel con ayuda de un programa capaz de manipular las tablas termodinámicas de precisión “REFPROP” por medio del cual fue posible realizar la simulación.

Consideraciones generales para la simulación:

Se toma como principal condición que las condiciones de los fluidos dentro del yacimiento se encuentran en estado de saturación.

Tabla 5.1 Extracción de vapor

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen	0.1	km ³
Presión inicial del yacimiento	50	Bar
Porosidad	1	
Calidad	0.5	% volumen
Potencia de la Central	20	MW
Consumo específico	19	Ton/MWh
Recarga	0	Ton
Presión de trabajo de la Turbina	9	Bar

EXTRACCIÓN DE VAPOR

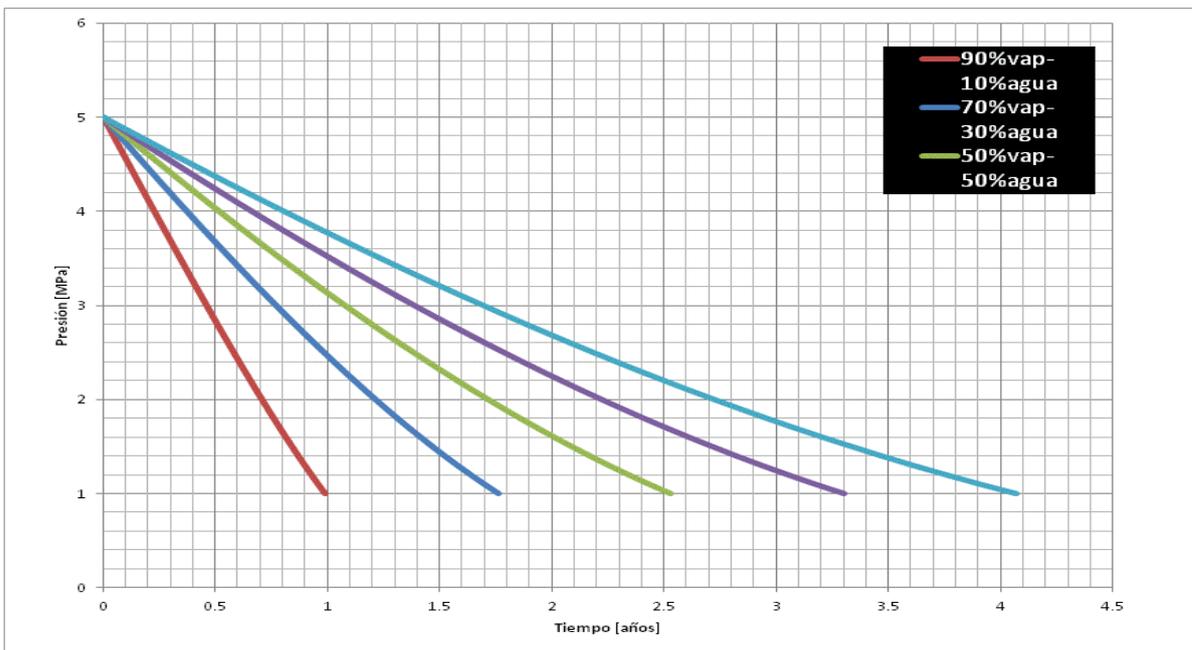


Figura 5.01 Grafica de Extracción de vapor

5.32 Extracción de Líquido (Agua caliente)

Desarrollando las ecuaciones para el caso en que se considera la extracción de la parte inferior del yacimiento (líquido saturado):

$$M_0 X_0 h_{g0} + M_0 (1 - X_0) h_{f0} - M_s h_{f0} = M_1 X_1 h_{g1} + M_1 (1 - X_1) h_{f1} \quad (1)$$

$$M_s = M_0 - M_1 \quad (2)$$

$$M_0 X_0 v_{g0} + M_0 (1 - X_0) v_{f0} = M_1 X_1 v_{g1} + M_1 (1 - X_1) v_{f1} \quad (3)$$

Se programó de tal forma que únicamente fuese necesario introducir los siguientes datos y con ellos obtener una gráfica que relaciona el decaimiento de la presión en el yacimiento a través del tiempo.

Tabla 5.2 Extracción de líquido

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen	0.1	km ³
Presión	50	Bar
Porosidad	1	
Calidad	0.5	% volumen
Potencia de la Central	20	MW
Consumo específico	19	Ton/MWh
Recarga	0	Ton
Presión de trabajo de la Turbina	9	Bar

EXTRACCIÓN DE LÍQUIDO

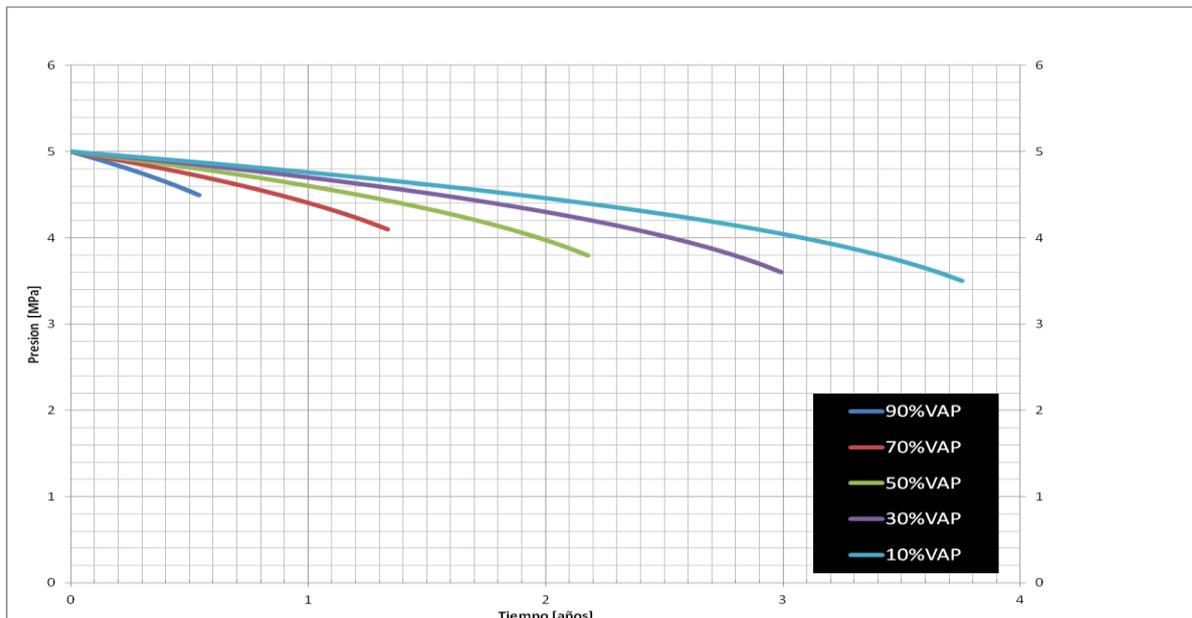


Figura 5.02 Gráfica de Extracción de líquido

5.33 Extracción Mezcla Homogénea (agua-vapor)

Desarrollando las ecuaciones para el caso en que se considera una extracción de un fluido homogéneo:

$$M_0 X_0 h_{g0} + M_0 (1 - X_0) h_{f0} - [M_s X_0 h_{g0} + M_s (1 - X_0) h_{f0}] = M_1 X_1 h_{g1} + M_1 (1 - X_1) h_{f1} \quad (1)$$

$$M_s = M_0 - M_1 \quad (2)$$

$$M_0 X_0 v_{g0} + M_0 (1 - X_0) v_{f0} = M_1 X_1 v_{g1} + M_1 (1 - X_1) v_{f1} \quad (3)$$

Tabla 5.3 Extracción homogénea (líquido-vapor)

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen	0.2	km ³
Presión	86	Bar
Porosidad	0.96	
Calidad	0.5	% volumen
Potencia de la Central	10	MW
Consumo específico	10	Ton/MWh
Recarga	0	Ton
Presión de trabajo de la Turbina	9	Bar

HOMOGÉNEO

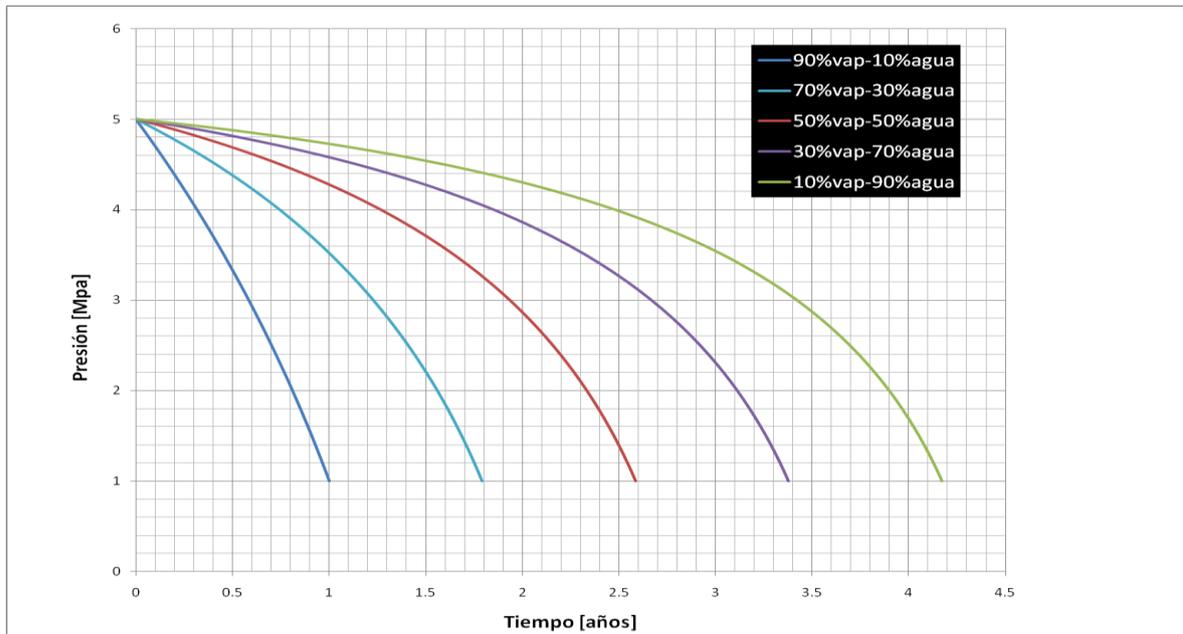


Figura 5.03 Gráfica de extracción mezcla homogénea

5.4 Modelo USGS (Heat in Place)

Primero se determina el calor disponible en el sitio, posteriormente se evalúa la cantidad de calor recuperable, una vez determinando el calor disponible en el yacimiento y suponiendo que el recurso geotérmico (totalmente en fase líquida) se lleva hasta la superficie con una efectividad de recuperación R_g y luego es enfriado hasta temperatura ambiente (recuperación ideal).

$$q_{recuperable} = R_g q_{disponible}$$

$$q_{recuperable} = R_g V \cdot [\phi \rho_{agua} C_{p_{agua}} + (1 - \phi) \rho_{roca} C_{roca}] \cdot (T_{yacimiento} - T_{ambiente})$$

Donde q es el calor disponible, V el volumen total del yacimiento, ϕ la porosidad, ρ la densidad, C_p el calor específico a presión constante, C la capacidad calorífica y T la temperatura.

Se determina la cantidad de fluido que debería ser extraída del yacimiento para recuperar este calor, dividiendo el calor recuperable por la diferencia entre la entalpía que tiene el agua en el yacimiento y la que tendría si se enfriara hasta temperatura ambiente:

$$M_{Recuperable} = \frac{q_{Recuperable}}{h_{yacimiento} - h_{ambiente}}$$

Posteriormente se evalúa la fracción de vapor que se genera en superficie al llevar el fluido a la presión de separación, esto permitirá convertir la masa recuperable (condiciones ideales) en masa aprovechable (condiciones reales).

$$M_{Aprovechable} = X_{separador} \cdot M_{Recuperable}$$

La calidad en el separador es la fracción de fluido recuperado que realmente puede ser utilizado en la generación, será una función de la presión de separación (si se supone flujo isoentálpico):

$$X_{separador} = \frac{h_{yacimiento} - h_{f@sep}}{h_{fg@sep}}$$

Cuando ya se conoce la cantidad de masa aprovechable se podrá determinar de forma sencilla el potencial geotérmico en potencia eléctrica dividiendo este valor por el tiempo de explotación y el consumo específico calculado de la central:

$$\dot{W}_{electrica} = \frac{M_{Aprovechable}}{CE_{central} \cdot t}$$

El consumo específico de la central está estrechamente relacionado con el inverso de la eficiencia del ciclo, es decir, una central eficiente tendrá menor consumo específico que una central ineficiente:

$$CE_{central} = \frac{1}{\eta_{ciclo}(h_{g@sep} - h_{ambiente})}$$

Por lo tanto para evaluar de manera sencilla el potencial de un yacimiento, se requiere conocer o tener una aproximación tolerable de los siguientes parámetros:

1. Temperatura de yacimiento
2. Área de yacimiento
3. Espesor de yacimiento
4. Factor de recuperación (Rg)
5. Porosidad de roca
6. Densidad de roca
7. Capacidad calorífica de roca
8. Presión de separación
9. Vida del proyecto
10. Temperatura ambiente

Algunos de estos parámetros pueden conocerse y otros pueden ser estimados pero con gran incertidumbre, recuérdese que los fenómenos subterráneos son siempre inciertos.

5.5 Metodología propuesta denominada: Descompresión Gradual

El presente trabajo propone una herramienta simple pero con los fundamentos teóricos necesarios para precisar los resultados.

Este modelo resulta más simple que un modelo completo, pero con una exactitud considerable; ya que presenta una complejidad aun mayor en comparación con el modelo simple (análisis volumétrico).

Para la simplificación del problema, se parte de la idealización del yacimiento geotérmico como un volumen de control con características físicas y termodinámicas homogéneas, en un principio se supondrá que las fronteras son impermeables y adiabáticas. En un yacimiento existe roca porosa saturada de fluido (Fig. 5.4 izq.), sin embargo, para simplificar el cálculo se propone un yacimiento conceptualmente separado, donde la roca estará en contacto con el agua pero serán dos medios diferentes.

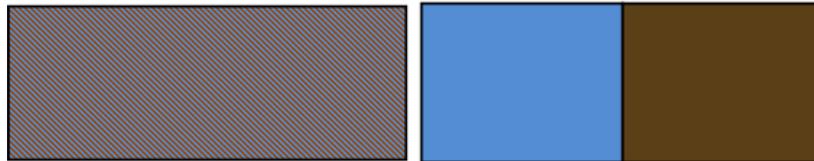


Figura 5.4 Izq. Yacimiento geotérmico, Der. Idealización del yacimiento

Se plantearán las ecuaciones que rigen el fenómeno partiendo de los principios fundamentales de conservación de masa y energía, además se utilizarán las tablas de vapor para definir las propiedades de cada estado, por otro lado se verá la bondad de utilizar incrementos de presión y se presentará la forma de interpretar la evolución en el tiempo.

Se seguirá la metodología presentada por Hiriart para la simplificación de las ecuaciones diferenciales y se propondrá también un método numérico donde se dé solución. Se espera del método concluir acerca de la capacidad instalable en un yacimiento geotérmico, el tiempo que podrá explotarse además de las características internas en el yacimiento.

Se deberán definir las condiciones iniciales del yacimiento (Temperatura, presión, estado termodinámico), parámetros básicos del yacimiento como: densidad, calor específico y porosidad de la roca, volumen total del yacimiento; y algunos otros de la central (Potencia, tipo de central, presión de separación, consumo específico, etc.)

Para fines de cálculo, se asume que la presión en el separador es la misma que en la admisión de la turbina (**10 Bar**), pero se debe de tener en cuenta, que en realidad el separador tiene una mayor presión, la cual se irá abatiendo en el

recorrido que el vapor realiza por las tuberías. También se ha supuesto que el consumo específico del turbogenerador es de **7 ton/MWh**.

Desarrollo de las ecuaciones.

Siguiendo la metodología presentada por Hiriart¹⁵ donde se resuelven las ecuaciones de conservación de masa y energía en función de las propiedades termodinámicas del fluido; se plantearon los casos mediante ecuaciones diferenciales que simulan el comportamiento de un yacimiento geotérmico.

Se plantean las ecuaciones diferenciales en función de diferenciales de presión (en lugar de diferenciales de masa o de tiempo), evitando la necesidad de realizar iteraciones.

El siguiente análisis se realizó partiendo de los principios fundamentales de conservación de masa y energía y los correspondientes balances energéticos. Se inicia considerando un volumen de yacimiento constante, en el que el fluido se encuentra en estado de saturación.

Nomenclatura

C_R	Calor específico de la roca a presión constante [kJ/kg °C]
h	Entalpía específica [kJ/kg]
\dot{m}	Flujo másico de extracción [kg/s]
M	Masa del yacimiento [kg]
\dot{M}	Flujo Másico [kg/s]
M_r	Masa de la roca [kg]
P	Presión [MPa]
Q	Calor [kJ]
\dot{Q}	Flujo de calor [kJ/s]
q	Recarga de masa [kg/s]
t	Tiempo [s]
T	Temperatura [°C]
u	Energía interna específica [kJ/kg]
V	Volumen del yacimiento [m ³]
v	Volumen específico [m ³ /kg]
V	Velocidad [m/s]
W	Trabajo [kJ]

¹⁵ **Hiriart** G., Sanchez E., (1985), Thermodynamic Behavior of Simplified Geothermal Reservoirs, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE, Proceedings Tenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 22-24.

x	Calidad de vapor
ϕ	Porosidad
ρ	Densidad de la roca [kg/m ³]
λ	Transferencia de calor roca al fluido

Subíndices

e	Extracción
g	Gas
f	Fluido
fg	Gas-fluido
R	Recarga

El método seguido para el planteamiento de cada caso fue el siguiente:

Descompresión Gradual Simple

Partiendo de los principios fundamentales:

Fracción de fluido en el yacimiento $M = \frac{V\phi}{v}$

Conservación de masa $\dot{m} = -\frac{dM}{dt}$

Conservación de energía $-\dot{m}h = \frac{d(Mu)}{dt}$

Después de desarrollar las ecuaciones con las consideraciones pertinentes para este caso y desarrollando se concluyó (Anexo1):

$$dh = vdp$$

Descompresión Gradual con Transferencia de Calor

De forma análoga.

Fracción de fluido en el yacimiento $M = \frac{V\phi}{v}$

Conservación de masa $\dot{m} = -\frac{dM}{dt}$

Conservación de energía $-\dot{m}h = \frac{d(Mu)}{dt} + \gamma \frac{d(M_r u_r)}{dt}$

Después de desarrollar las ecuaciones con las consideraciones pertinentes para este caso y desarrollando se concluyó (Anexo1):

$$dh = \left(v - \gamma \frac{M_R}{M} C_R \frac{\partial T}{\partial P} \Big|_{sat} \right) dP$$

Descompresión Gradual con Recarga de Masa

De forma Análoga:

Fracción de fluido en el yacimiento $M = \frac{v\phi}{v}$

Conservación de masa $q - \dot{m} = \frac{dM}{dt}$

Conservación de energía $qh_r - \dot{m}h = \frac{d(Mu)}{dt}$

Después de desarrollar las ecuaciones con las consideraciones pertinentes para este caso y desarrollando se concluyó (Anexo1):

$$dh = vdp + q \frac{hr}{M} dt$$

Descompresión Gradual General

Análogamente:

Fracción de fluido en el yacimiento $M = \frac{v\phi}{v}$

Conservación de masa $q - \dot{m} = \frac{dM}{dt}$

Conservación de energía $qh_r - \dot{m}h = \frac{d(Mu)}{dt} + \gamma \frac{d(M_r u_r)}{dt}$

Después de desarrollar las ecuaciones con las consideraciones pertinentes para este caso y desarrollando se concluyó (Anexo 1):

$$\alpha dv = du + \beta dp$$

$$\alpha = \frac{1}{v} \left[\left(\frac{(qhR - \dot{m}he)}{(q - \dot{m})} \right) - u \right]$$

$$\beta = \gamma \frac{(1 - \phi)v\rho_R}{\phi} C_R \frac{\partial T}{\partial P} \Big|_{sat}$$

$$dx = - \frac{\alpha \left(\frac{dvf}{dp} + \frac{xdvfg}{dP} \right) \left(\frac{duf}{dP} + \frac{xdufg}{dP} \right) + \beta}{(\alpha vfg + ufg)}$$

Que determinará el comportamiento de la calidad(x) dentro del yacimiento al verse involucrados los factores previamente mencionados.

Una vez planteadas y simplificadas las ecuaciones diferenciales se procede a darles solución numérica discretizando los incrementos de presión a un valor finito propuesto; se deberá conocer un estado en el que son conocidas todas las propiedades y evaluando en las ecuaciones diferenciales se conocerá el incremento en cada propiedad para definir el siguiente estado:

$$P_1 = P_0 + \Delta P$$

$$h_1 = h_0 + \Delta h$$

$$x_1 = x_0 + \Delta x$$

En los casos de Descompresión Gradual con recarga de masa y general, se deberá recurrir a un análisis de dimensión cero para poder dar solución sin iteraciones en el tiempo (Anexo1).

Intervalos de tiempo

Se plantearon las ecuaciones diferenciales en incrementos de presión, sin embargo el interés de este estudio está mayormente orientado a predecir la evolución de las propiedades del yacimiento en el tiempo, para ello es necesario conocer la relación que guardan las condiciones en el yacimiento y su explotación en superficie.

La potencia del turbogenerador está definida por el flujo másico de vapor, dividido por el consumo específico típico de una central del mismo tipo (central de condensación).

$$Pot = \frac{G}{C_e}$$

Donde:

C_e Consumo específico de la turbina [Ton/MWh]

Pot Potencia en el turbogenerador [MW]

G Gasto de vapor para la central [Ton/h]

Además, el gasto de vapor para la turbina depende de la calidad que se tiene en el separador, la masa de extracción y el intervalo de tiempo:

$$G = \frac{M_e}{\Delta t} x_{@sep}$$

Después de determinar la calidad en el separador y realizar las sustituciones necesarias se encontrará que el incremento de tiempo puede obtenerse:

$$\Delta t = \frac{M_e \cdot \left(\frac{h_y - h_{f@sep}}{h_{fg@sep}} \right)}{G \cdot Pot}$$

Se define la masa del yacimiento para saber el potencial del mismo, considerando que se quiere una producción de 30 años.

$$M = \frac{V}{v}$$

Para cada iteración es necesario definir la masa que se extraerá del yacimiento conociendo la calidad de separación y el consumo específico del turbogenerador.

$$X_{sep} = \frac{h_1 - h_{f \text{ turbina}}}{h_{fg \text{ turbina}}}$$

$$M_{ext} = \frac{Ce * Pot}{X_{sep}}$$

Se Desarrollaron y programaron las ecuaciones diferenciales previamente mencionadas, con lo que se desarrolló un software que permite estimar la potencia instalable para el periodo de vida que se plantea para el proyecto; con la facilidad de crear diferentes escenarios, modificando únicamente algunos parámetros físicos.

Explotación

Se propone explotar el yacimiento con un ciclo a condensación de simple separación, éste esquema de explotación se consideró para el cálculo del potencial en yacimiento, el fluido se extrae mediante una batería de pozos productores desde el yacimiento hasta la superficie, se acondiciona a la presión con una placa orificio y posteriormente es conducido a un separador centrifugo donde se separa la fracción evaporada, la presión de separación considerada fue de **10Bar**, el vapor generado se utiliza para generar energía con un consumo específico típico de una central a condensación de **7 ton/MWh**. Para fines de cálculo se asumió una vida útil del proyecto de **30 años**.

En la tabla 5.4 se muestran los parámetros básicos de la explotación del recurso:

Tabla. 5.4 Parámetros de Explotación

Parámetro	Variable	Valor	Unidades
Tiempo de vida	t	30	Años
Tipo de Central	-	Condensación	-
Presión de separación	P _{sep}	10	Bar
Consumo específico de vapor	CE	7	ton/MWh

Sensibilidad

Para entender cada caso se hará un análisis de sensibilidad variando algunos parámetros físicos y termodinámicos presentes en el yacimiento.

Se planteará y analizará un escenario al que se denomina como “escenario base”, cuyas condiciones iniciales, para este caso se definen de manera arbitraria (pero deben ser estimadas basándose en los estudios realizados de geología, geofísica, geoquímica etc.). Posteriormente para hacer evidente el efecto de la variación de algunos parámetros en el modelo, se realiza un análisis de sensibilidad.

Para hacer el estudio más conservador, se decidió evaluar cada modelo variando un parámetro del escenario base y observando su efecto en el resultado final del potencial, así se evaluó un límite inferior y un límite superior y se presenta el resultado para los siguientes parámetros:

- Temperatura inicial
- Área del yacimiento
- Espesor del yacimiento
- Porosidad de la roca

Tabla 5.5 Escenario de simulación base

Escenario base		
Caso	Unidades	General
V _{yac}	km ³	9.7
Porosidad	%	6
Temperatura	°C	240
C _e	Ton/MWh	7
X _{inicial}	%	14
Extracción		Homogéneo
C _{Roca}	kJ/kg°C	1.1
ρ _{roca}	ton/m ³	2.7
Presión del Separador	Bar	10

Capítulo VI
Validación de los Modelos de
Evaluación preliminar

CAPÍTULO VI

VI. Validación de los Modelos de Evaluación Preliminar

Objetivos

Realizar la evaluación preliminar del potencial en un yacimiento supuesto, comparando los distintos métodos existentes y confirmando la confiabilidad que el método de descompresión gradual presenta.

Para lograr una adecuada estimación es necesario contar con un modelo conceptual del yacimiento que se genere empleando adecuadamente la documentación disponible, para tal efecto se debe realizar la integración e interpretación de la información geológica, geofísica y geoquímica de la zona, a fin de delimitar el área, determinar sus condiciones de presión y temperatura en el subsuelo, conocer las características químicas de los fluidos contenidos en el reservorio y con ello, conformar el modelo conceptual del yacimiento.

Asimismo, para tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio, se recurre a la aplicación de las distintas técnicas de evaluación del yacimiento, cada una con distintas simplificaciones y diferente grado de complejidad, lo que da un gran margen de seguridad en los resultados:

- Calor remanente GEOCOST
- Análisis Volumétrico.
- Modelo Termodinámico
- Modelo USGS con Simulación de Montecarlo
- Descompresión gradual

Finalmente se presenta la discusión de los resultados obtenidos al evaluar el modelo conceptual por cada uno de los métodos propuestos, lo que sirvió para concluir sobre el potencial eléctrico del yacimiento y recomendar acerca de su explotación.

6.11 Modelo de Calor Remanente

Los resultados obtenidos de la evaluación por el método del calor remanente son los mostrados en la tabla 6.11.

Tabla. 6.11 Resultados del Modelo de Calor Remanente

Área	A	6.5	km ²
Espesor	E	1.5	km
Volumen de yacimiento	V	9.69	km ³
Porosidad de roca	ϕ	6	%
Densidad de la roca	ρ_r	2.7	Ton/m ³
Tiempo de vida	t	30	años
Temperatura	T	240	°C
Presión en el separador	P _{sep}	10	Bar
Temperatura en el separador	T _{sep}	180	°C
Calor específico del agua	Cp _a	4.8	kJ/kg
Masa de agua	M _a	4.7e+11	Kg
Energía específica del agua	e _a	287	kJ/kg
Energía total de agua	E _a	1.3e+14	kJ
Energía aprovechable de agua	E _{ad}	1.8e+13	kJ
Potencia entregada del calor del agua	\dot{W}_a	4.3	MW
Masa de Roca	M _r	2.4e+13	Kg
Calor Específico de la roca	C _r	1.1	kJ/kg
Energía específica de la roca	e _r	33	kJ/kg
Energía de la roca	E _r	8.1e+14	kJ
Energía aprovechable de roca	E _{rd}	1.1e+14	kJ
Potencia entregada del calor de la roca	\dot{W}_r	25.8	MW
Potencia total entregada	\dot{W}	30	MW

Sensibilidad del Modelo de Calor Remanente

Temperatura

Tabla. 6.12 Sensibilidad a la Temperatura del Modelo de Calor Remanente

Temperatura	210	240	260	°C
Potencia Entregada	7	30	54	MW

Área

Tabla. 6.13 Sensibilidad al Área del Modelo de Calor Remanente

Área	4	6.5	8	km ²
Potencia Entregada	19	30	37	MW

Espesor del yacimiento

Tabla. 6.14 Sensibilidad al Espesor del Modelo de Calor Remanente

Espesor	0.7	1.5	2	km
Potencia Entregada	14	30	40	MW

Porosidad de la roca

Tabla. 6.151 Sensibilidad a la Porosidad del Modelo Calor Remanente

Porosidad	4	6	8	%
Potencia Entregada	29	30	31	MW

Por este método el escenario pesimista es de 7 MW, el optimista de 54 y el esperado es de **29 MW**.

6.12 Modelo Volumétrico

Los resultados obtenidos del análisis de modelo volumétrico para el yacimiento se muestran en la tabla 6.16.

Tabla. 6.16 Resultados Modelo Volumétrico

Área	A	6.5	km ²
Espesor	e	1.5	km
Volumen de yacimiento	V	9.69	km ³
Porosidad de roca	ϕ	6	%
Tiempo de vida	t	30	años
Temperatura	T _y	240	°C
Presión	P _y	150	Bar
Entalpia	h _y	1060	kJ/kg
Volumen específico del agua	v	1.2e-3	m ³ /kg
Volumen de agua	V _a	0.58	km ³
Gasto	q	0.61	m ³ /s
Gasto másico	m	1800	ton/h
Presión de separación	P _{sep}	10	Bar
Calidad en el separador	x _{sep}	14	%
Consumo específico de vapor	CE	7	Ton/MWh
Potencia entregada	\dot{W}	35	MW

Sensibilidad del Modelo Volumétrico

Temperatura

Tabla. 6.17 Sensibilidad a la Temperatura del Modelo Volumétrico

Temperatura	210	240	260	°C
Potencia Entregada	18	35	46	MW

Área

Tabla. 2.18 Sensibilidad al Área del Modelo Volumétrico

Área	4	6.5	8	km ²
Potencia Entregada	22	35	43	MW

Espesor del yacimiento

Tabla. 6.19 Sensibilidad al Espesor del Modelo Volumétrico

Espesor	0.7	1.5	2	km
Potencia Entregada	16	35	47	MW

Porosidad de la roca

Tabla. 6.20 Sensibilidad a la Porosidad del Modelo Volumétrico

Porosidad	4	6	8	%
Potencia Entregada	23	35	47	MW

Por este método el escenario pesimista es de 16 MW, el optimista es de 47 MW y el esperado es de **33 MW**.

6.13 Modelo Termodinámico

Los resultados obtenidos del análisis de modelo termodinámico con extracción homogénea para el yacimiento se muestran en la tabla 6.21.

Tabla. 6.21 Resultados Modelo Termodinámico

Área	A	6.5	km ²
Espesor	e	1.5	km
Volumen de yacimiento	V	9.69	km ³
Porosidad de roca	ϕ	6	%
Tiempo de vida	t	30	años
Temperatura	T _y	240	°C
Presión	P _y	33.5	Bar
Entalpia	h _y	1064.3	kJ/kg
Presión de trabajo de la turbina	P _t	10	Bar
Gasto másico	m	1800	ton/h
Presión de separación	P _{sep}	10	Bar
Calidad en el separador	x _{sep}	14	%
Consumo específico de vapor	CE	7	Ton/MWh
Potencia entregada	\dot{W}	27	MW

Sensibilidad del Modelo Termodinámico

Temperatura

Tabla. 6.22 Sensibilidad a la Temperatura del Modelo Termodinámico

Temperatura	210	240	260	°C
Potencia Entregada	14	27	37	MW

Área

Tabla. 3.23 Sensibilidad al Área del Modelo Termodinámico

Área	4	6.5	8	km ²
Potencia Entregada	17	27	34	MW

Espesor del yacimiento

Tabla. 6.24 Sensibilidad al Espesor del Modelo Termodinámico

Espesor	0.7	1.5	2	km
Potencia Entregada	13	27	37	MW

Porosidad de la roca

Tabla. 6.25 Sensibilidad a la Porosidad del Modelo Termodinámico

Porosidad	4	6	8	%
Potencia Entregada	18	27	37	MW

Por este método el escenario pesimista es de 13 MW, el optimista es de 37 MW y el esperado es de **26 MW**.

6.14 Modelo USGS (Heat in Place)

Tabla. 6.26 Resultados del Modelo USGS

Área	A	6.5	km ²
Espesor	E	1.5	km
Volumen de yacimiento	V	9.69	km ³
Porosidad de roca	ϕ	6	%
Densidad de la roca	ρ_r	2.7	Ton/m ³
Calor específico de la roca	Cr	1.1	kJ/kgK
Tiempo de vida	t	30	años
Temperatura	T	240	°C
Presión en el separador	P _{sep}	10	Bar
Temperatura ambiente	T	20	°C
Calor específico del agua	Cp _a	4.8	kJ/kgK
Factor de Recuperación	Rg	6	%
Calor recuperable	Qr	3.9 E+14	kJ
Masa Recuperable	Mr	4.1E+11	kg
Masa Aprovechable	Ma	5.5E+10	kg
Calidad en el separador	Xsep	14	%
Potencia total entregada	\dot{W}	30	MW

Sensibilidad del Modelo USGS

Temperatura

Tabla. 6.27 Sensibilidad a la Temperatura del Modelo USGS

Temperatura	210	240	260	°C
Potencia Entregada	15	30	40	MW

Área

Tabla. 4.28 Sensibilidad al Área del Modelo USGS

Área	4	6.5	8	km ²
Potencia Entregada	19	30	37	MW

Espesor del yacimiento

Tabla. 6.29 Sensibilidad al Espesor del Modelo USGS

Espesor	0.7	1.5	2	km
Potencia Entregada	14	30	40	MW

Porosidad de la roca

Tabla. 6.30 Sensibilidad a la Porosidad del Modelo USGS

Porosidad	4	6	8	%
Potencia Entregada	30	30	30	MW

Por este método el escenario pesimista es de 14 MW, el optimista es de 40 MW y el esperado es de **28 MW**.

6.15 Modelo de Descompresión Gradual (propuesto en esta Tesis)

En la tabla 6.31 y las figuras 6.1 y 6.2 se muestran los resultados de la evaluación por el método de descompresión gradual.

Tabla. 6.31 Resultados del Modelo de Descompresión Gradual

Área	A	6.5	km ²
Espesor	e	1.5	km
Volumen de yacimiento	V	9.69	km ³
Porosidad de roca	ϕ	6	%
Calor Específico de la roca	C_r	1.1	kJ/kg
Densidad de la roca	ρ_r	2.7	Ton/m ³
Temperatura	T_y	240	°C
Presión de separación	P_{sep}	10	Bar
Consumo específico de vapor	CE	7	Ton/MWh
Potencia entregada	\dot{W}	35	MW

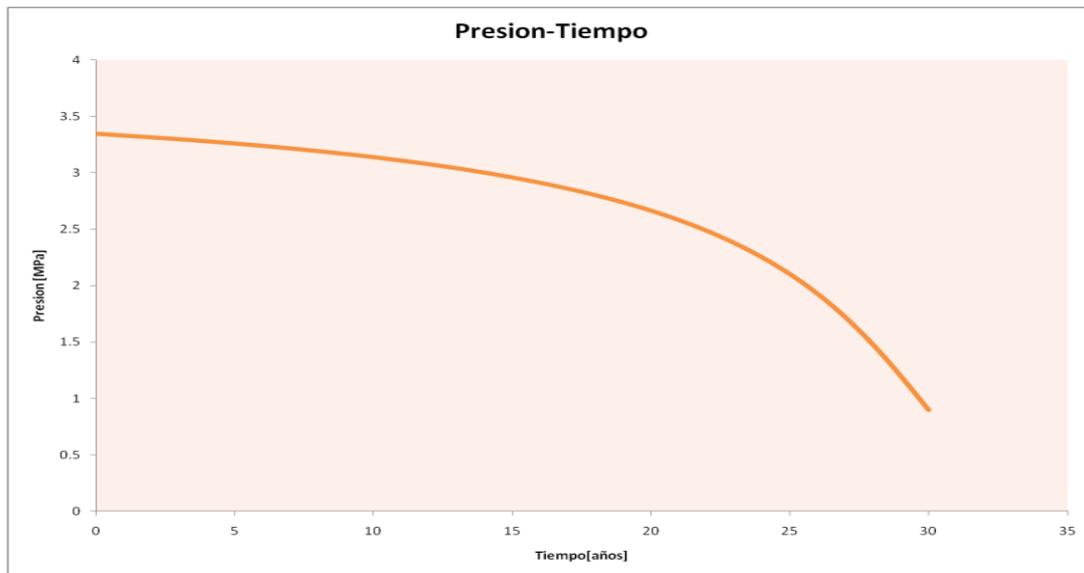


Figura. 6.1 Comportamiento de la presión del yacimiento en el tiempo

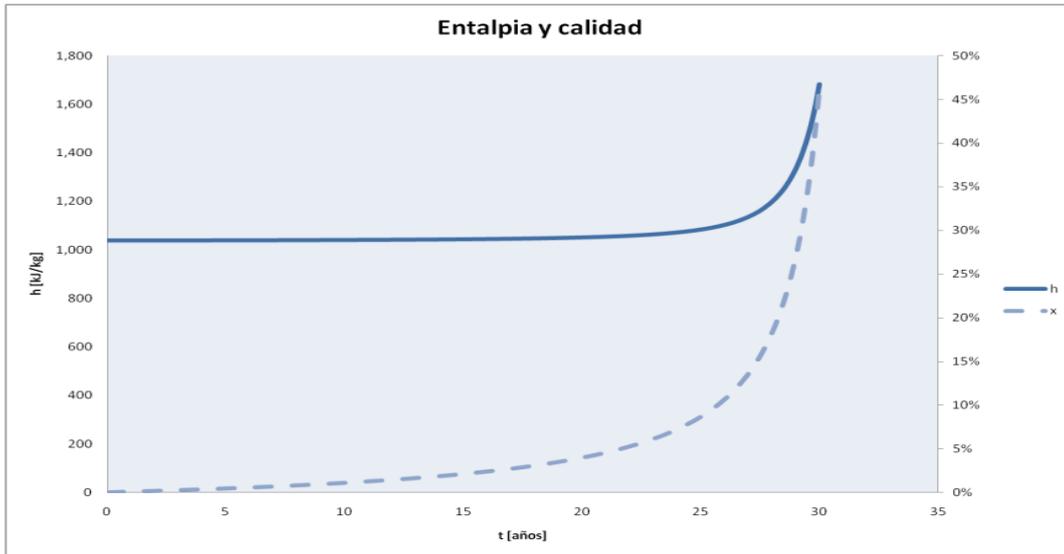


Figura. 6.2 Comportamiento de la calidad y la entalpía del yacimiento en el tiempo

Sensibilidad del Modelo de Descompresión Gradual

Temperatura

Tabla. 6.32 Sensibilidad a la Temperatura del Modelo de Descompresión Gradual

Temperatura	210	240	260	°C
Potencia Entregada	19	35	45	MW

Área

Tabla. 6.33 Sensibilidad al Área del Modelo de Descompresión Gradual

Área	4	6.5	8	km ²
Potencia Entregada	22	35	43	MW

Espesor del yacimiento

Tabla. 6.34 Sensibilidad al Espesor del Modelo de Descompresión Gradual

Espesor	0.7	1.5	2	km
Potencia Entregada	16	35	46	MW

Porosidad de la roca

Tabla. 6.35 Sensibilidad a la Porosidad del Modelo de Descompresión Gradual

Porosidad	4	6	8	%
Potencia Entregada	24	35	45	MW

Por este método el escenario pesimista es de 16 MW, el optimista de 46 MW y el esperado de **32 MW**.

Los métodos arrojan resultados muy similares en la estimación del potencial a pesar de las diferencias en el desarrollo y las simplificaciones asumidas:

Tabla 6.36 Resultado del Análisis de Sensibilidad

	Unidades	Volumétrico			Calor Remanente			Termodinámico			USGS			Descompresión Gradual		
Temperatura	°C	210	240	260	210	240	260	210	240	260	210	240	260	210	240	260
Potencia	MW	18	35	46	7	30	54	14	27	37	15	30	40	19	35	45
Área	km ²	4	6.5	8	4	6.5	8	4	6.5	8	4	6.5	8	4	6.5	8
Potencia	MW	22	35	43	19	30	37	17	27	34	19	30	37	22	35	43
Espesor	km	0.7	1.5	2	0.7	1.5	2	0.7	1.5	2	0.7	1.5	2	0.7	1.5	2
Potencia	MW	16	35	47	14	30	40	13	27	37	14	30	40	16	35	46
Porosidad	%	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
Potencia	MW	23	35	47	29	30	31	18	27	37	30	30	30	24	35	45
Escenario		Pesimista	Esperado	Optimista	Pesimista	Esperado	Optimista	Pesimista	Esperado	Optimista	Pesimista	Esperado	Optimista	Pesimista	Esperado	Optimista
Potencia	MW	16	34	47	7	29	54	13	26	37	14	28	40	16	33	46

CONCLUSIONES

- La metodología propuesta en esta tesis (modelo de Descompresión Gradual), resulta más completa que las otras metodologías desarrolladas, ya que además de incorporar un mayor número de parámetros termodinámicos, entrega resultados similares tomando en consideración parámetros iguales del yacimiento para cada modelo, lo que nos permite suponer que es una predicción aceptable.
- El software desarrollado es una herramienta útil, como primera aproximación de la evaluación del potencial de yacimientos geotérmicos con poca información durante las primeras etapas de exploración, con la posibilidad de complementarlo mediante el conocimiento de valores obtenidos en campo que permitan afinar el modelo y así obtener resultados más aproximados.
- Una ventaja dentro del modelo es la suposición que se puede incluir la recarga de masa en diferentes proporciones y a diferentes temperaturas permitiendo observar su efecto en la vida útil y el potencial del yacimiento geotérmico (Anexo II).
- No es posible determinar el volumen real, la porosidad, la calidad del vapor y el porcentaje de líquido que realmente se reinyecta; además como afecta éste la temperatura y presión del yacimiento. Por lo tanto, es relevante saber a ciencia cierta cuál será la vida útil del yacimiento, sin embargo, se debe ser consciente que siempre existirá un margen de error y los resultados presentados son aproximaciones.

Anexos

ANEXO I

Metodología DESCOMPRESIÓN GRADUAL

Siguiendo la metodología presentada por Hiriart¹⁶ donde se resuelven las ecuaciones de conservación de masa y energía en función de las propiedades termodinámicas del fluido; planteamos los distintos casos mediante ecuaciones diferenciales que simulan el comportamiento de un yacimiento geotérmico.

Caso A) Expansión Adiabática

Se definen las propiedades termodinámicas del yacimiento y con el decaimiento de la presión se expandirá la extracción.

Partiendo de la ecuación de conservación de masa

$$\dot{M} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

Como únicamente hay extracción del yacimiento:

$$\dot{M} = -\dot{m}_s$$

Por otro lado, el flujo másico se define como:

$$\dot{m} = -\frac{dM}{dt} \dots (1)$$

Donde:

\dot{m}	Flujo másico	[kg/s]
\dot{m}_e	Flujo másico de entrada	[kg/s]
\dot{m}_s	Flujo másico de salida	[kg/s]
\dot{M}	Masa del yacimiento	[kg]

La Masa se define como:

$$M = \frac{\forall \phi}{v}$$

Derivando:

$$\frac{dM}{dt} = \forall \phi \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{v} \right)$$

¹⁶ Hiriart et al

$$\frac{dM}{dt} = \forall \phi \left[\frac{v \frac{d(1)}{dt} - \frac{1 dv}{dt}}{v^2} \right]$$

$$\frac{dM}{dt} = \forall \phi \left[-\frac{1 dv}{v^2} \right] = -\frac{dv \forall \phi}{dt v^2}$$

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{M dv}{v dt}$$

$$v \frac{dM}{dt} = -M \frac{dv}{dt} \dots (2)$$

Sustituyendo (1) en (2)

$$-\dot{m}v = -M \frac{dv}{dt}$$

$$\dot{m}v = M \frac{dv}{dt} \dots (3)$$

De la Ecuación de la Energía:

$$-Q_R + W + \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) in - \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) out = \frac{dMu}{dt}$$

Considerando que no hay pérdidas de calor, trabajo, ni recarga de fluido y despreciando los términos de energía cinética y potencial.

$$-\dot{m}h = \frac{dMu}{dt} \dots (4)$$

Sustituyendo en (4)

$$h = u + Pv \therefore u = h - Pv$$

$$-\dot{m}h = \frac{dM(h - Pv)}{dt}$$

Derivando:

$$-\dot{m}h = \frac{Mdh}{dt} + \frac{hdM}{dt} - \frac{MPdv}{dt} - \frac{MvdP}{dt} - \frac{PvdM}{dt} \dots (5)$$

Sustituyendo (1) y (3) en (5)

$$-\dot{m}h = (h - Pv)(-\dot{m}) + M \frac{dh}{dt} - Pvd\dot{m} - Mv \frac{dp}{dt}$$

Homogenizando

$$0 = M \frac{dh}{dt} - Mv \frac{dp}{dt}$$

Simplificando

$$dh = v dp$$

Caso B) Expansión con Transferencia de Calor de la Roca al Fluido Sin Recarga de Masa.

Considerando flujo de calor cedido de la roca-fluido (sin recarga)

*Condición: la roca y el fluido permanecen en equilibrio termodinámico durante el proceso.

Por conservación de masa:

$$\dot{M} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

En este caso no se considera un flujo de entrada, únicamente extracción del reservorio.

Por lo tanto:

$$\dot{M} = -\dot{m}_s$$

Por otro lado, el flujo másico se define como:

$$\dot{M} = -\frac{dm_s}{dt}$$

De la Ecuación de la Energía:

$$-Q_R + W + \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{in} - \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \frac{dMu}{dt}$$

Por ser proceso a volumen constante:

$$W = \int P dv = 0$$

De la definición de entalpia:

$$h = U + \frac{P}{\rho}$$

Despreciando energía cinética y potencial

Por lo tanto:

$$-\dot{m}h = \frac{dMu}{dt} + \dot{Q}_R$$

Como:

$$h = u + Pv$$

Podemos reescribir la ecuación como:

$$-\dot{m}h = \frac{dM(h - Pv)}{dt} + \dot{Q}_R \dots (1)$$

De la expresión que define a Q_R (flujo):

$$\dot{Q}_R = M_R C_R \Delta T$$

$$\frac{dQ_R}{dt} = M_R C_R \frac{dT}{dt}$$

Como no existe cambio de fase “u” depende únicamente del cambio de temperatura (ΔT), y como se propone equilibrio termodinámico:

* $M_R = \text{cte.}$

$$\frac{du_R}{dt} = \frac{dT}{dt} C_R$$

$$\dot{Q}_R = M_R \frac{du_R}{dt}$$

En la ecuación (1):

$$-\dot{m}h = \frac{dM(h - Pv)}{dt} + M_R \frac{du_R}{dt} \quad (2)$$

Como se pretende involucrar a la presión como variable independiente, para el término de Q_R :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dt} \frac{dP}{dP} = \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt}$$

$$\dot{Q}_R = M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt}$$

En saturación el término que involucra a la derivada parcial implica una derivada ordinaria, en cualquier otro punto fuera de la campana sería necesario conocer dos propiedades para definir a la temperatura.

$$\frac{\partial T}{\partial P} \text{sat}$$

Por lo tanto la ecuación se reescribe como:

$$-\dot{m}h = \frac{dM(h - Pv)}{dt} + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt} \dots (3)$$

Desarrollando:

$$-\dot{m}h = \frac{d[Mh]}{dt} - \frac{d[MPv]}{dt} + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt} \dots (4)$$

Por regla de la cadena:

$$-\dot{m}h = \frac{Mdh}{dt} + \frac{hdM}{dt} - \frac{MPdv}{dt} - \frac{PvdM}{dt} + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt}$$

$$-\dot{m}h = \frac{Mdh}{dt} + \frac{hdM}{dt} - \frac{MPdv}{dt} - \frac{MvdP}{dt} - \frac{PvdM}{dt} + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt} \dots (5)$$

Simplificando:

$$-\dot{m}h = (h - Pv) \frac{dM}{dt} + \frac{Mdh}{dt} - \frac{MPdv}{dt} - \frac{MvdP}{dt} + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt} \dots (6)$$

Sustituyendo:

$$\dot{m} = - \frac{dM}{dt}$$

Y considerando que:

$$- \frac{dM}{dt} = - \frac{M dv}{v dt}$$

Por tanto la ecuación es posible escribirse como:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M dv}{v dt}$$

Finalmente al involucrar las consideraciones anteriores:

$$-\dot{m}h = (h - Pv)(-\dot{m}) + \frac{Mdh}{dt} - \frac{MPdv}{dt} - \frac{MvdP}{dt} + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt}$$

$$-\dot{m}h = (h - Pv)(-\dot{m}) + \frac{Mdh}{dt} - \frac{PvdM}{dt} - \frac{MvdP}{dt} + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt}$$

$$-\dot{m}h = (h - Pv)(-\dot{m}) + \frac{Mdh}{dt} - Pv(\dot{m}) - \frac{MvdP}{dt} + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt}$$

Simplificando:

$$\frac{Mdh}{dt} = \frac{MvdP}{dt} - M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt} \dots (7)$$

Dividiendo entre la masa (M) y reduciendo a su mínima expresión:

$$dh = vdP - \frac{M_R}{M} C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} dP \dots (8)$$

Caso C) Considerando Expansión con Recarga de Fluido pero sin Transferencia de Calor.

Partiendo del caso a) pero ahora se realiza una recarga de masa al yacimiento y no se toma en cuenta la transferencia de calor de la roca al fluido. Se plantea el comportamiento de la recarga para saber si es benéfica o dañina para el yacimiento.

Aplicando la ecuación de la conservación de masa

$$\dot{m} = q_R - \dot{m}_s$$

Como la masa de recarga es constante

$$-\dot{m} = \frac{dM}{dt} \dots (1)$$

Definiendo la masa del yacimiento

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{M}{v} \frac{dv}{dt}$$

$$v \frac{dM}{dt} = -M \frac{dv}{dt} \dots (2)$$

Sustituyendo (2) en (1)

$$-\dot{m}v = -M \frac{dv}{dt}$$

$$\dot{m}v = M \frac{dv}{dt} \dots (3)$$

De la ecuación de Conservación de la Energía

$$-Q_R + W + \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{in} - \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \frac{dMu}{dt}$$

Despreciando la energía cinética y potencial

$$qh_R - \dot{m}h = \frac{dMu}{dt} \dots (4)$$

Considerando que: $h = u + Pv \therefore u = h - Pv \dots (5)$

Sustituyendo (4) y (5) en la ecuación de la conservación de la energía y desarrollando

$$qh_R - \dot{m}h = \frac{dM(h - Pv)}{dt}$$

Desarrollando

$$qh_R - \dot{m}h = \frac{Mdh}{dt} + \frac{hdM}{dt} - \left(\frac{MdPv}{dt} + \frac{PvdM}{dt} \right)$$

$$qh_R - \dot{m}h = \frac{Mdh}{dt} + \frac{hdM}{dt} - \left(\frac{MvdP}{dt} + \frac{MPdv}{dt} + \frac{PvdM}{dt} \right)$$

$$qh_R - \dot{m}h = (h - Pv) \frac{dM}{dt} + M \frac{dh}{dt} - MP \frac{dv}{dt} - Mv \frac{dp}{dt} \dots (6)$$

Sustituyendo (1) y (3) en (6)

$$qh_R - \dot{m}h = (h - Pv)(-\dot{m}) + M \frac{dh}{dt} - P\dot{m}v - Mv \frac{dp}{dt}$$

$$qh_R - M \frac{dh}{dt} = -Mv \frac{dp}{dt} \dots (6)$$

Simplificando (6)

$$q \frac{hr}{M} dt - dh = -vdp$$

Reescribiendo:

$$dh = vdp + q \frac{hr}{M} dt$$

Caso D) General: Expansión con Transferencia de Calor y Recarga de Masa

Este es el caso más completo, se valorará que la roca cede calor al fluido y que un porcentaje de masa será reinyectado al yacimiento.

-Por conservación de masa:

$$q - \dot{m} = \frac{dM}{dt} \dots (1) \quad M = \frac{\forall \phi}{v} \dots (2) \quad \dot{m} = \frac{dM}{dt} \dots (3)$$

Igualando (2) y (3)

$$\frac{dM}{dt} = \forall \phi \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{v} \right)$$

$$\frac{dM}{dt} = \forall \phi \left[\frac{v \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{v} \right) - \frac{1}{v^2} \frac{dv}{dt} \right]$$

$$\frac{dM}{dt} = \forall \phi \left[-\frac{1}{v^2} \frac{dv}{dt} \right] = -\frac{dv}{dt} \frac{\forall \phi}{v^2}$$

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{M}{v} \frac{dv}{dt} \dots (4)$$

$$q - \dot{m} = -\frac{M}{v} \frac{dv}{dt} \dots (5)$$

De la ecuación (5) separando dt:

$$dt = -\frac{1}{v} \frac{M}{(q - \dot{m})} dv \dots (6)$$

De la primera ley de la termodinámica:

$$qh_R - \dot{m}he = \frac{dMu}{dt} + M_R C_R \frac{dT}{dt}$$

$$qh_R - \dot{m}he = \frac{dMu}{dt} + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt}$$

Despejando dt:

$$dt(qh_R - \dot{m}he) = dMu + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} dP \dots (7)$$

Sustituyendo el valor de dt en la ecuación (7):

$$-\frac{1}{v} \frac{M}{(q - \dot{m})} dv (qh_R - \dot{m}he) = dMu + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} sat dP$$

$$-\frac{M}{v} \frac{(qh_R - \dot{m}he)}{(q - \dot{m})} dv = Mdu + u dM + M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} sat dP$$

Dividiendo entre la masa M:

$$-\frac{1}{v} \frac{(qh_R - \dot{m}he)}{(q - \dot{m})} dv = du + \frac{u}{M} dM + \frac{M_R}{M} C_R \frac{\partial T}{\partial P} sat dP \dots (8)$$

Recordando que:

$$\frac{dM}{dT} = -\frac{M}{v} \frac{dv}{dt}$$

$$M_R = \forall (1 - \phi) \rho_R$$

$$M = \frac{\forall \phi}{v}$$

Sustituyendo en (8)

$$-\frac{1}{v} \frac{(qh_R - \dot{m}he)}{(q - \dot{m})} dv + \frac{u}{v} dv = du + \frac{(1 - \phi) \forall \rho_R}{\phi} C_R \frac{\partial T}{\partial P} sat dP \dots (9)$$

Simplificando:

$$\frac{1}{v} \left[\left(\frac{(qh_R - \dot{m}he)}{(q - \dot{m})} \right) - u \right] dv = du + \frac{(1 - \phi) \forall \rho_R}{\phi} C_R \frac{\partial T}{\partial P} sat dP \dots (10)$$

Determinando los valores para α y β como:

$$\alpha = \frac{1}{v} \left[\left(\frac{(qh_R - \dot{m}he)}{(q - \dot{m})} \right) - u \right] \dots (11)$$

$$\beta = \frac{(1 - \phi) \forall \rho_R}{\phi} C_R \frac{\partial T}{\partial P} sat \dots (12)$$

Si $\alpha = -W$ y $\beta = B$

Finalmente sustituyendo (11) y (12) en X

$$\alpha dv = du + \beta dp \dots (A)$$

Partiendo de la definición de energía interna:

$$\begin{aligned} u &= uf + xufg \\ du &= duf + d[xufg] \\ du &= duf + xd[ufg] + ufgdx \end{aligned}$$

Involucrando a la presión que es la variable independiente:

$$du = \frac{duf}{dP} dP + \frac{xd[ufg]}{dP} dP + ufgdx$$

Definiendo volumen específico como:

$$\begin{aligned} v &= v f + x v f g \\ dv &= dv f + x d[v f g] + v f g dx \end{aligned}$$

Involucrando a la presión que en nuestro caso es la variable independiente:

$$dv = \frac{dvf}{dP} dP + \frac{x dvfg}{dP} dP + vfgdx$$

*(P y X variables independientes)

Sustituyendo en la ecuación (A): * $\alpha = -W$

$$(-\alpha) \left[\left(\frac{dvf}{dp} + \frac{x dvfg}{dP} \right) dP \right] + (-\alpha) vfgdx = \left[\left(\frac{duf}{dP} + \frac{x dufg}{dP} \right) dP \right] + ufgdx + \beta dP$$

$$((-\alpha) vfg - ufg) dx = \left[\left(\frac{duf}{dP} + \frac{x dufg}{dP} \right) dP \right] + \beta dP + \alpha \left[\left(\frac{dvf}{dp} + \frac{x dvfg}{dP} \right) dP \right]$$

Factorizando el signo del denominador:

$$dx = \frac{\left(\frac{duf}{dP} + \frac{x dufg}{dP} \right) dP + \beta dP + \alpha \left[\left(\frac{dvf}{dp} + \frac{x dvfg}{dP} \right) dP \right]}{-\alpha vfg + ufg}$$

$$dx = - \frac{\alpha \left(\frac{dvf}{dp} + \frac{x dvfg}{dP} \right) \left(\frac{duf}{dP} + \frac{x dufg}{dP} \right) + \beta}{\alpha vfg + ufg}$$

ANEXO II

Análisis de Sensibilidad Considerando Expansión con Recarga- Sin Transferencia de Calor

Se realiza la evaluación del potencial bajo un nuevo esquema, a manera de mostrar las posibilidades que presenta el software desarrollado cuando se involucran otros parámetros tales como la calidad de vapor presente en el yacimiento, así como la recarga de fluido y la transferencia de calor de la roca al fluido mostrando la influencia de estos parámetros en el modelo.

c) Expansión con REINYECCIÓN pero SIN TRANSFERENCIA de calor

El fluido se expande sin que tome o ceda calor al medio; un porcentaje de la masa que es extraída del yacimiento (líquido), es reinyectada. Para este caso se exponen diversos escenarios en que la masa de líquido y su temperatura son variables que pueden repercutir de manera sustancial en la evolución del yacimiento.

$$dh = vdp + q \frac{hr}{M} dt$$

Para facilitar el análisis, se varían los parámetros del yacimiento en un escenario base definido previamente cuyas condiciones se presentan a continuación:

Condiciones iniciales

- Presión inicial de yacimiento: 5[MPa]
- Volumen del yacimiento: 1[km3]
- Porosidad (Φ): 0.2
- Presión Turbina: 0.9 [MPa]
- Consume específico turbina: 8 [Ton/MWh]
- Potencia: 50[MW]
- Recarga (q): 25[Kg/s]
- Temperatura de recarga (T): 100[°C]
- Presión de recarga (P): 5.1[MPa]
- Calidad inicial en el yacimiento: 50%

Escenario c.1) Manteniendo el caso base y variando la calidad (X) y calidad de extracción (líquido, vapor, homogéneo)

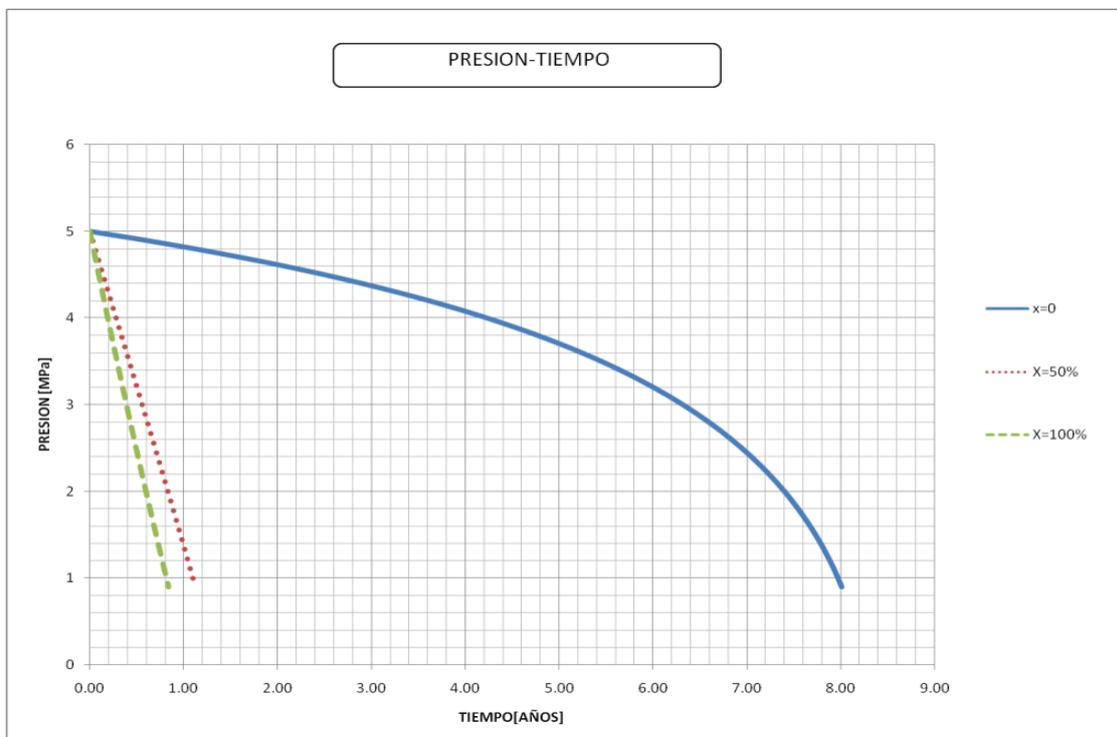
- 0%, 50%, 100%(tipo de extracción: vapor y homogéneo)
- 0%, 2%, 50% (tipo de extracción: líquido)

*La razón por la cual no se presenta el mismo porcentaje de vapor en los diferentes escenarios, es debido a que se pretende una mejor apreciación de los garfios.

Variación de la calidad inicial del yacimiento (X) en el rango de: 0,50 y 100% y por otro lado el tipo de calidad de extracción (líquido, vapor, homogéneo).

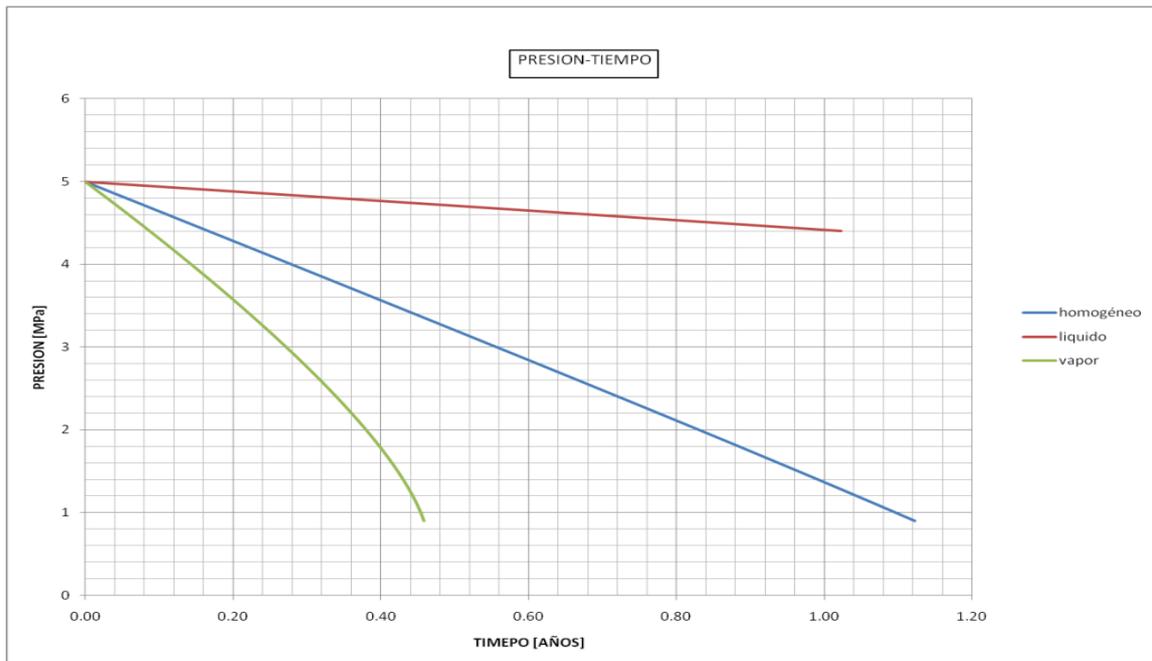
Se presentan 3 gráficos representativos para cada caso en que se varían los parámetros.

- Presión[MPa] -Tiempo[años]
- Entalpia [KJ/Kg] -Tiempo[años]
- Calidad del yacimiento[%] -Tiempo[años]



Grafica c.1 Variación de la Calidad (X) en el Yacimiento

Con relación al primer caso la influencia que la recarga tiene en el yacimiento parece ser perjudicial esto probablemente se explique por la temperatura a la cual se está reinyectando, un porcentaje del líquido que se tiene en la superficie. Más adelante se definirá el caso en donde la temperatura de reinyección tenga una variación; para con ello determinar el impacto que esto pueda tener en el yacimiento y su explotación. Por otro lado es necesario considerar que aun no involucramos el efecto que tiene la roca al ceder un porcentaje de su calor.



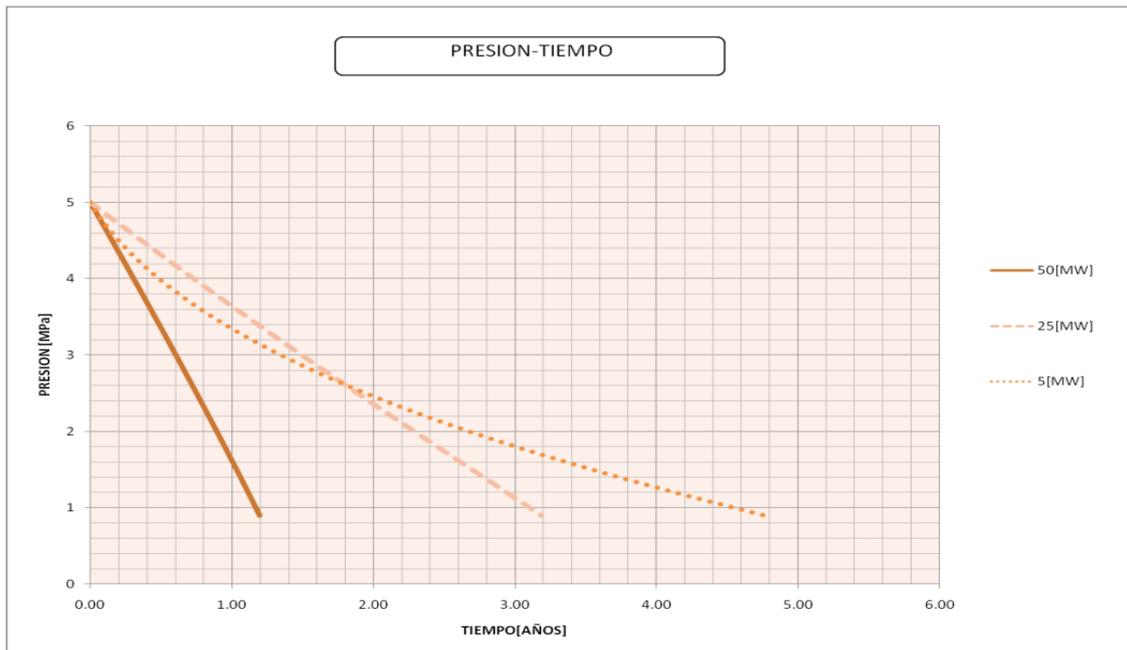
Gráfica c.1.1 Variación de la Calidad de Extracción (líquido vapor homogéneo)

El gráfico presión-tiempo (Gráfica C.1.1) muestra para este caso (únicamente tomando la variación del tipo de calidad de extracción) una alteración en el tiempo de explotación del yacimiento, siendo este menor en comparación con el caso que no presenta recarga. De igual forma la mejor opción para la explotación es tomando en cuenta que se extrae una mezcla homogénea aunque el tiempo de explotación se ve mermado por la temperatura del líquido que se reinyecta.

Escenario c.2)

Manteniendo el caso base y variando la potencia instalada:

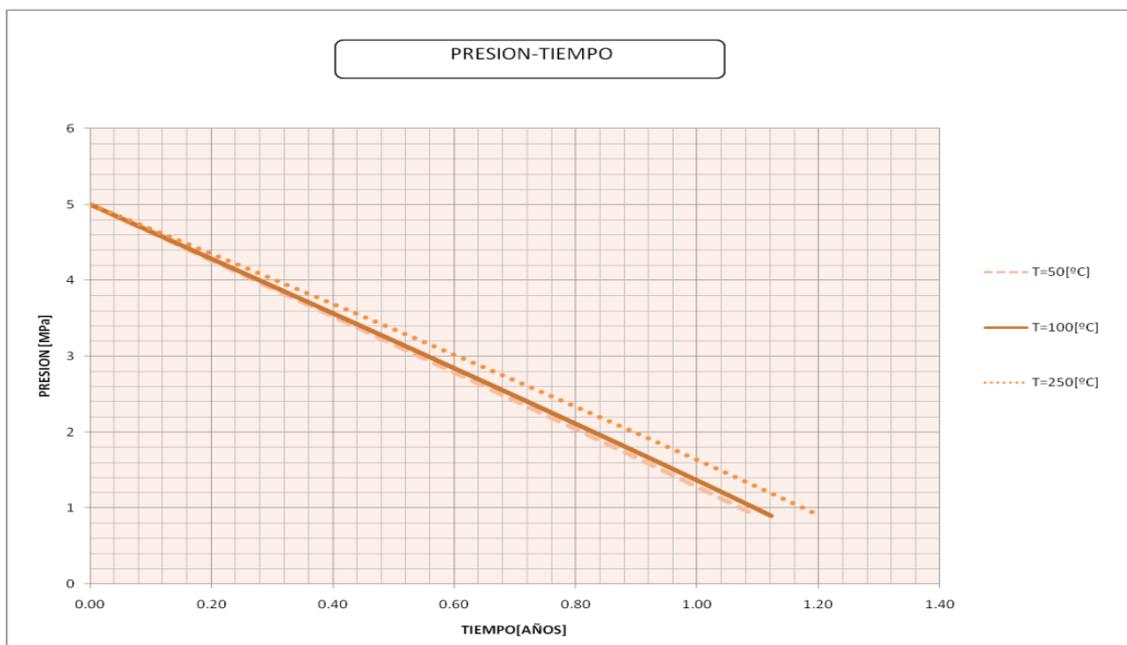
- 5[MW]
- 25[MW]
- 50 [MW]



Gráfica c.2 Variación de la Potencia Instalada

Escenario c.3 Manteniendo el caso base y variando la temperatura de recarga:

- 50 T[°C]
- 100 T[°C]
- 250 T[°C]



Gráfica c. 3 Variación Temperatura de Recarga

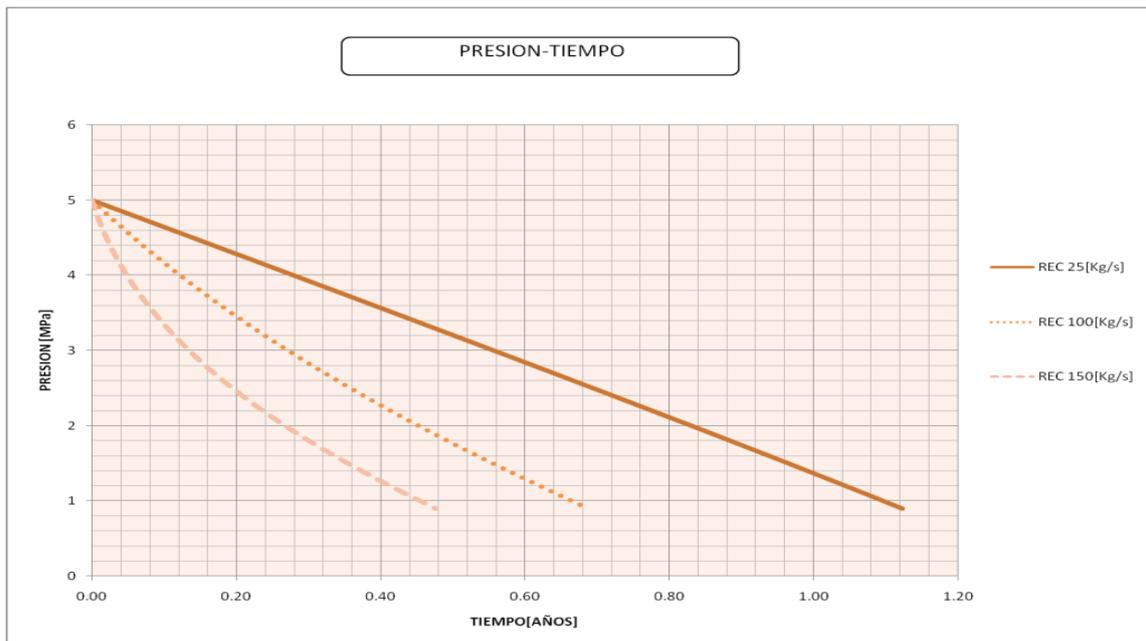
El impacto de la temperatura de recarga resulta ser poco significativo en la evolución que el yacimiento presenta (teóricamente), pues significaría que al

estar la temperatura cercana a la que se tiene dentro del yacimiento, esto afectaría en menor medida la energía almacenada dentro del mismo.

Escenario c.4)

Manteniendo el caso base y variando la masa de recarga:

- 25[Kg/s]
- 100[Kg/s]
- 150[Kg/s]



Gráfica c. 4 Variación de la Recarga de Masa

Al incrementar el porcentaje de líquido que se reinyecta (estamos considerando reinyección en frío: $T=100[^\circ\text{C}]$), por tanto el yacimiento pierde una mayor cantidad de energía (puesto que se propone equilibrio termodinámico) y con ello el periodo de explotación disminuye.

Debe tenerse en cuenta que para que un yacimiento pueda ser explotado para la generación de energía eléctrica su temperatura (en el yacimiento) debe estar por encima de las 240°C y en la cabeza del pozo debe ser $\geq 150^\circ\text{C}$.

ANEXO III**EL RÉGIMEN JURÍDICO DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO****I. Introducción**

El principal enfoque de éste escrito es señalar las lagunas legales en las que se encuentra inmersa la Energía Geotermoeléctrica. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y la Ley de Aguas Nacionales carecen de precisión en la normatividad que debe de respetar la Geotermia (exploración, construcción, extracción y generación). Se necesita una nueva ley que ate todos los cabos sueltos, que reconozca el subsuelo como recurso natural, para proteger los yacimientos geotérmicos y su riqueza.

II. Geotermia

Un yacimiento geotérmico contiene agua salina (de temperatura y presión elevadas) atrapada entre la roca, la cual evita que salga a la superficie; y se encuentra cerca de un magma (hasta de 700°C), el cual le transfiere calor (energía).

La rentabilidad de un yacimiento es determinada por: la entalpía (calor u energía del fluido), la porosidad, la permeabilidad y la transferencia de calor (de la roca).

La clasificación de los fluidos y yacimientos geotérmicos es la siguiente:

- ❖ De alta entalpía (temperatura mayor o igual a 150°C).
- ❖ De mediana entalpía (temperatura menor a 150°C pero mayor a 60°C).
- ❖ De baja entalpía (temperatura menor a 60°C).

La extracción de fluido (mezcla de agua y vapor) del yacimiento se lleva a cabo a través de un pozo; el vapor es el encargado de hacer rotar las alabes del turbogenerador produciendo energía eléctrica; mientras que el líquido puede ser reinyectado al yacimiento (pozos inyectoros) o dirigido a un ciclo binario.

Los ciclos binarios producen electricidad mediante el uso de un fluido de bajo punto de ebullición, dicho fluido absorbe el calor del agua extraída del yacimiento (evaporándose); y es dirigido a un turbogenerador, después condensará e iniciará el ciclo (cerrado) de nuevo.

III. Régimen Jurídico de los Recursos Naturales en México

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos dicta que el Estado tiene el dominio de los recursos naturales ubicados en el territorio nacional, pero el subsuelo no es considerado recurso natural (exceptuando los yacimientos petroleros); por lo tanto puede ser explotado con libertad, a menos que la población lo requiriese.

También aclara que la generación, conducción, transformación, distribución y abastecimiento de energía eléctrica corresponde exclusivamente a la CFE.

La Ley de Aguas Nacionales establece concesiones para la explotación y uso de los yacimientos acuíferos, siempre y cuando se precise: volúmenes de extracción y descarga, los derechos de los concesionarios y disposiciones especiales.

Finalmente, la CFE debe de cumplir con: los requerimientos impuestos por la Ley de Aguas Nacionales, autorización de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y solicitar el consentimiento de CONAGUA para: construir pozos, reinyectar, certificado de calidad de agua y concesión de aprovechamiento de aguas subterráneas.

IV. Carencia de Regulación Legal de los Recursos Geotérmicos

La labor fundamental de la Ley de Aguas Nacionales es cuidar la calidad y cantidad del vital líquido en el país, pero no toma en cuenta, que el fluido extraído no cumple inicialmente con dichas propiedades físicas y químicas.

Por último, se debe de concientizar que la extracción de aguas geotérmicas extralimita a la normatividad mexicana, se requiere una propia ley que establezca los parámetros de la explotación geotérmica y todo lo que ésta envuelve para la producción de energía eléctrica; con el fin de proteger los yacimientos geotérmicos, y así, los recursos naturales del subsuelo mexicano.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- Thermodynamic behaviour of simplified geothermal reservoirs
Gerardo Hiriart and Eduardo Sánchez
Gerencias de proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad (CFE), Morelia, México
University, Stanford, California, January 1985
- Nava C., Hiriart G., (2008), Desalación de agua con energías renovables, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Geotermia, la renovable más desconocida y con más potencial. David SERRANO; Javier DUFOUR (2 Febrero, 2009)
- José Luis Quijano León, Manual de Geotermia “Ciencias de la tierra e Ingeniería de Reservorios”, 2007
- Flores, Magaly, (1997), Revista Mexicana de Geoenergía. Vol.12, No.3, págs. (209-219)
- Arellano, V. M., Barragán, R.M., Birkle, P., y Torres, V. (1997). Comportamiento Geoquímico de las Manifestaciones Geotérmicas en el Flanco Oriental del Volcán El Nevado del Ruiz (Río Claro-Las Nereidas), Colombia. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XII, Núm. 3, pág. 5-13.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Birkle, P. and Portugal, E. (1999). Chemical Description of Spring Waters From the Tutupaca and Río Calientes (Perú) Geothermal Zones. International Journal of Energy Research Vol. 23, pág. 125-140.
- Formulación de un Plan de Desarrollo para las Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE), Volumen 2- Diagnóstico de las FCNE en Colombia. Consorcio Energético Corpoema. Bogotá, Diciembre 30 de 2010.

Tesis

- Alonso, F. R. (1993). **Sistemas Geotérmicos de Roca Seca y Caliente: una Fuente de Energía no Convencional**. Tesis de Maestría Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 215 páginas.
- Eduardo Sánchez Velazco, (1984), **Aspectos Termodinámicos en Yacimientos Geotérmicos**. Tesis de Licenciatura Universidad la Salle, México, D.F., 118 páginas.
- Espíndola S., (2006), **Viabilidad Económica de Proyectos Geotermoeléctricos, un Enfoque Integral**, Tesis de licenciatura, Facultad Ingeniería UNAM, México.
- **Predicción de la evolución del contenido de gas en yacimientos geotérmicos de vapor dominante**. Tesis “físico matemático” 1988

Libros

Energía Geotérmica

<http://www.geothermal.org/09NovDec21.pdf>

- Fundamentos de geotermia
- Aplicaciones de la geotermia

Centrales Térmicas

<http://es.libros.redsauce.net/index.php?folderID=3>

- Introducción a las centrales térmicas
- Transformaciones termodinámicas
- Dinámica de Fluidos
- Principios básicos de transferencia de calor

Revistas

<http://www.geothermal.org/Geotermia-Vol23-1.pdf>
 GEOTERMIA REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA ISSN 0186-5897
Volumen 23, No. 1
Enero-Junio de 2010

- **Evolución del sector CP-I del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC, y alternativas de explotación**
 Marco Helio Rodríguez Rodríguez
- **Estudios para recuperar la capacidad de aceptación en pozos inyectores del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC**
 Julio Álvarez Rosales
- **Mejora en el aprovechamiento del vapor para generar energía eléctrica en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.**
 Marco A. Torres-Rodríguez, Magaly Flores-Armenta y Alfredo Mendoza-Covarrubias

<http://www.geothermal.org/Geotermia-Vol22-2.pdf>
 GEOTERMIA REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA ISSN 0186-5897
Volumen 22, No. 2
Julio-Diciembre de 2009

- **Áreas para exploración en los alrededores del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC**, Álvaro Aguilar Dumas
- **Propuesta para la neutralización de fluidos ácidos provenientes de pozos del campo geotérmico de Los Humeros, Pue.**
 Magaly del Carmen Flores Armenta, Miguel Ramírez Montes y Juan Manuel García Cuevas
- **Zonas de alteración hidrotermal y condiciones actuales del yacimiento: un enfoque para determinar zonas productoras al oriente del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC**
 Juan Manuel Camacho Hernández

<http://www.geothermal.org/Geotermia-Vol22-1.pdf>
 GEOTERMIA REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA ISSN 0186-5897
Volumen 22, No. 1
Enero-Junio de 2009

- **Condiciones termodinámicas mínimas del yacimiento para producir vapor en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC**
 Marco Helio Rodríguez Rodríguez
- **Aplicación del SPCALC en la especiación química y termodinámica de fluidos: ejemplo del caso de los pozos LV-4A, LV-11 y LV-13, de Las Tres Vírgenes, BCS**, J.C. Viggiano-Guerra, F. Sandoval-Medina, M.C. Flores-Armenta, R.J. Pérez y E. González-Partida

<http://www.geothermal.org/Geotermia-Vol21-2.pdf>

GEOTERMIA REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA ISSN 0186-5897
GEOTERMIA 5897

Volumen 21, No. 2, Julio-Diciembre de 2008

- **Análisis de datos de producción y condiciones termodinámicas del fluido de alimentación de pozos de Los Humeros, Puebla.**
Víctor Manuel Arellano Gómez, Alfonso Aragón Aguilar, Rosa María Barragán Reyes, Magaly Flores Armenta, Miguel Ramírez Montes y Rigoberto Tovar Aguado
- **Selection of new drill sites using a Geographic Information System (GIS) at Los Azufres, Mexico**
G.H. García-Estrada, A. López-Hernández, and J.L. Quijano-León

Referencias de Internet

- <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2009/02/02/112128>
- <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/queEsCFE/estadisticas/Paginas/Indicadoresdegeneración.aspx>
- <http://www.geothermieprojekte.de/que-es-geotermia>
- http://www.renovableshoy.com/energias_renovables/geotermica/geotermia_renovable
- http://www.girodigeotermia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=209&Itemid=134
- <http://www.igme.es/internet/geotermia/presentacion.htm>
- <http://www.geothermal-energy.org/>
- http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page_id=112
- http://www.oramat.com/solutions/Geothermal_Binary_Plant
- <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2009/02/02/112128>
- <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/queEsCFE/estadisticas/Paginas/Indicadoresdegeneración.aspx>
- http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_2_Diagnostico_FNCE.pdf