

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD-TICOMÁN**

CIENCIAS DE LA TIERRA

SEMINARIO DE ACTUALIZACIÓN CON OPCIÓN A TITULACIÓN DE
PERFORACIÓN, TERMINACIÓN Y REPARACIÓN DE POZOS PETROLEROS

TESIS

**DESARROLLO DE POZOS GEOTÉRMICOS Y APLICACIONES DE LA
GEOTERMIA**

A FIN DE OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO PETROLERO

PRESENTAN

EFRAÍN SANTOS MONTES

JOSÉ ANTONIO HUERTA DÍAZ

DIRECTORES

ING. MANUEL TORRES HERNÁNDEZ

ING. ALBERTO ENRIQUE MORFÍN FAURE

CIUDAD DE MÉXICO

MAYO 2019



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

SECRETARÍA ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapala"
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Eslaviano Ramírez Ruiz"
60 años de XEIPN Canal Once, orgulloosamente politécnico
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

Folio: DES/2365/2019

Asunto: Impartición de Seminario.

Ciudad de México, a 29 de abril de 2019

DR. ARTURO ORTIZ UBILLA
DIRECTOR DE LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Y ARQUITECTURA (ESIA), UNIDAD TICOMÁN
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
P R E S E N T E

Con fundamento en el Artículo 44, Fracción VII del Reglamento Orgánico; Artículo 5, Fracción III del Reglamento General de Estudios; Artículo 12 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional; en atención a su oficio DET/798/2019, le comunico que se autoriza la impartición del Seminario de Actualización con Opción a Titulación:

"PERFORACIÓN, TERMINACIÓN Y REPARACIÓN DE POZOS PETROLEROS"

Folio de Autorización: DES/ESIA-TIC/S/433-22/2010-2019
Vigencia del seminario: 22 de marzo de 2018 al 22 de marzo de 2020
Duración: 150 horas.
Período de impartición: Del 4 de mayo al 2 de junio de 2019
Horario: lunes a viernes de 14:00 a 20:00 y sábados de 9:00 a 15:00 horas.
Sede: ESIA-TICOMAN.
Expositores: Ing. Manuel Torres Hernández, Quím. Rosa de Jesús Hernández Álvarez E Ing. Alberto Enrique Morfin Faure

Debiendo observar lo siguiente:

- Enviar la lista inicial oficial de participantes, firmada y sellada por el Coordinador del Seminario y el Subdirector Académico dentro de los primeros diez días hábiles posteriores a la fecha del inicio del seminario.



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

SECRETARÍA ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR

"2019, Año del Caridillo del Sur, Emiliano Zapata"
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruiz"
60 años de XEIPN Canal Orce, orgulloosamente politécnico
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

- Dar a conocer a los participantes el folio de autorización correspondiente, para trámites de titulación ante la Dirección de Administración Escolar.
- Al concluir el programa del seminario enviar la relación de asistencia, de evaluación final y de trabajos finales, en un plazo no mayor a 20 días hábiles, para la emisión de las constancias a los participantes.

Cabe señalar que tanto la información emitida para la autorización de vigencia, como los datos de los participantes utilizados en la emisión de constancias, está sustentada en los anexos adjuntos al oficio enviado por usted, por lo que solicito verificarla a detalle previamente a su trámite.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"La Técnica al Servicio de la Patria"

M. EN C. ROSALÍA MARÍA DEL CONSUELO TORRES HEZAURY
DIRECTORA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Dirección de Educación Superior

c.c.p. Dr. Jorge Toro González. - Secretario Académico del IPN.
Lic. Marisela Cabrera Rojas - Directora de Administración Escolar DAE.
División de Operaciones de Unidades Académicas de la DES.

T- 7525

RMCTB/EGW/yvvn

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

PRESENTE

Bajo protesta de decir verdad los que suscriben: Efraín Santos Montes, José Antonio Huerta Díaz manifiestan ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**Desarrollo de pozos geotérmicos y aplicaciones de la geotermia**", en adelante "LA TESIS" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al Instituto Politécnico Nacional, en adelante EL IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales (publicación en línea) "LA TESIS" por un periodo de un año contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "EL IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "EL IPN" deberá reconocer en todo momento la calidad de los autores de la "LA TESIS".

Adicionalmente, y en calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de "LA TESIS", manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto a "LA TESIS", por lo que deslindo de toda responsabilidad a EL IPN en caso de que el contenido de la "LA TESIS" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que pueda derivarse del caso.

Atentamente

EFRAIN SANTOS MONTES



JOSE ANTONIO HUERTA DÍAZ



Ciudad de México, Mayo de 2019

AGRADECIMIENTOS

EFRAÍN SANTOS MONTES.

A mis padres y hermanos, por haber sido muy pacientes, pero sobre todo a mi madre que siempre ha estado presente en toda empresa que he realizado a lo largo de mi vida, soportándolo todo y a pesar de todo.

A mi hija Abigail que todo aquello que uno realiza sea motivo de ejemplo y un objetivo de perfección.

“Cosas buenas están por venir”

JOSÉ ANTONIO HUERTA DÍAZ.

Agradezco a mis padres por darme la oportunidad y las herramientas para ir siempre tras mis sueños y nunca darme por vencido, por la paciencia y el gran esfuerzo que han realizado para ello, y por todo el apoyo y amor que siempre me han otorgado en todas mis travesías, les agradezco infinitamente, los amo.

A mis hermanos por su apoyo incondicional y la gran motivación que han sido para mí durante este proceso, agradezco todo el cariño y gratitud, y por ser parte de esta meta.

A todos mis compañeros y amigos que me acompañaron en toda esta trayectoria, las muestras de apoyo y cariño que siempre me rodearon, y las experiencias vividas siempre estarán en mi memoria.

Quiero agradecer al Instituto Politécnico Nacional por la educación integral que me dio durante mi trayectoria como estudiante universitario, dándome las herramientas necesarias para afrontar cualquier reto profesional y personal que se presente.

RESUMEN

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor en el interior de la tierra, esta constituye una de las fuentes de energía con mayor potencial debido a que se encuentra en la mayor parte del subsuelo terrestre. Actualmente la explotación de esta energía ha tomado un gran auge, esto se debe a que es considerada una fuente energética limpia y renovable.

Para explotar esta fuente energética con el objeto de producir energía eléctrica es necesaria la construcción de pozos que permitan la extracción de fluidos a altas temperaturas (agua, vapor de agua o una mezcla de ambos), los cuales son empleados para accionar grandes turbinas generadoras de electricidad. A este proceso se le conoce como Perforación y Terminación de Pozos Geotérmicos.

En la actualidad existen 4 campos geotérmicos en operación en México, en los cuales se han perforado un total de 238 pozos productores y 26 pozos inyectoros a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), los cuales producen alrededor de 928 MW. Aunado a esto la CFE planea aumentar la capacidad de producción de energía eléctrica en 3 de sus campos, para ello se estima perforar 275 pozos nuevos en diferentes localidades.

La perforación y terminación de pozos son procesos que requieren ser planificados y ejecutados adecuadamente para garantizar el éxito de la operación y por tanto el éxito de la extracción de los fluidos. El Ingeniero Petrolero es el profesionalista encargado de realizar estos procedimientos en conjunto con el personal operario adecuado. Sin embargo el Ingeniero Petrolero es instruido principalmente en los procesos que involucran la extracción de hidrocarburos.

En el presente trabajo pretende mostrar a los interesados en el tema de manera sencilla y práctica los aspectos más importantes del proceso de Perforación y Terminación de Pozos Geotérmicos, el equipo empleado para llevar a cabo estos procesos, las técnicas que actualmente se emplean para lograr una operación exitosa y las oportunidades que se tienen como profesionistas (Ingeniero Petrolero) para laborar en esta rama de la industria.

ABSTRACT

Geothermal energy is energy stored as head inside of the Earth which is one of the energy sources with huge potential due to it is located in most of the Earth's subsurface. At the present time, exploitation of this kind of energy is growing up and it has been possible because this energy is considered as clean and renewable energy source.

To exploit this energy source in order to produce electricity, well construction that allow the extraction of high temperature fluids (water, water vapor or a mixture of both) is required, which are used to drive large generators turbines electricity. This process is known as Geothermal Well Drilling and Completion.

Currently there are four operating geothermal fields in Mexico, which have drilled a total of 238 producing wells and 26 injection wells by the Federal Electricity Commission (CFE), which produce around 928 MW. Added to this, CFE plans to increase the capacity of electricity production in three of its fields, it is expected to drill 275 new wells in different localities.

Drilling and completion processes need to be planned and properly executed to ensure the success of operations and thus the success of extraction fluids. Petroleum Engineer is responsible for perform these procedures in conjunction with the appropriate operator personnel. However, Petroleum Engineer is instructed mainly in processes that involve the extraction of hydrocarbons.

This paper aims to show in a simple and practical way the most important aspects of Geothermal Well Drilling and Completion, equipment used to carry out the process, techniques currently used to achieve successful operations and opportunities to work in this branch of industry as a Petroleum Engineer.

OBJETIVO

Este trabajo tiene como objetivo exponer que factores intervienen en el desarrollo, alcance y aplicación de la geotermia como complemento de las diferentes energías ya existentes.

INTRODUCCIÓN

El propósito fundamental de este trabajo, es explicar el proceso convencional mediante el cual se perforan y se terminan los pozos geotérmicos, así como resaltar las diferencias que existen entre la perforación de pozos petroleros y geotérmicos.

Las energías alternativas han tenido un gran desarrollo en las últimas décadas, debido a los altos costos de los combustibles fósiles y a los problemas que conlleva su explotación. Una de las energías renovables que tiene gran potencial en México y ciertas partes del mundo es la energía geotérmica, la localización geográfica juega un rol importante para explotar estos recursos.

En sentido amplio, la energía geotérmica es la energía calorífica que la Tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre, que tiene su origen en los movimientos diferenciales entre las distintas capas que la constituyen principalmente, entre manto y núcleo, en el calor inicial que se liberó durante su formación que aún está llegando a la superficie, en la desintegración de isótopos radiactivos presentes en la corteza y en el manto –básicamente, uranio 235, uranio 238, torio 232 y potasio 40–, y en el calor latente de cristalización del núcleo externo. La energía geotérmica engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia, pero no el contenido en masas de agua superficiales, continentales o marinas.

Una práctica importante durante la perforación de pozos es la toma de registros (geofísicos, de presión, de temperatura y de diámetro de pozo), por lo que en el capítulo tres se muestran las características de los principales registros tomados durante la perforación, en etapa exploratoria o de

desarrollo, así como su importancia y la información que nos proporcionan para el diseño y comportamiento del pozo e incluso el estudio de yacimientos.

Contenido

RESUMEN

ABSTRACT

OBJETIVO

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	1
ANTECEDENTES	1
1.1.- ¿Qué es la energía geotérmica?	2
1.2.- ¿Qué son los pozos geotérmicos?	3
1.3.-Generalidades de la geotermia.	3
1.4.-Estado actual de la geotermia en México.	6
1.5.-México y la Geotermia.	8
CAPÍTULO 2	12
CLASIFICACIÓN Y EXPLORACIÓN DE CAMPOS GEOTÉRMICOS	12
2.- Clasificación de los campos Geotérmicos	13
2.1.1.-Sistemas Geotérmicos Convectivos	13
2.1.2.-Sistemas Geotérmicos Conductivos	14
2.1.3.-Sistemas Marinos	16
2.1.4.-Sistemas Magmáticos	16
2.2.-Exploración de los campos Geotérmicos.	17
2.2.1.-Métodos Geológicos	20
2.2.2.-Métodos Hidrogeológicos	22
2.2.3.-Métodos Geoquímicos	24
2.2.4.-Métodos Geofísicos	26
2.2.4.1.-Mediciones Infrarrojas	27
2.2.4.2.-Mediciones superficiales de temperatura y flujo de calor	28
2.2.4.5.-Métodos Sísmicos	33
2.2.4.6.-Métodos Magneto-Métricos	36
CAPÍTULO 3	40
PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS	40
3.1.-Etapas de proyecto geotérmico	41
3.2.-Tipos de formaciones rocosas	42

3.3.-Etapa de perforación	44
3.4.-Asentamiento de tuberías	48
3.4.1.-Geopresiones	49
3.4.2.-Cementación	53
3.5.-Registros durante la perforación.....	57
3.6. Indicadores de zonas permeables	60
3.7.-Terminación de pozos geotérmicos	61
3.8.-Estimulación de un pozo.....	63
3.9.- Problemas durante la perforación de pozos geotérmicos	68
3.9.1 Pérdidas de circulación	68
3.9.2.- Atascamiento de la sarta por presión diferencial.....	69
3.9.3.- Inestabilidad del pozo.....	70
3.9.4.- Dificultades durante la cementación	70
3.9.5.- Reducción del diámetro de pozo	71
CAPÍTULO 4.....	72
EJEMPLO DE APLICACIÓN DE UN PROGRAMA DE PERFORACIÓN	72
4. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE UN PROGRAMA DE PERFORACION	73
4.1.-ETAPA 26 PULGS. DE DIÁMETRO	73
4.2.-ETAPA DE 17½ PULGS. DE DIÁMETRO	74
4.3.-ETAPA DE 12 ¼ PULGS. DE DIÁMETRO	77
4.4.-ETAPA DE 8½ PULGS. DE DIÁMETRO	79
4.5.-Terminación	80
CAPÍTULO 5.....	82
APLICACIONES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA	82
5.-Aplicaciones de la Industria Geotérmica.....	83
5.1.-Uso directo	85
5.1.1.-Bombas de Calor Geotérmicas (BCG)	86
5.1.2.-Balneología.....	87
5.1.3.-Calefacción de edificios e invernaderos.....	87
5.1.4.-Acuicultura	89
5.1.5.-Otras Aplicaciones	90
5.2.-Uso indirecto (Generación de Energía Eléctrica)	90
5.2.1.-Plantas de Vapor Seco	91
5.2.2.-Plantas de Separación de Vapor.....	92
5.2.3.-Plantas de Ciclo Binario	93

CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	100
CARTERA DE NECESIDADES DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO.....	103
ÍNDICE DE FIGURAS	105
BIBLIOGRAFÍAS	108

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1.- ¿Qué es la energía geotérmica?

La energía geotérmica es aquella energía que puede ser obtenida por el hombre mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. El calor del interior de la Tierra se debe a varios factores, entre los que cabe destacar el gradiente geotérmico, el calor radiogénico, etc. Geotérmico viene del griego geo, "Tierra", y thermos, "calor"; literalmente "calor de la Tierra".

En los años 80 casi el total de la energía consumida en el mundo provenía de la quema de combustibles fósiles, considerando el mismo consumo per cápita de esos años y el aumento de la población, se estima que para el año 2025 se quemaran 14,000 millones de toneladas de carbón. Es decir, habrá un incremento del 40%. Ello producirá una aceleración del calentamiento global y además al elevarse la temperatura del planeta esto acelerará el deshielo de los casquetes polares e irremediablemente habrá un aumento en el nivel de los océanos, que puede llegar a ser catastrófico para el ser humano. En México al igual que en la mayoría de los países del mundo la economía está regida por que tanto petróleo produce el país, y la mayoría de las máquinas, los automóviles etc. Utilizan combustibles fósiles. El 51.87% de la energía eléctrica es producida por termoeléctricas, y estas ocupan combustible fósil.

Los combustibles fósiles se agotan eso es una realidad, y además amenazan con causar una catástrofe ecológica a nivel mundial. La energía Nuclear es muy costosa y peligrosa. ¿Qué alternativas nos quedan? Actualmente se vive una crisis energética y esto ha obligado a especialistas de distintas partes del mundo a formular un replanteo sobre los mecanismos de generación de electricidad.

A nivel mundial se han empezado a utilizar otras fuentes para la generación de energía llamadas energías alternativas. ¿Qué son las energías alternativas? Son fuentes de obtención de energía sin destrucción del medio ambiente, renovables que han sido investigadas y desarrolladas en las

últimas décadas, algunas de ellas son, eólica, solar, biomasa y la energía geotérmica de la cual se hablara a fondo en este trabajo.

1.2.- ¿Qué son los pozos geotérmicos?

Es la perforación de agujeros en zonas de alta energía termal acumulada en el subsuelo, consistente en perforar rocas secas y calientes situadas bajo sistemas volcánicos en reposo para luego introducir agua superficial que regresa como vapor muy enfriado. La energía geotérmica tiene un gran potencial, la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono junto con el aumento de los precios de la electricidad ha traído como consecuencia la necesidad de emplear tecnologías sustentables con el medio ambiente tanto en los países bajos como en el resto del mundo. Geotermia es una opción atractiva también desde el punto de vista económico. A pesar de que el subsuelo en otras partes del mundo puede variar mucho en comparación con el de los Países Bajos, existen muchas áreas urbanas densamente pobladas donde el subsuelo presenta características idóneas para la geotermia.

1.3.-Generalidades de la geotermia.

Panorama Geotérmico en la Actualidad Los sistemas geotérmicos representan en la actualidad un recurso importante para la generación de electricidad a nivel mundial, basta con las 612 plantas geotérmicas operando en el mundo, las cuales suman una capacidad instalada de 12.63 GW y aunque representan menos del 0.4% de la energía eléctrica total generada en el mundo, la obtención de electricidad por medio de los sistemas geotérmicos ha crecido un 16 % desde el 2010, en donde la producción era de 8.9 GW.

Es de mencionar que la energía geotérmica es considerada como una fuente inagotable de recursos energéticos en “términos humanos”, siendo solo comparable con la energía del sol, debido a lo anterior se le considera como un recurso renovable. En términos prácticos es definida como la utilización de la energía térmica que al ser trasportada a través de las rocas por medio

de fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia niveles superiores de la misma.

El calor generado continuamente en el interior de la tierra ya sea por el origen estelar de nuestro planeta (evolución de la tierra desde sus orígenes hace 4,470 Ma), cámaras magmáticas superficiales o por el decaimiento natural de isotopos radiactivos, por ejemplo: en el caso del Th232 y el U238, que en conjunto tiene una tasa energética de 860 EJ/año, lo que representa 2 veces la energía primaria consumida en el 2004 (463 EJ/año; MIT, 2006). Normalmente el gradiente geotérmico normal tiene un promedio de 33°C/Km, sin embargo en un sistema geotérmico se puede alcanzar temperaturas de 150°C/Km. Iglesias et al., (2005) clasifico los sistemas geotérmicos de la siguiente manera:

- Sistemas Hidrotermales.
- Sistemas de Roca Seca Caliente.
- Sistemas Mágmaticos.
- Sistemas Marinos.
- Sistemas Geopresurizados.

Este estudio se enfocara a los sistemas hidrotermales, debido a que en actualidad estos sistemas son los únicos que se explotan comercialmente para la generación de energía eléctrica los cuales están constituidos principalmente por: una fuente de calor (cámara magmática), agua (líquido y/o vapor) y la roca en donde se almacena el fluido. El agua de los sistemas hidrotermales es principalmente meteórica, la cual se infiltra lentamente al subsuelo, a través de poros y fracturas, penetrando varios kilómetros de profundidad en donde es calentada ya sea por conducción o por convección o por ambos, alcanzando en algunas ocasiones temperaturas de hasta >400°C. Estos sistemas pueden clasificarse en tres tipos principalmente en:

- Vapor dominante.

- Líquido dominante de alta entalpía.
- Líquido dominante de baja entalpía.

(i) Vapor Dominante.- Estos sistemas producen vapor seco saturado y ligeramente sobrecalentado a presiones por encima de la atmosférica, el agua y vapor coexisten pero la fase de vapor domina en el sistema. En México el campo geotérmico de Los Hornos presenta características de un sistema de vapor dominante.

(ii) Líquido dominante (alta entalpía).- Son sistemas de salmuera súper caliente, con temperaturas mayores a 180°C y son más abundantes que los anteriores. Ejemplo: Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Tiwi (Filipinas).

(iii) Líquido Dominante (baja entalpía).- Son sistemas con salmueras calientes, con temperaturas menores a 180°C, son más abundantes en comparación a los anteriores en una proporción de 10 a 1. Encontrándose en casi todos los países del mundo.

Producción Mundial.- El primer intento de producir electricidad por medio de la energía geotérmica inicio en Italia entre 1904-1905 en la zona de Larderello, pero no fue hasta en 1911 cuando se construye la primer planta de energía eléctrica (250 KW) en el Valle del Diablo, ya en 1950 se alcanzó los 300 KW en Italia hecho que demostró el importante valor industrial de la energía geotérmica y marcó el comienzo de la explotación de este recurso en el mundo y a partir de 1958 países como Nueva Zelandia (yacimiento de Wairakei), México (yacimiento de Pathé) y Estados Unidos (yacimiento de The Geysers) comienzan la producción geotermo-eléctrica (Pérez y Callejas, 2011).

En la actualidad una gran cantidad de países utilizan la geotermia de manera directa para diversas aplicaciones como (calefacción, balneario, agricultura, bombas de calor, etc.); sin embargo la generación de electricidad es la principal utilidad de la geotermia.

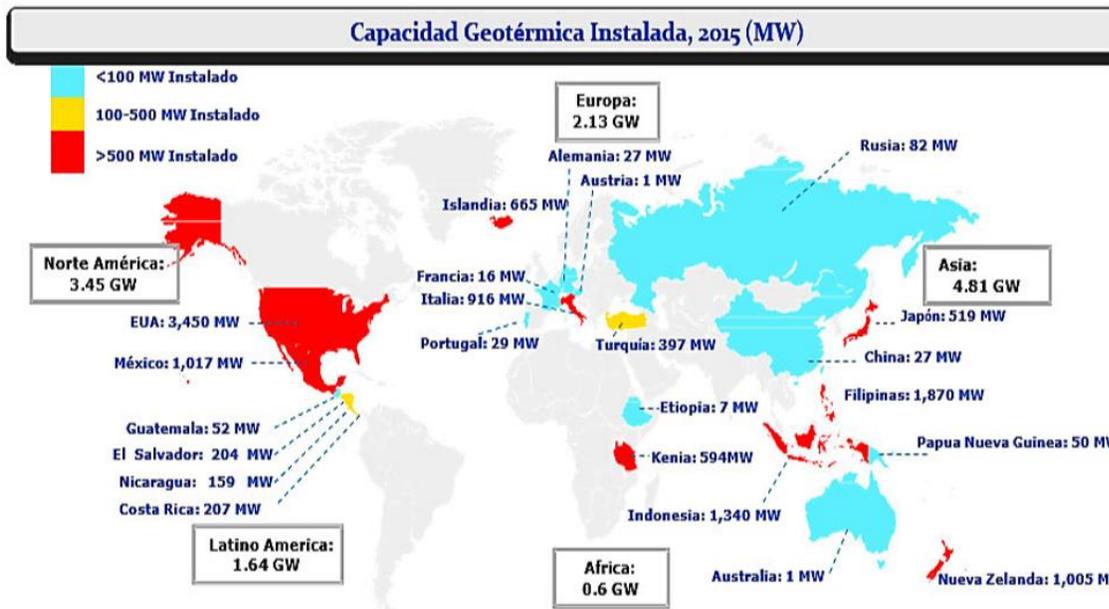


Figura 1. Capacidad geotérmica instalada para diciembre del 2015 (12.63 GW) en los principales países del mundo.

1.4.-Estado actual de la Geotermia en México.

México a Nivel Mundial Desde hace 58 años México figura como pionero y líder en el continente Americano en la explotación de recursos geotérmicos para la generación de electricidad. De los 78 países que disponen de información acerca del uso de la energía geotérmica (Santoyo, E. y Torres, I., 2010) solo 24 la utilizan para generar electricidad y de esa lista México (1,017 MW) ocupa el cuarto lugar a nivel mundial (Figura 2), estando por delante de él países como Estados Unidos (3,450 MW), Filipinas (1,870 MW) e Indonesia (1,340 MW).

En México son cinco los principales campos geotérmicos que se encuentran en operación para la producción de electricidad, de los cuales cuatro son de carácter federal: Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros, Las Tres Vírgenes, y uno de iniciativa privada: Domo de San Pedro.

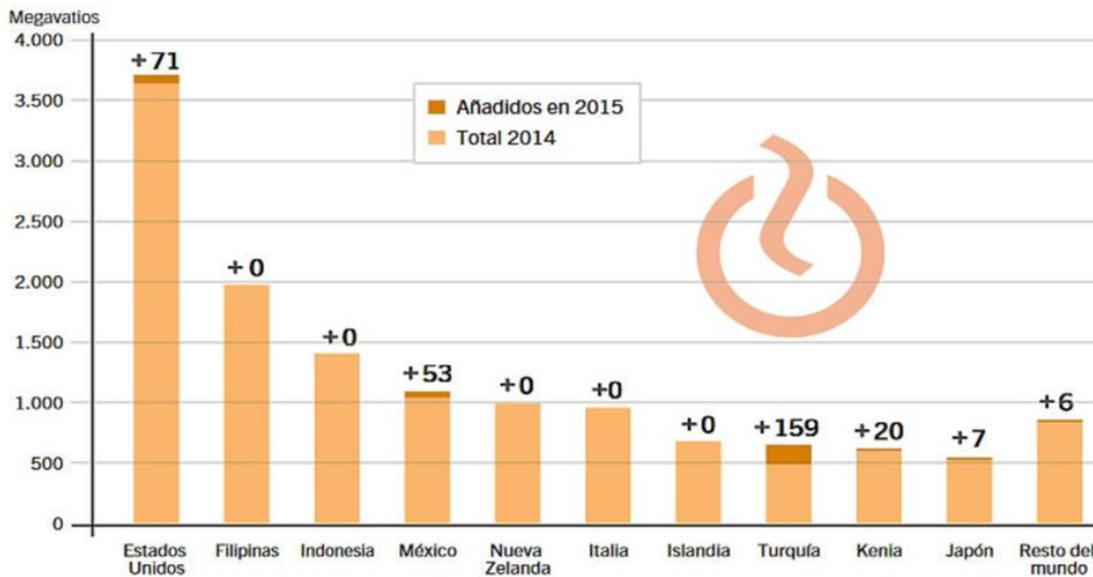


Figura 3. Capacidad geotérmica instalada y ampliada en México para diciembre del 2015. REN21's Renewables 2016 Global

Figura 2. Capacidad geotérmica instalada y ampliada en México para diciembre del 2015. REN21's Renewables 2016 Global.

Una de las nueve iniciativas de la Reforma Energética que fue decretada en diciembre del 2013, fue la nueva ley de energía geotérmica compuesta por 67 artículos y 13 transitorios, la cual pretende derribar las barreras, retos científicos y tecnológicos que enfrenta el país para el aprovechamiento sustentable de la energía, y mediante el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), la Secretaría de Energía (SENER), y a través del Fondo Sectorial CONACyT-SENER-Sustentabilidad Energética se crea el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) institución que busca estar a la vanguardia.

A nivel mundial, y en conjunto con otras instituciones como CeMIESol, CeMIEBio, CeMIE-Eólico pretenden cumplir el acuerdo de la Ley General para el Cambio Climático, cuyo objetivo fijado es el generar 35 % de las necesidades energéticas del país a partir de las fuentes renovables para el 2024.

CeMIEGeo inició sus actividades en marzo del 2014, con 30 proyectos con 6 líneas de investigación, del cual se desprende el proyecto # 8, que tiene como

misión el desarrollo, implementación y aplicación de metodologías analíticas de procesos de interacción agua-roca en reservorios geotérmicos de baja y alta entalpía para la aplicación en campos Mexicanos, proyecto a cargo del Dr. Eduardo González Partida investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Juriquilla.

1.5.-México y la Geotermia.

México inauguró el primer campo geotérmico en 1959, Pathé en el estado de Hidalgo, siendo esta la primer planta de energía geotérmica en el continente Americano la cual inició con una capacidad instalada de 3.5 MW, misma que estuvo funcionando hasta 1973 cuando fue desmantelada debido a que el vapor era insuficiente. En este mismo año Cerro Prieto comenzó la producción geotérmica industrial con la operación de dos primeras unidades con capacidad de 37.5 MW cada una, estas unidades, en conjunto con otras dos con la misma capacidad, se encuentran actualmente fuera de operación, después de haber concluido su periodo de vida útil.

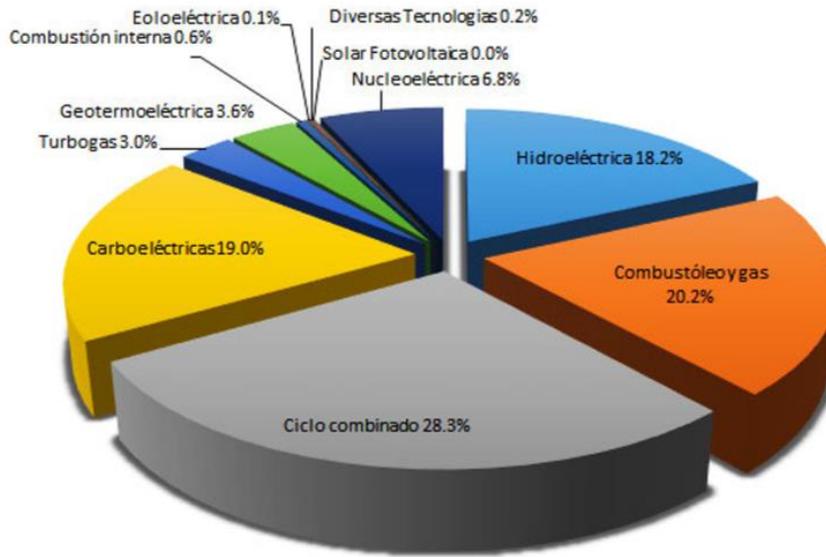
Los campos geotérmicos en México se han clasificado desde el punto de vista de su contenido energético en tres tipos:

1°- Sistemas de baja entalpía con temperaturas de 50° a 140 °C.

2°- Sistemas de moderada entalpia que tienen temperaturas de 140° a 200 °C .

3°- Sistemas de alta entalpía 200° a 350.

En la actualidad México por medio de CFE ha venido operando los cuatro principales campos geotérmicos de tipo hidrotermal de alta entalpia, con una capacidad instalada de 1,017 MW , lo que satisface a dos millones de hogares en promedio, sin embargo la generación de electricidad por este medio representa a nivel nacional el 3.6 % del total de energía neta generada.



Generación Nacional de Electricidad 2015

Figura 3. Generación de electricidad neta de las diferentes fuentes para el año 2015 en México, donde el 77.3% siguen siendo fuentes no renovables y solo el 22.7% son fuentes renovables. Informe anual de la CFE (2015).

El campo geotérmico más grande del país es Cerro Prieto en Baja California Norte (Figura 4-a), con una generación anual de 4,100 GWh, se localiza a unos 13 msnm en la planicie aluvial del Valle de Mexicali, dentro de una cuenca tectónica transtensional formada entre las fallas laterales Imperial y Cerro Prieto Cucupah que pertenecen al sistema de San Andrés. Cerro Prieto es un campo instalado en un ambiente sedimentario, con un yacimiento geotérmico hidrotermal de líquido dominante, cuyos fluidos están contenidos en areniscas intercaladas con lutitas del Terciario Medio-Superior, que descansan sobre un basamento predominantemente granítico cretácico.

El campo de Los Azufres en Michoacán (Figura 4-b) genera anualmente 1,550 GWh, una de las ventajas de este campo es que el sistema central no consume agua de enfriamiento ni emite gases de combustión. Está ubicado en la porción central de México, dentro del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), a una altitud media de 2,850 msnm. Los Azufres es un campo volcánico cuyos fluidos están alojados en rocas principalmente

andesíticas de edad Mioceno-Plioceno las cuales están cubiertas por riolitas de edad cuaternaria. Este es un yacimiento de líquido dominante, cuya fuente de calor parece ser la cámara magmática que alimenta al del Volcán San Andrés.

Un tercer campo es Los Humeros en Puebla (Figura 4-c), con una generación anual de 340 GWh siendo el campo geotérmico con la temperatura más alta del país (hasta 400°C), se encuentra también dentro del CVTM en la porción oriental, a una elevación promedio similar a la de Los Azufres. La CFE ha desarrollado este campo dentro de una caldera volcánica de unos cien mil años de antigüedad, llamada caldera de los potreros, anidada en otra caldera mayor y ligeramente más antigua conocida como caldera de los Humeros. Los Humeros es un campo volcánico de vapor dominante cuya fuente de calor es la cámara magmática alimentadora de ambas calderas, cuyo fluidos están contenidos en una secuencia de andesitas y tobas de edad Mio-Pliocénica que descansan sobre una basamento calcáreo con intrusiones, existen zonas metamórficas las cuales son cubiertas por ignimbritas.

El campo geotérmico el de Las Tres Vírgenes en Baja California Sur(figura 4-d) genera anualmente 55 GWh, está localizado a la mitad de la península de Baja California, dentro del complejo volcánico cuaternario del mismo nombre, a unos 750 metros sobre el nivel del mar. El campo contiene un yacimiento hidrotermal de líquido dominante en el que los fluidos están alojados en un basamento granítico cretácico, que forma parte del batolito de California, cuya fuente de calor parece ser la cámara magmática que alimenta al volcán más reciente y más meridional de la línea de tres volcanes que le dan nombre al complejo.

La CFE tiene en operación continua en esos campos más de 250 pozos geotérmicos con profundidades promedio de 2 mil 500 metros, estimándose, en un ahorro para México de más de 10 millones de barriles de petróleo al año.



Figura 4. Vistas panorámicas de los cuatro principales campos geotérmicos en México: a) Cerro Prieto en Baja California Norte, b) Los Azufres en Michoacán, c) Los Hornos en Puebla y d) Tres Vírgenes en Baja California Sur.

CAPÍTULO 2

CLASIFICACIÓN Y EXPLORACIÓN DE CAMPOS GEOTÉRMICOS

2.- Clasificación de los campos Geotérmicos

2.1.1.-Sistemas Geotérmicos Convectivos

También son conocidos como Sistemas hidrotermales básicos, este tipo de sistemas están asociados con ambientes de alta porosidad y permeabilidad, relacionado con intrusiones silíceas someras de edad reciente e incluye, prácticamente, a casi todos los sistemas geotérmicos desarrollados y explotados hasta la fecha.

La fuente de calor son las intrusiones magmáticas, dichas intrusiones se presentan principalmente en ambientes geológicos específicos, tales como: crestas oceánicas (zonas de expansión), márgenes convergentes (zonas de subducción), “rift continental” y anomalías térmicas dentro de las placas. Asimismo, estos sistemas están caracterizados por la circulación natural de un fluido de trabajo donde el calor es transportado por el mismo fluido; de esta forma, el proceso de transferencia de calor se debe, principalmente, a la circulación del fluido en el lugar de la transferencia por la conducción de las rocas. Dentro de esta categoría de sistemas existen dos subdivisiones generalmente reconocidas:

a) Sistemas de vapor dominante o sistema de vapor de alta entalpía.

Este tipo de sistemas o yacimientos geotérmicos están formados de vapor originado de la ebullición del agua en la profundidad, el cual asciende, a través de fracturas, hasta zonas cercanas a la superficie donde se condensa y se drena como líquido a través de la roca porosa, siguiendo un patrón de flujo a contracorriente. En estos sistemas, el vapor es la fase que controla el perfil de la presión-profundidad.

b) Sistemas de líquido dominante de alta y baja entalpía.

Estos yacimientos se caracterizan por producir aguas presurizadas con temperaturas altas (150 a 350° C), intermedias (90 a 150° C) y bajas (90° C). Los fluidos de éstos, al iniciar su ascenso a la superficie, sufren un decremento en su presión, de tal forma que una fracción de éste pasa como fase vapor, mientras que la fracción remanente permanece como líquido a

presión (Figura 3.4). En estos sistemas el agua líquida es la fase que controla el perfil de la presión-profundidad; a este tipo de sistemas dependiendo del contenido calorífico de sus fluidos, se les conoce como sistemas de:

Alta entalpía.- Sistemas de salmuera súper caliente, con temperaturas entre 200°C y más de 300°C.

Baja entalpía.- Sistemas con salmueras calientes, con temperaturas entre los 100°C y 200°C aproximadamente. Son más abundantes que los anteriores en una proporción de 50 a 1, se encuentran en casi todos los países del mundo, que tienen actividad volcánica reciente.

Generalmente los primeros son los que se explotan en la actualidad con fines de producción de energía eléctrica, mientras que los segundos son aprovechados para plantas de ciclo binario y en aplicaciones de calefacción, procesamiento de alimentos, etc. Esta clasificación de los sistemas convectivos se refiere al estado natural de los yacimientos geotérmicos, sin embargo, a medida que se han ido descubriendo y desarrollando nuevos campos geotérmicos, se ha observado que un solo campo geotérmico puede tener tanto regiones de líquido como de vapor dominante.

2.1.2.-Sistemas Geotérmicos Conductivos.

Estos sistemas se caracterizan por tener un régimen térmico debido únicamente al proceso de transferencia de calor por conducción. Dentro de esta categoría de sistemas destacan: a) los sistemas de roca seca caliente y b) los sistemas geopresionados.

a) Sistemas de roca seca caliente.

Las masas rocosas y calientes pero secas, contienen una gran cantidad de calor, el cual no es fácil de extraer debido a su falta de porosidad natural y por ende de agua, la cual en circunstancias normales es la que funciona como fluido transmisor de calor. A esto se asocia el hecho de que tampoco existen cauces naturales a través de los cuales puedan circular esos fluidos.

Debido a la baja conductividad térmica de las rocas, se requieren áreas muy grandes para la transferencia de calor si es que se desea obtener cantidades importantes de energía, lo cual no representa gran problema porque la cantidad de rocas secas y calientes dentro del subsuelo es muy grande, de hecho se ha calculado que la incidencia de este tipo de campos es de por lo menos 2 o 3 veces mayor que la de los sistemas hidrotermales. Sin embargo, uno de los problemas que se presentan para su explotación, es que estos sistemas se encuentran a grandes profundidades de la corteza terrestre, por lo que en muchos casos resulta incosteable su explotación comercial.

En este tipo de sistemas el calor se obtiene de la siguiente manera: Se inyecta un fluido a presión para que fisure las rocas en la profundidad deseada. El agua circula en estas fracturas artificiales, extrayendo el calor de la roca circundante que actúa como un yacimiento natural. Este yacimiento es posteriormente alcanzado por un segundo pozo que se emplea para extraer el agua calentada; en el capítulo IV, se abunda un poco más sobre estos sistemas.

b) Sistemas geopresionados.

Estos campos también son conocidos como sistemas de zonas de alta presión, se encuentran habitualmente en grandes cuencas sedimentarias, por ejemplo en el Golfo de México, a profundidades de 3 a 7 km. Los yacimientos geopresionados consisten en rocas sedimentarias permeables, intercalados en estratos impermeables; el agua sometida a presión permaneció entrampada desde el momento de la depositación de los sedimentos. La presión del agua caliente es cercana a la presión litostática, excediendo por mucho la presión hidrostática. Los yacimientos geopresionados también pueden contener cantidades significativas de metano y podrían producir energía térmica e hidráulica (aguas calientes presurizadas) como también gas metano. Estos recursos han sido intensamente investigados pero aún, no han sido industrialmente explotados.

Además de los anteriores, también hay campos geotérmicos marinos y magmáticos.

2.1.3.-Sistemas Marinos.

Estos sistemas de alta entalpía tienen lugar en el fondo del mar, que en la actualidad no se explotan comercialmente y hasta ahora han sido poco estudiados, por ejemplo en el Golfo de California (México). Hace algunos años se efectuaron estudios preliminares en el Golfo de California, como parte de los estudios se incluyeron algunas inmersiones en un submarino, esto permitió observar a 2,600 metros de profundidad, impresionantes chimeneas naturales descargando chorros de agua a 350°C. El flujo de calor medido en algunos puntos del Golfo de California es muy alto, de 0.34 W/m², mientras que en promedio, el flujo natural de calor alcanza valores de entre 0.05 y 0.10 W/m². En el año de 1986, se efectuaron una serie de estudios en una zona del Golfo de California, denominada depresión de Wagner (latitudes de 31° 00' a 31° 15' y longitudes de 113° 50'), que cubre un área de 10 km de ancho por 20 km de largo. La investigación abarcó estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, a partir de los resultados del estudio se interpretó que la cuenca en estudio pudiera ser un campo geotérmico de gran magnitud, con un potencial energético de 100 a 500 veces mayor que el del campo geotérmico de Cerro Prieto.

2.1.4.-Sistemas Mágmaticos.

Se refiere a los sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad, en zonas de debilidad cortical. En la actualidad no se explotan comercialmente; algunos ejemplos son: el volcán de Colima, México, y el volcán Mauna Kea, Hawaii. Posiblemente el atractivo más importante de este tipo de recurso sean las altísimas temperaturas disponibles (800°C), ya que la eficiencia de las máquinas térmicas es proporcional a la temperatura máxima de su ciclo termodinámico.

En el mediano o largo plazo cuando se cuente con la tecnología y los materiales adecuados para resistir la corrosión y las altas temperaturas, se podrá explotar la enorme cantidad de energía almacenada en las cámaras

magnéticas de los volcanes activos, aunque en muchos casos la gran profundidad a la que se encuentran también es un obstáculo importante.

2.2.-Exploración de los campos geotérmicos.

En su artículo, ¿Qué es la energía geotérmica?, Dickson y Fanelli (2004), definen cada una de las etapas que se realizan en la exploración de los campos geotérmicos que se describe a continuación.

El principal propósito de la exploración de una zona geotérmica es definir su tamaño, forma y estructura así como determinar sus características, tales como: el tipo de fluido, su temperatura, composición química y su capacidad de producir energía.

Estas características pueden ser determinadas en dos formas: por exploración superficial y con perforaciones exploratorias. Puesto que es mucho más barato hacer exploración superficial que perforar pozos, se acostumbra realizar un extenso programa de exploración superficial antes de comenzar a hacer perforaciones.

La exploración de un campo se puede dividir en dos etapas: reconocimiento y evaluación; y aún durante la etapa de explotación, se emplean algunos métodos de exploración con el objeto de llevar a cabo un monitoreo del campo. La planeación de cada una de las etapas en cuanto a su desarrollo y los métodos a usar, varían mucho dependiendo de las características del campo en estudio y del país en que se encuentre; sin embargo, se pueden definir los siguientes lineamientos generales:

- Comenzar con métodos simples y bien establecidos.
- Esforzarse desde el principio por obtener datos del prospecto en su totalidad.
- Usar tanto como sea posible los recursos locales disponibles.

Antes de realizar un programa de exploración geotérmica, todos los datos geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y geoquímicos existentes deben ser recolectados e integrados con todos los estudios previos disponibles sobre

agua, recursos minerales o petróleo que se hayan efectuado en el área del proyecto y en las zonas adyacentes. Esta información es medular en la definición de los objetivos que se plantean en el programa de exploración geotérmica y pueden conducir a una reducción importante en los costos.

El programa de exploración es usualmente desarrollado básicamente paso por paso: reconocimiento, pre-factibilidad y factibilidad. Durante cada fase del proyecto se van eliminando gradualmente las áreas de menor interés y concentrándose en las más prometedoras.

Los métodos también pueden ser progresivamente más sofisticados y más detallados conforme el desarrollo del programa avance.

El tamaño y presupuesto del programa entero debe ser proporcional a los objetivos, a la importancia de los recursos que se espera encontrar y a la planeación de la utilización que se harán de los mismos.

El programa establecido debe ser flexible y reexaminado conforme se vayan obteniendo los diferentes datos y se realicen los estudios de cada fase; similarmente, el modelo geológico-geotérmico debe ser progresivamente actualizado y mejorado. Ese reajuste periódico del programa debe eliminar idealmente algunas operaciones que no son del todo necesarias e insertar otras, de acuerdo al resultado obtenido en cada estadio de desarrollo.

Evidentemente, una reducción en el número y tamaño de las prospecciones, disminuye los costos y también corresponde a un incremento en el riesgo de error en el futuro. A la inversa, por el decremento en el riesgo de error, aumentan los costos. El éxito económico de un programa de exploración geotérmica depende de encontrar el balance apropiado entre los dos.

Los principales objetivos a cumplirse durante la exploración geotérmica son los siguientes:

1. Identificar los fenómenos geotermiales.
2. Determinar la viabilidad de la producción de un campo geotérmico.

3. Estimación del tamaño del campo geotérmico.
4. Determinar la porosidad efectiva de la roca almacenadora.
5. Determinar el tipo de yacimiento geotérmico.
6. Localizar las zonas productivas.
7. Determinar la cantidad de calor contenido en los fluidos y la posibilidad de su aprovechamiento.
8. Determinar el volumen de agua disponible de acuerdo a los balances hídricos.
9. La compilación de un cuerpo de datos que puedan ser confirmados o no con los obtenidos en la realidad.
10. Determinar los valores de los parámetros de pre-explotación que sean sensibles al medio ambiente.
11. Tener conocimiento de algunas características que pudiesen ocasionar problemas durante la explotación del recurso.

La importancia relativa de cada objetivo y el orden depende de numerosos factores, la mayoría de los cuales están ligados al recurso mismo. En cada proyecto, se considera la utilización anticipada de la tecnología disponible, la economía, la situación del campo, su localización y el tiempo.

Por ejemplo, un reconocimiento preliminar de una zona con manifestaciones hidrotermales tiene mayor importancia que un área inexplorada o de la cual se sabe muy poco y por lo tanto, el orden y tipo de objetivos varían de un caso a otro.

Un gran número de tecnologías y métodos pueden ser obtenidos en el orden en que se requiera de acuerdo a los objetivos. Muchos de esos métodos son usados actualmente en otros sectores en la búsqueda de otros recursos naturales.

Por ejemplo, las técnicas usadas en la exploración de minerales, gas o petróleo, podrían ser usadas en la búsqueda de calor, sin embargo, dependiendo del proyecto, no necesariamente debe ser así, ya que hay casos en los que bastan algunas de las más sencillas herramientas de las usadas en la búsqueda del calor interno de la Tierra que pueden resultar ideales.

A continuación, se mencionan las funciones específicas que tiene cada uno de los métodos que se emplean en exploración geotérmica.

2.2.1.-Métodos Geológicos.

Los métodos geológicos son el punto de partida en un programa de exploración, tienen una función básica que es la de identificar la localización y extensión de las áreas importantes; son un elemento primordial en todas las fases subsecuentes de la exploración y explotación. Estos estudios permiten establecer el sitio correcto donde se van a perforar los pozos exploratorios y productores (de desarrollo).

También proveen información para la interpretación de los datos obtenidos con otros métodos de exploración y, finalmente para construir un modelo realista del sistema geotérmico y para evaluar el potencial del recurso.

Los estudios geológicos e hidrológicos pueden ser usados en la fase de producción, proporcionando información valiosa del yacimiento.

Los principales objetivos de los estudios geológicos en la etapa de reconocimiento son: Identificar y catalogar todas las manifestaciones geotérmicas que existan en la superficie, ya sean activas o fósiles; efectuar una evaluación preliminar de su significado con respecto a los procesos subterráneos que tienen lugar en el sistema geotérmico; y recomendar las áreas para un estudio a mayor detalle. Esto se lleva a cabo examinando fotografías aéreas o imágenes de satélite y visitando el área para correlacionar los datos de éstas con la información disponible.

Una vez terminado el reconocimiento del área, si se identifica que la zona geotérmica tiene posibilidades para su explotación, se continúa con la etapa

de exploración propiamente dicha, en la cual se debe preparar un mapa geológico a detalle del prospecto geotérmico seleccionado y de las áreas circundantes.

Este mapa debe incluir a las unidades estratigráficas, los rasgos estructurales, las manifestaciones superficiales (sección geológica), la profundidad a la que se encuentran los diferentes tipos de rocas, su porosidad, permeabilidad, etc. Todos estos elementos pueden contribuir a elaborar un modelo del sistema geotérmico y recomendar la localización de los pozos exploratorios.

El método de cartografiado de las alteraciones hidrotermales de las rocas es empleado en provincias volcánicas jóvenes en donde hay actividad volcánica que se manifiesta mediante aguas termales, vapor o fumarolas, lo que es indicio de una secuencia de rocas o cámara magmática todavía calientes. Los puntos visibles en la superficie de la salida de vapor, de agua o de los gases, son efímeros. Cuando existen zonas de debilidad, por ejemplo, relacionadas con el tectonismo, se forman nuevas fracturas y por precipitación química de minerales otras se cierran. El antiguo camino de ascenso queda marcado, de tal manera que en el transcurso del enfriamiento de una cámara magmática, los cortes geológicos cartografiables en superficie, exponen las alteraciones hidrotermales de las rocas. Muy frecuentemente se ven cubiertas por la vegetación y por lo tanto, no son visibles en toda su extensión.

Después de elaborar el mapa de alteraciones hidrotermales, se realiza la clasificación temporal de las anomalías térmicas en el contexto de la historia geológica; para esto se determina la edad de los depósitos hidrotermales.

Otras determinaciones relativas de edades de las anomalías geotérmicas se obtienen mediante una correlación con los sedimentos o rocas que existen fuera de la zona de alteración; por ejemplo, si un conglomerado contiene fragmentos alterados por la corrosión del agua termal, entonces es más joven que la anomalía, y la edad de la roca corroída por el agua termal proporciona un límite superior a la edad del yacimiento geotérmico.

A partir de la duración de la actividad hidrotermal y del volumen de roca alterada, se puede evaluar a grosso modo la magnitud, en profundidad, de la fuente termal.

En la Figura 5, se establece el tipo de estudio geológico y la información que se obtiene del mismo, cabe mencionar que los estudios a realizar dependerán de cada proyecto en específico de acuerdo a sus características individuales.

TIPO DE ESTUDIO	INFORMACIÓN OBTENIDA
Geomorfología	Dinámica Superficial
Fotogeología	Geología Preliminar
Cartografía De Campo	Mapa Geológico
Petrografía	Litología Superficial Y Subsuelo
Geocronología	Relaciones De Tiempo
Vulcanología	Procesos Volcánicos
Geología Estructural	Mapa Estructural
Modelo Geovulcanológico	Magmagénesis
Modelo Tectónico	Contexto Global
Estudios Aéreos En Infrarrojo	Anomalías Térmicas
Imágenes Satelitales	Mapas Estructurales Y Texturales
Estudio De Bandas Termales	Aniomalías Termales
Mapeo Temático	Mapa Temático

Figura 5. Tipo de estudio geológico y la información que se obtiene del mismo en un proyecto de exploración geotérmica (Tomada de Torres, et al., 1993).

2.2.2.-Métodos hidrogeológicos.

Los métodos hidrológicos junto con los geológicos, constituyen la base en la exploración geotérmica. El agua es de vital importancia, y el estudio de las aguas del subsuelo, es considerado como una ciencia cuantitativa y cualitativa que tiene como objetivo fundamental determinar entre otras cosas, su localización, cantidad, dirección de flujo; así como, las características de las rocas y suelos localizados en las diferentes unidades de permeabilidad. Esta información permite establecer los criterios necesarios para determinar la extensión y distribución del yacimiento geotérmico.

La evaluación detallada de los recursos hidrológicos e hidrogeológicos es de gran importancia para evaluar el potencial de la energía geotérmica, aunque no siempre son tomados en cuenta, por ello, se deben realizar consideraciones especiales con las manifestaciones geotérmicas detectadas en sondeos, ya que su análisis resulta fundamental.

En hidrogeología, también existen diversos tipos de estudios que tienen como objetivo la descripción textural de las características y propiedades relacionadas con la presencia de agua subterránea, así como de su comportamiento, características hidráulicas, control y afectación por la presencia de diversos elementos químicos. La Figura 6, resume los principales tipos de estudios hidrogeológicos y la información que proporcionan para los fines de exploración.

TIPO DE ESTUDIO	INFORMACIÓN OBTENIDA
Climatología	Volúmenes de Agua de Origen Meteórico
Hidrología De Campo	Hidrodinámica de Acuíferos
Hidrología Superficial	Volúmenes de Escurrimiento
Hidrogeología	Caracterización de Acuíferos, Recarga de Sistemas Geotérmicos
Hidrogeoquímica	Caracterización de Acuíferos y Procesos de Termalismo
Isotopía & ¹⁸O	Origen de Fluidos y Mezcla
Trazadores	Trayectoria de Flujo, Propiedades Hidrodinámicas
Modelación Numérica	Simulación predictiva del acuífero

Figura 6. Tipos de estudios hidrogeológicos y la información que se obtiene de los mismos en proyectos con fines de exploración geotérmica.

2.2.3.-Métodos Geoquímicos

Incluyendo la geoquímica isotópica, estos estudios se utilizan como medidas para determinar si el sistema geotérmico es predominantemente agua o vapor; también es posible obtener la estimación de la mínima temperatura esperada a cierta profundidad, la estimación de la homogeneidad del agua suministrada, se pueden inferir las características químicas de un fluido a determinada profundidad y la capacidad de recarga. Esta información valiosa, también puede obtenerse durante la reinyección y utilización de plantas, ya que permite conocer información sobre la composición de los fluidos y del probable impacto ambiental que pueden ejercer.

Un examen químico o análisis isotópico se hace a las muestras de agua y gas que provienen de manifestaciones geotermales como fumarolas o bien, de pozos exploratorios. El análisis químico de las aguas termales proporciona su composición química que provee mucha información sobre el origen de las mismas, así como sobre la temperatura que reina en el yacimiento. Se puede conocer el camino de migración, y finalmente caracterizar el sistema hidrotermal en su totalidad, describiendo la participación de aguas magmáticas y meteóricas, así como del agua fósil en los poros de las rocas sedimentarias. La explicación del proceso de mezcla proporciona indicaciones de gran valor para la utilización efectiva del yacimiento geotérmico. Cuando el agua proviene de un yacimiento cerrado, se puede evaluar su capacidad de almacenamiento. En un sistema geotérmico, donde el agua meteórica penetra muy profundamente, para ahí ser calentada y alcanzar de nuevo la superficie, se debe evaluar la productividad para que este sistema no limitado con respecto al tiempo, no se vea perjudicado por la explotación. Se puede lograr una diferenciación entre ambos sistemas, mediante el análisis químico de los fluidos térmicos, ya que los efectos de la temperatura en el subsuelo son semejantes en ambos casos.

Además de determinar la estructura del sistema hidrotermal, el contenido de SiO₂ puede proporcionar información, ya sea sobre la temperatura del

yacimiento geotérmico, o bien información cuantitativa sobre la mezcla de aguas termales y de aquellas provenientes de la superficie.

Las anomalías no están siempre caracterizadas por una actividad hidrotermal alta. A falta de fumarolas o de zonas de alteración hidrotermal, el contenido de radón del suelo y de óxido de carbono, así como de elementos volátiles tales como el mercurio, arsénico y boro, constituyen guías en la exploración geoquímica de regiones calientes del subsuelo. La distribución en la corteza de los elementos y compuestos mencionados, es igualmente apropiada para la cartografía de zonas de fracturamiento, y para ayudar a fijar los límites de una fuente profunda de calor.

El gas noble radón, con una vida media de 3.8 días, es un elemento con una vida corta ($Rn222$), el cual se origina de la desintegración del radio ($Ra226$) y en general está regularmente distribuido en la corteza superior. En fracturas, asciende el radón y por lo tanto puede servir a la prospección de zonas de fracturamiento; el cartografiado del contenido de este elemento en el suelo proporciona información muy valiosa en la exploración.

La concentración de radón proporciona información muy importante a sobre las propiedades de transmisibilidad de las rocas, tales como la permeabilidad y la velocidad del flujo de los fluidos que llenan los poros de las rocas en el yacimiento geotérmico.

Por otro lado, la transformación en carbón de las sustancias orgánicas incluidas en las rocas sedimentarias, es decir, el incremento en su grado de carbonización, ocurre bajo la influencia de una temperatura de reacción y del tiempo. La evolución de la transformación en carbón en el seno de una anomalía de calor, es por lo tanto apropiada para caracterizar la anomalía misma, a partir de los efectos integrados de la temperatura y del tiempo. Sin embargo la obtención de información cuantitativa es posible sólo excepcionalmente debido a los cortos tiempos de influencia.

Las condiciones geotérmicas regionales han logrado, a las profundidades respectivas, que ocurra un determinado grado de carbonización, el cual se

vería perturbado por el ascenso de fluidos hidrotermales y/o el ascenso de magma hasta horizontes más someros de la corteza terrestre. Dentro de una anomalía geotérmica, el grado de carbonización aumenta más con la profundidad, que por fuera de ella. Después de períodos prolongados de influencia, el gradiente de transformación en carbono puede relacionarse a un gradiente de temperatura. Pero en el caso de períodos cortos de calentamiento, esto no es posible sin cálculos suplementarios de modelado geotérmico, ya que no se puede alcanzar durante la evolución del proceso de enfriamiento de un cuerpo intrusivo un grado de carbonización similar al que sería alcanzado bajo las temperaturas de reacción comparables, pero bajo un régimen estacionario. Sin embargo, en el caso de gradientes de carbonización homogéneos elevados, se puede obtener información sobre la posible existencia de una anomalía de calor de origen conductivo.

La transformación de las sustancias orgánicas ocasionadas por el aumento en la temperatura también puede ser estudiada mediante el análisis de uno de sus productos de reacción, los hidrocarburos, y así delimitar la posición de la región de mayor temperatura gracias a la concentración de este último.

Los estudios geoquímicos proveen datos para la planeación de la exploración y el costo es relativamente bajo comparado con otros métodos que utilizan tecnología sofisticada como los geofísicos. Las técnicas de geoquímica deben ser utilizadas tanto como sea posible antes de proceder con metodologías más costosas.

2.2.4.-Métodos Geofísicos.

Los métodos geofísicos de prospección deben ser apropiados para localizar desde la superficie yacimientos geotérmicos situados en profundidad. En los métodos directos se mide la temperatura del suelo, ya sea desde el aire, mediante el registro de observaciones infrarrojas, o en la misma superficie con ayuda de termómetros. En el contexto de la medición de temperaturas del subsuelo a diferentes profundidades, también se puede incluir el flujo de calor, variable física que está mejor adaptado para evaluar la magnitud de una fuente térmica. En los métodos indirectos se utiliza la sensibilidad a la

temperatura de las variables físicas de las rocas para estimar cuantitativamente la temperatura y se aplican métodos cualitativos que proporcionan indicios sobre yacimientos geotérmicos, tal como una alta sismicidad o un elevado potencial eléctrico en la superficie.

2.2.4.1.-Mediciones Infrarrojas.

El dominio del infrarrojo-térmico comprende longitudes de onda que se encuentran entre 3 y 14 μm . Este dominio incluye dos ventanas atmosféricas que se encuentran entre 3 y 5 μm , o bien entre 8 y 14 μm . Las ondas infrarrojas más largas son absorbidas en la atmósfera.

La radiación en el dominio infrarrojo indicado no puede ser estudiada con cámaras fotográficas usuales, ya que las lentes son impermeables al dominio térmico infrarrojo; sin embargo existen termocámaras infrarrojas especiales que permiten identificar anomalías con gran precisión. La radiación infrarroja es medida, en la mayoría de los casos, con ayuda de detectores basados en semiconductores. En las mediciones superficiales se usan radiómetros, los cuales miden la temperatura del orden de 0.2°C . Desde aviones o bien desde satélites se usan sistemas de barrido que constituyen métodos de representación de imágenes que proporcionan una mayor sensibilidad a la temperatura.

Las temperaturas de radiación que así se observan, no dependen únicamente de la radiación solar, sino que también dependen de la topografía y de las propiedades térmicas de la superficie. Aquí, además de la conductividad y de la temperatura del cuerpo, la fuente de calor juega un papel muy importante. El contraste de temperatura, está relacionado a diferentes propiedades térmicas del suelo; es máximo en la noche poco antes de la salida del sol, y también en el día aproximadamente una hora inmediatamente después del máximo de temperatura de medio día.

Para poder reconocer una anomalía de temperatura con base a estudios infrarrojos, el flujo anómalo de calor proveniente del subsuelo debe ser aproximadamente 100 veces mayor que el valor normal del flujo de calor, lo

cual únicamente sucede en anomalías muy marcadas, generalmente de origen volcánico. Desde aviones o satélites los métodos altos infrarrojos son idóneos para el reconocimiento de fuentes de calor tanto en la superficie terrestre como en el agua. Para anomalías muy grandes que alcanzan valores, varios miles de veces más grande que el flujo térmico normal, existe una ecuación empírica, a través de la cual se puede calcular el flujo de calor con base en la temperatura superficial. Por lo general, con ayuda de mediciones superficiales de temperatura hechas con termómetros, se puede localizar con mayor exactitud y más rápidamente una fuente de calor natural.

2.2.4.2.-Mediciones superficiales de Temperatura y Flujo de calor.

Cuando la medición superficial de temperatura es empleada como método de prospección, es posible realizar la evaluación de la magnitud de una fuente de calor a partir de la distribución de temperatura a dos profundidades próximas a la superficie, además de que el campo de temperaturas indica dónde se deben perforar los pozos, siempre y cuando se tengan buenas posibilidades de que exista agua caliente o vapor.

Las observaciones bidimensionales de temperaturas deben, por un lado, ser independientes de las variaciones diarias de la temperatura, es decir, la profundidad de observación debe ser mayor a $z = 0.5\text{m}$ y por otro, las observaciones se deben realizar rápidamente. Para poder evaluar las dimensiones y la productividad del yacimiento a menudo se miden las temperaturas a las profundidades de $z = 1\text{ m}$ y $z = 10\text{ m}$. Ya que las variaciones anuales de la temperatura superficial están incluidas en los valores observados; la prospección deberá efectuarse en un periodo corto de tiempo, ya que entonces las variaciones del campo de temperaturas con periodos muy largos serán insignificantes durante el tiempo de medición.

Como termómetro se utilizan sensores eléctricos tales como el termómetro de resistencias, los termistores y los termoelementos. Con la exactitud de $+0.1^\circ\text{ C}$, proporcionada, por lo general por estos instrumentos y con una diferencia de profundidad de 10 m , se puede identificar un gradiente medio de temperatura de 30° C/Km aproximadamente cuando se aplica la

corrección de la variación anual de la temperatura. Un yacimiento geotérmico somero aprovechable desde el punto de vista económico, se manifiesta mediante un gradiente de temperatura de 0.1° C/m de tal manera, que, en primer lugar, para localizar una anomalía geotérmica las observaciones deben efectuarse en dos niveles con una diferencia de profundidad de 10 m aproximadamente. En este caso es posible realizar una estimación aproximada de la magnitud de la fuente de calor. Únicamente con pozos más profundos, hasta 30 m aproximadamente, es posible realizar un cálculo cuantitativo seguro, ya que las variaciones anuales de la temperatura superficial son casi nulas a esa profundidad.

La temperatura superficial delimita con claridad las zonas de transporte convectivo de calor dentro de áreas con potencial geotérmico. De esta forma, en la anomalía se pueden delimitar zonas de fracturamiento, las cuales ayudan a determinar la ubicación de los pozos.

El flujo de calor contiene dos componentes, una parte conductiva y otra convectiva. Asociado a la porción convectiva se deben considerar las eventuales fuentes de aguas termales o de vapor existentes, ya que la cantidad de calor conducida por estos fluidos no es cedida completamente a la roca vecina a lo largo del camino de ascenso. El cálculo de la pérdida de calor proporciona información para determinar si la anomalía representa un yacimiento percedero desde el punto de vista económico o si el rendimiento es suficiente para una utilización continua, temporalmente ilimitada.

En la Figura 7, se muestra un mapa infrarrojo de las temperaturas de la superficie del mar, apareciendo en rojo las más calientes y en morado las más frías. Las regiones alrededor del ecuador, a 0° de latitud, son calentadas por el sol más que las zonas del resto del globo. Estas áreas calientes están indicadas en colores rojo, naranja y amarillo, de tal manera que las zonas de mayor temperatura son visibles a simple vista.

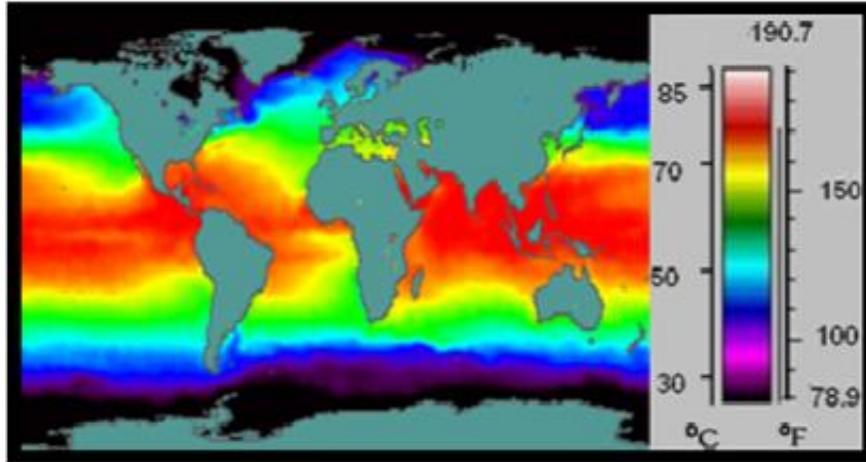


Figura 7. Imagen de raios infrarrojos de la superficie del mar (Modificada de www.spitzer.edu, 2007).

2.2.4.3.-Mediciones Gravimétricas.

Los resultados obtenidos con los métodos gravimétricos sirven para delimitar las estructuras geológicas del subsuelo, las cuales constituyen una herramienta importante para localizar el máximo en la anomalía de calor, así como indicar con mayor certeza la ubicación de los pozos (Quijano, 2007).

La prospección gravimétrica se fundamenta en la observación experimental de la intensidad del campo gravitacional de la superficie terrestre, ya que presenta variaciones pequeñas, que pueden ser detectadas con instrumentos de precisión. Estas ‘anomalías’ gravimétricas se originan por variaciones en la masa de la corteza terrestre, debidas a rasgos litológicos y estructurales. La intensidad promedio del campo gravitacional (en su componente vertical) de la Tierra está dada por la expresión (Quijano, 2007):

$$g = G \cdot (M_t / R_t^2);$$

Donde:

G= Constante de gravitación.

Mt = Masa de la Tierra.

Rt = radio.

A nivel del mar, en el ecuador, tiene un valor de $9,780326771 \text{ m/s}^2$, según el World Geodetic System 1984 (WGS-84).

Para contar con una referencia universal con la cual comparar las mediciones de campo, es necesario definir una superficie equipotencial del campo gravitacional. Esta superficie se conoce como geoide, y coincide, en cierta manera, con la superficie de los océanos y su prolongación virtual en los continentes. En el cálculo del geoide se considera, por una parte, el hecho de que la Tierra no es una esfera perfecta, sino un esferoide o elipsoide achatado por los polos; por otra parte, se toma en cuenta la fuerza centrífuga debida a la rotación. Esta fuerza depende de la latitud y actúa en sentido contrario a la fuerza gravitacional. El geoide de referencia aceptado oficialmente en México es el WGS-84, que incluye los parámetros que definen la forma del elipsoide, la velocidad angular, la masa del elipsoide y un modelo gravimétrico detallado. El marco de referencia WGS-84 es consistente con el International Terrestrial Reference Frame 1992 (ITRF-92), que se usa en los levantamientos topográficos.

Los datos de campo, para poder ser interpretados, deben corregirse de tal manera que los valores de gravedad tengan una referencia normalizada. De otra forma, alguno o varios de estos efectos pueden ser dominantes e impedir que las anomalías puedan ser observadas; estas correcciones son:

- Altitud
- Latitud
- Efecto Bouguer
- Efecto topográfico
- Mareas

Una vez realizadas todas estas correcciones, se obtiene el mapa de anomalía de Bouguer, que refleja las variaciones de densidad del subsuelo y que servirá de base para el modelado numérico y para realizar la interpretación correspondiente.

Como última etapa, se realiza el modelado numérico de la anomalía de interés, que consiste en proponer la geometría y localización del cuerpo

geológico causante de la anomalía residual. Este puede realizarse con técnicas directas o inversas. Con la actual disponibilidad de equipo de cómputo y de algoritmos apropiados, las técnicas de inversión se han vuelto más accesibles.

Las grandes anomalías geotérmicas se localizan en regiones volcánicas activas, de tal forma que los reservorios de agua caliente o bien de vapor se encuentran en la mayoría de los casos asociados a estratos porosos, los cuales presentan una alta porosidad en relación con las formaciones fuera del yacimiento; a causa de ésta su densidad disminuye y se presentan como anomalías gravimétricas negativas muy locales. Además, las fracturas también tienen alta porosidad y dan origen a anomalías negativas muy locales, las cuales por un lado, delimitan el camino de ascenso de los fluidos hidrotermales y por el otro, posibilitan una cartografía de las zonas de fracturamiento. A partir de este sistema se pueden evaluar los tamaños de las diversas partes del yacimiento.

A menudo, además de la prospección indirecta, también es posible una evaluación cuantitativa de la temperatura, la cual se basa en la disminución de la densidad debido a la temperatura. La temperatura en el yacimiento es una variable muy importante, que habla a favor o en contra de la factibilidad del aprovechamiento de la energía.

2.2.4.4.-Mediciones Geo-eléctricas.

La distribución de la resistencia eléctrica específica en el subsuelo es usada con éxito desde hace mucho tiempo en la prospección de aguas subterráneas.

La geoelectricidad puede también ser empleada en la prospección de yacimientos geotérmicos, junto con otros métodos que se usan en campos eléctricos artificiales; también se puede aplicar para realizar la medición de autopotenciales geoeléctricos de campos eléctricos naturales.

Los métodos geoeléctricos se pueden emplear en estratos conductores ya sea como sondeos o bien en el cartografiado de las variaciones laterales. Por

lo general, los estratos con bajas resistencias específicas pueden ser asociados a los yacimientos buscados de agua caliente. Una disminución brusca de la resistencia específica es un indicativo de un acuífero.

La resistencia específica se ve determinada por la porosidad, el contenido en sales del agua y también por la temperatura.

En el contexto de los campos eléctricos naturales, se utiliza el potencial natural, el cual se origina por la migración de un electrolito a través de un estrato permeable. Este potencial electrocinético es considerablemente mayor que el potencial termoeléctrico que se presenta en las anomalías geotérmicas. Frecuentemente dentro de una anomalía geotérmica existe un sistema hidrotermal pronunciado, a menudo el método de potencial natural es idóneo para la prospección de yacimientos geotérmicos. El cálculo del potencial de electrofiltración apenas es posible debido a los múltiples parámetros que deben considerarse, tales como la diferencia de presión, la viscosidad y la resistencia específica. Por lo general la diferencia de potencial aumenta con la resistencia específica del fluido de poro. El signo de la caída de potencial es por lo general negativo en aguas descendentes y positivo en aguas ascendentes.

El efecto termoeléctrico entra en acción tan pronto como se presenta una diferencia de temperatura. La caída de potencial que se origina es proporcional a la diferencia de temperatura.

Los autopotenciales se ven perturbados por muchos efectos secundarios, tales como las corrientes telúricas de grandes períodos, corrientes de potencial de origen topográfico, por efectos electroquímicos y otros. Una interpretación cuantitativa de las mediciones, se realiza a partir de una determinación del campo de temperaturas o de la evaluación de la cantidad de agua termal ascendente.

2.2.4.5.-Métodos Sísmicos

La prospección sismológica se divide en dos grandes grupos. Primero, la llamada sísmica de reflexión que se utiliza como herramienta básica en la

prospección petrolera y que consiste en provocar artificialmente ondas sísmicas en el subsuelo, mediante explosivos o vibradores. Al medir y registrar la componente reflejada de estas ondas, se puede obtener información valiosa de la estructura del subsuelo.

En geotermia, este tipo de prospección se ha usado poco, por su alto costo y porque en ambientes volcánicos no existen horizontes reflectores bien definidos.

El tipo de prospección útil en geotermia es el registro de la microsismicidad natural del terreno.

La actividad sísmica se registra mediante sismómetros y sismógrafos. Los equipos digitales de tres componentes (x,y,z) son los más adecuados para estudios exploratorios; los sensores pueden medir la velocidad del movimiento del terreno o la aceleración. Estos últimos son mejores pues pueden registrar sismos en un rango grande de magnitudes sin que se saturen.

Hasta ahora la aplicación de la sismología de reflexión y de refracción a la prospección de recursos geotérmicos ha tenido lugar en muy pocas regiones. Se ha demostrado que los tiempos residuales de las ondas compresionales son negativos, cuando las ondas atraviesan una anomalía geotérmica. En las regiones estudiadas, el retraso en el tiempo de recorrido es de 0.2 segundos aproximadamente y es atribuido a las dos propiedades características de un sistema hidrotermal: la alta porosidad y las elevadas temperaturas. Además de la disminución de la velocidad de las ondas compresionales en su paso por una anomalía geotérmica, también la amplitud y el frente de onda se ven modificadas; el coeficiente de absorción es ahí muy grande.

La aplicación de la sísmica de reflexión y de refracción es más apropiada para la localización de yacimientos geotérmicos profundos que en la prospección de yacimientos próximos a la superficie, los cuales son estudiados óptimamente por otros métodos geofísicos.

El vapor o el agua que emanan de una anomalía geotérmica dan origen a lo largo de su camino de ascenso a elevados gradientes locales de temperatura, los cuales ocasionan fracturas en las rocas, y alivios instantáneos de presión, dando origen a explosiones locales de vapor a partir del agua sobrecalentada.

Tales fenómenos locales se caracterizan en el seno de una anomalía geotérmica por una alta sismicidad.

Es por lo tanto posible localizar yacimientos calientes con temperaturas muy por arriba de $T = 100^{\circ} \text{C}$, donde el punto de ebullición del agua se encuentra a presión normal.

Un ejemplo del uso de métodos sísmicos, es en el que Lermo, et al. (2008), analizaron la distribución en superficie y en profundidad de los sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla (México), durante el periodo 1997-2004. Los datos corresponden a 95 sismos registrados por más de cinco estaciones permanentes y temporales instaladas por la Comisión Federal de Electricidad y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyas magnitudes de duración fueron menores o iguales a 3.6 Md y a profundidades focales que no sobrepasan los 4.0 km.

Asimismo, se realizaron mecanismos focales simples y de inversión de tensor de momento, y se comparó el número de sismos registrados por dos estaciones de la red permanente (números S05, S06) con la inyección de agua y la producción de vapor durante cierto tiempo.

Los resultados en superficie y en profundidad muestran actividad sísmica en la zona norte del campo, alrededor de los pozos inyectoros I29 (pozo H-29) e I38 (pozo H-38), mientras que los mecanismos focales simples y de tensor de momento evidencian esfuerzos de origen heterogéneo, sugiriendo que parte de la actividad sísmica ocurrida en Los Humeros puede haber sido "inducida" principalmente por el proceso de inyección de agua al subsuelo del campo geotérmico.

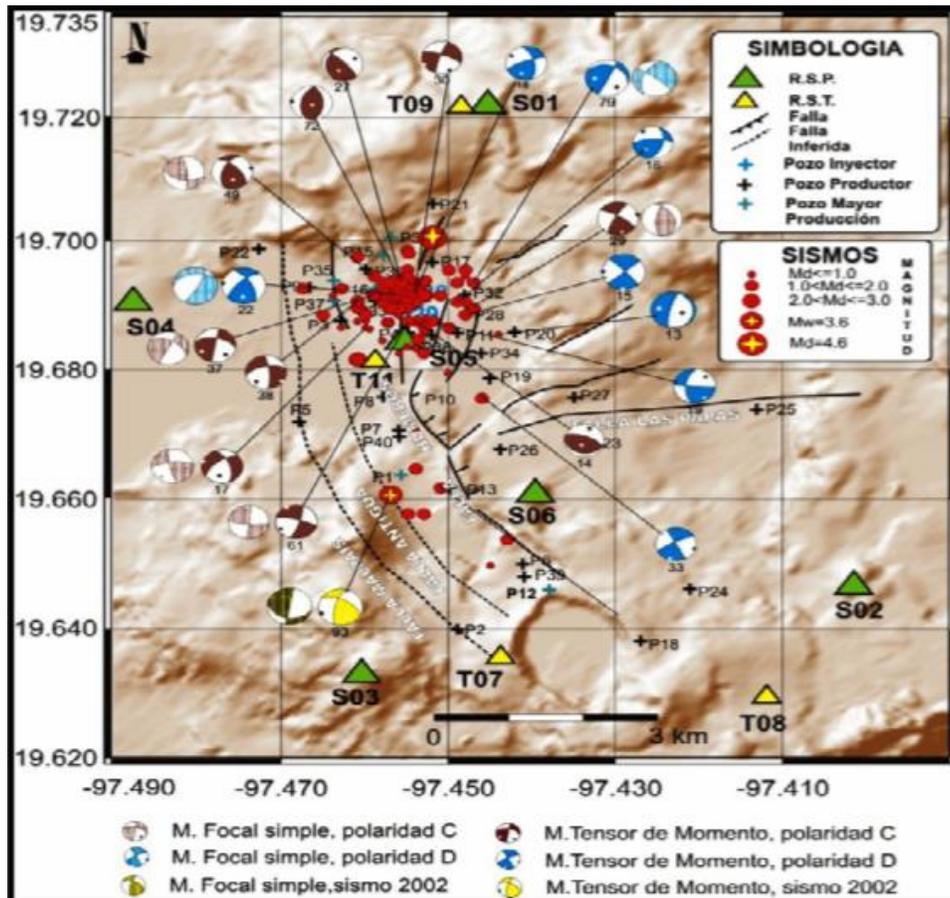


Figura 8. Distribución de los sismos seleccionados, mecanismos focales simples y de tensor de momento con polaridad compresional y dilatacional.

la importancia del monitoreo sísmico en el campo de Los Humeros se deriva básicamente del sismo del 25 noviembre de 1994, el cual ocasionó daños considerables en su infraestructura, por ello, en diciembre de 1997 la CFE instaló una Red Sísmica Telemétrica Permanente, a fin de analizar la distribución de la sismicidad, conocer los mecanismos que la generan, el estado de esfuerzos del campo geotérmico y la relación de los sismos registrados en las estaciones permanentes (S05, S06) con los pozos (inyectores, productores) y la tectónica local (Lermo, et al., 2008).

2.2.4.6.-Métodos Magneto-Métricos.

La Tierra posee un campo magnético estacionario, que en la superficie terrestre puede ser representado, con buena aproximación, por un campo magnético bipolar. Este campo se produce por varias fuentes, la más

importante es el llamado 'geodinamo magnético', que se origina por la convección de minerales líquidos eléctricamente conductivos, en la porción externa del núcleo terrestre. Otras fuentes son la magnetización de la corteza terrestre y varias fuentes exteriores como la ionósfera.

La contribución de la corteza es importante en el contexto de la exploración de recursos naturales como la energía geotérmica. Esta contribución se debe a la presencia de concentraciones anómalas de minerales magnéticos, como la magnetita, y puede ser inducida o remanente. La magnetización inducida se debe a que, por la presencia del campo magnético primario, los minerales susceptibles de magnetización se alinean en el sentido del campo magnético principal. Dependiendo de la posición relativa del observador con respecto al campo principal, el pequeño dipolo inducido se añade o se sustrae a dicho campo principal. La magnetización remanente es similar a la anterior; se diferencian en que, una vez que el campo magnético principal desaparece, el remanente permanece mientras que la inducida también se desvanece. La magnetización remanente se origina por la presencia de minerales ferromagnesianos que dan lugar a dipolos permanentes, los cuales se formaron al momento, porque la roca fundida se cristalizaba; su orientación depende, desde luego, de la orientación del campo principal al momento de la cristalización.

El campo magnético de la Tierra varía con el tiempo, lo que se conoce como variaciones seculares. La escala de tiempo puede variar de un día a miles de años. Las variaciones diurnas son del orden de 30 nT, pero pueden llegar a valores de 1000 nT, cuando los vientos solares son intensos. En esos casos, es necesario corregir estas variaciones en los valores observados durante un levantamiento.

La polaridad del campo magnético también presenta inversiones, en periodos que varían de miles a millones de años. Actualmente el polo norte magnético casi coincide con el polo sur geográfico, con una desviación del orden de 11°.

El objetivo final de los estudios magnetométricos es el poder conocer mejor la estructura tridimensional del subsuelo e identificar los cuerpos rocosos cuyas características sean de importancia para el objeto de la prospección, por ejemplo, intrusivos o cuerpos mineralizados.

Existen otros métodos que han sido poco usados como ocurre con el magnetotelúrico o el audiomagnetotelúrico, que debido a que requieren instrumentos muy sofisticados, son muy sensibles al ambiente, o como en el caso del segundo, que aún está en desarrollo, y por lo tanto, no son comúnmente empleados en la exploración geotérmica.

Se sintetizan los métodos geofísicos usados para la prospección geotérmica y los resultados que se obtienen de cada uno de ellos.

Tipo de estudio	Información obtenida
Flujo de calor	Gradiente geotérmico
Sísmica pasiva	Zonas de fracturamiento activas
Sísmica de reflexión	Estructura geológica
Sísmica de refracción	Estructura geológica
Exploración geoelectrica	Detección de conductores someros
Exploración gravimétrica	Distribución de densidades y estructuras mayores
Exploración magnetométrica	Configuración de basamento y presencia de fallas
Exploración magnetotelúrica	Detección de conductores semi-profundos
Estudios paleomagnéticos	Magnetoestratigrafía

Figura 9. Tipos de estudios geofísicos y la información que se obtiene de los mismos en proyectos con fines de exploración geotérmica.

Todos los métodos geofísicos son costosos, algunos más que otros, por lo tanto, no pueden ser usados indiscriminadamente en cualquier situación o condición. En conclusión, un método que produce excelentes resultados en la determinación del ambiente geológico, también puede dar resultados insatisfactorios el uso de un método inadecuado.

El orden reduce costos, por lo que es muy importante que el método seleccionado sea adecuadamente elegido por geofísicos que trabajen en estrecha relación con geólogos.

La perforación de pozos exploratorios representa la fase final de todo el programa de exploración geotérmica, de hecho, es el único medio para determinar las características reales del yacimiento geotérmico, y de esta manera evaluar su potencial. Los datos que proveen los pozos exploratorios deben ser capaces de verificar todas las hipótesis y modelos elaborados durante la exploración en superficie; se debería confirmar si el yacimiento es productivo y contiene los fluidos característicos adecuados para la utilización a que están destinados, es por todo lo anterior que la ubicación de pozos exploratorios es una operación delicada.

CAPÍTULO 3

PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS

3.1.-Etapas de proyecto geotérmico

La ejecución de un proyecto geotérmico se divide desde el punto de vista práctico en cinco etapas.

1. Estudio de reconocimiento.
2. Estudio de prefactibilidad.
3. Estudio de factibilidad.
4. Desarrollo.
5. Explotación.

Las tres primeras se enfocan a la parte exploratoria del proyecto y las otras dos a la preparación del campo para el aprovechamiento del fluido geotérmico, producción sistemática del fluido, utilización industrial y solución sobre problemas de gestión del campo. Para poder desarrollar un proyecto geotérmico en una región geológicamente poco estudiada, es necesario iniciar la actividad exploratoria con un estudio de reconocimiento que abarque un área de mil o más kilómetros cuadrados, este estudio de reconocimientos permite formular las primeras hipótesis acerca de las posibilidades geotérmicas de la región. En el estudio de prefactibilidad su objetivo es identificar con trabajos de superficie la posible existencia de un yacimiento en el subsuelo con condiciones tales que el riesgo de continuar la exploración con perforaciones profundas sea muy reducido. Estas se realizan en áreas cuya extensión en un intervalo de 400-500 kilómetros cuadrados. Proyectos geotérmicos cuya etapa de prefactibilidad ha sido aprobada continúa con el punto de factibilidad cuyo objetivo es la comprobación de la existencia de un yacimiento en un área de 10 a 100 kilómetros cuadrados, evaluación del potencial energético de dicha área y el diseño preliminar de los sistemas de utilización del recurso detectado. Una vez ubicado el recurso geotérmico el desarrollo comprende la continuación de la perforación, ejecución de estudios geocientíficos, evaluación precisa del yacimiento, extracción del fluido geotérmico, elaboración del proyecto definitivo y la

construcción de dicha central generadora de electricidad o su respectivo uso directo de calor.

3.2.-Tipos de formaciones rocosas.

Al conjunto de calor, el fluido y la zona cortical donde se almacena o circula el fluido se le llama sistema geotérmico. La energía almacenada en forma de calor en las rocas y en acuíferos situados cerca de la superficie, en algunos casos es probable ser aprovechada mediante la perforación de pozos de hasta 3 km de profundidad entonces cuando estos puntos atribuyen a condiciones rentables, el yacimiento y las instalaciones superficiales constituyen lo que se le denomina campo geotérmico.

Hay varias fuentes generadoras de calor en el interior de la tierra creando volcanes y calentando las formaciones geológicas, así constituyen el mecanismo más importante al cual se asocian genéticamente los yacimientos geotérmicos.

Las corrientes de convección en la astenósfera han originado placas oceánicas y continentales en la litosfera que al chocar o separarse constituyen regiones geológicamente activas en las cuales se presenta los fenómenos de la subducción de placas o la formación de fisuras corticales.

La energía calorífica transportada hacia los niveles superiores de la corteza puede ser almacenada en la roca o en acuíferos ubicados a unos cuantos kilómetros de profundidad, llegando a constituir yacimientos geotérmicos que se pueden manifestar en la superficie.

El agua meteórica que se infiltra a través de rocas permeables a grandes profundidades puede ser calentada directa o indirectamente por el flujo del calor generado por las cámaras magmáticas y llegar a construir yacimientos geotérmicos de alta, media y baja entalpía.

Es cierto que cuando las edades de las cámaras magmáticas son recientes (menores de un millón de años) y de grandes dimensiones bajo ciertas condiciones llega a favorecer la formación de yacimientos geotérmicos de alta entalpía. Por lo contrario, cuerpos magmáticos con edades de varios

millones de años y de tamaño menor son los que generalmente no reúnen condiciones favorables para la formación de tales yacimientos pero en este caso pueden contribuir en los de media y baja entalpía.

Para esta información surgen características de los campos geotérmicos susceptibles de aprovechamiento para la producción de vapor cuyo fin es generar electricidad o bien agua caliente para fines no energéticos, los cuales son:

1. Un conjunto de rocas permeables que da lugar al yacimiento, con las que se permite la circulación de fluido geotérmico a profundidades económicamente explotables.
2. Una anomalía térmica (Incremento de la temperatura con respecto a la profundidad en el cual es muy superior al estándar de $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$).
3. Una cobertura impermeable del yacimiento que impida la pérdida de calor por la circulación de fluido geotérmico hacia la superficie.

Con lo mencionado anteriormente deben considerarse áreas potencialmente geotérmicas aquellas donde permanecen localmente grandes volúmenes de magma dentro de la parte superior de la corteza continental o en las cuales existen manifestaciones volcánicas que indican la presencia de cámaras magmáticas. Estas áreas se caracterizan por la presencia de volcanes poligénicos con productos andesíticos, dacíticos, riolíticos, o calderas y complejos dómicos ácidos.

La mayoría de los campos geotérmicos en América Latina están localizados en zonas de vulcanismo cuaternario, constituidos por productos diferenciados (andesitas, ácidas, riolitas o dacitas) relacionados con una intrusión ígnea bastante superficial (entre 10 y 15 km) que representa la cámara magmática de centros volcánicos recientes o activos. Con respecto a los yacimientos geotérmicos, deben estar formados por rocas permeables con suficiente volumen y entonces así asegurar la explotación prolongada de fluidos termales, estos deben estar localizados dentro de un sistema hidrológico que permita la carga hidráulica del área en explotación. Nos

brinda información concerniente al yacimiento los estudios estratigráficos y el levantamiento geológico estructural. Es importante determinar si el fracturamiento es debido a la tectónica activa (neotectónica), esta contribuirá a mantener abiertas las fracturas da reactivar las fracturas previas que pueden estar selladas por alteración hidrotermal. Cuando el yacimiento se ubica en rocas volcánicas, la permeabilidad en su mayoría es de tipo secundario ya que este tipo de rocas tienen baja porosidad primaria entonces solo es posible que lleguen a ser productoras de fluidos gracias a la incorporación de la permeabilidad secundaria de origen tectónico, en la mayoría de los campos la permeabilidad está en función del fracturamiento penetrante o por fracturas concentrada en zonas de falla. La permeabilidad de la roca evoluciona por efecto de esfuerzos tectónicos, por cambios térmicos y por procesos químicos. La deformación tectónica y la concentración térmica aumentan la permeabilidad; mientras que la expansión térmica, la deformación dúctil y la depositación química, tiende a sellar la roca. La capa sello de un yacimiento puede estar compuesta 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 por una roca cerrada por auto sellamiento debido a efectos prolongados de la actividad geotérmica o por mecanismos de precipitación química que generan los fluidos hidrotermales.

3.3.-Etapa de perforación.

Perforación Exploratoria de Diámetro Reducido.

Antes de la perforación exploratoria profunda es aconsejable la ejecución de pozos someros de gradiente para ampliar la información del subsuelo y disminuir el riesgo económico de una perforación profunda este es un método directo de exploración, mediante mediciones del gradiente térmico y la conductividad térmica de las rocas correlacionadas aporta información adicional que ratifique la hipótesis de la presencia de una anomalía geotérmica para que se determine la zona de interés. Se toma la decisión de perforar pozos exploratorios de diámetro reducido de propósito múltiple que

tiene la ventaja de determinar las condiciones reales del subsuelo a mayor profundidad que la de los pozos de gradiente. Entre más profundas sean estas perforaciones (500 a 1500m) existe la posibilidad de conocer la composición de las rocas de la capa sello, las del yacimiento, su respectiva temperatura y el panorama de producción.

Pozos de Gradiente.

Su objetivo es definir en tres dimensiones las temperaturas en la parte superior de una anomalía termal, debe ayudar a complementar, evaluar y detallar los estudios geocientíficos realizados durante la primera fase de exploración de prefactibilidad y en algunos casos puede ayudar a determinar la ubicación, profundidad y el número de pozos exploratorios profundos que deben de perforarse en la etapa de factibilidad. La perforación de estos pozos se ha convertido en una herramienta adicional en la exploración, la profundidad varía entre 50 m y un poco más de 100 m. El diámetro de la perforación de los pozos será menor que el de un pozo exploratorio profundo.

La perforación se realiza con equipo rotatorio y a veces se emplea un equipo con sistema de cable de muestreo de núcleos.

Durante la perforación de los pozos de gradiente y al finalizar, se registrarán las temperaturas a diferentes intervalos, al terminar la perforación el pozo debe ser entubado con tubería PVC, rellenar el espacio anular con un material impermeable (arcilla o cemento) para evitar el movimiento de fluidos.

Durante las primeras perforaciones de gradiente térmico es necesario correlacionar los estudios superficiales con los datos que aporten los pozos, para poder corregir cierta base de datos.

Perforación Profunda de Diámetro Reducido.

Cuando la información de superficie y con el gradiente de temperatura no es favorable la interpretación en forma confiable es conveniente la perforación de pozos de propósito múltiple para obtener información del subsuelo y si es

posible del propio yacimiento que refuerce o se pueda modificar el modelo conceptual del sistema geotérmico. El objetivo de pozos múltiple es determinar las condiciones del subsuelo a mayor profundidad que los pozos de gradiente, entre más profunda sea la perforación (500 a 1500m) se debe definir la composición litológica de la capa sello, la del yacimiento y cuando es alcanzado el yacimiento por lo regular no producen.

3.3.1.-Selección de sitios para el desarrollo de la perforación.

El presupuesto para la perforación exploratoria está limitado, es importante hacer una selección adecuada.

Los criterios para la perforación consta de análisis estratigráfico, geofísico, geoquímico, geológico-estructurales.

En cada zona se establece el plan resaltando la profundidad, ubicación y objetivos que deben incluirse también los sitios alternos a la perforación

Técnicas de perforación.

1. Perforación por rotación con muestreo continuo (toma de núcleos de roca) con barreno de diamante o de carburo de tungsteno.
2. Perforación por rotación con barrenas de insertos o tricónicas.

Las dos técnicas usan normalmente lodos tipo bentónico como medio de acarreo de los recortes de la roca y mantener la estabilidad en la columna, dar lubricación a la barrena.

La primera técnica normalmente se usa en pozos de diámetro reducido en el cual se desea obtener núcleos continuos de la roca que se está perforando, por lo general es caro su realización en pozos profundos o de diámetro grande y se utiliza en la etapa de prefactibilidad.

La segunda técnica se realiza en pozos de diámetro de producción comercial. Esta técnica nos permite con mayor efectividad y a menor costo mayor profundidad con un diámetro mayor, pero esta no permite obtener núcleos

de la roca. En ocasiones se presenta la combinación de ambas técnicas lo cual resulta costoso.

En esta segunda existen tres subdivisiones:

1. Perforación rotatoria con lodo. Este es el más común debido a su versatilidad a fin de mantener la estabilidad de las paredes del pozo durante la perforación, lubrica la barrena y transportar los recortes.

2. Perforación rotatoria usando aire, lodos o agua aireada. Se utiliza en yacimientos dominados por vapor con el fin de evitar el daño a la formación productora. La ventaja es que aumenta la velocidad de penetración de la barrena pero a su vez provoca el ataque del H₂S y el oxígeno sobre la tubería lo que erosiona más rápido los equipos tubulares.

3. Perforación rotatoria direccional Permite perforar varios pozos desde una sola plataforma, permite interceptar con mayor probabilidad fallas o sistemas de fracturas verticales o subverticales, permite investigar en varias direcciones desde un mismo pozo. En el caso del pozo modelo se aprecia el plan direccional con sus respectivas tuberías de revestimiento, los metros desarrollados y el respectivo ángulo de construcción.

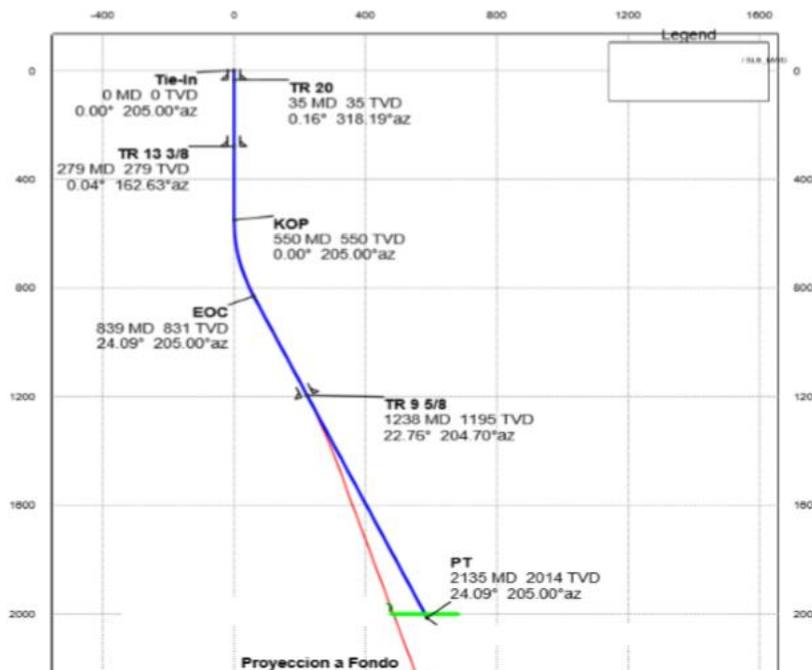


Figura 10. Plan direccional del pozo modelo, Fuente: Confidencial (2011).

Cabe señalar que en la perforación del pozo se requiere realizar pruebas de solubilidad de sólidos utilizando diferentes sistemas (HCl 10%, MUD ACID 12% HCl 6% HF entre otros).

El objetivo de estas pruebas es tener datos del comportamiento de los recortes con los sistemas mencionados y con ello seleccionar el fluido de tratamiento adecuado para los trabajos de estimulación.

La prueba se realiza mediante el método gravimétrico, el que permite determinar de forma cuantitativa, la cantidad de sólidos que se disuelven en el sistema. Figura 10, Plan direccional del pozo modelo, Fuente: Confidencial (2011).

3.4.-Asentamiento de tuberías.

En el diseño de los primeros pozos se debe hacer un análisis de las alternativas en función de las profundidades que se deseen alcanzar, combinando diámetros, tubulares, gastos de producción y número de pozos con el fin de definir la combinación de tuberías más convenientes y económicas.

Una vez que se definen los diámetros en agujero descubierto y su respectiva tubería de producción, se define los diámetros de la tubería de ademe y anclaje, así como las tuberías superficiales, las conductoras y las tuberías cortas que se pueden colocar frente a la zona de explotación.

En la calidad de las tuberías se debe considerar dos factores fundamentales.

1. La resistencia de las aleaciones que se usan para diferentes tipos de corrosión y los efectos de fragilización por anhídrido sulfuroso (agente antioxidante).
2. Capacidad mecánica de la tubería soportar colapso, deformación y esfuerzos de tensión compresión que se origina por los efectos de cambio térmico.

Accesorios para cementar las tuberías:

1. Los que están sometidos a temperaturas normales.

2. Aquellos que están sometidos a temperaturas previstas del yacimiento. En los primeros se emplean accesorios convencionales petroleros mientras que en el segundo se usan herramientas y accesorios con diseños especiales que enfrentan altas temperaturas y acción corrosiva de los fluidos geotérmicos

Se usan cementos a fin de enfrentar dichas condiciones entre los que se tienen tipo G y H, normas API. Antes de la cementación se realiza un muestreo, el agua y los aditivos para su evaluación a la temperatura y presión a las que se someten.

3.4.1.-Geopresiones.

Son las presiones que se relacionan con la corteza terrestre tales como la presión de sobrecarga, presión de formación y presión de fractura.

La interpretación de geopresiones nos permite:

- Evitar atrapamientos.
- Establecer la densidad correcta del fluido.
- Maximiza la velocidad de perforación.
- Reducir los efectos en zonas sobre presionadas.

La presión de sobrecarga es la resultante del efecto que produce el peso de las formaciones superiores sobre las que se encuentran debajo de ellas.

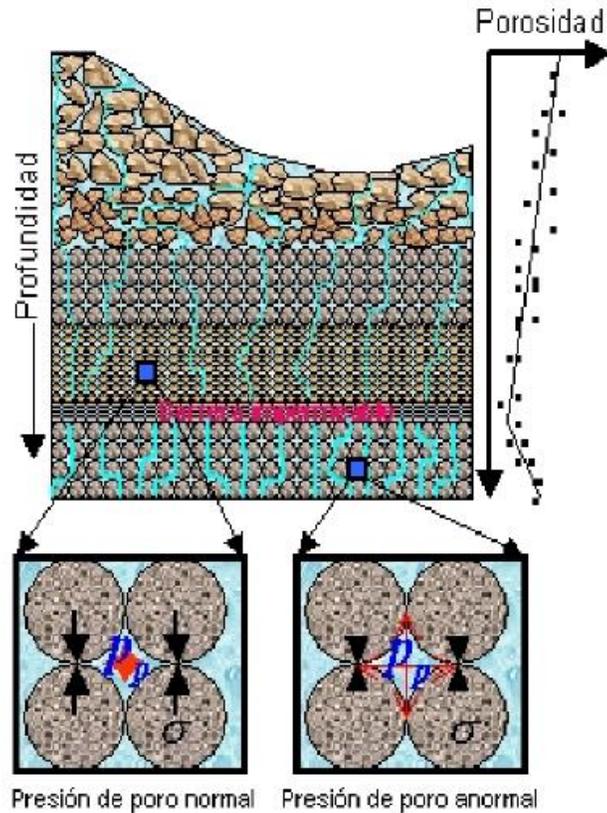


Figura 11. Proceso de compactación y sedimentación,
 Fuente: PEMEX (2008) Guía de predicción geopresiones.

La presión de yacimiento se conoce como presión de formación o presión de poro (presión interna a la cual se encuentra confinados los fluidos en sus poros) y es la fuente de energía que los hace fluir hacia el exterior de dicha roca. Esfuerzo efectivo de la matriz Es el esfuerzo generado por el contacto grano a grano de la matriz de la roca, el cual está en función de la sobrecarga a la profundidad de interés. Presiones anormales Durante la depositación normal la presión de sobrecarga incrementa conforme los sedimentos se acumulan, el incremento de sobre carga compacta los sedimentos resultado de un decremento de la porosidad, el proceso de compactación ocurre a medida que el agua de formación es expulsada del espacio poroso y el esfuerzo de sobrecarga soportado por dicha agua de formación es transferido a la matriz de la roca reduciendo la porosidad, por tal motivo la permeabilidad de la formación es suficiente para permitir la migración de fluidos causada por la reducción de la porosidad. La presión de poro es normal y se considera aproximadamente igual a la presión hidrostática

ejercida por una columna de agua de formación a la profundidad de interés. Las zonas de presiones anormales se originan durante el proceso de depositación y compactación, formándose una barrera impermeable impidiendo la liberación del agua de formación. Esta barrera impermeable se formó debido a un ritmo más rápido de sedimentación y compactación consecuentemente entonces la porosidad difiere de la tendencia normal.

Entonces para realizar el asentamiento de las tuberías de revestimiento se tiene que realizar un gráfico que involucre la presión de fractura y presión de poro a lo largo de la profundidad, conocida como ventana operativa.

Determinación de la Presión de Sobrecarga:

$$S = \frac{\sum_{n=1}^n \rho_{Fi} (D_i - D_{i-1})}{10}$$

Donde:

S: Presión de sobrecarga ($\frac{g}{cm^3}$)

ρ_{Fi} : Densidad promedio de la formación ($\frac{g}{cm^3}$)

D_i : Profundidad de interés (m)

ρ_{Fi} se determina por medio del registro de densidad o con una correlación empírica.

$$\rho_{Fi} = 0.0701 * V^{0.25}$$

Donde:

V: Velocidad del intervalo ($\frac{m}{seg}$) .

Posteriormente definir los intervalos de lutitas limpias y generar la línea base de lutitas.

Determinación de la Presión de Poro: Método del Exponente (Jorden y Shirley).

$$dc = \frac{\log\left(\frac{R}{18.29N}\right)}{\log\left(\frac{12W}{454d_b}\right)}$$

Donde:

R: Ritmo de penetración (m/h).

N: Revoluciones por minuto de la rotaria (RPM).

W: Peso sobre barrena (toneladas).

d_b : Diámetro de la barrena (pulgadas).

dc: Exponente (adimensional).

Para corregir el exponente dc por cambios de densidad de lodo, Rehm y McCendon propusieron la siguiente ecuación:

$$dc_{mod} = dc \frac{\rho_{FF}}{\rho_{lodo}}$$

Donde:

ρ_{lodo} : Densidad equivalente de circulación del lodo durante la perforación

ρ_{FF} : Densidad del fluido de formación.

1. Se tiene que calcular dc y el exponente modificado.
2. Se grafica profundidad vs exponente dc modificado.
3. Trazar la línea de tendencia hasta la profundidad total.
4. Finalmente se calcula la presión de poro.

$$p_{p(D)} = S_{(D)} - (S_{(D)} - P_{P(Dn)}) \left(\frac{dc_{mod}}{dc_{mod n}} \right)$$

Donde:

(D) : Gradiente de sobrecarga.

(Dn) : Gradiente normal de poro.

$dcm\ o\ n$: Es la tendencia normal.

Determinación de la Presión de Fractura.

Método de Eaton:

$$P_{FR(D)} = P_{P(D)} + \left(\frac{V}{1-V}\right)(S_{(D)} - P_{P(D)})$$

Donde:

V : Relación de Poisson (Propiedad mecánica que relaciona deformación lateral de la roca con respecto a su deformación axial)

$$V = 0.0645 * \ln(D) - 0.0673$$

Una vez que se obtiene Presión de poro y Presión de fractura a la profundidad de interés, se obtiene la ventana operativa, la cual se debe administrar para determinar el número de etapas de la perforación de manera segura optimizando la profundidad de las zapatas.

3.4.2.-Cementación.

Los cementos se definen como aquellas sustancias adhesivas :o artificiales, con las que se puede formar masas plásticas, que son capaces de unir entre sí a fragmentos o masas de materiales sólidos con una distribución granulométrica determinada. En diferentes industrias se utiliza una clasificación. La clasificación de los cementos se realiza para promover una consistencia entre los diferentes fabricantes, con especificaciones bien definidas. Se conocen dos tipos de clasificación:

1. API (American Petroleum Institute).

2. ASTM (American Society of Testing and Materials).

En lo sucesivo nos referiremos exclusivamente al API. El método más usado y aceptado (Método Bogue data desde 1929) para expresar las cantidades relativas de las fases principales del clinker, está se basa en cálculos relativos a la composición de los óxidos. Se basa en el equilibrio que debe existir entre los diferentes componentes de un cemento. Actualmente hay ocho (8) clases de cementos API. Se clasifican de acuerdo a la profundidad de colocación, la temperatura y presión a la que estarán expuestos.

Clase	Especificación
A	(0-8000'). no tiene requerimiento especial. Equivale al tipo ASTM I de construcción
B	(0-8000'). Es similar al ASTM II y tiene menor cantidad de C3S que el "A". Disponible en MSR y HSR
C	(0-8000'). Util cuando se requiere alta resistencia inicial. Tiene alto contenido de C3S. Disponible en los tres diferentes grados de resistencia a los sulfatos. Similar al ASTM III
D	(8000- 10000). Se recomienda en condiciones de presión y temperatura moderadas y/o altas. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos MSR y HSR. La relación área/volumen es alta.
E	(10000"-14000'). Se recomienda en condiciones de presión y temperatura altas. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos MSR y HSR.
F	(10000"-14000'). Se recomienda en condiciones extremas de altas temperatura. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos MSR y HSR.
D	(8000- 10000). Se recomienda en condiciones de presión y temperatura moderada y/o alta. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos MSR y HSR.
	Estos tres son conocidos como "cementos retardados", tienen una cantidad reducida de reactivos de rápida hidratación CS y CA.
G y H	(0-8000'). Estos cementos estan desarrollados para ser utilizados con aditivos (aceleradores y retardadores) para cubrir un amplio rango de temperatura. No debe agregar glycol ni acetato durante la manufactura, solamente se debe agregar yeso y agua. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos, MSR y HSR. Químicamente el G y el H son idénticos la diferencia esta en el tamaño del grano, el H es mas grande, como se evidencia por su menor requisito de agua

Figura 11. Clasificación de cementos, Fuente: PEMEX (2012) Técnicas y operaciones de cementación de pozos petroleros.

Clase A y B – Uso a poca profundidad. Composición 50% C3S, 25% C2S, 10% C3A, 10% C4AF

Clase C – Produce alta resistencia temprana debido al alto contenido de C3S.
Clase D, E y F – Cementos retardados debido a una molienda gruesa o inclusión de retardadores orgánicos (lingsulfanatos).

Clase G y H – Para uso general, compatible con la mayoría de los aditivos y puede usarse en un vasto rango de temperaturas y presiones. H es más grueso -mejor retraso en pozos más profundos.

Clase G es el tipo de cemento comúnmente utilizado.

Es cierto que la limitación de la cementación en pozos geotérmicos es la temperatura debido a las condiciones en que se encuentra el sistema impide poder cementar las tuberías en el fondo del pozo ya que el cemento fragua antes de tiempo y no se cumple con el objetivo. En nuestro pozo modelo las Tuberías de Revestimiento se encuentra cementación primaria, su objetivo fue proveer un buen sello hidráulico a través de espacio anular hasta superficie y aislar los mantos freáticos. Se presenta pérdidas de circulación por los cuales se implementó el tapón por circulación.

OD de TR (pulg)	Profundidad medida de Zapata (m)
20"	.4.76
13 3/8"	279.33
9 5/8"	1195.29
7"	2433.02

Figura 13. Profundidad y diámetro de zapata,
Fuente: Confidencial (2012).

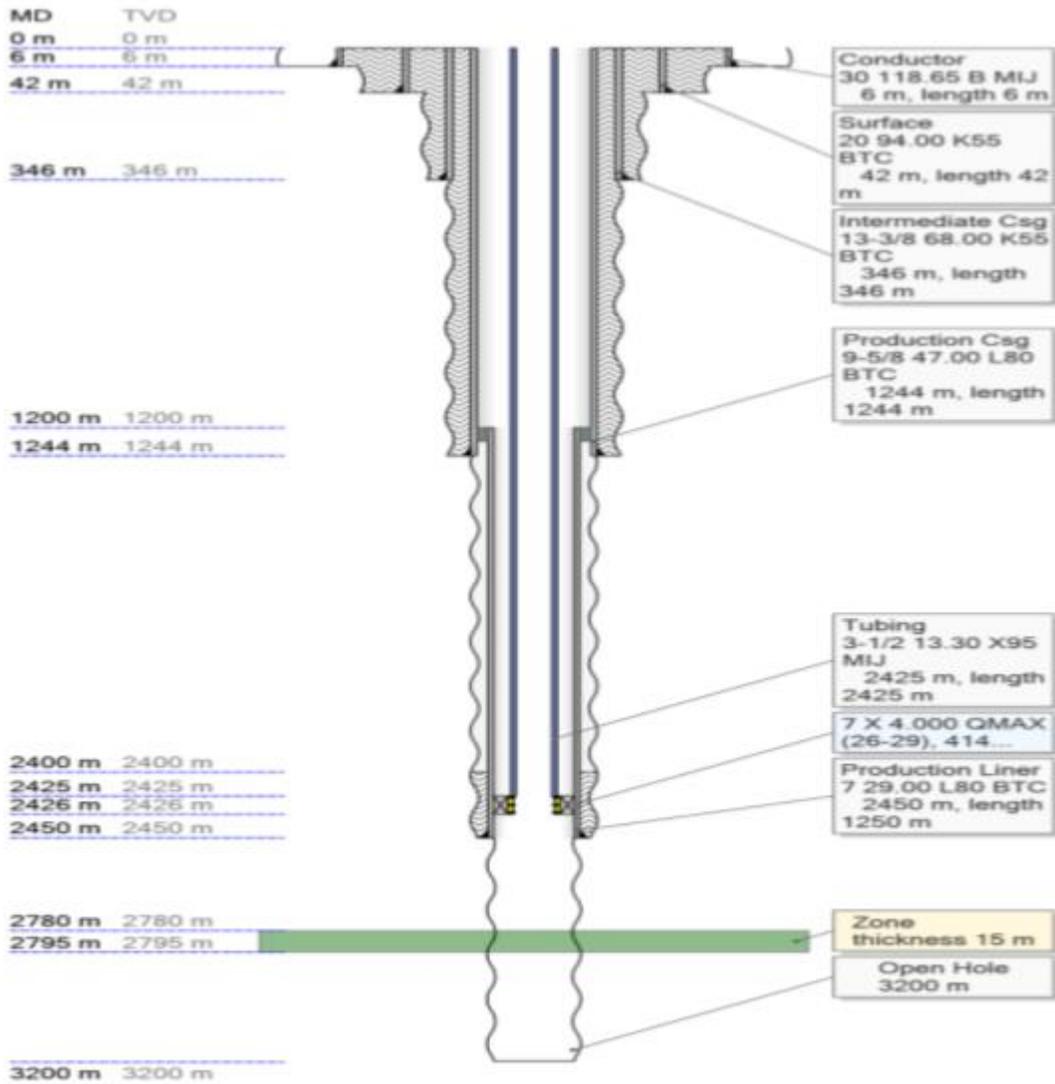


Figura 14. Información del Pozo, Fuente: Confidencial (2012).

En la cementación se opera el sistema sónico-densidad variable a fin de tener un panorama de la calidad de adherencia y saber que inconvenientes se presentan a las profundidades con respecto a la formación, espacio anular y tubería.

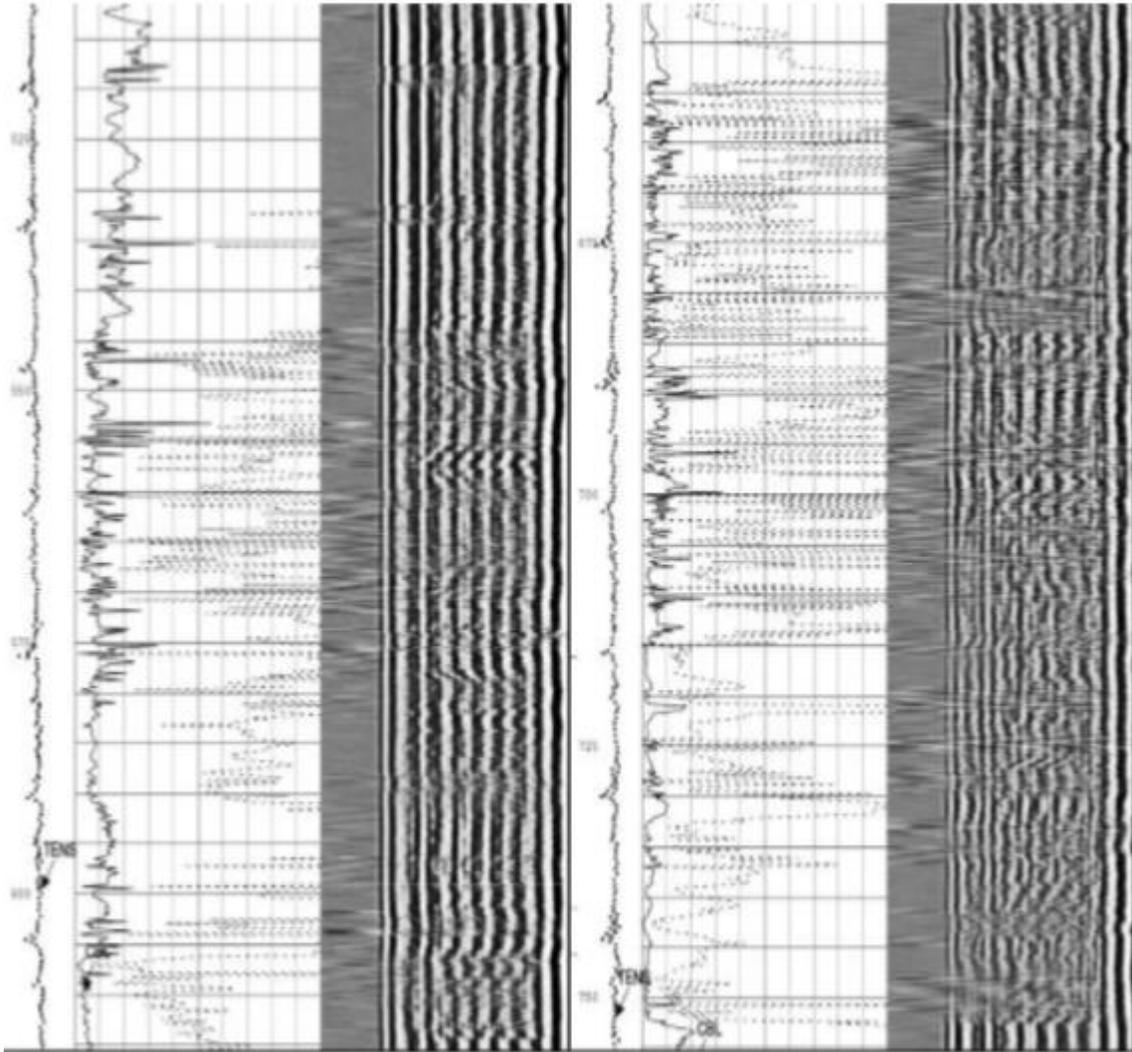


Figura 15. CBL-VDL, 3er. Etapa, Fuente: Confidencial (2012).

3.5.-Registros durante la perforación

Durante la perforación en la etapa de prefactibilidad es raro obtener registros geofísicos a no ser el de temperatura, estos son necesarios al igual que el de presión vs profundidad en cada intervalo; principalmente a partir de los niveles en los que se estima que el pozo se aproxima a la zona de interés. Un indicador de la proximidad en la zona productora es proporcionado por las temperaturas que alcanza el fluido de perforación y por la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del fluido. Estos registros es conveniente realizarlos en series de cuatro o más registros para cada profundidad seleccionada y debe de tenerse un tiempo entre ellos de 4 a 6, horas con el objetivo de permitir que la temperatura por detectar aumente entre

corridas, una vez realizado esto se determina una aproximación de la temperatura estabilizada en la formación (aquella que existe en el punto de medición antes de la perforación del pozo). Existe una forma de calcular la temperatura estabilizada en base a los datos de temperatura que se obtienen a una profundidad determinada. Al tener la temperatura estabilizada a diferente profundidad, se puede construir el perfil de temperatura a lo largo del pozo, contando con datos de varios pozos.

Por su parte, los registros de presión permiten determinar la profundidad a la que se encuentra el nivel estático del fluido del pozo durante la perforación y así alcanzar la posible zona del yacimiento, se puede contribuir a determinar la permeabilidad y la posibilidad de producción de la formación mediante pruebas de inyección-recuperación.

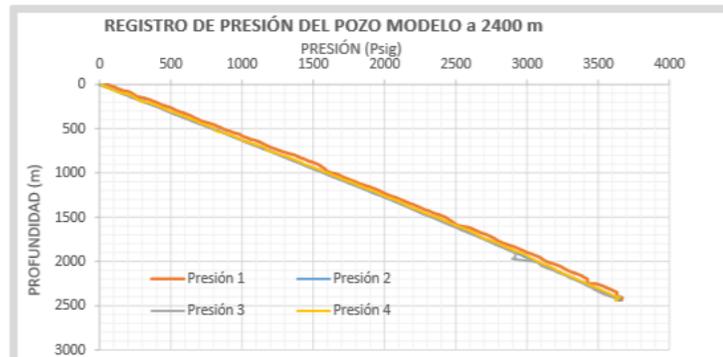


Figura 16. Registro de presión, Fuente: tesis desarrollo de pozos geotérmicos.

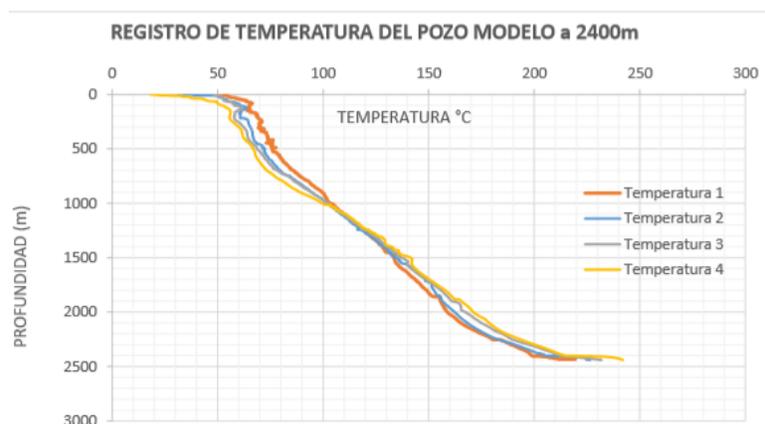


Figura 17. Registro de temperatura, Fuente: tesis desarrollo de pozos geotérmicos.

Durante la etapa de factibilidad los estudios geofísicos en la etapa de perforación contribuyen a la reevaluación y reinterpretación de los datos geofísicos de superficie utilizando los datos obtenidos de los pozos de exploración profunda y con ello se podrá obtener un mejor modelo estructural del subsuelo al igual que se podrá cuantificar el grado y alcance del fracturamiento y alteración hidrotermal.

Tomando en cuenta los datos adquiridos en estudios preliminares y en conjunto con los registros se contribuye a la diferenciación de regímenes térmicos conductivos, así como indicar zonas fracturadas y permeables con flujos de agua caliente o fría.

La interpretación de los registros se presenta en informes en donde se describe las metodologías que se implementan para recopilación, procesamiento e interpretación.

En la perforación estas herramientas sirven de apoyo a fin de definir las condiciones petrofísicas y térmicas de las unidades litológicas al igual que se determinan las condiciones de cementación de las tuberías en el proceso de construcción y terminación. Los registros que se operan en agujero descubierto a lo largo del pozo con fin de determinar los parámetros de la formación como son:

- Litología: Registro de rayos gama, potencial espontáneo, resistividad.
- Porosidad, permeabilidad y saturación: Registro sísmico, densidad, neutrón.
- Temperatura: Registro de temperatura.
- Índice de fracturamiento: Registro sísmico, densidad, microregistro, calibrador de diámetro de pozo, echados, temperatura y calibrador.
- Condiciones de tubería: Sísmico de cementación-densidad variable, temperatura y calibrador.

La mayoría de las compañías cuentan con herramientas para trabajar hasta 200°C, pero en los campos se puede encontrar con temperaturas superiores a los 250°C que ocasionan daños a las sondas y cable de registro. Para evitar dicho daño, se requiere contar con información sobre la temperatura máxima esperada.

Existe una herramienta como el The Protherma™ PTS-GR/CCL, que proporciona una correlación geológica y de tubería / carcasa exacta para la medición de la presión, temperatura y flujo. La profundidad de pozo y la correlación geológica se logran con un sistema de rayos gama y un localizador de coples (CCL). Este puede trabajar a una temperatura de 350°C y presión de 18000 Psi.

3.6. Indicadores de zonas permeables.

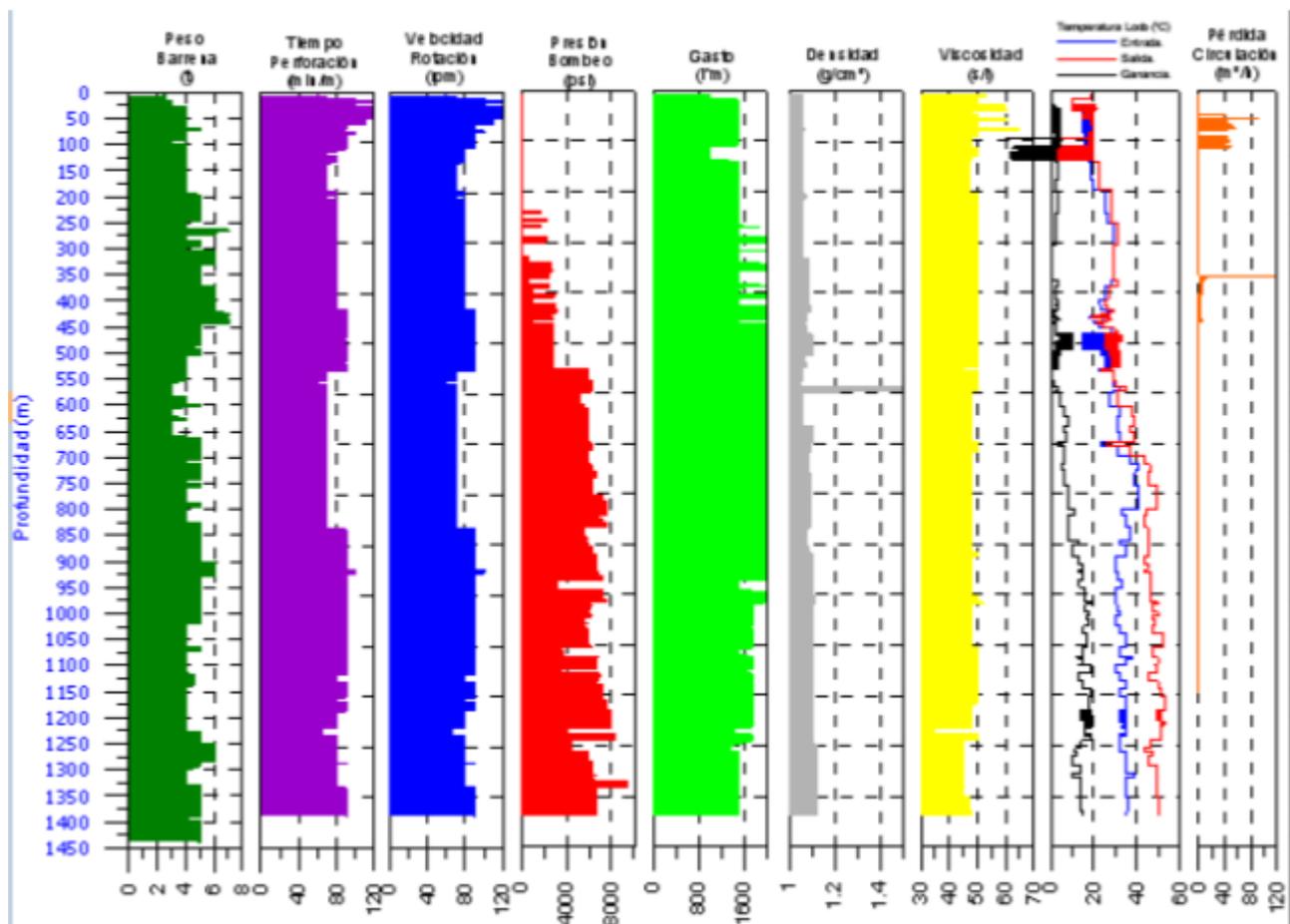


Figura 18. Indicadores de permeabilidad, Fuente: Gustavo Ortega (2017), Conceptos básicos de ingeniería de yacimientos geotérmicos.

La pérdida de circulación se puede presentar en las primeras etapas debido a que las formaciones no son tan consolidadas, es importante mencionar que en las etapas posteriores se debe a zonas con cavidades o que se dañaron conforme se fue atravesando la formación.

Conforme se va perforando, la temperatura es un factor determinante para las condiciones del sistema. Un punto importante es la cementación de la tubería de revestimiento, ésta se ve limitada por la temperatura que se maneja en los sistemas geotérmicos por el fraguado del cemento, máximo 150 °C es lo que se puede manejar.

El gasto de inyección se debe mantener aceptable por la ventana operativa, debido a que se maneja rangos de presión de poro y presión de fractura. Conforme se van atravesando las formaciones, el aumento de presión en la presa se incrementa, a fin de tener un ciclo completo de fluido en otras palabras su retorno a superficie.

3.7.-Terminación de pozos geotérmicos.

Estos se clasifican en tres tipos:

- Agujero descubierto sin ademe.

Este se puede utilizar en formaciones estables y aun en la explotación del recurso no originan derrumbes ni desprendimientos que puedan ocasionar daño al pozo, al igual que no producen una cantidad excesiva de material detrítico dado que repercuten en el buen funcionamiento de los equipos superficiales, la turbina o los sistemas de separación y conducción del fluido.

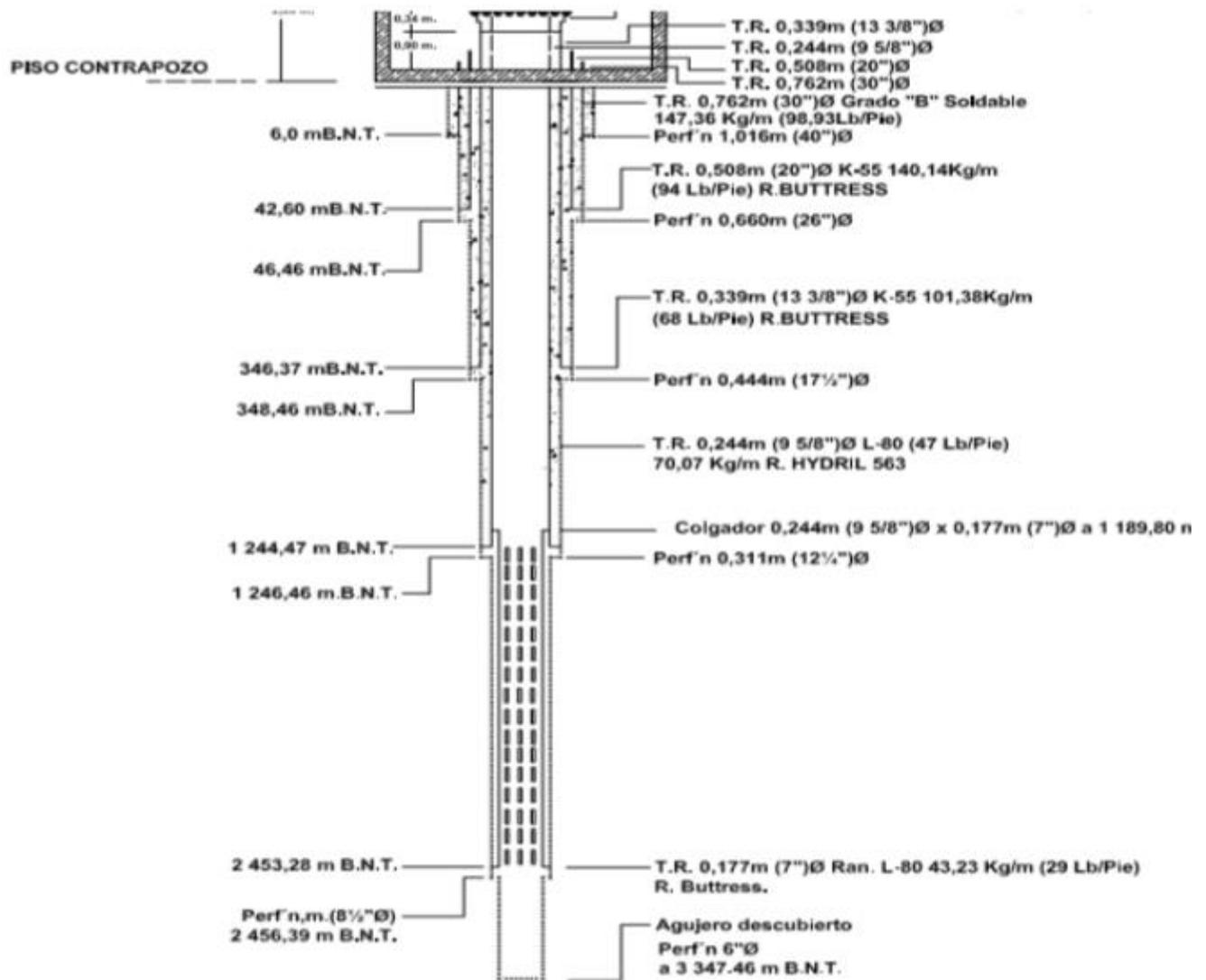


Figura 19. Condiciones finales, Fuente: Confidencial (2012).

- Tubería colgada ranurada.

Esta se recomienda en pozos de formaciones volcánicas debido a que en su mayoría son poco estables, normalmente la tubería ranurada se cuelga de la tubería cementada profunda por medio de un colgador especial.

- Tubería cementada al fondo con disparos.

Cuando se utiliza esta opción se debe perforar posteriormente la tubería con un sistema de pistolas, esta terminación se usa en pozos cuya producción es a través de rocas de permeabilidad primaria como son las areniscas como

rocas sedimentarias, a favor de este procedimiento, se permite seleccionar los intervalos que deben quedar descubiertos. Un punto contrario es la excesiva caída de presión que se interpreta como un daño, generado por el paso de los fluidos por los agujeros perforados lo que genera incrustación o depositación de sólidos que acorten la vida útil del pozo. Este tipo de terminación no se recomienda en pozos perforados en rocas ígneas fracturadas.

3.8.-Estimulación de un pozo

Las técnicas de estimulación de los pozos mejora la productividad o inyectividad del pozo, la cual consiste en introducir a la formación rocosa materiales cuya función es establecer o restablecer condiciones adecuadas para el flujo de fluidos a través de la formación.

La productividad del pozo se puede incrementar sobremanera con la aplicación de los fracturamientos.

Además del abatimiento de la presión que se presenta en un yacimiento debido a la explotación existe otro motivo por el que los pozos pierden productividad el cual es que en sus tuberías se presentan incrustaciones con el paso del tiempo, esto se produce por depósitos de carbono, sílice o de sulfuro según sea las características químicas del fluido producido. Un mantenimiento se refiere a la limpieza o desincrustación de las tuberías del pozo para poder lograr obtener las condiciones originales de producción. Algunos pozos requieren ser intervenidos para poder corregir fallas mayores que afectan la producción o ponen en riesgo al personal y se pueden presentar diferentes escenarios, por ejemplo:

- Corrosión de tuberías productoras.
- Cementaciones deficientes.
- Colapsos en la tubería de producción.
- Fracturamiento de las soldaduras.
- Sellamiento de la zona productora.

Las reparaciones de los pozos son más costosas y frecuentes conforme la temperatura de yacimiento y su profundidad es mayor. Daño a la formación Este es un concepto particularmente importante debido al efecto negativo que tiene sobre la productividad de los pozos. El daño es la obstrucción parcial o total y natural o inducida que se refleja en la roca al flujo de fluidos de la formación al pozo o del pozo a la formación, con esto se concluye que el daño a la formación ocasiona la alteración de sus propiedades petrofísicas como son permeabilidad y porosidad. Clasificación del daño según Grubb-Martin:

Daño somero:

- Partículas del lodo de perforación y otros sólidos.
- Hinchamiento o dispersión de las arcillas en la formación.
- Aguas incompatibles.
- Parafinas e incrustaciones.

Daño profundo:

- Tratamientos forzados de inhibidores de incrustación.
- Hinchamiento y/o dispersión de las arcillas por baja salinidad del agua de inyección.

Clasificación del daño según Roberts-Allen:

Daño causado por sólidos:

- Materiales para dar peso.
- Materiales para dar viscosidad.
- Materiales para controlar la pérdida de fluido como partículas de cemento.
- Oxido en las tuberías por incrustaciones precipitadas.
- Sólidos triturados provenientes de la perforación.

Daño causado por el filtrado del fluido:

- Solución acuosa con cationes, aniones y surfactantes de diferentes tipos y concentraciones. En pozos geotérmicos existen tres tipos de estimulación geotérmica las cuales son:
- Estimulación térmica.

El procedimiento consiste en inyectar durante tres horas el gasto que acepte el pozo de preferencia con bombeo, con presiones de cabezal de entre 10 y 20 bar. Concluyendo el tiempo mencionado se suspende la inyección y se cierra el pozo con lo que se mantiene 8 horas el pozo en reposo. Se repite el proceso anterior durante tres días, con monitoreo continuo de la inyección al pozo. Se realizan tres pruebas transitorias de presión y se evalúa la permeabilidad por el espesor y el factor de daño al pozo.

El comportamiento de este tipo de prueba de inyección, mientras mayor sea el gasto de inyección mayor es la presión que se registra a la profundidad de la prueba y al dejar de inyectar se alcanza la misma presión después de un tiempo de reposo y así se permite que se equilibre la presión del yacimiento con la del pozo.

- Estimulación química.

Este procedimiento tiene como objetivo que con un tratamiento ácido a la matriz se pueda remover los minerales que se encuentran en los alrededores del pozo, en las zonas de aporte y dentro del pozo en las zonas de flasheo o ebullición, por lo que se debe tener como resultado una mejor permeabilidad y capacidad de producción. Primero se reconoce el pozo bajando la tubería flexible, la estimulación ácida empezó con la inyección del ácido para lo que se conoce como prelavado con el objetivo de disolver productos ferrosos y material carbonato que pudiera precipitar materiales insolubles, después de la etapa de prelavado, se inyecta una mezcla de ácidos para el lavado principal. Después de esto; se procede al post-lavado cuyo objetivo es actuar como una transición o separación entre la mezcla de ácidos del lavado principal y la salmuera que después fluye desde la formación y reduce la

futura precipitación de minerales indeseables. Este tipo de estimulación se recomienda en pozos perforados con lodo y que presentan fuertes pérdidas de circulación.

- Estimulación física.

- El Fracturamiento Hidráulico consiste en el rompimiento de la formación productora, con un fluido inyectado mayor que el que pueda admitir matricialmente la roca. La inyección continua para transmitir la presión hidráulica y así permitir ampliar y extender la fractura cuando esta por alcanzar la amplitud tal que no impida el paso de partículas sólidas de tamaño establecido, se agregan estas las que son acarreadas al punto donde se realiza dicho proceso y cuya finalidad es prevenir el cierre de la fractura generada y con ello establecer un conducto. El fluido que se emplea se conoce como fluido fracturante, y el sólido como apuntalante o sustentante. El objetivo de este tratamiento es facilitar la conducción de los fluidos dentro de la formación.

- En el pozo modelo se realizó la estimulación con cortador de chorro (Piña). Este tiene como objetivo ampliar el agujero y conectar o abrir posibles fracturas en dicha formación entonces es conveniente utilizar el porcentaje de retorno como indicador del grado de aceptación del pozo, ya que comunica las fracturas o la presencia de azolve/recorte en el pozo.

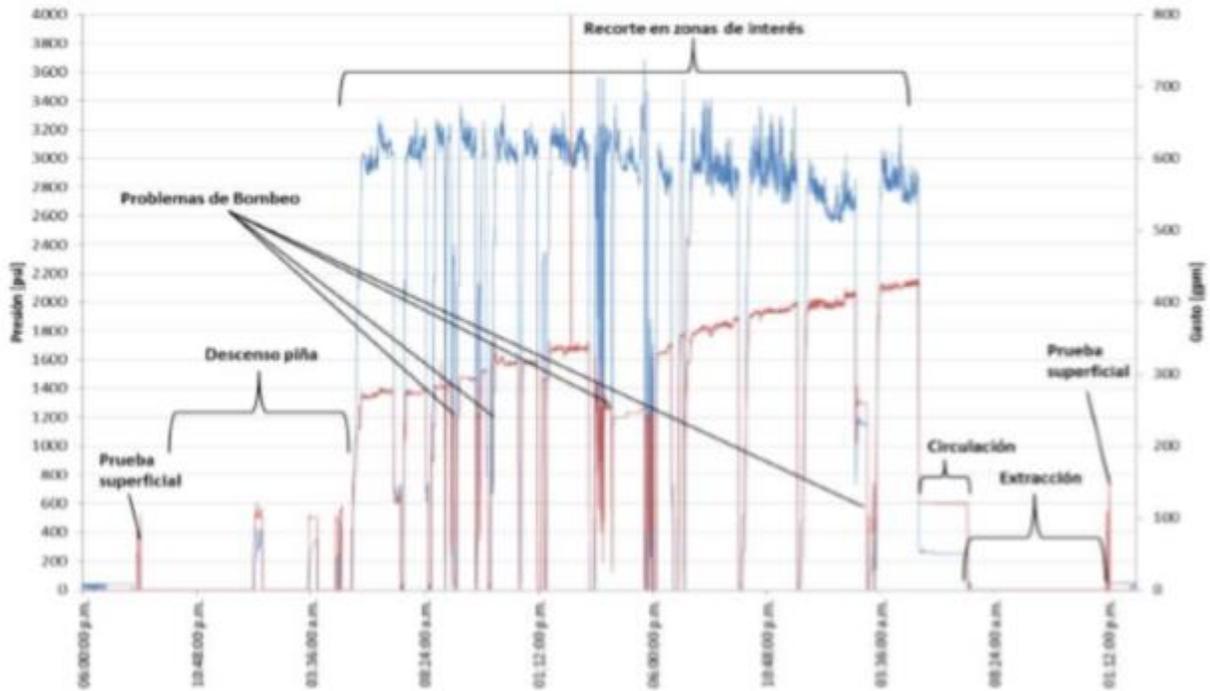


Figura 20. Proceso de corte por chorro, Fuente: Confidencial (2012).



Figura 21. Acontecimientos de interés Zona 3, Fuente: Confidencial (2012).

El comportamiento anómalo del porcentaje del flujo de retorno, puede ser por la presencia de cavidades que inicialmente no están conectadas de

manera hidráulica dado que se refleja en el retorno que se obtiene en superficie.

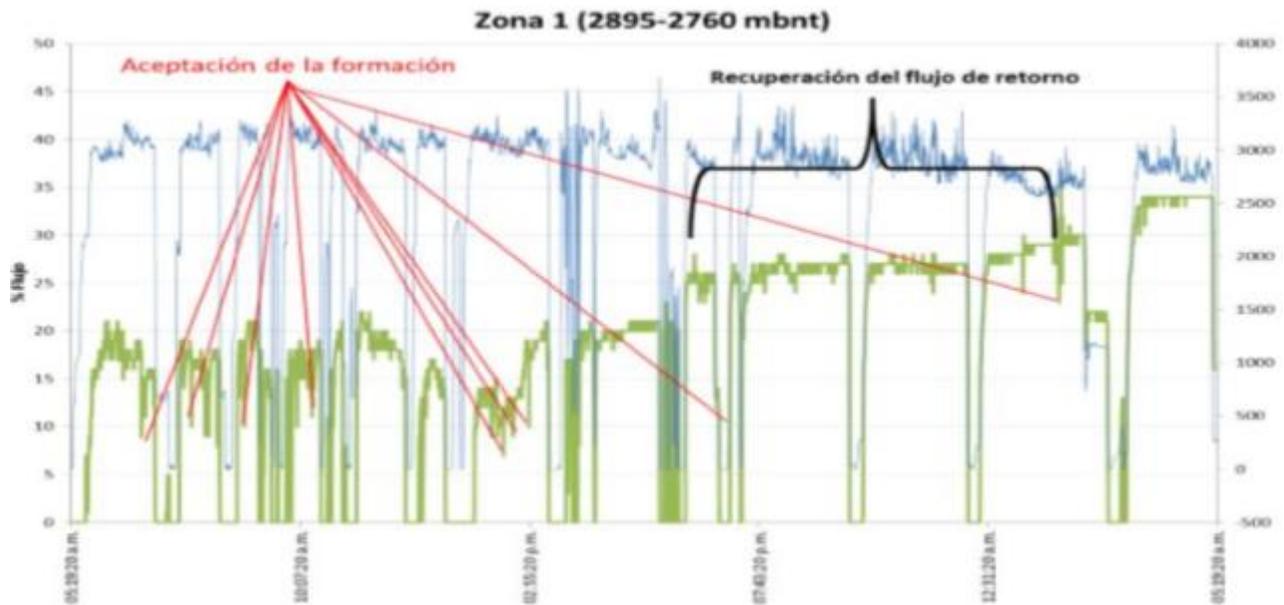


Figura 22. Flujo de retorno en Zona 1, Fuente: Grupo Enal (2012) Estimulación de pozo geotérmico con el uso de barrena cortadora de chorro.

En la zona uno se aprecia que sucede nuevamente el flujo de retorno y de forma pronunciada en las últimas etapas, esto se relaciona con la obturación en la formación por azolve.

Se concluye que el incremento de aceptación del pozo da a conocer que el uso de la piña aspersora es favorable para escariar la pared del pozo.

3.9.- Problemas durante la perforación de pozos geotérmicos.

3.9.1 Pérdidas de circulación.

El problema que acarrea mayores costos durante la perforación de pozos geotérmicos es la pérdida de circulación, la cual consiste en la pérdida parcial o total del fluido de perforación dentro del pozo, debida a que el fluido migra hacia las fracturas de la formación que están siendo perforadas. Se estima que del 3.5% al 10% del costo total de un proyecto geotérmico puede ser atribuido a pérdidas de circulación.

Las pérdidas por circulación pueden traer severas consecuencias:

- Si el fluido de circulación falla al realizar la tarea de transporte de recortes a la superficie, los recortes no transportados pueden provocar el atascamiento de la sarta.
- Las formulaciones especiales para altas temperaturas son muy costosas, por lo que la pérdida del fluido acarrearía altos costos de operación.
- En pozos geotérmicos, la zona productora es una zona de pérdida de circulación, por lo que las formaciones pueden ser dañadas causando decrementos en el potencial de producción.
- La pérdida de fluido reduce la carga hidrostática del fluido, permitiendo que los fluidos de formación entren al pozo causando descontrol en el pozo. Esto puede ocurrir en zonas productoras y no productoras.

Mitigar las pérdidas por circulación se puede lograr de diferentes maneras; perforar con pérdidas de circulación controladas, perforar con un fluido de perforación que tenga una carga hidrostática menor a la presión ejercida por los fluidos de formación (perforación bajo balance), agregar al fluido de perforación materiales fibrosos o partículas que sellen las zonas de pérdidas de circulación, o incluso pausar la perforación y tratar de sellar las zonas con algún material que pueda ser perforado posteriormente.

3.9.2.- Atascamiento de la sarta por presión diferencial.

Adicionalmente a los problemas de atascamiento de la sarta, debido a la mala circulación de recortes, también la tubería puede adherirse a las paredes del pozo debido a la diferencia de presión existente entre el fluido de perforación y los fluidos de formación. Muchos intervalos en formaciones geotérmicas están subpresionadas, lo cual significa que la presión de poro es menor que la presión ejercida por la columna hidrostática del fluido a determinada profundidad, causando un diferencial de presión que provoca que la tubería se pegue a las paredes del pozo.

Las pegaduras de tubería por presión diferencial impiden el movimiento rotatorio de la sarta e incluso el levantamiento de la misma, sin embargo se puede seguir circulando sin problema alguno.

Las maneras de evitar o combatir las pegaduras diferenciales son, emplear aditivos que reduzcan las pérdidas del fluido y ayuden a equalizar los

diferenciales de presión en la tubería y la pared; y el método denominado “último recurso” que consiste en bajar la densidad del lodo y por tanto la presión hidrostática, sin embargo esto puede traer serios problemas si la sarta está atascada debido a inestabilidad del pozo y no por presión diferencial.

3.9.3.- Inestabilidad del pozo.

La inestabilidad del pozo tiene muchos efectos, los cuales pueden ocasionar distintos problemas durante las operaciones de perforación.

El pozo puede estar mecánicamente inestable debido a que las formaciones están en su mayoría fracturadas, o pueden ser fracturadas durante la perforación • Las formaciones no consolidadas o poco consolidadas agravan el problema de limpieza de pozo, provocando la existencia de zonas de lavado y/o atascamiento de la sarta. • En pozos desviados existe un diferencial de esfuerzos aplicados, lo cual causa inestabilidad severa del pozo.

Estos problemas normalmente causan dificultades en el acarreo de recortes y complican las operaciones de cementación.

3.9.4.- Dificultades durante la cementación.

Debido a que las TR's en operaciones geotérmicas son cementadas completamente hasta la superficie, se presentan problemas para realizar un buen trabajo de cementación cuando se han reconocido zonas de baja resistencia y pérdidas de circulación dado que el cemento bombeado es más denso que el fluido de perforación y por tanto se crea una carga hidrostática mayor, causando pérdida parcial de la lechada o existencia de agua libre.

Para mitigar este problema, en ocasiones se emplean lechadas de cemento de baja densidad (menor a 1.5 gr/cm³). Las pérdidas de cemento pueden ser observadas cuando la lechada no alcanza la superficie, o una vez alcanzada desciende el nivel.

Cuando el cemento no llega hasta la superficie, el problema puede ser resuelto por medio de trabajos en superficie, cementando el espacio anular entre las TR's mediante una tubería de diámetro pequeño, sin embargo este

método está limitado por los centralizadores, dado que no puede pasar la tubería a través de ellos, por lo que es común que las primeras dos conexiones superficiales de las TR's no lleven centralizadores.

3.9.5.- Reducción del diámetro de pozo.

Todos los pozos geotérmicos son diseñados para ser terminados con determinados diámetros en la zona productora, sin embargo el programa de TR's se enfoca en la menor cantidad de TR's debido a sus elevados costos. Esto adquiere importancia particular en proyectos geotérmicos donde se requieren altos gastos de producción y por tanto grandes diámetros de tubería.

Si por causa de problemas inesperados se requiere de una corrida extra de TR's que difiere del diseño original, esto ocasionara que la terminación del pozo tenga un diámetro menor al planeado, repercutiendo en los gastos de producción. Para mitigar este problema en ocasiones la TR superficial es asentada con un diámetro un tanto mayor al de diseño.

En general, los pozos geotérmicos son autoalimentados de energía para producir, pues mediante la evaporación del fluido se aligera la carga hidrostática de la columna de producción permitiendo el libre flujo del fondo a la superficie, es por ello que una reducción en el diámetro repercutirá en la reducción significativa de la producción.

CAPÍTULO 4

EJEMPLO DE APLICACIÓN DE UN PROGRAMA DE PERFORACIÓN

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE UN PROGRAMA DE PERFORACION.

4.1.-ETAPA 26 PULGS. DE DIÁMETRO.

1) Inició construcción del pozo perforado con diámetro de 26 pulgs. desde 2.25 mbnt, hasta la profundidad de 150.0 mbnt.

2) Efectuó viaje de calibración de agujero satisfactoriamente, circuló para limpiar el pozo y proceder a la corrida de tubería² de revestimiento de 20 pulgs. de diámetro.

CONDICIONES DE OPERACIÓN	
Peso sobre barrena	2.2-4.5 ton
Rotación	100 rpm
Presión de bombeo	0 psi
Gasto de Bombeo	330 gal/min

CONDICIONES DEL FLUIDO	
Densidad	1.04-1.12 gr/cc
Viscosidad Marsh	50 seg/lt
Arena	0.25-1.0 %

3) Efectuó preparativos e instaló en el piso de perforación El equipo necesario para efectuar la instalación de la tubería de revestimiento 20 pulgs. de diámetro.

4) Corrió tubería de revestimiento de 20 pulgs. de diámetro, grado K-55, peso 106.5 lb/pie, rosca Buttress, equipada con zapata flotadora 20 pulgs. de diámetro tipo stab-in hasta 148.37 mbnt.

5) Bajó tubería de perforación con conector stab-in hasta conectar en interior de zapata 20 pulgs. de diámetro, verificó acoplamiento de stab-in y zapata, con sarta conectada a zapata circuló un tiempo de atraso antes de iniciar cementación.

6) Probó líneas de unidad cementadora con 2500 psi y efectuó cementación de la tubería de revestimiento.

7) Levantó stab-in 1m, bombeó 1 bl de agua, observó aflorar cemento franco a los 176 bl, sacó stab-in a la superficie y esperó tiempo de fraguado.

4.2.-ETAPA DE 17½ PULGS. DE DIÁMETRO.

1) Perforó zapata de 20 pulgs. de diámetro, reconoció agujero de 26 pulgs. de diámetro a 150 mbnt, y perforo agujero vertical de diámetro de 17 ½ pulgs. de 151 mbnt hasta la profundidad de 878 mbnt, con circulación normal.

CONDICIONES DE OPERACIÓN	
Peso sobre barrena	2.2-4.5 ton
Rotación	100 rpm
Presión de bombeo	100-450 psi
Gasto de bombeo	396-495 gal/min

CONDICIONES DEL LODO	
Densidad	1.10-1.16 gr/cc
Viscosidad Marsh	45-54 seg/lt
Arena	0.25-0.75 %
Filtrado	11.4-12 cc/30 min
Enjarre	1.0 mm

PROFUNDIDAD mbnt	INCLINACIÓN grados
100	1.00
200	1.00
300	1.00
400	1.00
500	1.00
600	1.50
700	1.25
800	1.00

2) Con barrena de 17 ½ pulgs. de diámetro equipada con motor de fondo de 8 pulgs. de diámetro con deflexión ajustada a 1.5° reconoció agujero 17 ½ pulgs. de diámetro vertical hasta 900 mbnt, orientó herramienta desviadora con rumbo N82.17E y perforó agujero direccional hasta 1989 mbnt, (profundidad programada) circuló para limpieza del agujero y sacó sarta a superficie, eliminó motor de fondo de 8 pulgs. de diámetro para continuar perforando nuevamente agujero de 17 ½ pulgs. de diámetro vertical.

CONDICIONES DE OPERACIÓN	
Peso sobre barrena	2.2 – 11.3 ton
Rotación	60 - 80 rpm
Presión de bombeo	1600 -2100 psi
Gasto de bombeo	627 gal/min

CONDICIONES DEL LODO	
Densidad	1.10-1.16 gr/cc
Viscosidad Marsh	50-60 seg/lt
Arena	0.25 – 1.5 %
Filtrado	6-10 cc/30 min
Enjarre	1.0 mm

3) Armó y bajó barrena de 17 ½ pulgs. de diámetro con sarta estabilizada convencional hasta la profundidad de 1989 mbnt, (fondo) y perforó agujero 17 ½ pulgs. de diámetro normal hasta 2117 mbnt en donde observó incremento de torsión, sacó sarta a la superficie y eliminó estabilizadores, bajó misma sarta y perforó hasta 2208 mbnt, (profundidad programada) circuló y acondicionó lodo, sacó sarta a superficie.

4) Corrió registro de calibración 17 ½ pulgs. de diámetro hasta 2208 mbnt, bajó barrena de 17 ½ pulgs. de diámetro con sarta convencional hasta 2208 mbnt (fondo), circuló para limpiar el pozo y acondicionó el fluido para correr tubería de revestimiento 13 3/8 pulgs. de diámetro.

CONDICIONES DE OPERACIÓN	
Peso sobre barrena	9 -11.3 ton
Rotación	80 – 90 rpm
Presión de bombeo	1600 psi
Gasto de bombeo	528 gal/min

CONDICIONES DEL LODO	
Densidad	1.10-1.16 gr/cc
Viscosidad Marsh	50-60 seg/lt
Arena	0.25 – 1.5 %
Filtrado	6-10 cc/30 min
Enjarre	1.0 mm

5) Efectuó preparativos y corrió tubería de revestimiento de 13 3/8 pulgs. de diámetro equipada con sus respectivos accesorios de cementación hasta 2204.92 mbnt y circuló tiempo de atraso, bombeó 30 m³ de lodo tratado con lignito cáustico, efectuó preparativos y cementó tubería de revestimiento de 13 3/8 pulgs. de diámetro en condiciones satisfactorias en dos etapas (2204.92 a 1065.31 m y 1065.31 m a superficie) esperando tiempo de fraguado en ambas.

6) Instaló cabezal de 13 3/8 pulgs. de diámetro S-900 y efectuó prueba hidráulica al mismo con 1500 PSI X 30 min con resultado positivo, instaló conexiones superficiales de control y prevención, efectuó prueba hidráulica a conexiones superficiales de prevención con 1500 PSI X 30 min con resultado positivo.

7) Bajó barrena 12 ¼ pulgs. de diámetro con sarta convencional, reconociendo tubería de revestimiento de 13 3/8 pulgs. de diámetro, perforó cemento y accesorios hasta 2204.92 mbnt, así mismo efectuó pruebas hidráulicas a la profundidad de 1062 mbnt y 2165.17 mbnt con 1500 PSI x 30 min con resultado positivo, reconoció agujero de 17 ½ pulgs. de diámetro hasta 2208 mbnt (fondo).

4.3.-ETAPA DE 12 ¼ PULGS. DE DIÁMETRO.

1) Con sarta de perforación convencional (durante la bajada instaló hules protectores a la tubería de perforación 4 ½ pulgs. de diámetro), perforó agujero de 12 ¼ pulgs. de diámetro normal hasta 2240 mbnt, circuló y sacó sarta a superficie.

2) Bajó barrena de 12 ¼ pulgs. de diámetro equipada con sarta estabilizada de 12 ¼ pulgs. de diámetro hasta 2203.05 mbnt, donde encontró resistencia, repasó agujero 12 ¼ pulgs. de diámetro hasta 2240 mbnt (fondo), perforó agujero de 12 ¼ pulgs. de diámetro normal hasta 2474 mbnt, donde se presentó PTC bombeó 20 m³ de lodo y sacó sarta a superficie para eliminar estabilizadores y barrena de 12 ¼ pulgs. de diámetro.

3) Bajó barrena de 12 ¼ pulgs. de diámetro equipada con sarta convencional hasta 2474 mbnt, perforó con PPC y PTC hasta 2668 mbnt, (profundidad programada), efectuó viaje corto para verificar la estabilidad del agujero, bombeó y colocó bache (110 m³) para alta temperatura por etapas y saca sarta a superficie.

4) Corrió registro de calibración de diámetro de 12 ¼ pulgs. hasta la profundidad de 2668 mbnt.

5) Corrió 2 registros de Temperatura-Presión con 9:15 y 13:15 hrs de reposo observando temperatura máxima de 173.89°C y aportación de agua la profundidad de 2250 mbnt, procede a la obturación de zona de aportación con tapones de cemento.

a) Con T.P. de 4 ½ pulgs. de diámetro colocó tapón de cemento No.1 en intervalo de 2451-2651 mbnt, probó líneas con 3150 PSI, bombeó 96 bls de lechada de cemento de 13.842 lb/gal, 42 bls de lodo, soltó dardo de plug catcher, 67 bls de lodo presión final de 60 PSI, la operación se realizó con PTC, sacó T.P. a la superficie, esperó fragüado.

b) Con T.P. franca verificó cima de cemento a 2521.19 mbnt, colocó tapón de cemento No. 2 en el intervalo de 2318-2518 mbnt (96 bls de lechada de cemento de 133.808 lb/gal), con barrena de 12 ¼ pulgs. de diámetro verificó cima de cemento a 2400.50 mbnt, rebajó cemento normal hasta 2479 mbnt y con PPC hasta 2668 mbnt (fondo), bombeó y desplazó bache (60 m³) de lodo para alta temperatura, sacó sarta a la superficie.

6) Corrió serie de 2 registros de temperatura-presión con 6 y 10 hrs de reposo, observando temperatura máxima de 138.17°C.

7) Bajó barrena de 12 ¼ pulgs. de diámetro con sarta convencional reconoció y acondicionó agujero hasta 2668 mbnt, (fondo), bombeó y desplazó bache (60m³) para alta temperatura, sacó sarta hasta la supercie.

8) Instaló equipo de manejo, apriete e instrumentación para registro de la operación, efectuó corrida de tubería de revestimiento de 9 5/8 pulgs. de diámetro, peso 47 lb/pie, grado L-80, rosca Multivam, en 1ª sección equipada con accesorios de flotación y anclaje, para la operación de cementación, libremente hasta 2668 mbnt, (fondo, anclando en la tubeía en el intervalo 2044.19-2666 mbnt).

9) Con unidad de cementación Halliburton, efectuó cementación primaria a la tubería de revestimiento de 9 5/8 pulgs. de diámetro.

10) Bajó empacador para tubería de revestimiento de 13 3/8 pulgs. de diámetro con tubería de perforación de 4 ½ pulgs. de diámetro x. h. hasta 1880.94 mbnt, donde lo operó para efectuar cementación de tubería de revestimiento de 9 5/8 pulgs. de diámetro en 2da. Etapa.

11) Con unidad de cementación Halliburton, realizó cementación en 2da. Etapa.

12) Con barrena de 12 ¼ pulgs. de diámetro reconoció tubería de revestimiento de 13 3/8 pulgs. de diámetro hasta 1980 mbnt, donde detectó cima de cemento, rebajó cemento hasta 2044.19 mbnt, (colgador 13 3/8 pulgs. de diámetro X 9 5/8 pulgs. de diámetro), circuló y efectuó prueba

hidráulica con 1500 PSI x 30 min. Con resultado positivo, circuló y acondicionó lodo para correr tubería de revestimiento de 9 5/8 pulgs. de diámetro en 2da. Sección y sacó sarta a superficie.

13) Instaló equipo de manejo, apriete e instrumentación para registro de operación y efectuó corrida de tubería de revestimiento de 9 5/8 pulgs. de diámetro, peso 47 lb/pie, grado L-80, rosca multivam en 2da seccion equipado con accesorios de cementación hasta la profundidad de 2043.19 mbnt, (1.0 m, arriba de colgador de 13 3/8 pulgs. de diámetro X 9 5/8 pulgs. de diámetro).

14) Con unidad de cementación Halliburton efeculó cementación de la tubería de revestimiento en 2da. Seccion de 0.0-2043.19 mbnt.

15) Instaló conexiones superficiales de prevención y control, probando su correcto funcionamiento satisfactoriamente.

16) Con barrena 8 ½ pulgs. de diámetro reconoció interior de tubería de 9 5/8 pulgs. de diámetro detectando cima de cemento a la profundidad de 1926 mbnt, rebajó cemento hasta 2013.88 mbnt, efectuó prueba hidráulica con resultado positivo con 2000 PSI, rebajó cemento y accesorios hasta 2046 mbnt, bajó barrena libremente hasta la profundidad de 2562 mbnt, donde verificó cima de cemento, rebajó hasta 2636.24 mbnt, y efectuó prueba hidráulica positiva con 2000 PSI con resultado positivo, rebajó cemento y accesorios hasta 2663 mbnt, cambió columna de lodo por agua, sacó sarta a la superficie, corrió registro eléctrico C.E.T. de 2662 a 1163 mbnt, bajó barrena de 8 ½ pulgs. de diámetro, rebajó cemento de 2663 mbnt hasta 2666 mbnt (zapata 9 5/8 pulgs. de diámetro) y reconoció agujero de 12 ¼ pulgs. de diámetro hasta 2668 mbnt (fondo).

4.4.-ETAPA DE 8½ PULGS. DE DIÁMETRO.

1) Con barrena de 8 ½ pulgs. de diámetro y sarta convencional a 2668 mbnt (fondo), perforó agujero de 8 ½ pulgs. de diámetro normal hasta 2700 mbnt, sacó sarta a la superficie y cambió barrena tricónica por PDC, perforó normal hasta 2705 mbnt, perforó con PPC hasta 2721 mbnt y PTC hasta 2917 mbnt

(profundidad programada), colocó bache para alta temperatura en el intervalo de 2917 – 2518.62 mbnt y sacó sarta a superficie.

2) Corrió 4 registros dobles de Temperatura-presión por estaciones hasta 2900 mbnt temperatura máxima de 306.94°C.

3) Bajó barrena de 8 ½ pulgs. de diámetro equipada con sarta convencional hasta 2917 mbnt, (fondo) levantó sarta hasta 2503.25 mbnt, introdujo tubería de revestimiento de 9 5/8 pulgs. de diámetro, bombeando bache para alta temperatura, continuó sacando sarta hasta superficie.

5) Efectuó preparativos y corrió 288.93m de tubería de revestimiento de 7 pulgs. de diámetro ranurada TN-80-3% Cr, 29 lb/pie TSH Blue, equipada con zapata de 7 pulgs. de diámetro guía y colgador de 9 5/8 pulgs. de diámetro X 7 pulgs. de diámetro, bajandola con tubería de perforación de 4 ¼ pulgs. de diámetro xh hasta la profundidad de 2917 mbnt, (fondo) operó colgador de 9 5/8 pulgs. de diámetro X 7 pulgs. de diámetro anclándola en el intervalo de 2627.07 – 2916 mbnt, sacó soltador a superficie sin rotación.

4.5.-Terminación.

1) Desmanteló conexiones superficiales de control, instaló carrete de expansión de 12 pulgs. x 10 pulgs. S-900 y válvula maestra de 10 pulgs. X 10 pulgs. S-900, en posición de producción, instalación nuevamente el equipo de prevención, probó las conexiones superficiales con 1200 PSI, con resultado satisfactorio, en el transcurso de estas maniobras, lavó presas del equipo y recuperó agua en las mismas.

2) Bajó barrena de 6 pulgs. de diámetro con sarta convencional lavando pozo con PTC, hasta 2915.69 mbnt, (Zapata 7 pulgs. de diámetro), levantó sarta bombeando agua por estaciones hasta 2627 mbnt, cerró preventor e inyectó 150m³ de agua con lignito cáustico con PTC y 0 PSI, sacó sarta a superficie, el volumen total de agua empleado fue de 682 m³.

3) Corrió un registro de Presión-temperatura por estaciones hasta 2900 mbnt con 60 hrs de reposo, temperatura máxima de 334.20°C.

4) Quebró en su totalidad la tubería de perforación de 4 ¼ pulgs. de diámetro, 3 ½ pulgs. de diámetro y herramientas usadas, cerró la válvula maestra dando por terminada la construcción del pozo 229D a las 15:00 hrs el día 11 de Agosto de 2008.

CAPÍTULO 5

APLICACIONES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

5.-Aplicaciones de la Industria Geotérmica.

La energía geotérmica es considerada como una fuente de energía renovable debido a que es continua durante la producción de calor y electricidad.

Se considera que el calor de la Tierra es ilimitado a escala humana y estará disponible por mucho tiempo, y si el medio de extracción de calor es el agua subterránea (vapor o líquido), esta se puede renovar mediante la recarga con aguas superficiales de manera natural o por inyección artificial al subsuelo. Es importante tomar en cuenta que la explotación de los yacimientos se debe de hacer en forma racional para que mantenga su carácter de recurso renovable.

La energía geotérmica es considerada una fuente de energía limpia debido a que no emplea combustibles fósiles y por lo tanto las emisiones de CO₂ por parte de las centrales geotérmicas para la producción de energía eléctrica son menores en comparación con las emitidas por centrales eléctricas que emplean gas natural, petróleo o carbón para generar electricidad, (figura 22).

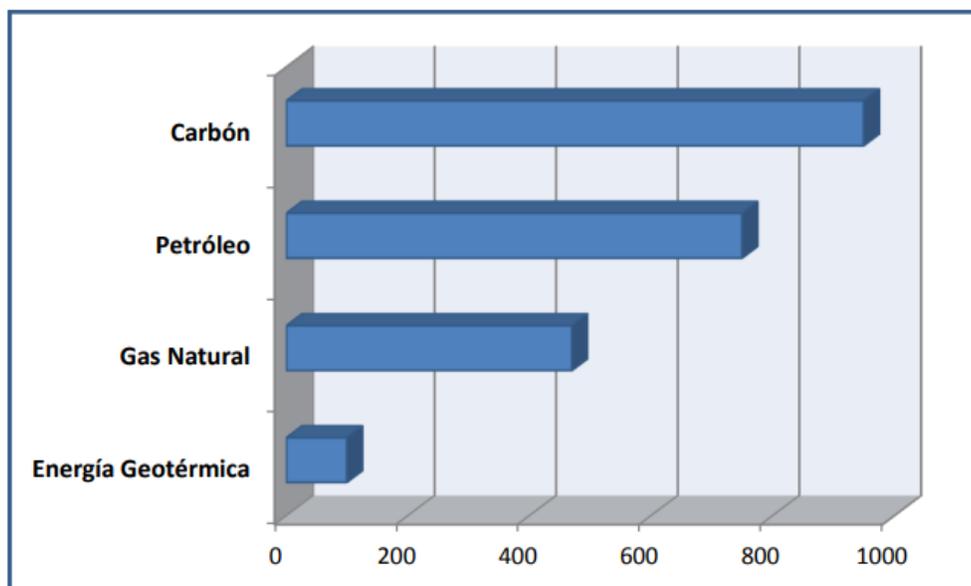


Figura 23. Gráfica comparativa de emisiones de CO₂, de las principales fuentes de generación de electricidad (Kg/MWh). Fuente: IAEA 2010

Dentro de los aspectos económicos se tiene que la inversión inicial de los proyectos geotermoeléctricos es elevada, sin embargo los costos de

explotación son relativamente bajos y más competitivos con relación a otras fuentes generadoras de electricidad.

El calor proveniente del subsuelo terrestre puede ser aprovechado de diversas formas explotando los yacimientos subterráneos naturales de agua vapor o una mezcla de ambos. Estos pueden ser empleados para uso de la energía calorífica (uso directo) o para generación de energía eléctrica (uso indirecto). El uso que se le dé a cada yacimiento depende de la temperatura a la que se encuentran confinados los fluidos en el subsuelo. Por tanto, una de las clasificaciones de los yacimientos geotérmicos es la siguiente:

- Yacimientos de alta temperatura: más de 150°C.
- Yacimientos de media temperatura: entre 90 y 150°C.
- Yacimientos de baja temperatura: entre 30 y 90°C.
- Yacimientos de muy baja temperatura: menos de 30°C.

Los dos primeros tipos de yacimientos se explotan para generar energía eléctrica, siendo los de mayor desarrollo e importancia y los dos restantes son explotados para emplear la energía calorífica que emiten, teniendo una gran diversidad de usos en la industria.

La temperatura no es el único requerimiento para la explotación comercial de los yacimientos geotérmicos, pues también es necesario tomar en cuenta los siguientes factores.

- Suficiente disponibilidad del fluido confinado en el subsuelo (vapor, agua o una mezcla de ambos).
- Los fluidos confinados deben contener la menor cantidad posible de compuestos químicos.
- La presión en el yacimiento debe ser adecuada para la explotación del fluido

5.1.-Uso directo.

No todos los recursos geotérmicos tienen la capacidad para emplearse en la generación de energía eléctrica, sin embargo, estos recursos dado que se encuentran en gran cantidad pueden ser empleados como fuentes caloríficas directas. Las aplicaciones de estos recursos pueden ser industriales, comerciales y para uso doméstico, como se muestra en la figura 24.

Ya para el año 2010, alrededor de 73 países comenzaron a emplear la energía geotérmica en su forma directa y su uso se está expandiendo a otros países. Estos recursos son explotados a partir de la construcción de pozos a poca profundidad y/o a partir de manifestaciones de los fluidos en superficie. El 32% de este tipo de recursos se emplea para bombas de calor geotérmicas, 30% para balneología, 20% para calefacción, 7.5% para invernaderos, 4% para procesos industriales, 4% acuicultura y el resto en secado agrícola, derretimiento de nieve y otras aplicaciones.



Figura 24. Temperaturas aproximadas de los fluidos geotérmicos para usos directos.

El uso directo de los recursos geotérmicos puede producir un ahorro de hasta el 80% en costos en comparación con los combustibles fósiles.

En México actualmente los usos directos están limitados a la balneología, sin embargo, al día de hoy existen algunos proyectos piloto desarrollados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que involucran aplicaciones directas, los cuales fueron implementados en los campos geotérmicos de Cerro Prieto, Los Azufres y Los Humeros.

La CFE, en conjunto con el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), han elaborado trabajos de investigación y desarrollo para la implementación de bombas de calor operando con energía geotérmica.

Los principales usos directos son:

5.1.1.-Bombas de Calor Geotérmicas (BCG).

Es una máquina térmica que permite transferir energía en forma de calor de un lugar a otro y según se requiera.

Las bombas de calor geotérmico son sistemas de circuito cerrado que utilizan el terreno circundante a un edificio o el que se encuentre por debajo del mismo. Mediante la instalación de un serpentín de tubería del tamaño adecuado, se hace circular agua u otro fluido para recoger el calor almacenado y ahí entregarlo a una bomba de calor.

Estos dispositivos emplean normalmente un sistema agua/agua o salmuera/agua y se emplean para climatización, refrigeración, recuperación de calor y producción de agua caliente, siendo el primer uso el más común, el cual se realiza mediante la perforación de pozos.

Estos sistemas pueden ser abiertos o cerrados. Los abiertos son utilizados en donde se sabe que existe algún acuífero o corriente subterránea de agua, que se aprovecha como líquido recolector hasta la bomba y una vez extraído el calor se devuelve al acuífero.

En los sistemas cerrados el fluido es bombeado desde la superficie y circula a través de las tuberías para recoger el calor del subsuelo. En estos tipos de sistemas existen dos tipos de arreglos: los verticales y los horizontales.

5.1.2.-Balneología.

Se denomina balneología al estudio e investigación científica de los baños en aguas termales y su aplicación con fines medicinales, así como sus características curativas, siendo esta la forma más antigua del uso de la energía geotérmica.

Para este tipo de uso son las manifestaciones (manantiales termales) las que se emplean como fuente generadora de energía. Algunos autores consideran esta aplicación como una sub-aplicación ya que no implica la transformación de los fluidos geotérmicos o del calor generado por los mismos, sin embargo actualmente es uno de los usos más extendidos de la energía geotérmica debido a que se puede emplear en un amplio rango de temperaturas (de 30 a 90°C, dependiendo de su uso en calefacción de piscinas o como aguas termales).

En México el uso de la energía geotérmica en aplicaciones de balneología es muy extenso debido a la gran cantidad de manifestaciones de aguas termales que existen en el territorio nacional.

5.1.3.-Calefacción de edificios e invernaderos.

La calefacción generada a partir de fluidos geotérmicos es de bajo costo en comparación con la que se tendría si se emplearan combustibles fósiles para producir energía eléctrica, que a su vez serviría para generar la calefacción. La temperatura de todos los fluidos geotérmicos empleados para generar calefacción es a partir de 50°C, por lo que los yacimientos ideales para este tipo de aplicación son los clasificados como de baja y de muy baja temperatura.

Para el caso de calefacción en edificios, su aplicación es a partir de un circuito cerrado en donde el fluido geotérmico es bombeado desde los pozos que alimentan la planta intercambiadora de calor. En la planta, el contenido

calorífico de los fluidos geotérmicos es transferido a agua pura, la cual mediante un circuito secundario se hace circular por tuberías que con una distribución establecida, la cual deberá recorrer edificios, viviendas, complejos etc., como se muestra en la figura 25.

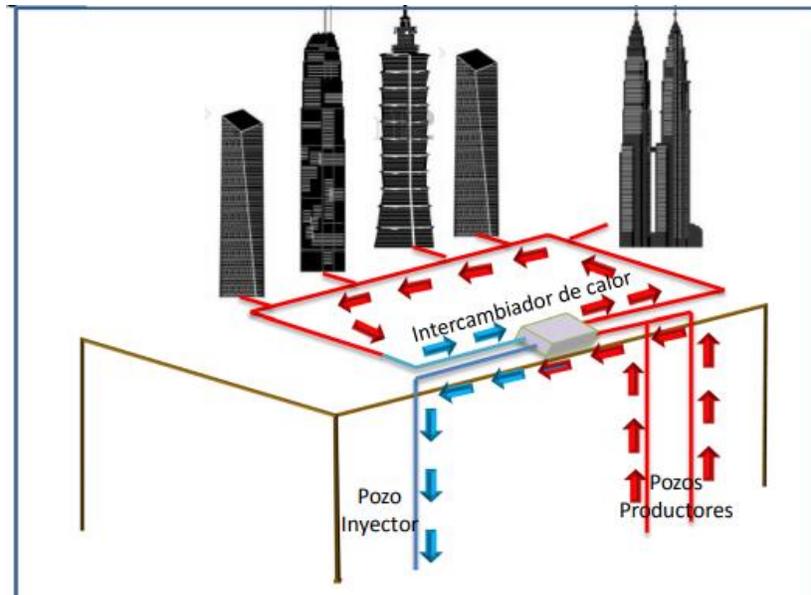


Figura 25. Esquema de un circuito cerrado, utilizado para la calefacción de edificios.

La cantidad de inmuebles a calentar estará en función de la capacidad del yacimiento, del número de pozos de alimentación y de la capacidad de extracción de los fluidos mediante bombeo.

En zonas donde las horas de sol no son abundantes, es posible reproducir las condiciones de temperatura y humedad ideales para los cultivos en invernaderos mediante el aprovechamiento del calor de los fluidos geotérmicos a través de un intercambiador de calor. La transferencia de calor en invernaderos estará en función del tipo de cultivo, la cual puede ser por convección forzada o por radiación.

La transferencia de calor por convección se produce por medio de un fluido que transporta el calor entre zonas de diferentes temperaturas, la convección forzada se origina cuando el movimiento del fluido es ocasionado

por una bomba o un ventilador (una fuerza externa). Y la radiación es cuando la propagación de calor de un cuerpo a otro se da sin contacto o sin un fluido que transporten el calor.

El fluido de climatización puede ser circulado por tubos enterrados junto a las raíces de las plantas proporcionando calor adicional por conducción al sustrato mineral para incrementar el rendimiento de las cosechas.

El rango de temperaturas requeridas para el aprovechamiento de la energía en estas aplicaciones es bastante amplio, oscila desde los 40°C para calentamiento del suelo de manera directa o por retorno del fluido ya empleado, hasta los 90°C para crear corrientes de convección, a partir del circuito secundario que transmitirá el calor al invernadero.

5.1.4.-Acuicultura.

La acuicultura es definida como la producción controlada de organismos vegetales y animales acuáticos, lo cual ofrece amplias oportunidades de negocio y alternativas alimenticias, o recuperación de las poblaciones naturales que se han visto disminuidas.

La aplicación del calor de los fluidos geotérmicos dentro de la acuicultura es la de climatizar las aguas de las instalaciones dedicadas a la cría de peces, tanto de carácter fluvial, lacustre o marinas, para especies concreta.

Lo más común es que los fluidos geotérmicos no se usen directamente en los tanques a manera de circuito abierto, al igual que en las aplicaciones antes mencionadas se recurre al proceso de intercambiar el calor de los fluidos geotérmicos a un circuito secundario que constituye el agua de crianza de los tanques.

Los rangos de temperatura requeridas por las especies criadas varía entre 20 y 30°C, lo cual requiere que las temperaturas de los fluidos geotérmicos oscilen entre 45 y 60°C.

5.1.5.-Otras Aplicaciones.

Existe una gran cantidad de procesos industriales en las cuales se puede aprovechar el calor de los fluidos geotérmicos, en general todas aquellas que empleen tratamiento de calor o vapor de agua para su realización. En función de su temperatura, los fluidos geotérmicos son empleados en:

- Ganadería.
- Secado de madera.
- Secado de productos agrícolas.
- Procesado de alimentos.
- Manufactura de papel.
- Manufactura de textiles.
- Fermentación.
- Extracción de sustancias útiles.
- Producción de ácido sulfúrico (H₂S).
- Producción de etanol.
- Extracción de sales por evaporación.
- Manufactura de cementos.
- Manufactura de revestimientos.

5.2.-Uso indirecto (Generación de Energía Eléctrica).

La mayor aplicación práctica de la energía geotérmica y la que atrajo la atención a nivel mundial es la transformación de la energía geotérmica en energía eléctrica, debido a que dentro de las fuentes alternas de energía, ésta ha demostrado ser económicamente más viable y menos contaminante. La transformación a partir de los fluidos geotérmicos tiene una eficiencia relativamente baja comparada con las termoeléctricas convencionales, sin embargo las plantas geotermoeléctricas son económicamente redituables

debido al bajo costo de la energía calorífica obtenida y la poca contaminación ambiental que generan en comparación con los combustibles fósiles.

La generación de energía eléctrica a través de los fluidos geotérmicos, está en función de las condiciones naturales de los yacimientos geotérmicos. Las condiciones de presión y temperatura a la entrada de las turbinas generadoras accionadas por el vapor, son determinadas por las condiciones de presión y temperatura del yacimiento.

Una planta geotermoeléctrica es una instalación utilizada para la transformación de energía calorífica emitida por los fluidos geotérmicos en energía eléctrica, la energía calorífica emitida por los fluidos es empleada por un ciclo termodinámico convencional para accionar un alternador y generar la energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica a partir de la geotérmica requiere temperaturas del fluido que oscilen entre los 100 y 250°C, es decir yacimientos de mediana y alta temperatura.

Actualmente existen tres tipos de plantas generadoras de electricidad que aprovechan el calor de los fluidos geotérmicos que se encuentran en operación comercial, las cuales son:

- Vapor seco.
- Separación de vapor.
- Ciclo binario.

5.2.1.-Plantas de Vapor Seco.

Este tipo de plantas fueron las primeras instaladas para generar electricidad. Emplean el vapor saturado o ligeramente sobrecalentado proveniente del yacimiento de manera directa para accionar la turbina generadora de electricidad. El vapor húmedo es condensado a la salida para ser inyectado al yacimiento por medio de pozos inyectoros (figura 26).

Estas plantas de vapor seco son alimentadas por yacimientos clasificados como de vapor dominante.

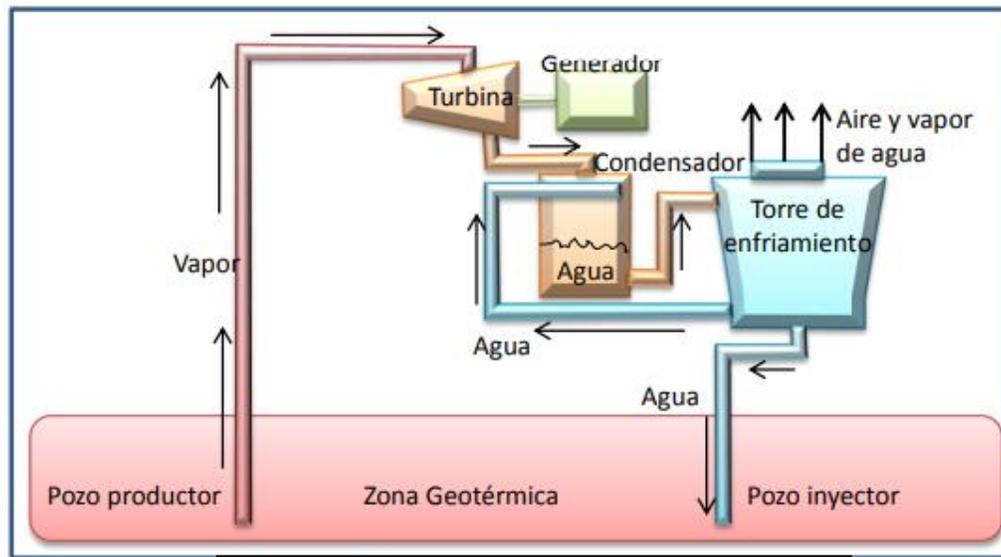


Figura 26. Diagrama de una planta de vapor seco.

5.2.2.-Plantas de Separación de Vapor.

Estas plantas son el tipo más común de plantas geotermoeléctricas. El vapor una vez separado del agua, es dirigido a las turbinas de vapor para accionarlas. Después de pasar por las turbinas el vapor es condensado. El vapor es normalmente condensado en un condensador de contacto directo o en un condensador de tipo intercambiador de calor y el líquido separado a la entrada de la turbina es inyectado al yacimiento (figura 26).

En este tipo de plantas los fluidos geotérmicos son extraídos de yacimientos dominados por líquido lo suficientemente caliente como para permitir una ebullición de una porción importante del líquido, produciendo una mezcla de agua y vapor en superficie producto de una caída de presión en las tuberías a lo largo del pozo.

Estas plantas son relativamente económicas y simples de instalar, sin embargo se les considera ineficientes debido a que en promedio producen 1 MW por cada 10- 20 toneladas de vapor en una hora.

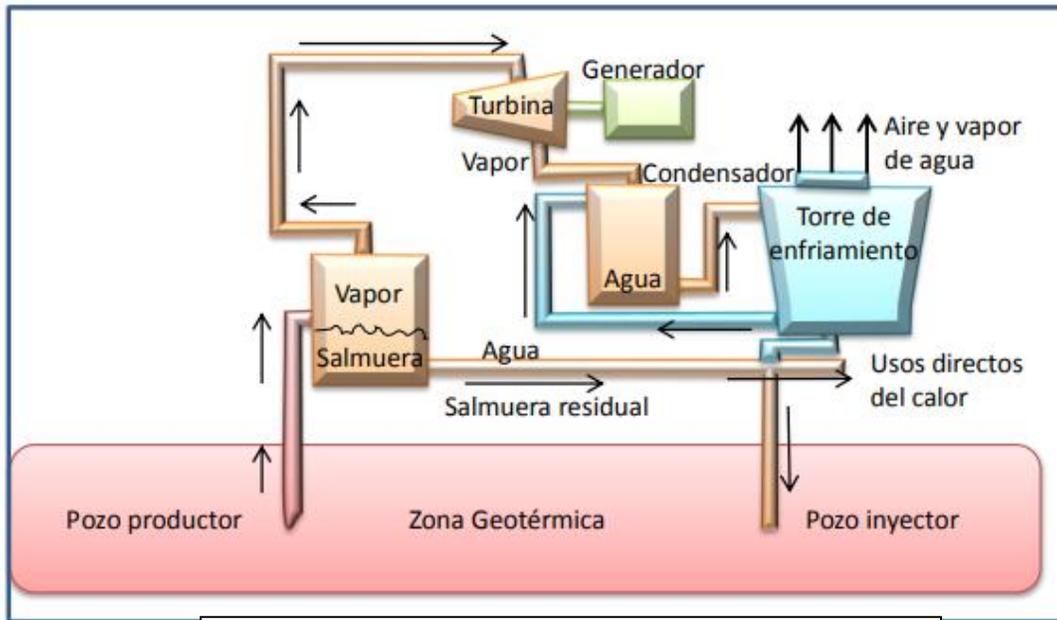


Figura 27. Diagrama de una planta de separación de vapor.

5.2.3.-Plantas de Ciclo Binario.

En este tipo de plantas generadoras el fluido proveniente del yacimiento es pasado a través de un intercambiador de calor, el cual calienta un fluido de trabajo secundario (orgánico) con un punto de ebullición menor a los 100°C. Normalmente se emplea el Isopentano, el cual es vaporizado y empleado para accionar la turbina. El fluido secundario es condensado después de pasar por la turbina para ser reciclado formando un ciclo cerrado. El fluido geotérmico que transfiere el calor es inyectado al yacimiento después de pasar por el intercambiador, (figura 27).

Las plantas de ciclo binario normalmente tienen una eficiencia del 7 al 12%, dependiendo de la temperatura del fluido geotérmico.

Los yacimientos adecuados para alimentar este tipo de plantas son los de líquido dominante que no se encuentran lo suficientemente calientes para producir la ebullición del fluido geotérmico. Yacimientos con temperaturas menores a 220°C y mayores a 100°C son los explotados en este tipo de plantas.

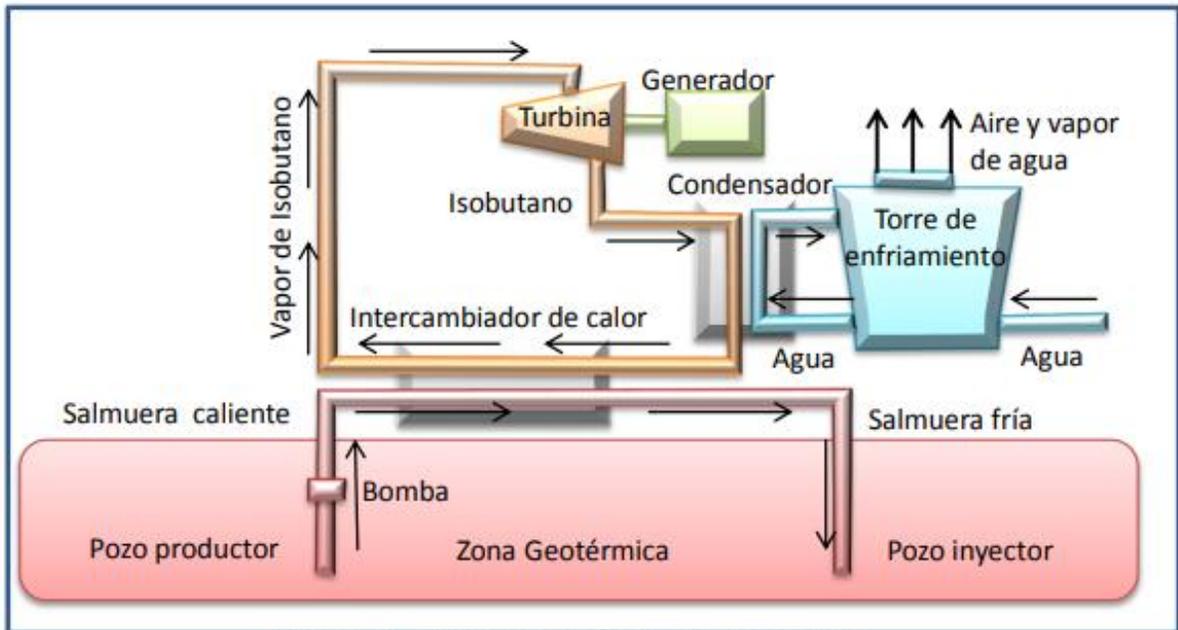


Figura 28. Diagrama de una planta de ciclo binario.

CONCLUSIONES

La energía calorífica obtenida del interior de la Tierra (energía geotérmica), actualmente explotada en México y muchos otros lugares en el mundo, debido a su carácter de recurso renovable y energía limpia; siendo su principal aplicación la de generación de energía eléctrica. El potencial existente de este recurso es vasto, por lo que el panorama futuro de la energía geotérmica es prometedor para ayudar a satisfacer la demanda energética en nuestro país y a nivel mundial.

La generación de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos se logra mediante la perforación y terminación de pozos geotérmicos, que tienen por objetivo servir de ducto al fluido geotérmico (fluido con energía calorífica) para que este llegue a la superficie y pueda accionar turbinas generadoras de energía eléctrica.

Los yacimientos geotérmicos se asocian a rocas de origen volcánico y metamórfico, en zonas donde existe una alta actividad volcánica o en los denominados límites de placas, lugares donde el gradiente geotérmico es mayor al gradiente normal.

Los fluidos geotérmicos, normalmente agua o salmuera (líquidos o en vapor) se encuentran alojados en las cavidades de las rocas denominadas poros, siendo las rocas volcánicas las que normalmente alojan estos fluidos, las fracturas de dichas rocas son las que alojan a estos fluidos en las profundidades de la corteza, desde algunos pocos metros, hasta unos cuantos kilómetros.

Aunque también yacimientos sedimentarios, las rocas volcánicas porosas fracturadas, con mayor dureza y abrasivas son las que principalmente componen los sistemas hidrotermales (yacimientos geotérmicos más explotados).

Los registros geofísicos de pozos dentro de la industria geotérmica han adquirido relevancia dentro del estudio de los yacimientos, dado que con

ellos se obtienen parámetros como las resistividades de la formación, la densidad y la porosidad de la misma; parámetros que ayudan a definir litologías y posibles yacimientos. Estos registros son corridos durante la perforación de pozos. El principio de operación de los mismos debe adecuarse a formaciones volcánicas principalmente, dado que estas herramientas son ampliamente empleadas en la industria petrolera, y por tanto están calibradas para formaciones sedimentarias. Sin embargo son normalmente empleados durante la etapa de exploración de recursos geotérmicos.

Existen registros de presión, temperatura y diámetro de agujero que son mayormente aplicados en la perforación de pozos geotérmicos. El primero nos permite determinar temperatura del pozo que puede traducirse en localización de acuíferos principalmente, con el segundo se pueden definir la productividad de los pozos productores y la inyectabilidad de los pozos de inyección; con el tercer registro se puede determinar principalmente la estabilidad del agujero y los volúmenes de inyección de cemento.

Para poder correr los registros, es necesario tener en consideración las altas temperaturas de los yacimientos geotérmicos y el efecto que esta puede tener sobre las herramientas, por lo que los materiales y sensores deberán de estar adecuados para soportarlas.

Para llevar a cabo el proceso de perforación de pozos geotérmicos es necesario emplear unidades de perforación y herramientas que permitan realizar la operación. Las unidades de perforación de pozos pueden ser del tipo convencional (similares a las empleadas en la industria petrolera) o del tipo nuclear (similares a las empleadas en la industria minera).

Los equipos de perforación convencional están compuestos de sistemas de suministro de potencia, de izaje, rotación, control de brotes, monitoreo y de circulación al igual que la industria petrolera, con la única diferencia que el sistema de circulación debe ser adecuado para tratar al fluido de perforación proveniente del pozo a alta temperatura (uso de torres de enfriamiento).

Las herramientas empleadas durante el proceso también son similares a las empleadas en la industria de los hidrocarburos. Barrenas que permitan desgastar la roca, siendo más empleadas las tricónicas con consideraciones para altas temperaturas, el uso de martillos de percusión es más amplio dado que mejora la velocidad de penetración, teniendo como limitante el uso de fluidos de perforación aireados.

Dentro del aparejo de fondo y sarta de perforación, las tuberías empleadas deben ser diseñadas para trabajar a alta temperatura, con presencia de fluidos corrosivos y formaciones abrasivas. El uso de porta barrenas, lastrabarrenas, tubería pesada, estabilizadores es común, y dado que se trata de formaciones fracturadas, el uso de rimadores y amortiguadores es más amplio.

Los fluidos de perforación más empleados dentro de la industria son los lodos base agua, las salmueras, las espumas y los fluidos aireados. Estos fluidos deben estar adecuados para trabajar a altas temperaturas, deben ser diseñados para mantener sus propiedades. Es común que se emplee un tipo de fluido (normalmente base agua) para la mayor parte de la perforación del pozo, y para el intervalo productor se cambie a un fluido menos denso para evitar problemas de daño a la formación.

Durante la perforación de pozos geotérmicos, dada la naturaleza de las formaciones fracturadas, uno de los problemas más comunes son las pérdidas de circulación parciales o totales, lo que incrementa los costos de perforación.

El asentamiento de tuberías de revestimiento sigue el mismo procedimiento que el empleado en pozos de petróleo, se considera la presión de sobrecarga, presión de poro, presión de fractura y la presión ejercida por el fluido de perforación para el diseño de la ventana operacional y posteriormente el asentamiento de tuberías. La presión de sobrecarga se estima a partir de la densidad de las rocas volcánicas asociadas a los yacimientos.

El diseño de tuberías de revestimiento se hace considerando los esfuerzos a los que se somete la tubería, presión interna, presión de colapso, tensión y el esfuerzo biaxial. Los factores de seguridad empleados en pozos de petróleo diferirán en pozos geotérmicos dado que las altas temperaturas tienden a disminuir la resistencia de los aceros empleados en la fabricación de tuberías, por lo que dichos factores son más altos, trayendo como consecuencia el uso de grados de tubería mayores o recubrimientos.

Los cementos más comunes en la industria geotérmica son del tipo Portland en sus clases A y G, empleando normalmente del 35 al 40% de sílice en polvo para que resistan la alta temperatura. El procedimiento de cementado es similar al realizado en pozos petroleros, empleando una unidad de alta, sin embargo es común que las tuberías de revestimiento sean cementadas hasta la superficie en operaciones en pozos geotérmicos.

La perforación de pozos geotérmicos direccionales no es tan común como en la industria petrolera, sin embargo si se realiza. El objetivo de emplear esta técnica en la industria geotérmica es el de intersectar el mayor número de fracturas verticales cuando se tienen formaciones denominadas impermeables que únicamente cuentan con fracturas verticales muy cercanas entre sí.

El procedimiento de terminación de pozos geotérmicos depende del tipo de pozo (productor, inyector o de diámetro reducido), sin embargo la variación es mínima. El procedimiento de terminación empieza una vez cementada la última tubería de revestimiento (tubería de producción).

A diferencia de la industria petrolera y tratándose de rocas más consolidadas la terminación normal de un pozo geotérmico es en agujero descubierto o con tubería corta ranurada colgada o asentada, haciendo el procedimiento de terminación más simple, sin embargo si las condiciones del yacimiento cumplen con ciertas características (yacimiento de vapor dominante, no sobre explotado y roca no deleznable), se pueden llevar a cabo terminaciones bilaterales para aumentar la productividad del pozo. En general el diámetro de los pozos geotérmicos ya terminados es más grande que el de los pozos

de petróleo ya que no se emplea tubería de producción en ellos, produciendo entonces mayores volúmenes de fluido.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones se generan en base a los retos que se presentan en todo el proceso para obtener energía geotérmica, estos retos se obtienen por la fusión del análisis de las necesidades nacionales e internacionales.

Exploración

- Reconocer y analizar las señales medidas en los registros geofísicos y herramientas similares.
- Poder diseñar herramientas capaces de operar de acuerdo a las condiciones del sistema y a su vez implementar nuevas técnicas de aplicación.
- Ubicar los datos para obtener una buena delimitación del yacimiento.
- Tener un porcentaje de certeza viable a través de pruebas de laboratorio.
- Con apoyo de datos geoquímicos, geofísicos y geológicos en estudios cuantitativos en la determinación de la permeabilidad y sus respectivas condiciones.
- Generar una base de datos con información geológica.
- Implementar técnicas de fracturación para la determinación de la permeabilidad del yacimiento.
- Crear modelos y herramientas de sub-superficie que faciliten la ubicación de la formación de interés.

Perforación.

- Rediseñar materiales y técnicas para la construcción de pozos.
- Diseñar sellos mecánicos que resistan altas temperaturas.
- Diseñar herramientas que soporten altas temperaturas para su adecuada operación.

- Diseñar fluidos de perforación resistentes a las altas temperaturas que se encuentren en el pozo.
- Diseñar cementos que resistan altas temperaturas.
- Ubicar zonas permeables y solucionar los problemas de pérdida de circulación.
- Mejorar la situación de gases no condensables.

Desarrollo de campo.

- Ser accesibles con los rangos de temperatura, presión y entalpía para operar en una planta.
- Generar una buena sincronización con los equipos de fondo y de superficie para una buena eficiencia.
- Desarrollo de modelos que puedan identificar los flujos de formación.
- Tener mayor conocimiento del yacimiento debido a que el diseño de la planta se lleva a cabo antes de la perforación de los pozos que la conforman.

Construcción de plantas.

- Contar con materiales resistentes que constituyan la planta.
- Operación y mantenimiento.
- Disminuir la corrosión y erosión de las tuberías que contribuyen al proceso.
- Disminuir el sarro en los intercambiadores de calor.
- Diseñar intercambiadores de calor con materiales resistentes.
- Optimizar los ciclos termodinámicos a fin de obtener una mejor eficiencia en las plantas.
- Aprovechar la energía a baja y mediana temperatura.
- Aprovechar la extracción de minerales.

Sistemas geotérmicos mejorados.

- Incrementar la eficiencia de los métodos de estimulación con objeto de obtener un mayor porcentaje de eficiencia.
- Aumentar la eficiencia de los ciclos para obtener mayor energía.
- Diseñar nuevas técnicas de estimulación según las limitaciones que establezca el sistema.
- Generar tecnología avanzada debido a los recursos que se encuentran costa afuera y geo presurizados.
- Innovación de tecnología para poder aprovechar los recursos de roca seca caliente.

CARTERA DE NECESIDADES DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

El presente reporte forma parte de los entregables asociados al Mapa de Ruta Tecnológica de Geotermia que el Instituto Mexicano del Petróleo realizó para el Fondo Sectorial CONACYT – Secretaría de Energía - Sustentabilidad Energética (FSE).

Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para incrementar el aprovechamiento de los recursos de mediana y alta entalpía
<ul style="list-style-type: none">• NT-1: Integrar métodos de prospección geofísica.• NT-2: Desarrollar nuevos geotermómetros y geobarómetros que mejoren la certidumbre en la medición.• NT-3: Desarrollar software capaz de producir modelos geofísicos robustos.• NT-4: Integrar e innovar métodos de exploración.• NT-5: Probar técnicas novedosas de perforación.• NT-6: Desarrollar mecanismos entre industria y academia para la identificación de problemas relevantes que afectan los costos, riesgos e incertidumbre durante la perforación.• NT-7: Aplicar modelos numéricos de transferencia de calor y transferencia de fluidos teniendo como eje la optimización energética de las plantas.• NT-8: Adaptar plantas para permitir el uso, en cascada, del recurso para aumentar la eficiencia general.

Figura 29. Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para incrementar el aprovechamiento de los recursos de mediana y alta entalpía.

Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para explotar recursos de baja entalpía
<ul style="list-style-type: none">• NT- 9: Realizar el inventario de sitios de la industria que cuenten con calor residual con potencial de generación de energía eléctrica.• NT-10: Realizar estudios de factibilidad técnico económica para el aprovechamiento del recurso.• NT-11: Mejorar la eficiencia térmica de los intercambiadores de calor.• NT-12: Desarrollar fluidos secundarios más eficientes (estables, menos tóxicos y costosos).• NT-13: Desarrollar y aplicar modelos numéricos para simular la dinámica de precipitación de sustancias, tomando en cuenta los fenómenos de nucleación.• NT-14: Desarrollar métodos de mantenimiento que prevengan corrosión e incrustaciones.• NT-15: Desarrollar métodos (químicos, térmicos, mecánicos) más eficientes de desintegración de incrustaciones.

Figura 30. Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para explotar recursos de baja entalpía.

Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para explotar recursos no convencionales: súper calientes

- NT-16: Desarrollar o adaptar simuladores numéricos de la termodinámica del recurso, basados en pruebas de laboratorio.
- NT-17: Desarrollar revestimientos de diafragmas y álabes de turbinas que eviten incrustaciones.
- NT-18: Desarrollar técnicas de acondicionamiento de fluidos que minimicen problemas de corrosión.
- NT-19: Seleccionar, adaptar o desarrollar materiales apropiados en condiciones de alta temperatura y acidez.
- NT-20: Desarrollar simuladores numéricos para simular las condiciones físico-químicas desde el fondo del pozo hasta el condensador.
- NT-21: Investigar ciclos termodinámicos apropiados para el aprovechamiento óptimo del recurso.

Figura 31. Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para explotar recursos no convencionales: súper calientes.

Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para explotar recursos no convencionales: roca seca caliente

- NT-22: Optimizar la aplicación de los estudios exploratorios mediante la simulación numérica de la respuesta geofísica y geoquímica de sistemas con baja permeabilidad y alta temperatura.
- NT-23: Integrar métodos de prospección.
- NT-24: Caracterizar las condiciones físico-químicas de sistemas de roca seca caliente con base en pruebas de laboratorio.
- NT-25: Asimilar métodos ambientalmente aceptables para generar permeabilidad secundaria en sistemas de roca seca caliente.

Figura 32. Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para explotar recursos no convencionales: roca seca caliente Necesidades

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capacidad geotérmica instalada para diciembre del 2015 (12.63 GW) en los principales países del mundo. Modificado de Bertani, 2015.....	6
Figura 2. Capacidad geotérmica instalada y ampliada en México para diciembre del 2015. REN21's Renewables 2016 Global.....	8
Figura 3. Generación de electricidad neta de las diferentes fuentes para el año 2015 en México, donde el 77.3% siguen siendo fuentes no renovables y solo el 22.7% son fuentes renovables. Informe anual de la CFE (2015).....	9
Figura 4. Vistas panorámicas de los cuatro principales campos geotérmicos en México:.....	11
Figura 5. Tipo de estudio geológico y la información que se obtiene del mismo en un proyecto de exploración geotérmica (Tomada de Torres, et al., 1993).....	22
Figura 6. Tipos de estudios hidrogeológicos y la información que se obtiene de los mismos en proyectos con fines de exploración geotérmica (Tomada de Torres, et al.1993).....	23
Figura 7. Imagen de rayos infrarrojos de la superficie del mar (Modificada de www.spitzer.edu ,2007).....	30
Figura 8. Distribución de los sismos seleccionados, mecanismos focales simples y de tensor de momento con polaridad compresional y dilatacional (Tomada de Lermo, et al., 2008).....	36
Figura 9. Tipos de estudios geofísicos y la información que se obtiene de los mismos en proyectos con fines de exploración geotérmica.....	38

Figura 10. Plan direccional del pozo modelo, Fuente: Confidencial (2011).....	47
Figura 11. Proceso de compactación y sedimentación, Fuente: PEMEX (2008) Guía de predicción geopresiones.....	50
Figura 12. Clasificación de cementos, Fuente: PEMEX (2012) Técnicas y operaciones de cementación de pozos petroleros.....	54
Figura 13. Profundidad y diámetro de zapata, Fuente: Confidencial (2012).....	55
Figura 14. Información del Pozo, Fuente: Confidencial (2012).....	56
Figura 15. CBL-VDL, 3er. Etapa, Fuente: Confidencial (2012).....	57
Figura 16. Registro de presión, Fuente: tesis desarrollo de pozos geotérmicos.....	58
Figura 17.Registro de temperatura Fuente: tesis desarrollo de pozos geotérmicosLizbeth-Hernández.....	58
Figura 18. Indicadores de permeabilidad, Fuente: Gustavo Ortega (2017), Conceptos básicos de ingeniería de yacimientos geotérmicos.....	60
Figura 19 Condiciones finales, Fuente: Confidencial (2012).....	62
Figura 20. Proceso de corte por chorro, Fuente: Confidencial (2012).....	67
Figura 21. Acontecimientos de interés Zona 3, Fuente: Confidencial (2012)	67

Figura 22. . Flujo de retorno en Zona 1, Fuente: Grupo Enal (2012) Estimulación de pozo geotérmico con el uso de barrena cortadora de chorro.....	68
Figura 23. Gráfica comparativa de emisiones de CO ₂ , de las principales fuentes de generación de electricidad (Kg/MWh). Fuente: IAEA 2010.....	83
Figura 24. Temperaturas aproximadas de los fluidos geotérmicos para usos directos.....	85
Figura 25. Esquema de un circuito cerrado, utilizado para la calefacción de edificio.....	88
Figura 26. Diagrama de una planta de vapor seco.....	92
Figura 27. Diagrama de una planta de separación de vapor.....	93
Figura 28. Diagrama de una planta de ciclo binario.....	94
Figura 29. Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para incrementar el aprovechamiento de los recursos de mediana y alta entalpía.....	101
Figura 30. Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para explotar recursos de baja entalpía.....	101
Figura 31. Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para explotar recursos no convencionales: súper calientes.....	102
Figura 32. Necesidades tecnológicas asociadas a los retos prioritarios para explotar recursos no convencionales: roca seca caliente.....	102

BIBLIOGRAFIAS

“Apuntes del tema geotermia de la asignatura geología de explotación del petróleo, agua y vapor” tesis de Claudia Berenice Martínez Safora (UNAM)

“Desarrollo de pozos geotérmicos.” Lizbeth Hernández Ramírez, tesis (IPN)

“Modelado inicial para yacimientos geotérmicos durante la etapa de exploración” Andraca Gutiérrez Fabián Huematzin - Rodríguez Marian José Roberto tesis (UNAM)

“Procesos de perforación y terminación de pozos geotérmicos” Daniel Delgado Cid Roberto Ildair Juárez Ortega tesis (UNAM)

“Cartera de necesidades de innovación y desarrollo tecnológico geotermia” Número de proyecto IMP F.61493. Mapas de Ruta Tecnológica para los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIE's).