



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“PROCESOS DE PERFORACIÓN Y
TERMINACIÓN DE POZOS
GEOTÉRMICOS”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO**

PRESENTAN:

DANIEL DELGADO CID

ROBERTO ILDAIR JUÁREZ ORTEGA



**ASESOR: ING. JOSÉ AGUSTÍN VELASCO
ESQUIVEL**

MÉXICO, D.F. 2014

A la memoria de mi madre:

Guadalupe Cid Torres

Por darme la vida y nunca dejar de creer en mí.

AGRADECIMIENTOS:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater y la Facultad de Ingeniería por permitirme forjar gran parte de lo que soy.

A mis hermanas Carolina Valenzuela y Gabriela Delgado por brindarme en todo momento su apoyo incondicional.

A la familia Salas Crivelli, Señora Nelly Crivelli y Señor Carlos Salas por su orientación y apoyo; y a Marcela y Lucero Salas por considerarme como parte de su familia.

A Priscila Stivaly Calixto por compartir gran parte de su ser conmigo durante la culminación de esta importante etapa de mi vida.

A mis amigos Carlos Salas, Edgar Aguirre y Luis Alberto Vázquez por estar conmigo en las buenas y en las malas desde hace tiempo.

A mis amigos de la facultad, Ildair Juárez, Martín Alegría, Fernando Jiménez, Ricardo Téllez, Karen López, Raquel Chávez, Abdula Sánchez, Omar Vera y todos los que me faltan por nombrar; por haber sido parte de mí durante mi formación profesional en la universidad.

A mis tíos, Librado Cid y María del Carmen Márquez por otorgarme su apoyo durante la última etapa de mis estudios.

“No sólo no hubiera sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo, algunos siguen hasta hoy:

Gracias... Totales.”

Roberto Ildair Juárez Ortega

AGRADECIMIENTOS.

A las dos personas más importantes en mi vida, con todo mi cariño, amor y respeto, ya que hicieron todo lo posible y hasta lo imposible para que pudiera lograr todos mis sueños, por nunca dejarme solo, por apoyarme en todos y cada uno de los momentos en los que necesitaba una mano, por ser las únicas personas que nunca me darán la espalda y porque estoy orgulloso de ellos... Mis padres, Antonia Ortega y José Juárez.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi alma mater.

SENKA TLASOJKAMATI.

ABSTRACT	1
RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPITULO 1. ANTECEDENTES	5
1.1 Historia de la Industria Geotérmica	5
1.2 Aplicaciones de la Industria Geotérmica	7
1.2.1 Uso directo	9
1.2.1.1 Bombas de Calor Geotérmicas (BCG)	11
1.2.1.2 Balneología	11
1.2.1.3 Calefacción de edificios e invernaderos	12
1.2.1.4 Acuacultura	13
1.2.1.5 Otras Aplicaciones	14
1.2.2 Uso indirecto (Generación de Energía eléctrica)	14
1.2.2.1 Plantas de Vapor Seco	15
1.2.2.2 Plantas de Separación de Vapor	16
1.2.2.3 Plantas de Ciclo Binario	16
1.3 Panorama Mundial de la Industria Geotérmica	17
1.3.1 Principales países productores de energía eléctrica a partir de Recursos Geotérmicos	19
1.3.1.1 Estados Unidos	19
1.3.1.2 Filipinas	20
1.3.1.3 Indonesia	20
1.3.1.4 México	21
1.3.1.5 Italia	22
1.4 Potencial Geotérmico en México	22
1.4.1 Campos Geotérmicos en México	22
1.4.1.1 Cerro Prieto	23
1.4.1.2 Los Azufres	23
1.4.1.3 Los Humeros	23
1.4.1.4 Las Tres Vírgenes	24
1.4.1.5 Cerritos Colorados (No desarrollado)	24
1.4.2 Reservas Probadas, Probables y Posibles en México	24
1.4.2.1 Reservas Probadas	25
1.4.2.2 Reservas Probables	25
1.4.2.3 Reservas Posibles.	25
1.4.2.4 Recursos Geotérmicos	25
1.4.2.4 Reservas en México	26

CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS	28
2.1 Tipos de rocas asociadas a un yacimiento geotérmico	28
2.1.2 Tipos y composición de las Rocas	28
2.1.3 Rocas Ígneas	28
2.1.3.1 Rocas Ígneas Intrusivas y Extrusivas	29
2.1.3.2 Textura de las Rocas Ígneas	29
2.1.3.3 Composición mineralógica	30
2.1.3.4 Clasificación química de Rocas Ígneas	31
2.1.3.5 Clasificación IUGS (<i>International Union of the Geological Sciences</i>) de las Rocas Ígneas	31
2.1.4 Rocas Sedimentarias	32
2.1.4.1 Rocas Sedimentarias Detríticas	33
2.1.4.1 Rocas Sedimentarias Químicas y Bioquímicas	33
2.1.5 Rocas Metamórficas	34
2.1.5.1 Composición mineralógica de las rocas Metamórficas	35
2.1.5.2 Tipos de metamorfismo	35
2.1.5.3 Clasificación de las Rocas Metamórficas (clase textural y clase química)	35
2.1.6 Ciclo de las Rocas	37
2.2 Gradiente Geotérmico y Ambiente Tectónico	38
2.2.1 Flujo de calor terrestre	38
2.2.1.1 Propagación del calor terrestre	39
2.2.1.2 Gradiente geotérmico	39
2.2.2 Tectónica de placas	40
2.2.2.1 Límite de placas	40
2.3 Componentes geológicos y propiedades petrofísicas de yacimientos geotérmicos	42
2.3.1 Definición de yacimiento geotérmico	42
2.3.2 Clasificación de los sistemas geotérmicos	43
2.3.2.1 Sistemas Convectivos Hidrotermales	43
2.3.2.2 Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS)	43
2.3.2.3 Sistemas Geopresurizados	44
2.3.2.4 Sistemas Marinos	44
2.3.2.5 Sistemas Magmáticos	44
2.3.3 Propiedades petrofísicas básicas de yacimientos geotérmicos	44
2.3.3.1 Porosidad	44
2.3.3.2 Permeabilidad y conductividad hidráulica	45
CAPÍTULO 3. TOMA DE REGISTROS DURANTE LA PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS	47
3.1 Registros Geofísicos de Pozos	47
3.2 Registros Geofísicos durante la perforación de pozos geotérmicos	47

3.2.1 Registro de Resistividad	48
3.2.1.1 Funcionamiento de la Herramienta	49
3.2.1.2 Aplicación del Registro	50
3.2.2 Registro de Rayos Gamma	51
3.2.2.1 Funcionamiento de la Herramienta	52
3.2.2.2 Aplicación del Registro	53
3.2.3 Registro de Porosidad (Neutrón–Neutrón)	54
3.2.3.1 Funcionamiento de la Herramienta	54
3.2.3.2 Aplicación de la Herramienta	55
3.2.4 Registro de Imagen de pared de pozo.	56
3.2.4.1 Funcionamiento de la herramienta	57
3.3 Registros de Temperatura y Presión	58
3.3.1 Herramientas para la toma de Registros de Temperatura y Presión	58
3.3.2 Registro de Temperatura	59
3.3.2.1 Mapas de temperatura de los yacimientos geotérmicos	61
3.3.3 Registro de Presión	61
3.3.3.1 Mapas isobáricos	64
3.4 Registro de Diámetro de pozo (<i>Caliper</i>)	64
CAPÍTULO 4. PROCESO DE PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICO	67
4.1 Principales componentes del equipo de perforación rotaria en pozos geotérmicos	67
4.1.1 Sistema de suministro de potencia	68
4.1.2 Sistema de izaje	68
4.1.3 Sistema circulación	69
4.1.4 Sistema de rotación	71
4.1.5 Sistema de control de brotes	73
4.1.6 Sistema de monitoreo	74
4.1.7 Selección de la Unidad de perforación	75
4.2 Herramientas y fluidos de perforación para pozos geotérmicos	76
4.2.1 Barrenas (<i>Bits</i>)	76
4.2.1.1 Barrenas Tricónicas (<i>Roller-cone bits</i>)	76
4.2.1.2 Barrenas de cortadores fijos (<i>Drag bits</i>)	77
4.2.1.3 Barrenas nucleadoras (<i>Core bits</i>).	78
4.2.1.4 Martillos para perforación por percusión (<i>Impax Hammer Bit System</i>)	79
4.2.2 Sarta de perforación (<i>Drill string</i>)	80
4.2.2.1 Tubería de perforación (<i>Drill pipe</i>)	81
4.2.2.2 Tubería de perforación con aislante térmico (<i>Insulated Drillpipe</i>)	82
4.2.2.3 Portabarrenas (<i>Bit sub</i>)	82

4.2.2.4 Lastrabarrenas (<i>Drill Collar</i>)	83
4.2.2.5 Tubería pesada (<i>Heavy Weight</i>)	84
4.2.2.6 Estabilizadores (<i>Stabilizers</i>)	84
4.2.2.7 Rimadores (<i>Reamers</i>)	85
4.2.2.8 Amortiguadores (<i>Shock sub</i>)	86
4.2.2.9 Martillos (<i>Jars</i>)	86
4.2.3 Fluidos de perforación para pozos geotérmicos	87
4.2.3.1 Propiedades de los fluidos de perforación	87
4.2.3.2 Principales Fluidos de perforación utilizados en la industria geotérmica	88
4.3 Asentamiento y diseño de tubería de revestimiento	89
4.3.1 Geopresiones	90
4.3.2 Asentamiento de tubería de revestimiento	92
4.3.2.1 Ventana operacional	94
4.3.2.2 Selección de asentamiento de tubería de revestimiento	94
4.3.3 Propiedades físicas de las tuberías de revestimiento	96
4.3.4 Diseño de tubería de revestimiento	96
4.3.4.1 Diseño uniaxial	98
4.3.4.2 Diseño biaxial	103
4.3.4.3 Efectos de la temperatura en la tubería de revestimiento	103
4.3.5 Cementación	104
4.3.5.1 Proceso de Cementación Primaria (Método convencional)	106
4.3.5.2 Tipos de cementos utilizados en la industria geotérmica	107
4.6 Perforación direccional de pozos geotérmicos	109
4.6.1 Tipos de trayectorias	109
4.6.2 Principales herramientas especiales para desviar trayectoria	111
4.6.3 Perforación de pozos direccionales en la industria geotérmica	111
4.6 Problemas durante la perforación de pozos geotérmicos	112
4.7.1 Perdidas de circulación	112
4.7.2 Atascamiento de la sarta por presión diferencial	113
4.7.3 Inestabilidad del pozo	113
4.7.4 Dificultades durante la cementación	114
4.7.5 Reducción del diámetro de pozo	114
CAPÍTULO 5. PROCESO DE TERMINACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS	116
5.1 Tipos de pozos geotérmicos	116
5.1.1 Pozos exploratorios	116
5.1.2 Pozos de desarrollo	117
5.2 Terminación de pozos geotérmicos productores	117
5.2.1 Terminación en agujero descubierto	117

5.2.2 Terminación con tubería corta ranurada	118
5.2.3 Terminación con tubería corta ranurada y extensión de agujero	119
5.2.4 Terminación bilateral	120
5.2.5 Cabezal de pozo y árbol de válvulas	121
5.3 Terminación de pozos geotérmicos inyectores	122
5.3.1 Terminación en agujero descubierto	122
5.3.2 Terminación con tubería corta ranurada	123
5.4 Empacadores	123
5.5 Corrosión e incrustaciones en la tubería de revestimiento	124
5.6 Estimulación química de pozos geotérmicos	125
5.7 Proceso de producción de pozos geotérmicos	127
CONCLUSIONES	129
Anexo 1. Diagrama del diseño de la perforación y terminación en pozos geotérmicos	132
Anexo 2. Diagrama del proceso operativo de perforación de pozos geotérmicos	133
Glosario	134
Bibliografía	139

Abstract

Geothermal energy is energy stored as heat 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.

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 profesional 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.

El presente trabajo pretende mostrar a los interesados en el tema de manera sencilla y practica 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.

Introducción

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.

La energía geotérmica se define como, la energía que se encuentra almacenada en forma de calor en el subsuelo, su principal uso en nuestro país es la generación de electricidad. En la actualidad México es uno de los principales países en cuanto a producción de energía geotermoeléctrica, aunque no se considera como un recurso que cubra la demanda de energía para el futuro.

Para la explotación de la energía geotérmica, es necesaria la perforación de pozos con el objetivo que crear y acondicionar un ducto (pozo) que servirá como medio para transportar los fluidos geotérmicos desde el subsuelo hasta la superficie, para que posteriormente sean empleados para la generación de energía eléctrica.

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.

En el capítulo uno, se exponen los conceptos fundamentales de la energía geotérmica, así como sus principales aplicaciones y la historia del uso comercial de esta fuente energética. Por último se da a conocer el panorama mundial de la energía geotérmica y las reservas con las que cuenta México en los diferentes campos operados por la Comisión Federal de Electricidad.

Para poder perforar los pozos geotérmicos es necesario conocer la geología general de los yacimientos geotérmicos, por lo que en el capítulo dos se explican las propiedades de las rocas presentes en estos yacimientos (principalmente rocas volcánicas y metamórficas), así como la relación que existe entre la tectónica de placas y la ubicación de los sistemas geotérmicos.

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.

El proceso de perforación de los pozos geotérmicos difiere un poco al realizado en los pozos de hidrocarburos, sin embargo existen diferencias en el equipo, herramientas y las técnicas empleadas, que deben de ser consideradas durante todo el proceso de perforación. Parámetros como las altas temperaturas que se manejan en los pozos geotérmicos, la geología volcánica fracturada a perforar y los fluidos altamente corrosivos son los que principalmente hacen la diferencia; el procedimiento convencional se describe en el capítulo cuatro.

Por último, la terminación de pozos geotérmicos se explica en el capítulo cinco, en donde se documentan los tipos de pozos geotérmicos, la terminación de cada uno de estos, así como las ventajas y desventajas de cada una. Una breve descripción del proceso de producción (objetivo de la terminación de un pozo) es descrita en el mismo.

CAPITULO 1. ANTECEDENTES

Como la perforación y la terminación de pozos geotérmicos son operaciones necesarias para la explotación de la industria geotérmica. A pesar de que tiene otras aplicaciones, el término Industria geotérmica se refiere primordialmente a la generación de electricidad a partir de fluidos a altas temperaturas provenientes del subsuelo, es por ello que para lograr la extracción de dichos fluidos confinados en el interior de la corteza terrestre, deben de llevarse a cabo de manera correcta los procesos de perforación y terminación de pozos geotérmicos.

El desarrollo de la industria geotérmica tiene sus inicios en el aprovechamiento directo de la *energía térmica emanada de la tierra (geotermia)*, posteriormente con la ayuda de los avances tecnológicos, dicha energía fue transformada en energía eléctrica con mayor aprovechamiento, determinando así lo que se conoce como uso indirecto. Es por ello que la industria geotérmica ha tomado gran relevancia a nivel mundial.

1.1 Historia de la Industria Geotérmica

El uso y explotación de la energía geotérmica en su forma directa data de aproximadamente hace 10,000 años, tiempo durante el cual el ser humano empleaba el calor que afloraba de forma natural en la superficie del planeta. Debido a los avances técnicos y mejor conocimiento del subsuelo a partir del siglo XIX, se pudo implementar la búsqueda de esta fuente energética en el subsuelo y cada vez a mayor profundidad para así explotarla con mayor eficiencia.

Para 1827 el francés Francois Larderel desarrollo un sistema en el cual empleaba el calor de los fluidos provenientes del subsuelo en el proceso de evaporación, con ello mitigaba la quema de madera proveniente de los bosques aledaños; por ello es considerado como el fundador de la industria geotérmica.

En 1883 en París, Francia se inició el primer sondeo a profundidad, se trataba de un pozo de 548 metros de profundidad (Figura 1), el cual tardo en construirse aproximadamente ocho años. Con este pozo se obtenía agua a una temperatura de 30°C proveniente de un acuífero alojado en areniscas de la Cuenca de Paris.

A partir del siglo XX se comenzaron a emplear los recursos geotérmicos de manera comercial debido a las necesidades de abastecimiento y los requerimientos energéticos de las civilizaciones modernas.

En 1904 en Larderello, Italia se registraron los primeros trabajos de generación de electricidad a partir del vapor geotérmico, lo cual contribuyo a que en 1913 entrara en funcionamiento la primera central generadora de electricidad a partir de vapor proveniente del subsuelo, generando 250 kW (Figura 2).



Figura 1. Primer pozo geotérmico perforado en Larderello, Italia.
Fuente: Página oficial del Museo della geotermia.

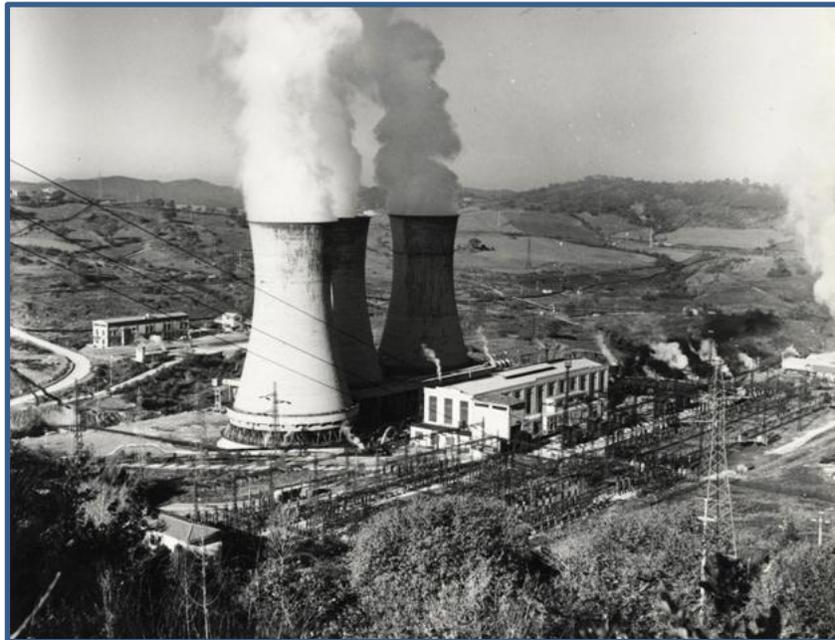


Figura 2. Primera central generadora de electricidad a partir de fluidos geotermiales. *Fuente: Página oficial del Museo della geotermia.*

Para 1919 en Asia ya se perforaban los primeros pozos en Beppu, Japón, en 1924 se instaló una planta generadora de energía eléctrica (experimental) de 1 kW. En 1921 en la zona denominada *The Geysers* ubicada en California, Estados Unidos se perforaron un par de pozos para que posteriormente se instalara una pequeña máquina de vapor conectada a un dinamo para producir electricidad comercial.

Durante la década de los setenta comienza una intensa actividad de exploración e investigación de recursos geotérmicos alrededor del mundo; esto encaminado a utilizar dichos recursos en mayor medida para la producción de energía eléctrica, así como para calefacción o simplemente agua caliente.

En la década de 1990, debido a las exigencias ambientales, en particular a la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera, la explotación de la energía geotérmica para generar electricidad empieza a tener un gran desarrollo a nivel internacional.

Actualmente en el mundo se generan alrededor de 10 GW provenientes de los diferentes campos geotérmicos alrededor del mundo, donde los principales generadores son Estados Unidos, Filipinas, Indonesia y México con una capacidad de 958 MW.

En México la industria geotérmica tiene sus raíces en el año de 1959, año en el que se instala la primera planta experimental con una capacidad efectiva de 600 kW en la zona de Pathé en el estado de Hidalgo.

En 1973 inicia formalmente la etapa industrial de explotación de los recursos geotérmicos en nuestro país con la inauguración de las dos primeras unidades del campo Cerro Prieto Uno ubicado en el estado de Baja California, con capacidad de generación de 37.5 MW cada una. En 1982 inicia la explotación comercial del campo denominado Los Azufres en el estado de Michoacán con la entrada en operación de 5 unidades de contrapresión de 5 MW cada una. En el año de 1990 se comenzó la explotación del yacimiento geotérmico Los Humeros con la instalación de la primera unidad con una capacidad de 5 MW. A mediados del año 2001 empezaron a funcionar las primeras dos unidades turbogeneradoras a condensación de 5 MW cada una en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes ubicado en el estado de Baja California Sur.

1.2 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, como se muestra en la figura 3.

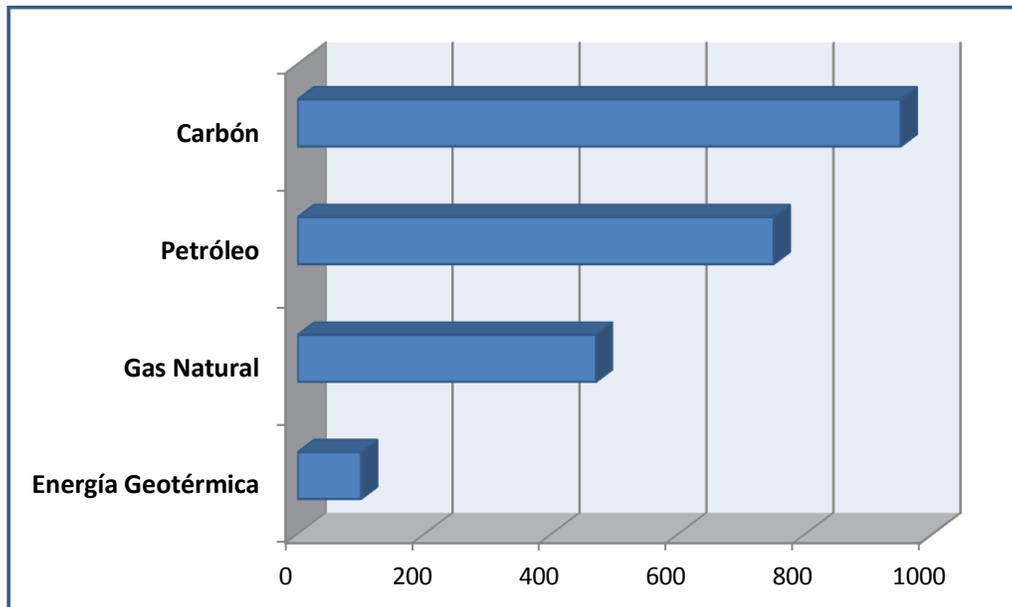


Figura 3. Grafica comparativa de emisiones de CO₂, de las principales fuentes de generación de electricidad (Kg/MWh). Fuente: IAEA 2010

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 yacimientos debe ser adecuada para la explotación del fluido

1.2.1 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 4.

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 4. 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:

1.2.1.1 Bombas de Calor Geotérmicas (BCG)

Una bomba de calor es una maquina 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.

1.2.1.2 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 subaplicación 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 mas 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.

1.2.1.3 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 5.

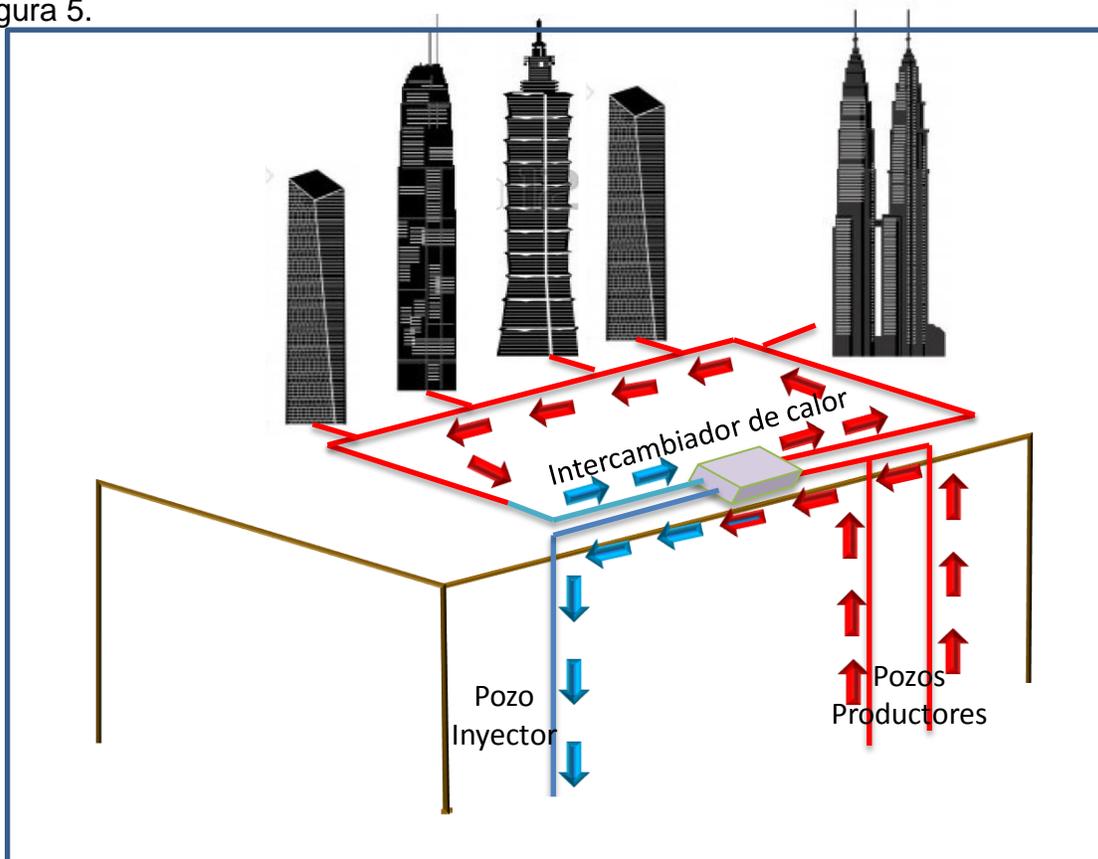


Figura 5. Esquema de un circuito cerrado, utilizado para la calefacción de edificios.

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.

1.2.1.4 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.

1.2.1.5 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

1.2.2 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

1.2.2.1 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 inyectores (figura 6).

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

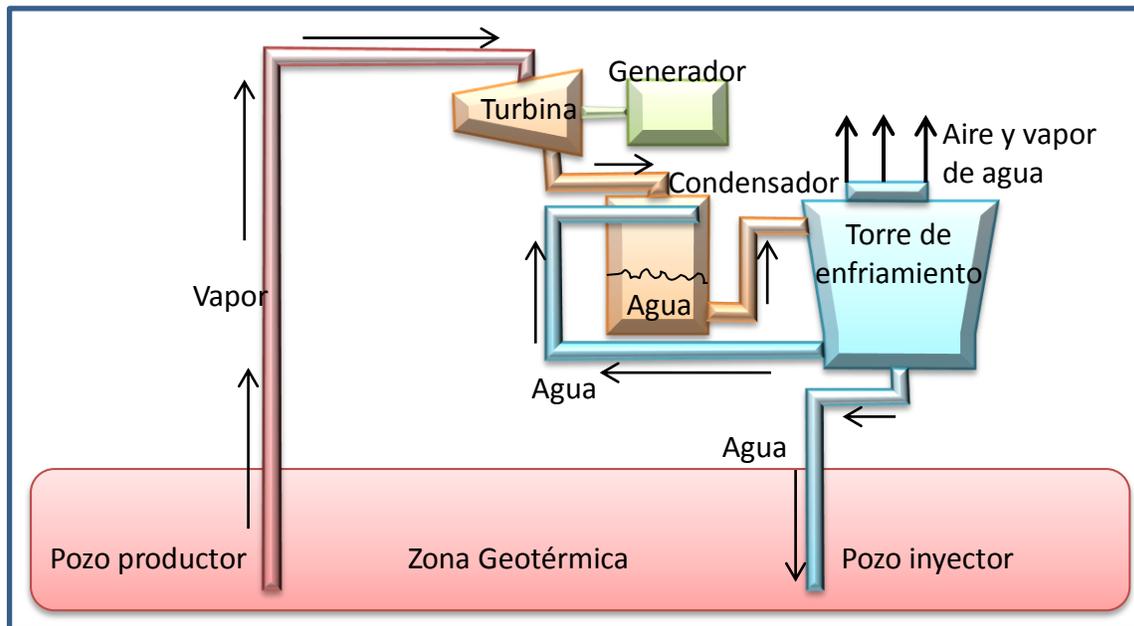


Figura 6. Diagrama de una planta de vapor seco.

1.2.2.2 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 7).

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.

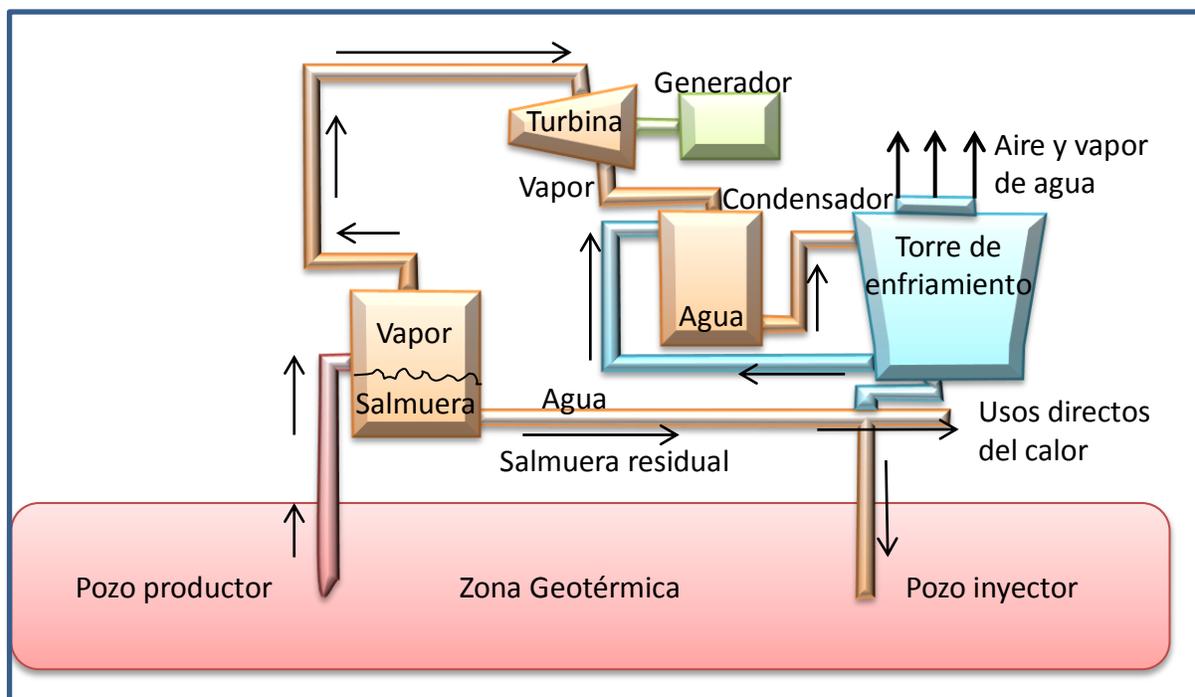


Figura 7. Diagrama de una planta de separación de vapor.

1.2.2.3 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, como se muestra en la figura 8.

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.

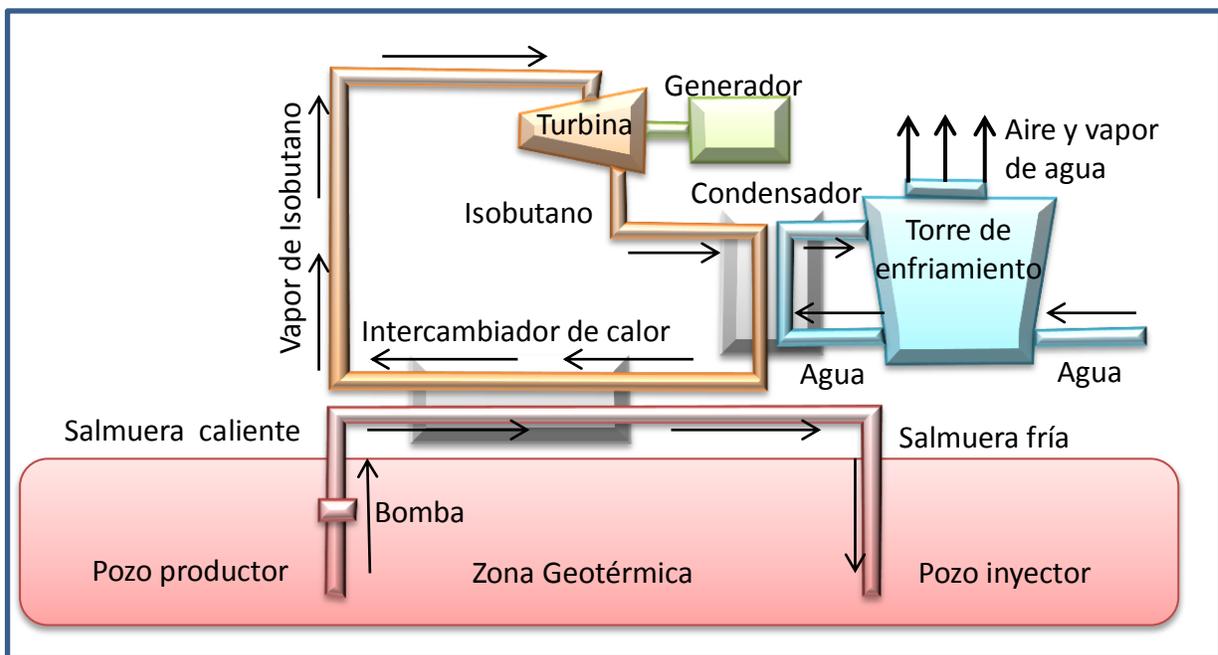


Figura 8. Diagrama de una planta de ciclo binario.

1.3 Panorama Mundial de la Industria Geotérmica

El sistema energético actual a nivel mundial, está basado en la generación de energía a partir de combustibles fósiles tales como: el petróleo, carbón vegetal y mineral, así como el gas. Generar energía a partir de esta materia tiene muchos inconvenientes: son recursos limitados que se encuentran en puntos específicos del planeta, su uso a gran escala está provocando graves efectos en el medio ambiente y en la salud de los seres humanos, adicionalmente las reservas mundiales se están agotando.

Es por ello que a nivel mundial se han implementado y desarrollado métodos de generación de energía a partir de recursos renovables que mitiguen la problemática de generar energía a partir de fuentes fósiles. Las fuentes

renovables que actualmente son explotadas a nivel mundial son:

- Energía eólica
- Energía solar
- Energía hidráulica
- Biomasa
- Energía geotérmica
- Energía undimotriz

Los porcentajes en los que se utilizan cada una de las energías renovables se muestran en la figura 9.

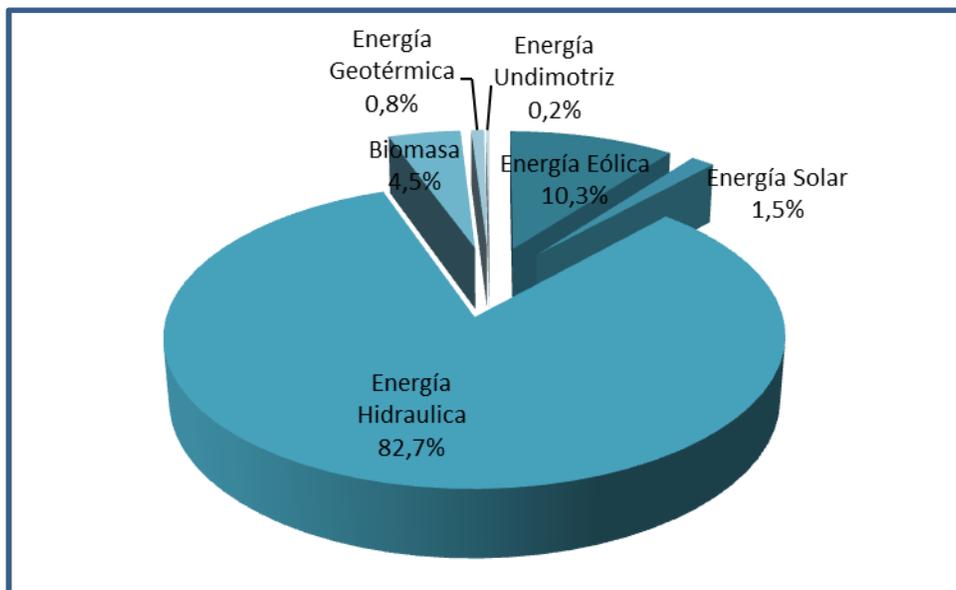


Figura 9. Energías renovables utilizadas en el mundo y su porcentaje de uso.
Fuente: *Renewables Global Status Report 2011*

Actualmente la explotación de la energía geotérmica va en aumento sustancial. La generación de energía eléctrica a partir de los recursos geotérmicos es la de mayor importancia, y en el mundo la capacidad de generación de electricidad a partir de este recurso también va en aumento. Además, la mayor parte de los recursos mundiales de energía geotérmica se están produciendo en países con gran potencial de recursos geotérmicos sin explotar.

En Estados Unidos y Europa las industrias emplean cada vez más los ciclos binarios, los cuales usan recursos geotérmicos de temperatura moderada y baja para la generación de energía eléctrica. De igual forma las políticas nacionales en materia energética impulsan su crecimiento.

1.3.1 Principales países productores de energía eléctrica a partir de Recursos Geotérmicos

A nivel mundial, los principales recursos geotérmicos se localizan en los límites de las diversas placas tectónicas, en la llamada litosfera.

Como los sistemas geotérmicos se forman preferentemente en los bordes de las placas tectónicas, donde también suelen ocurrir fenómenos de vulcanismo y sismicidad, los países ubicados en o cerca de estos sitios son los que poseen más recursos.

Los principales países productores de energía eléctrica a partir de fuentes geotérmicas son citados a continuación.

1.3.1.1 Estados Unidos

Primer lugar en la producción de energía eléctrica a partir de energía geotérmica. El desarrollo de los recursos geotérmicos en este país comenzó en la década de los 60, desde esa época ha sido el líder global en el desarrollo de estos recursos. Actualmente cuenta con una capacidad instalada de 3,186 MW que representan 0.3% de la producción nacional.

Su capacidad de producción está concentrada de los estados de California y Nevada principalmente sin embargo existen plantas en operación en los estados de Alaska, Hawaii, Idaho, Oregon, Utah y Wyoming.

El campo geotérmico *The Geysers* es al campo de vapor seco más grande del mundo y el principal aportador de energía en Estados Unidos, ubicado al norte de San Francisco en el estado de California.



Figura 10. Mapa de las zonas con mayor potencial Geotérmico en la zona occidente de Estados Unidos

1.3.1.2 Filipinas

Segundo país productor de electricidad proveniente de energía geotérmica. Han explotado la energía geotérmica desde 1977, cuando la primera planta geotérmica se construyó en la Isla de Leyte.

Actualmente la capacidad de generación es de 1,972 MW, lo que representa el 27% de la generación total de energía eléctrica. El gobierno filipino planea incrementar la capacidad de producción de 1,972 a 3,447 MW en un periodo que va del año 2009 al 2030 de acuerdo a su Plan de Energía.



Figura 11. Campos geotérmicos en Filipinas

1.3.1.3 Indonesia

Tercer lugar a nivel mundial en producción de electricidad a partir de fuentes geotérmicas. Es el país que posee el mayor potencial de recursos geotérmicos debido a la gran actividad volcánica que se presenta en sus islas, se estima que cuenta con un potencial de 27,510 MW.

A la fecha en esta país se producen 1,197 MW, lo que representa un porcentaje de 3.7% de la producción nacional total de energía.



Figura 12. Areas con potencial geotérmico en Indonesia

1.3.1.4 México

Cuarto país productor de energía eléctrica proveniente de fuentes geotérmicas. En 1973 comienza la explotación comercial de los recursos geotérmicos en el campo Cerro Prieto. La explotación y transformación de energía geotérmica está a cargo de la Comisión Federal de Electricidad CFE.

La capacidad instalada de producción actualmente es de 958 MW, lo que representa el 2.7% de la producción de energía eléctrica total del país.



Figura 13. Campos geotérmicos en México.

1.3.1.5 Italia

Quinto mayor productor de electricidad a partir de energía geotérmica. En este país es en donde se construyó la primera planta geotérmica en un campo de vapor seco en Larderello en 1913. Actualmente existen dos áreas geotérmicas en explotación, Larderello y Monte Amiata en la región de la Toscana.

La producción de electricidad instalada es de 843 MW, representando el 10% de la energía eléctrica producida a nivel nacional.



Figura 14. Áreas Geotérmicas en la región de Toscana, Italia.

1.4 Potencial Geotérmico en México

En México al igual que en muchos otros países, la generación de energía eléctrica es la mayor aplicación de los recursos geotérmicos. Los usos directos se limitan únicamente a balneología y calefacción de albercas.

1.4.1 Campos Geotérmicos en México

Existen 4 campos que actualmente son explotados para la generación de electricidad, los cuales son operados por la CFE, sin embargo también existen proyectos en etapa exploratoria y no desarrollados. A continuación se describen los campos más importantes:

1.4.1.1 Cerro Prieto

Ubicado en la parte norte de México muy cerca de la frontera con Estados Unidos a 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, capital del estado de Baja California. Es el segundo campo geotérmico más grande del mundo después de *The Geysers*, en California, EUA y es el campo más grande de líquido dominante, siendo su explotación una de las más exitosas.

Es un campo de tipo sedimentario, en el cual los fluidos geotérmicos se alojan en rocas areniscas. La fuente de calor es una anomalía térmica formada por el adelgazamiento de la corteza terrestre.

En este campo actualmente se tienen instaladas cuatro centrales geotermoeléctricas con una capacidad total de 720 MW, todas ellas unidades de separación de vapor. Se han perforado más de 300 pozos a profundidades que van desde los 700 hasta los 4300 metros, con un promedio de 2500 metros.

1.4.1.2 Los Azufres

Se encuentra en la parte central de México, en el estado de Michoacán a 200 km de la Ciudad de México en la denominada Faja Volcánica Mexicana, en la cual se encuentran volcanes actualmente activos tales como el Popocatepetl y el Volcán de Colima.

Los Azufres es un campo de tipo volcánico cuyos fluidos geotérmicos están contenidos en rocas de tipo andesítico.

Actualmente la CFE tiene instalados 188 MW distribuidos en una unidad de condensación (50 MW), cuatro unidades de flasheo simple (100 MW), siete unidades a contrapresión (35 MW) y dos unidades de ciclo binario (3 MW). En este campo se han perforado más de 80 pozos con profundidades de 600 a 3544 metros con una temperatura máxima de fondo de 358°C.

1.4.1.3 Los Humeros

Este campo se localiza en la parte oriental de la Faja Volcánica Mexicana, en los límites de los estados de Puebla y Veracruz a 200 km de distancia de la Ciudad de México.

Los Humeros es otro campo volcánico, ubicado en el interior de una caldera volcánica cuyas últimas erupciones ocurrieron hace 20.000 años. La roca que alojan a los fluidos geotérmicos son andesíticas.

El campo geotérmico Los Humeros está constituido por 8 unidades turbogeneradoras de contrapresión con capacidad para generar en total 40 MW (5

MW cada una). A la fecha se ha perforado más de 40 pozos con una temperatura de fondo en promedio de 400 °C.

1.4.1.4 Las Tres Vírgenes

Este campo se ubica en la parte media de la península de Baja California, en la parte norte del estado de Baja California Sur a 32 km del poblado de Santa Rosalía. Es igualmente un campo volcánico, su fuente de calor es probablemente una cámara magmática del volcán La Virgen, los fluidos geotérmicos están alojados en rocas de tipo intrusivo

Se han instalado dos plantas de tipo condensación en este campo geotérmico, con una capacidad total de 10 MW, las cuales entraron en operación en el año de 2001, siendo el campo en explotación más joven en México. Las plantas alimentan a ciudades como Santa Rosalía y otras poblaciones que están aisladas del sistema eléctrico nacional. Al día de hoy se han perforado más de 6 pozos tanto productores como inyectores.

1.4.1.5 Cerritos Colorados (No desarrollado)

Localizado en la parte occidental de la Faja Volcánica Mexicana, en las periferias de la ciudad de Guadalajara, Jalisco y conocido anteriormente como La Primavera.

El campo está ubicado dentro de una caldera volcánica, la fuente de calor es la cámara magmática. Los fluidos geotérmicos se encuentran alojados en rocas andesíticas plio-cuaternarias.

Se estima que los fluidos están alojados a una profundidad promedio de 2100 metros. La CFE ha perforado en este campo 13 pozos de los cuales 6 resultaron productores, sin embargo el campo no se ha podido aprovechar debido a la carencia de permisos y licencias en material ambiental.

1.4.2 Reservas Probadas, Probables y Posibles en México

La energía eléctrica generada en los campos antes descritos representa 2.7 % del total de electricidad que es generada en nuestro país proveniente de las diferentes formas de generación tanto renovables como no renovables con un total de 958 MW. Para contabilizar el potencial de generación de energía eléctrica a partir de energía geotérmica en nuestro país a futuro es necesario definir los siguientes conceptos.

1.4.2.1 Reservas Probadas

Una Reserva Geotérmica se define como “la porción de un Recurso Geotérmico Identificado o Medido, el cual es considerado económicamente redituable después de haber tomado en cuenta las consideraciones tanto de Recursos Geotérmicos como de Factores de Modificación. Demostrando que bajo estas consideraciones la extracción de la energía podría razonablemente ser económica y tecnológicamente justificada”.

Las Reservas Probadas son definidas como “la parte económicamente redituable de un Recurso Geotérmico, la cual incluye un volumen de roca perforado y probado que ha demostrado contiene producción comercial para determinado tiempo de vida de un proyecto que se ha pronosticado es exitoso”.

Tomando en cuenta aspectos económicos, de mercado, legales, ambientales, sociales y gubernamentales, se debe demostrar que la extracción de la energía geotérmica es económicamente justificada para clasificarla como Reserva Probada.

Con base en esa definición, y tomando en cuenta el desarrollo de campos geotérmicos en México, las reservas probadas pueden ser definidas únicamente en campos explotados.

1.4.2.2 Reservas Probables

A este tipo de reserva se le define como “la parte económicamente recuperable de un Recurso Identificado, o en algunas circunstancias de un Recurso Medido. Se diferencian de las reservas probadas debido al grado de incertidumbre, normalmente dependiente de los factores que repercuten en la recuperación de la energía, tales como la productividad de los pozos y la duración de los proyectos.

Al clasificar las reservas como Probables, existen suficientes indicadores para caracterizar la temperatura e incluso la química, sin embargo existen menos medidas directas que indiquen la extensión del Recurso Geotérmico dentro de la profundidad de la perforación económicamente accesible.

1.4.2.3 Reservas Posibles

Son definidas como aquellas reservas que mediante manifestaciones termales superficiales y por geología permiten inferir la posibilidad de existencia de un Recurso Geotérmico.

1.4.2.4 Recursos Geotérmicos

Los Recursos Geotérmicos son definidos como “un Play Geotérmico que existe en

tal forma, calidad y cantidad que existen oportunidades razonables para una eventual extracción. Si no hay una oportunidad razonable para una eventual extracción redituable, entonces la cantidad de energía en cuestión no deberá ser incluida en los Recursos estimados”.

Un Play Geotérmico es un término informal cualitativo que hace referencia a una acumulación de calor contenido en la roca y/o fluidos dentro de la corteza terrestre.

Los Recursos Geotérmicos son subdivididos con el objetivo de incrementar el grado de certidumbre de manera geológica. Las subdivisiones son:

- El Recurso Medido es definido como la parte del Recurso Geotérmico que ha sido demostrado que existe mediante métodos directos que indican por lo menos la temperatura del yacimiento, volumen del yacimiento y productividad de los pozos de manera que la Energía Térmica Recuperable puede ser estimada con un alto grado de certidumbre.
- Un Recurso Identificado es la parte del Recurso Geotérmico que ha sido demostrada su existencia mediante métodos directos, los cuales indican la temperatura y las dimensiones de modo que la Energía Térmica Recuperable puede ser estimada con un nivel razonable de certidumbre.
- Los Recursos Inferidos se definen como aquella parte de los Recursos Geotérmicos en la cual la Energía Térmica Recuperable puede ser estimada con un bajo nivel de certidumbre.

1.4.2.4 Reservas en México

Para el cálculo de reservas geotérmicas el método más empleado, es el método volumétrico con el cual se ha obtenido potencial geotérmico nacional. Es el método más empleado, debido a que es aplicable virtualmente a cualquier entorno geológico en función de la cantidad y tipo de información con la que se cuente y los parámetros requeridos pueden ser medidos o estimados.

Con este método, primero se calcula la energía térmica contenida en un determinado volumen de roca y agua, posteriormente se estima que fracción de dicha energía puede ser recuperada.

Las Reservas Probadas en los distintos campos explotados en México son:

Campos Geotérmicos	Capacidad Actual (MWe)	Reservas Probadas (MWe)
Cerro Prieto, BC.	720	25
Los Azufres, Mich.	188	40
Los Humeros, Pue.	40	46
Las Tres Virgenes, BCS.	10	0
Cerritos Colorados, Jal.	0	75
Total	958	186

Tabla 1. Capacidad anual y Reservas Probadas en cada campo geotérmico Mexicano.
Fuente: Gutiérrez Negrín (2012) "Update of the Geothermal Electric Potential in México"

De acuerdo a las definiciones de Reservas Probables y Posibles en México se estiman que dichos recursos son de la siguiente magnitud:

Reserva	MWe
Probable	2077
Posible	7222
Total	9499

Tabla 2. Potencial geotérmico para las reservas probables y posibles en México.
Fuente: Gutiérrez Negrín (2012) "Update of the Geothermal Electric Potential in México"

Las zonas geotérmicas con mayor potencial en Reservas Posibles y Probables en nuestro país son:

Graben de Compostela, Nayarit. 110 MW
 Las Planillas, Jalisco. 80 MW
 Volcán Ceboruco, Nayarit. 65 MW
 Volcán Tacaná, Chiapas.
 La Soledad, Jalisco. 50 MW
 Volcán Chichonal, Chiapas. 45 MW
 Hervores de la Vega, Jalisco. 45 MW
 Pathé, Hidalgo. 40 MW
 San Antonio El Bravo, Chihuahua. 30 MW
 Cuitzeo Lake (Araró), Michoacán. 25 MW
 Los Hervores-El Molote, Nayarit. 25 MW
 Los Negritos, Michoacán. 20 MW
 Ixtlán de los Hervores, Michoacán. 15 MW
 El Orito-Los Borbollones, Jalisco. 10 MW
 Santa Cruz de Atistique, Jalisco. 10 MW
 Santiago Papasquiaro, Durango. 4 MW
 Maguarichic, Chihuahua. 1 MW

CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS

2.1 Tipos de rocas asociadas a un yacimiento geotérmico

Los yacimientos geotérmicos a diferencia de los yacimientos petroleros convencionales, y por lo tanto más estudiados, están constituidos por un sistema geológico que incluye rocas de cualquiera de los tres tipos de acuerdo a su origen (ígneo, sedimentario y/o metamórfico). Esto repercute en la explotación de los mismos debido a que muchas de las técnicas y herramientas empleadas desde la exploración hasta la explotación son extrapoladas a partir de las empleadas en la industria de los hidrocarburos, la cual está basada en el estudio de las rocas sedimentarias principalmente.

Debido a los factores geológicos y otros de diferente índole, las herramientas y técnicas de exploración y explotación de yacimientos geotérmicos varían con respecto a la explotación de los yacimientos de hidrocarburos.

2.1.2 Tipos y composición de las Rocas

Una roca es un agregado de minerales, los cuales son sólidos y poseen propiedades físicas y químicas definidas. Los minerales están compuestos por muchos elementos químicos como oxígeno, silicio y aluminio, y estos a su vez están formados por átomos característicos de cada elemento. A la fecha se han identificado más de 3500 minerales pero solo pocos de ellos constituyen la mayoría de las rocas de la corteza terrestre.

Las rocas que integran la corteza terrestre se dividen en tres grupos fundamentales: ígneas, sedimentarias y metamórfica, caracterizándose por su modo de formación. Cada uno de estos grupos contiene una variedad de tipos de roca individuales que difieren uno de otro sobre la base de su composición o textura (el tamaño, la forma y la disposición de las partículas minerales).

Las rocas ígneas son el producto del enfriamiento, disociación y cristalización del magma; las rocas sedimentarias, como su nombre lo indica, son sedimentos un tanto modificados, que se han depositado en el fondo de las cuencas de agua dulce o de agua salina, o bien sobre la tierra firme, como resultado de la acción de agentes geológicos externos e incluso de organismos; las rocas metamórficas son producto de la alteración tanto de las rocas ígneas como sedimentarias, alteración que se lleva a cabo en las entrañas de la Tierra debido al efecto de las altas temperaturas y presiones.

2.1.3 Rocas Ígneas

Las rocas ígneas son originadas como resultado de la solidificación y cristalización del magma, al penetrar este en la corteza terrestre o derramarse en la superficie

durante la erupción de los volcanes.

Las propiedades de este tipo de rocas dependen principalmente de la posición de las masas magmáticas en proceso de enfriamiento, las condiciones de presión y temperatura, la composición mineralógica del magma, la rapidez de su solidificación etc.

2.1.3.1 Rocas Ígneas Intrusivas y Extrusivas

Las *Rocas Ígneas Intrusivas*, fueron formadas a partir de un enfriamiento lento del magma y en la profundidad de la corteza. Debido a que su enfriamiento fue lento, permitieron el crecimiento de cristales puros con tamaños de grano que son visibles a simple vista.

Este tipo de rocas se puede clasificar mineralógicamente basándose en la porción real de los distintos minerales que la componen. En cualquiera de los esquemas de clasificación, el establecimiento de las fronteras entre clases es arbitrario.

Las *Rocas Ígneas Extrusivas* se forman debido al rápido enfriamiento en la superficie o en las cercanías de la misma. Se formaron al ascender el magma fundido desde las profundidades, llenando las grietas y/o cámaras aledañas a la superficie, o al emerger el magma a través de los volcanes. El enfriamiento y la solidificación posteriores fueron rápidos, formando minerales con grano fino, muy fino o incluso vidrioso debido a su composición.

2.1.3.2 Textura de las Rocas Ígneas

La textura de estas rocas depende de la historia de enfriamiento del magma o de la lava, de acuerdo a este criterio los tipos de textura pueden ser:

Textura afanítica: se le denomina así a una textura de grano fino (menor a 0.5 milímetros), resultado del rápido descenso de temperatura como ocurre en los flujos de lava o en algunas intrusiones cercanas a la superficie. En esta textura los granos minerales son demasiado pequeños para ser observados sin alguna amplificación.

Textura fanerítica: son rocas con textura de grano grueso (mayor a 0.5 milímetros) que son fácilmente visibles sin amplificación, esto indica que existió un enfriamiento lento y por lo general de origen intrusivo. También pueden formarse en el interior de algunos flujos de lava espesos.

Textura porfídica: es una combinación de granos minerales de tamaños diferentes, lo que indica una historia de enfriamiento más compleja. Los granos de mayor tamaño son llamados *fenocristales* y los más pequeños se denominan matriz.

Textura vítrea: se caracteriza por no contener granos de minerales debido al rápido enfriamiento de la lava en superficie impidiendo a los minerales la oportunidad de cristalizar. Esto se puede deber a que el magma o la lava entran en contacto con materiales (sólidos o fluidos) más fríos que se encuentran en la superficie.

Textura vesicular: este tipo de textura se produce cuando los magmas contienen grandes cantidades de vapor de agua y otros gases. Estos pueden quedar atrapados en la lava cuando se enfría y formar numerosas cavidades pequeñas conocidas como vesículas.

Textura piroclástica o fragmental: esta textura es característica de las rocas ígneas producto de la actividad volcánica explosiva. El material piroclástico (bombas y bloques de más de 32 milímetros, lapilli de 4 a 32 milímetros y ceniza de menos de 4 milímetros) puede ser arrojado a la atmósfera y posteriormente asentarse en la superficie permitiendo su acumulación; si se convierte en roca, se considera una roca ígnea piroclástica.

2.1.3.3 Composición mineralógica

Una característica notable de las rocas ígneas es el muy pequeño número de minerales de que están compuestas, es por ello que la investigación de las rocas ígneas requiere de la determinación de tan solo pocos minerales. La tabla 3 muestra la composición mineralógica media de todas las rocas ígneas.

Mineral	% en las Rocas Ígneas
Cuarzo	12.4%
Feldespato alcalino	31.0%
Plagioclasa	29.2%
Piroxeno	12.0%
Hornblenda	1.7%
Biotita	3.8%
Muscovita	1.4%
Olivino	2.6%
Nefelina	0.3%
Minerales opacos	4.1%
Clorita y serpentina	0.6%
Apatita	0.6%
Esfena	0.3%
Total	100%

Tabla 3. Composición mineral media de todas las rocas ígneas.
Fuente: G. Gorshkov (1970) "Fundamentos de Geología"

2.1.3.4 Clasificación química de Rocas Ígneas

El magma (sílice como principal componente) desempeña un papel importante en la determinación de la composición mineral de las rocas ígneas; no obstante, un mismo tipo de magma puede producir distintos tipos de rocas debido a que su composición puede variar como resultado de la secuencia en la cual se cristalizan los minerales, así como el asentamiento del cristal y la mezcla de magma.

De acuerdo a su composición química (contenido sílice) las rocas se clasifican como:

- Ultramáficas: menor del 45% de sílice
- Máficas: del 45 al 52% de sílice
- Intermedias: del 53 al 65% de sílice
- Félsicas: mayor al 65% de sílice

2.1.3.5 Clasificación IUGS (International Union of the Geological Sciences) de las Rocas Ígneas

En este tipo de clasificación las rocas ígneas se identifican de acuerdo su mineralogía y textura.

Clasificación IUGS de las rocas ígneas faneríticas:

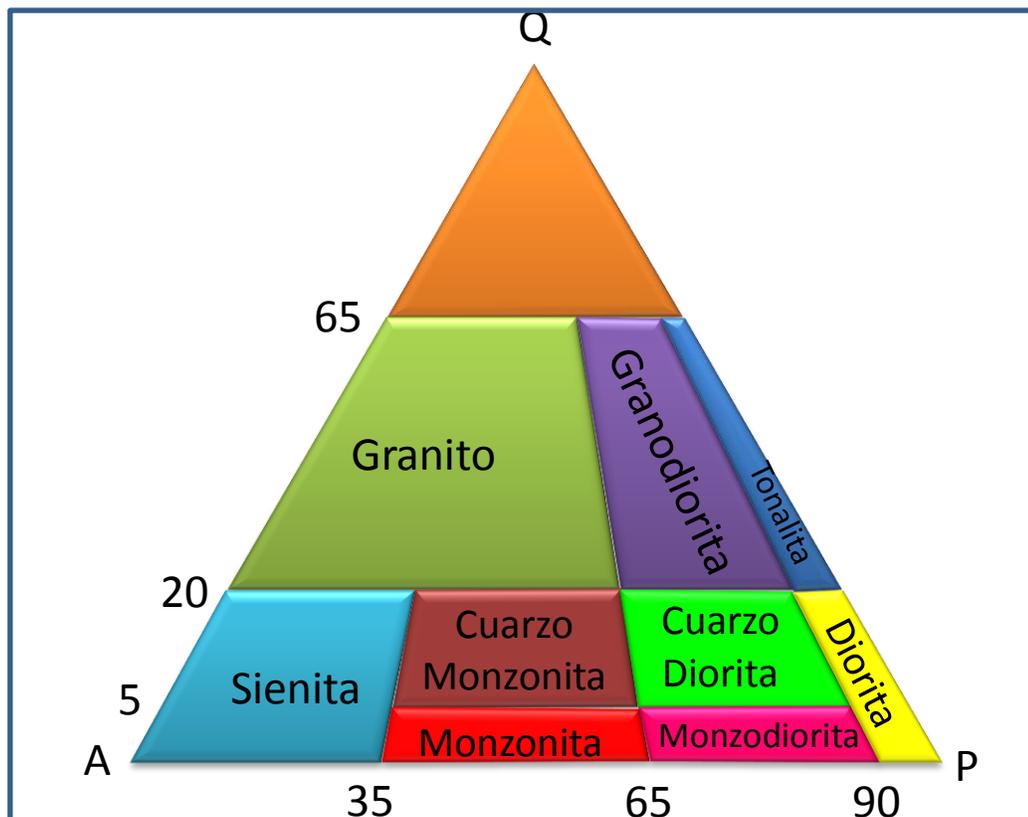


Figura 15. Diagrama ternario de la clasificación de las rocas ígneas faneríticas. Clasificación IUGS.

En el diagrama se pueden apreciar los tres principales componentes mineralógicos y de acuerdo a ellos, el nombre de la roca. Q representa el cuarzo, A los feldespatos alcalinos y P plagioclasa.

Clasificación IUGS de las rocas ígneas afaníticas:

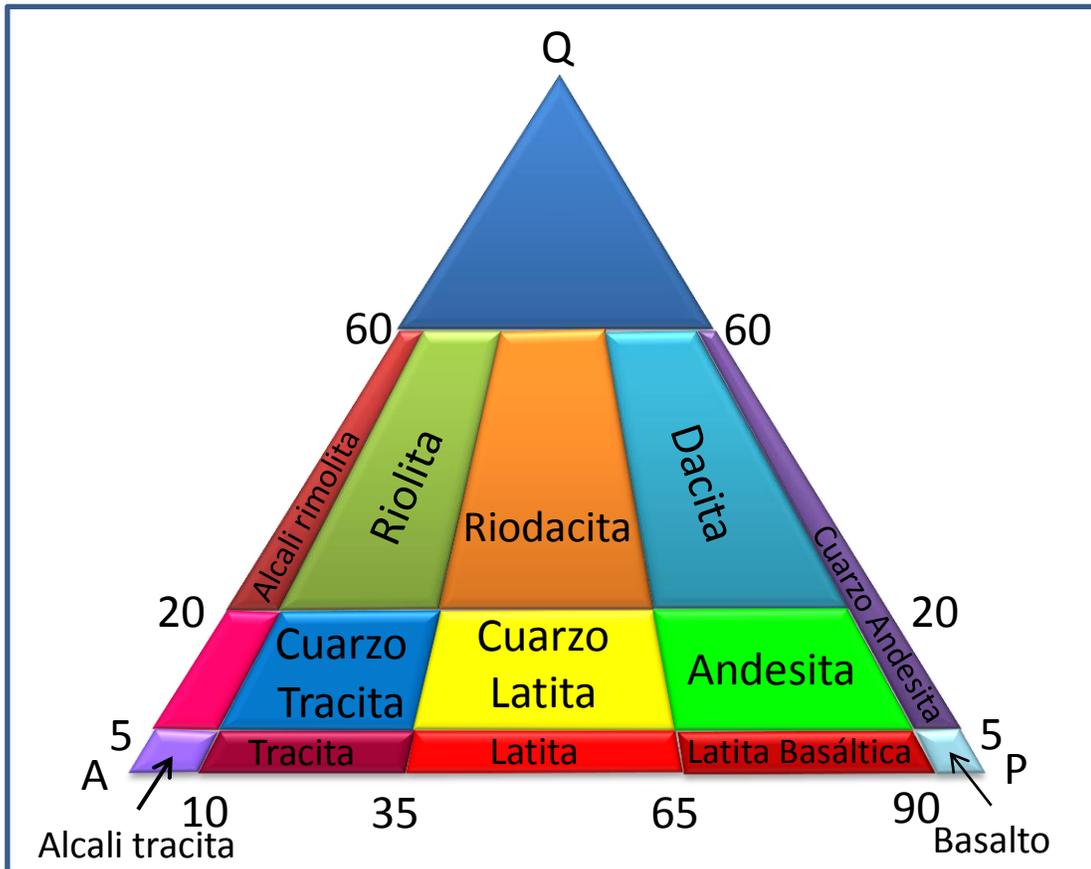


Figura 16. Diagrama ternario de la clasificación de las rocas afaníticas.
Clasificación IUGS.

2.1.4 Rocas Sedimentarias

Las rocas sedimentarias componen la mayor parte de la corteza terrestre (75%), estas rocas se forman en las cuencas marinas de la superficie terrestre como resultado de tres procesos:

- Acumulación de material detrítico originado por la erosión de rocas formadas previamente.
- Precipitación química de las sustancias disueltas.
- Actividad vital de los organismos.

Las características principales de las rocas sedimentarias son:

- Textura: corresponde a las características individuales y/o las relaciones que tienen entre sí las partículas, o sea los clastos o componentes químicos. Por ejemplo: tamaño y la forma.
- Estructura: son los mayores rasgos que caracterizan a los depósitos, por ejemplo la estratificación, que es la propiedad que tienen las rocas sedimentarias de disponerse en estratos con cierto paralelismo.

Este tipo de rocas se clasifican en general en detríticas y químicas, entre estas últimas se encuentra una subcategoría denominada bioquímicas.

2.1.4.1 Rocas Sedimentarias Detríticas

Están formadas por partículas sólidas provenientes de rocas preexistentes que afloran en la superficie terrestre. Tienen una textura clástica, lo cual significa que estas rocas se componen de fragmentos o partículas conocidas como clastos y un material que los mantiene unidos, el cual se encuentra relleno de los espacios entre los clastos, el cual puede ser de origen químico (cemento) o corresponder a una fracción clástica más fina (matriz).

Nombre y tamaño del sedimento	Descripción	Nombre de la roca
Grava (> 2 mm.)	Partículas de grava redondas	Conglomerado
	Partículas de grava angulosa	Brecha sedimentaria
Arena (1/16 a 2 mm.)	Principalmente arena de cuarzo	Roca arenisca de cuarzo
	Cuarzo con >25 % de feldespato	Arcosa
Lodo (< 1/16 mm.)	Principalmente limo	Limolita
	Limo y arcilla	Limolita
	Principalmente arcilla	Lutita

Tabla 4. Clasificación de las rocas detríticas

2.1.4.1 Rocas Sedimentarias Químicas y Bioquímicas

Esta tipo de rocas se origina en cuencas hídricas (lacustres y marinas) o en tierra firme como consecuencia de procesos químicos y de actividad de animales y plantas, también como resultado de la acumulación de restos orgánicos al morir los animales y plantas. Estos materiales pueden ser extraídos del agua para formar minerales, ya sea por procesos químicos inorgánicos o por la actividad química de los organismos.

La diferencia entre las rocas químicas y bioquímicas es que en las químicas, la precipitación (proceso químico) se produce en el agua, mientras que en las bioquímicas interviene una parte biológica, es decir organismos vivos.

Las rocas químicas y bioquímicas se pueden clasificar en función de su origen en:

- Rocas carbonatadas: principalmente compuestas por calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Reaccionan al HCl desprendiendo CO_2 (caliza y dolomía).
- Rocas silíceas: son aquellas que como su nombre lo indica poseen sílice en su composición (pedernal).
- Rocas fosfatadas: son aquellas formadas por fosfatos (principalmente $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) y presentan colores blanco, gris, azul, verde o negro. Son de origen orgánico.
- Rocas ferruginosas: son aquellas que contienen entre 3 y 10% de óxido de hierro o compuestos de hierro en su matriz. Son de color oscuro, rojo o verde.
- Rocas evaporíticas: rocas sedimentarias de precipitación química compuestas por sales disueltas que se forman tras la evaporación del agua que las contenía.

Rocas sedimentarias químicas		
<i>Textura</i>	<i>Composición</i>	<i>Nombre de la roca</i>
Varía	Calcita (CaCO_3)	Caliza
Varía	Dolomía ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	Dolomía
Cristalina	Yeso ($\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$)	Yeso
Cristalina	Halita (NaCl)	Sal de roca
Rocas sedimentarias bioquímicas		
Clástica	Conchas de carbonato de calcio (CaCO_3)	Caliza (diversos tipos como la creta y la coquina)
Generalmente cristalina	Conchas microscópicas alteradas con cuarzo (SiO_2). Principalmente carbono de restos alterados de plantas.	Carbón mineral

Tabla 5. Clasificación de las rocas sedimentarias químicas y bioquímicas

2.1.5 Rocas Metamórficas

Las rocas metamórficas se forman de la corteza terrestre a partir de rocas ígneas y sedimentarias mediante una profunda alteración y transformación de éstas por efecto de altas temperaturas y presiones, soluciones calientes y componentes

gaseosos, llevándose a cabo un complicado proceso de recristalización de los minerales y rocas, destrucción de las estructuras y formación de otras nuevas. Las rocas metamórficas pueden volver a sufrir una nueva recristalización.

2.1.5.1 Composición mineralógica de las rocas Metamórficas

La composición química de estas rocas es igual a la de las rocas ígneas y/o sedimentarias, que sirvieron de material básico para su formación. Es común encontrar la presencia de cuarzo, feldespatos, piroxenos, micas, etc. Sin embargo a la par de estos pueden aparecer nuevos minerales o aumentar la cantidad de aquellos que eran escasos en las rocas originales.

2.1.5.2 Tipos de metamorfismo

De acuerdo al predominio de los factores modificadores de las rocas sobre los demás, cabe distinguir tres clases principales de metamorfismo.

- Metamorfismo de contacto: tiene lugar cuando un cuerpo de magma altera la roca original circundante. A profundidades o superficialmente, un magma intrusivo eleva la temperatura de la roca circundante causando alteración térmica. La emisión de fluidos calientes dentro de la roca original por la intrusión que se enfría puede contribuir, a la formación de nuevos minerales producto de la introducción de material procedente de una fuente externa, a esta proceso se le conoce como *metasomatismo*. Si los fluidos metasomáticos son suficientemente energéticos, es posible que se lleve un proceso de recristalización.
- Metamorfismo dinámico: se asocia en mayor medida con zonas de falla, en las cuales la roca está sometida a grandes presiones diferenciales.
- Metamorfismo regional: la mayoría de las rocas metamórficas son resultado de este tipo de metamorfismo, el cual ocurre en una gran área y suele ser causado por temperaturas, presiones y deformaciones extremas dentro de las porciones más profundas de la corteza. Este metamorfismo es mas obvio a lo largo de los márgenes de las placas convergentes, donde las rocas se deforman intensamente y se recristalizan durante la convergencia y la subducción.

2.1.5.3 Clasificación de las Rocas Metamórficas (clase textural y clase química)

Para fines de clase textural, las rocas metamórficas se clasifican comúnmente en dos grupos, las rocas que muestran una textura foliada y las que no.

El termino *foliación* se refiere a cualquier disposición planar de los granos minerales o los rasgos estructurales del interior de una roca. De acuerdo a esto las

rocas metamórficas se dividen en:

- Rocas metamórficas foliadas: las rocas sometidas al calor y presión diferencial durante el metamorfismo se caracteriza por tener minerales dispuestos en una forma paralela, lo que les da una textura foliada. El tamaño y forma de los granos minerales determina si la foliación es fina o tosca. Las rocas metamórficas foliadas pueden disponerse en orden de tamaño de grano crecientemente tosco y de perfección de foliación.
- Rocas metamórficas no foliadas: en algunas rocas metamórficas, los granos de minerales no muestran una orientación preferencial distinguible. En lugar de esto dichas rocas consisten en un mosaico de minerales un tanto equidimensionales que se caracterizan por tener una textura no foliada. La mayoría de las rocas no foliadas resultan de metamorfismo de contacto o regional de rocas en las cuales no hay presencia de minerales laminados o laminados. En general las rocas metamórficas pueden ser de dos tipos: las compuestas principalmente por un solo mineral y aquellas en las que los diferentes granos minerales son demasiado pequeños para ser vistos sin amplificación.

Las intensidad de las condiciones metamórficas también se describe mediante el concepto de facies metamórficas, que alude al conjunto de rocas formadas en unos rangos de presión y temperatura, en la figura 17 se muestra el nombre de las rocas metamórficas según la presión y temperatura a la que se encuentran.

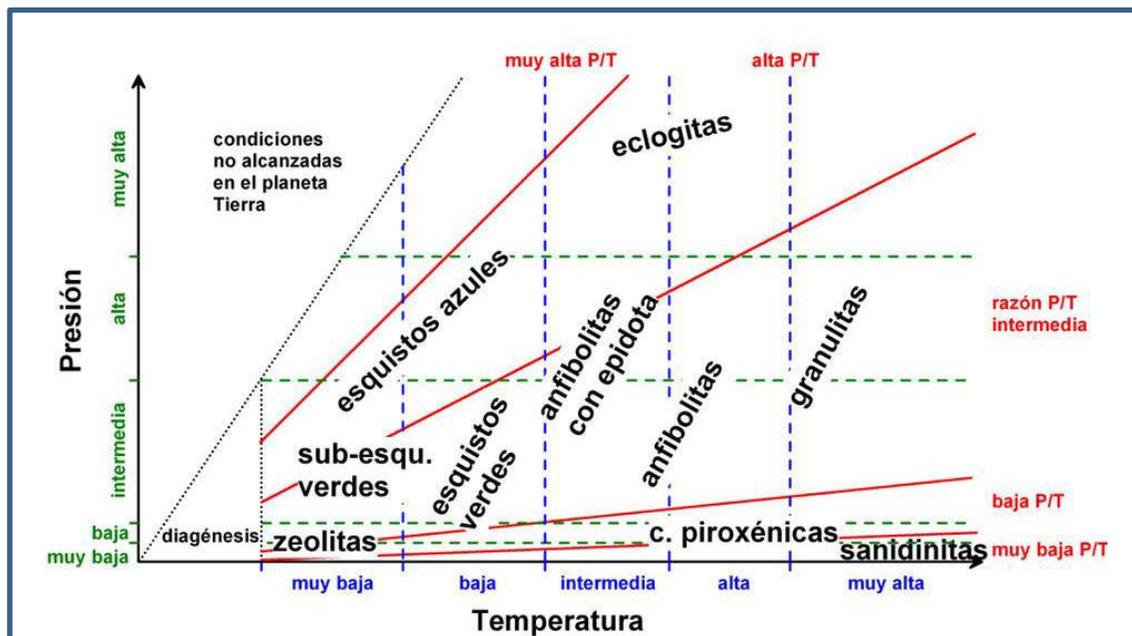


Figura 17. Clasificación de las rocas metamórficas según la presión y la temperatura a la que se encuentran. Fuente: Página oficial de la UGR.

Para fines de la clase química, las clases texturales anteriores pueden subdividirse de acuerdo a su composición mineralógica, la que refleja la composición química. La gran mayoría de las rocas metamórficas están constituidas dentro de seis clases químicas principales:

1. Clase pelítica: rocas derivadas de sedimentos pelíticos (arcillas y limos).
2. Clase cuarzo feldespática: rocas provenientes de rocas cuarzo feldespáticas (areniscas y piroclásticas ácidas).
3. Clase calcárea: rocas provenientes de calizas y dolomías puras e impuras.
4. Clase básica: rocas derivadas de rocas ígneas y tobas máficas e intermedias, de sedimentos margosos y grauvacas con componentes como el calcio, aluminio, hierro y magnesio en cantidades apreciables.
5. Clase magnesiánica: rocas provenientes de rocas ultramáficas y de algunos sedimentos ricos en magnesio (ricos en montmorillonita).
6. Clase ferruginosa: rocas derivadas de sedimentos ricos en hierro (sílex, rocas sedimentarias ricas en hierro, etc.).

2.1.6 Ciclo de las Rocas

El ciclo de las rocas es una forma de observar las relaciones entre los procesos internos y externos de la Tierra. Relaciona los tres grupos de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas) uno con otro; los procesos superficiales como el intemperismo, transporte y depositación; y los procesos internos como la generación del magma y el metamorfismo (figura 17). El movimiento de las placas tectónicas es el mecanismo responsable de reciclar los materiales de la roca y, en consecuencia es el motor del ciclo.

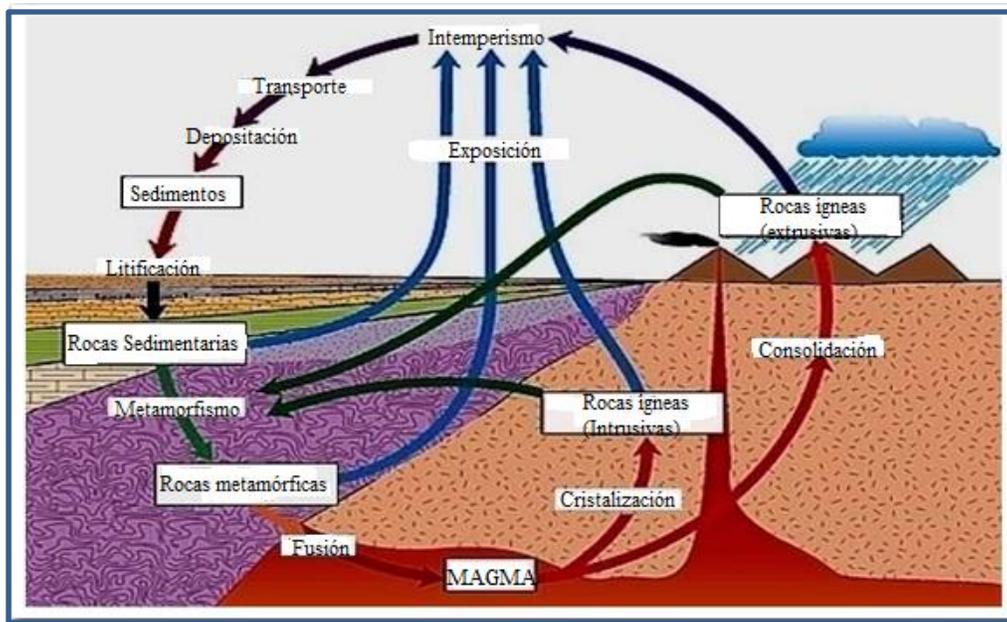


Figura 18. Ciclo de las rocas

2.2 Gradiente Geotérmico y Ambiente Tectónico

En los límites de las placas tectónicas se producen fenómenos magmáticos y sísmicos importantes los cuales constituyen la fuente de calor de la mayoría de los sistemas geotérmicos. La mayor parte de los yacimientos geotérmicos de alta temperatura se localizan en estos puntos de la corteza terrestre, existen pocos casos en los que los yacimientos se encuentran en medio de las placas, en los denominados puntos calientes.

El gradiente geotérmico promedio en la corteza terrestre es de 3°C por cada 100 metros de profundidad, sin embargo el flujo calorífico anormal que se produce en los límites de las placas da lugar a gradientes geotérmicos con un valor promedio de 15 a 30°C por cada 100 metros de profundidad, por lo que a profundidades de 1.5 a 2 kilómetros se pueden hallar temperaturas de 200 a 300°C, lo que representa una fuente calorífica con gran potencial.

2.2.1 Flujo de calor terrestre

La Tierra está dividida en cinco esferas concéntricas, estas son de la parte exterior a la interior: atmósfera, corteza, manto, núcleo líquido y núcleo sólido.

Tanto la temperatura como la densidad de estas capas aumenta rápidamente con la profundidad, de este modo tenemos un planeta muy caliente en el interior, pero eficientemente aislado por una capa fina de baja conductividad térmica.

- El núcleo, con un espesor aproximado de 3470 kilómetros es sólido en su parte interna y líquido en su parte exterior y puede alcanzar una temperatura de hasta 4200 °C.
- El manto envuelve al núcleo, con temperaturas que van de los 3000 a los 1000 °C. Tiene textura plástica en el centro volviéndose sólido hacia la superficie, con un espesor aproximado de 3000 kilómetros.
- La corteza es la parte superficial, su temperatura varía desde los 1000 en su contacto con el manto hasta los 15 o 20 °C en la superficie terrestre. Su espesor varía de los 5 a los 20 kilómetros en las profundidades oceánicas y de los 30 a los 70 bajo la superficie continental.

El origen del calor interno de la Tierra se da bajo los siguientes aspectos.

- Desintegración de isótopos radiactivos: presentes en la corteza y el manto, principalmente uranio 235, uranio 238, torio 232 y potasio 40.
- Calor inicial: liberado durante la formación del planeta hace aproximadamente 4500 millones de años, y que aún está llegando a la superficie terrestre.
- Movimientos diferenciales: entre las diferentes capas que constituyen la

tierra, principalmente entre el manto y el núcleo.

- Cristalización del núcleo: el núcleo externo está cristalizando continuamente y en la zona de transición con el núcleo interno se libera calor.

2.2.1.1 Propagación del calor terrestre

En general los mecanismos por los que se puede propagar el calor en cualquier medio son:

- Conducción: es la transferencia de calor de un medio por interacción entre partículas adyacentes, puede tener lugar entre sólidos líquidos y gases, aunque es característica principal de los sólidos, debido a que gases y líquidos siempre se producirá convección simultáneamente.
- Convección: es el modo en el que se transfiere energía térmica entre una superficie sólida y un fluido adyacente (líquido o gas). Comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluido, provocado por las diferencias de densidad del mismo.
- Radiación: es la emisión de la energía térmica en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de cambios en las configuraciones eléctricas de los átomos o moléculas. Entonces la Radiación térmica es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura.

Para el estudio de las deformaciones del material terrestre, la corteza y la parte rígida del manto se agrupan bajo el nombre de litosfera, con un espesor variable que va de los 75 a los 100 km. La *litosfera* descansa sobre la *astenosfera*, la cual es la parte deformable del manto. Es una capa plástica en la que la temperatura y presión alcanzan valores que permiten la fundición de la roca en algunos puntos. Posteriormente se encuentra la *mesosfera* que equivale al resto del manto, y por debajo de esta se localiza la *endosfera*, que comprende el núcleo tanto exterior como interior.

En la litosfera la transferencia de calor se produce por conducción térmica, el calor se difunde sin que exista transferencia de materia. Mientras que en la astenosfera el calor se transfiere por convección térmica, con movimiento de materia. En la mesosfera el calor se transfiere principalmente por convección.

En el núcleo externo el calor se transfiere principalmente por convección y en el núcleo interno el mecanismo de propagación más importante es la conducción.

2.2.1.2 Gradiente geotérmico

La energía térmica que se genera en el interior de la Tierra asciende lentamente hasta la superficie, pues las rocas de la corteza terrestre son muy malas conductoras de calor.

El gradiente geotérmico se denomina a la variación de temperatura en función de la profundidad. Normalmente expresado en °C por cada 100 metros. Para el cálculo del gradiente geotérmico normalmente se emplea la siguiente fórmula:

$$gg = \frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} \left[\frac{^{\circ}C}{m} \right]$$

Dónde: T es la temperatura en los puntos 1 y 2 en °C y Z la profundidad en los puntos 1 y 2 en metros.

Este gradiente puede ser medido mediante sondeos tanto mineros como petroleros con la ayuda de herramientas llamadas sondas térmicas. Tiene un valor promedio para todo el planeta de 3.3°C por cada 100 metros, a excepción de los denominados límites de placas, en donde los valores son mayores, como se citó anteriormente.

2.2.2 Tectónica de placas

El estudio de la tectónica de placas trata de la dinámica de la capa más externa de la Tierra, conocida como litósfera, que comprende la corteza tanto oceánica como continental así como el manto superior subyacente.

La litosfera consta de numerosos fragmentos de tamaños diversos denominados *placas tectónicas*, las cuales varían en espesor. Estas placas tectónicas descansan sobre la capa subyacente denominada astenosfera, la cual es más caliente y débil. El movimiento de las placas es resultado de la transferencia de calor por convección dentro de la astenosfera, lo cual provoca que las placas superiores se muevan.

2.2.2.1 Límite de placas

Las placas tectónicas se mueven una respecto de otra de manera que sus límites pueden caracterizarse como divergentes, convergentes o transformantes. La interacción de las placas en sus límites da como resultado una intensa actividad sísmica y volcánica y por consecuencia de anomalías geotérmicas que pueden ser aprovechadas industrialmente.

- Límites divergentes: se presentan donde las placas se están separando y se está transformando nueva litosfera oceánica. Estos límites son lugares donde la corteza se está separando, adelgazando y fracturando a medida que el magma asciende a la superficie se filtra en las fracturas verticales y fluye afuera en el suelo marino. Los límites divergentes corren más comúnmente a lo largo de las crestas de las dorsales oceánicas pero también están presentes bajo los continentes durante las

primeras etapas de la ruptura continental.

- Límites convergentes: se presenta en donde dos placas chocan y una se subduce o se inserta debajo de la otra, esto da lugar a la destrucción de la litosfera. Los límites convergentes se caracterizan por la deformación, vulcanismo, la formación de montañas y el metamorfismo. Se conocen tres tipos de límites de placa convergente: oceánico-oceánico, oceánico-continental y continental-continental.
- Límites transformantes: estos límites se presentan a lo largo de fracturas en el piso oceánico conocidas como fallas transformantes, donde las placas se deslizan una a lado de otra, de forma más o menos paralela. Aunque no se crea ni se destruye litosfera, el movimiento de entre las placas da por resultado una roca muy fracturada capaz de originar numerosos sismos superficiales.

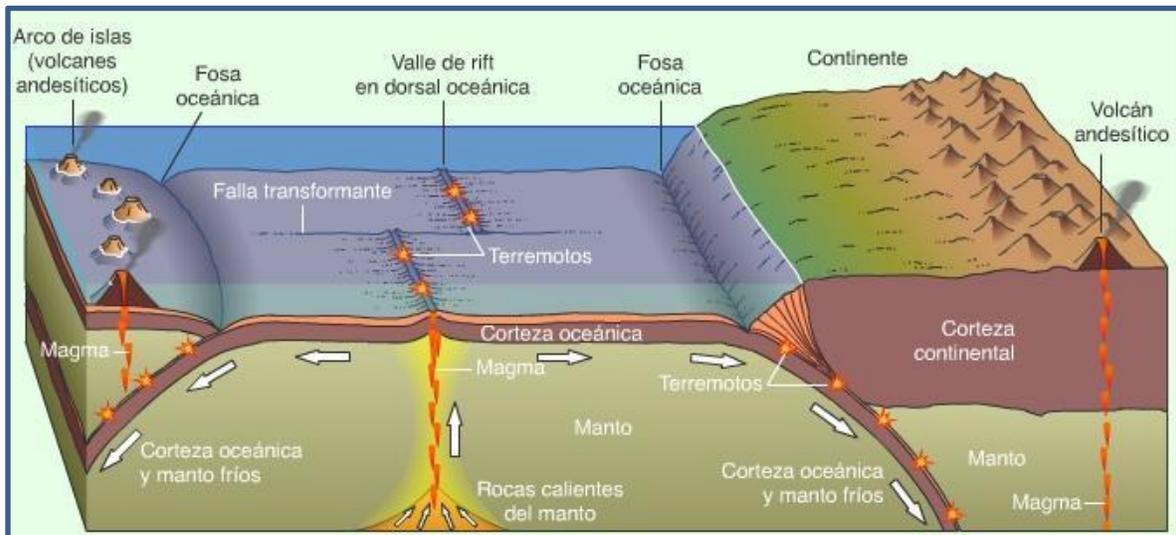


Figura 19. Límites de las placas tectónicas. Fuente: *Página oficial de International Geothermal Association*

Los *puntos calientes* son lugares en medio de las placas en donde existen columnas de magma estacionarias que se originan en lo profundo del manto, ascienden lentamente a la superficie y forman volcanes o expelen basalto.

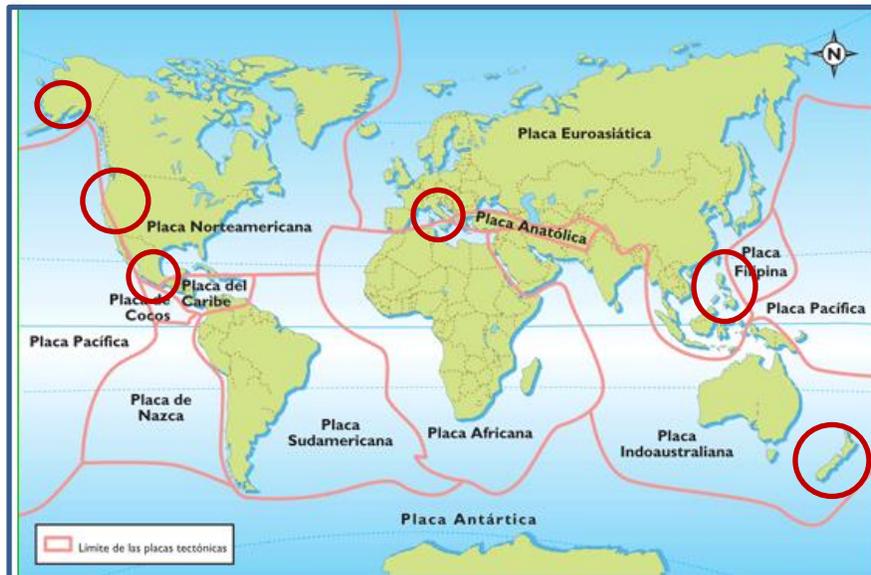


Figura 20. Mapa de las placas tectónicas y su relación con los campos geotérmicos de mayor importancia.

2.3 Componentes geológicos y propiedades petrofísicas de yacimientos geotérmicos.

2.3.1 Definición de yacimiento geotérmico

Se dice que existe un yacimiento geotérmico cuando en un área geográfica específica se dan ciertas condiciones geológicas y geotérmicas favorables para poder explotar de manera económicamente rentable los recursos térmicos del subsuelo.

Un yacimiento geotérmico típico esta compuesto por una fuente de calor, un acuífero y una roca sello.

- La fuente de calor es una cámara magmática en proceso de enfriamiento con temperaturas elevadas aun, de unos 500°C o incluso más. Normalmente se ubica a una profundidad de 7 a 15 kilómetros de la superficie terrestre. Usualmente asociadas a los límites de placas tectónicas y a los puntos calientes.
- El acuífero es cualquier formación geológica con permeabilidad primaria o secundaria suficiente para alojar agua meteórica filtrada desde la superficie o desde algún acuífero menos profundo. Debe tener un volumen suficiente para contener una cantidad de fluido que asegure su explotación comercial.
- La roca sello es otra formación, o parte de la misma, con permeabilidad menor a la del acuífero cuya función es impedir que los fluidos geotérmicos se disipen o filtren hacia la superficie.

2.3.2 Clasificación de los sistemas geotérmicos

Actualmente se reconoce la existencia de cinco diferentes sistemas geotérmicos: hidrotermales, de roca seca caliente, geopresurizados, marinos y magmáticos.

2.3.2.1 Sistemas Convectivos Hidrotermales

Estos están constituidos por una fuente de calor, fluido geotérmico y la roca en donde este está alojado. El agua de estos sistemas tiene su origen en la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve o hielo. Esta agua se filtra lentamente en la corteza a través de poros y fracturas a varios kilómetros de profundidad en donde es calentada por la fuente de calor alcanzando temperaturas de hasta 400°C. Cuando las temperaturas de los yacimientos son superiores a los 200°C, estos yacimientos tienen una relación con algún sistema volcánico y con la tectónica de placas.

Actualmente son los sistemas geotérmicos más convencionales y los que más se explotan comercialmente para la generación de electricidad mediante perforación de pozos. Estos sistemas se clasifican en tres tipos:

- Vapor dominante: sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco en su totalidad. Existen muy pocos en el mundo.
- Líquido dominante (alta entalpía): sistemas de salmuera a alta temperatura que oscila entre los 200°C y más de 300°C. Son más abundantes.
- Líquido dominante (baja entalpía): sistemas con salmueras a temperaturas de entre 100°C y 200°C aproximadamente. Son los más abundantes y se encuentran en casi todos los países del mundo.

2.3.2.2 Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS)

Los EGS (Enhanced Geothermal Systems) son conocidos también como Sistemas de Roca Seca Caliente. Son zonas rocosas con alto contenido energético pero con poca o nula cantidad de agua.

Este recurso se encuentra en el subsuelo, entre 2 y 4 kilómetros de profundidad con la temperatura necesaria para generar electricidad (150°C – 200°C). Es considerado como uno de los recursos más abundantes del mundo y es prácticamente inagotable. Se ha estimado que la energía almacenada en este tipo de yacimientos equivale a más de 500 veces la energía acumulable en todos los yacimientos de petróleo y gas del mundo.

Actualmente se desarrolla tecnología para poder llevar a cabo el siguiente procedimiento: se perfora un pozo (pozo inyector) hasta la profundidad en que se encuentra la formación de roca seca caliente, como esta roca es esencialmente

impermeable se crea un yacimiento artificial mediante fracturamiento hidráulico, posteriormente se perfora otro pozo (pozo inyector) a algunos metros de distancia del primero, con el objeto de intersectar las fracturas creadas anteriormente, en seguida se inyecta agua a presión en uno de los pozos, la cual al desplazarse por las fracturas se calienta el contacto con la roca para que finalmente el agua caliente sea extraída por el pozo inyector.

2.3.2.3 Sistemas Geopresurizados

Estos sistemas contienen agua y metano a alta presión (aproximadamente 700 bar) y mediana temperatura (90-200°C), generalmente están confinados en yacimientos de rocas sedimentarias. Dentro de ellos se encuentran tres tipos de energía: energía térmica (agua caliente), energía química (metano) y energía mecánica (energía cinética debida a los fluidos confinados a altas presiones). Los investigadores estiman que existe un alto potencial en estos recursos.

2.3.2.4 Sistemas Marinos

Sistemas de alta entalpía ubicados en el fondo marino que actualmente no se están explotando comercialmente, debido al poco estudio existe sobre estos.

Se han efectuado algunos estudios en el Golfo de California, abarcando investigaciones de tipo geológico, geofísico y geoquímica. La investigación arroja resultados en donde se estima la existencia de un campo geotérmico de gran magnitud, con un potencial energético de 100 a 500 veces mayor que Cerro Prieto.

2.3.2.5 Sistemas Magmáticos

Sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos con actividad o a una gran profundidad, en zonas donde hay debilidades en la corteza. Actualmente no son explotados comercialmente debido a la falta de tecnología apropiada.

La cualidad más importante de estos sistemas son las altas temperaturas disponibles (mayor a los 800°C). 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.

2.3.3 Propiedades petrofísicas básicas de yacimientos geotérmicos

2.3.3.1 Porosidad

La porosidad es definida como la fracción del volumen de la roca que es ocupada por los poros en relación al volumen total de la misma. Es expresada en fracción o en porcentaje y representa la capacidad de la roca para contener fluidos.

$$\phi = \frac{V_{poro}}{V_{roca}}$$

La porosidad puede ser primaria o secundaria de acuerdo al proceso en la cual se originó.

- Porosidad primaria: es el resultado de los procesos originales de formación del medio poroso, tales como depositación, compactación, recristalización, etc. Se tienen tres tipos principalmente: intergranular, intrapartícula e intercrystalina.
- Porosidad secundaria: se debe a los procesos diagenéticos que sufre el medio poroso después de que el material ha sido convertido en roca. Este tipo de porosidad es más diversa en morfología y su génesis es más compleja que la primaria.

Porosidad absoluta: es también llamada porosidad total, es el volumen total de espacios, poros, canales, fisuras o cavernas, comunicadas o no, que existen entre los elementos minerales de la roca, relacionados al volumen bruto de la roca.

La porosidad total o absoluta se puede expresar también:

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2$$

Dónde:

ϕ_t : Porosidad absoluta

ϕ_1 : Porosidad primaria

ϕ_2 : Porosidad secundaria

Porosidad Efectiva: Es el porcentaje de espacios porosos intercomunicados con respecto al volumen total de la roca. Entonces, es una indicación de la conductividad de los fluidos, siendo esta una función de muchos factores litológicos como el tamaño del grano, el empaque de los mismos, la cementación etc.

2.3.3.2 Permeabilidad y conductividad hidráulica.

Permeabilidad: Es una propiedad del medio poroso, la cual representa la capacidad de un medio para permitir el flujo de fluidos a través de él. La unidad de medida de la permeabilidad es el Darcy, el cual representa la permeabilidad de un medio poroso, si a través de él fluye un fluido de 1 centiposon de viscosidad, a un gasto de 1 cm³/s, a través de un área de 1 cm² con un gradiente de presión de 1 atm/cm.

Un Darcy es equivalente a 0.9869 X 10⁻¹² m², es decir, casi una micra cuadrada.

La permeabilidad de una roca porosa se mide en laboratorio, empleando núcleos o alguna muestra de los mismos.

La permeabilidad de un medio poroso está afectada por el tamaño y el número de poros por donde se conduce el fluido. Normalmente la permeabilidad aumenta cuando la porosidad aumenta, sin embargo en muchos casos el tamaño de grano disminuye, mientras la porosidad sigue siendo la misma.

La determinación de la permeabilidad en rocas no porosas es una situación especial, debido a que la permeabilidad de rocas ígneas, metamórficas y arcillosas están a menudo más controladas por las fracturas que por la matriz en sí.

Conductividad hidráulica: Es una medida útil de la habilidad que tiene la roca a permitir el flujo de fluidos. Es expresada en unidades de longitud por unidad de tiempo, normalmente metros/segundo. Es definida como el volumen de fluido, fluyendo a través de una sección transversal específica bajo la influencia de una unidad de gradiente hidráulico.

La conductividad hidráulica, al igual que la permeabilidad, varía con la dirección y el tipo de roca principalmente. Por esta razón, las pruebas de laboratorio obtenidas pueden ocasionar problemas cuando son extrapoladas a aplicaciones en campo.

CAPÍTULO 3. TOMA DE REGISTROS DURANTE LA PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS

Esta técnica en pozos geotérmicos se ha enfocado principalmente a registrar la variación de parámetros como la presión y la temperatura. Sin embargo aunque no se ha desarrollado la tecnología para extrapolar de manera exitosa la toma de Registros Geofísicos aplicados en pozos petroleros, existen registros de este tipo que son actualmente corridos durante la perforación de pozos geotérmicos principalmente exploratorios.

Una de las razones principales por la cual los registros geofísicos empleados en la industria de los hidrocarburos no han sido ampliamente empleados en la industria geotérmica es la variación litológica de las formaciones rocosas a perforar. Durante la perforación de pozos petroleros se atraviesan formaciones de tipo sedimentario, en operaciones geotérmicas se atraviesan formaciones principalmente ígneas y metamórficas, lo cual representa un cambio en el principio de operación e interpretación de la herramienta.

3.1 Registros Geofísicos de Pozos

Un registro geofísico es un gráfico X-Y en donde el eje Y representa la profundidad del pozo y el eje X representa los valores de algunos parámetros del pozo tales como: resistividad, densidad, porosidad, tiempo de tránsito, radioactividad, entre otros.

Estos registros se realizan con el objetivo de conocer las características de las formaciones atravesadas por los pozos, tanto de carácter litológico como en lo relativo al contenido de fluidos de la formación.

Para la toma de registros se emplea una unidad móvil, en la cual se encuentra en un sistema computarizado para la obtención y procesamiento de datos, que a su vez cuenta con el envío de potencia y señales de comando (instrucciones), estas son enviadas a un aparato denominado sonda que es bajado al fondo del pozo mediante un cable electromagnético que sirve como medio conductor de señales. Finalmente, el registro se obtiene al hacer pasar los sensores de la sonda enfrente de la formación, moviendo la herramienta mediante el cable.

3.2 Registros Geofísicos durante la perforación de pozos geotérmicos

Los objetivos de la toma de registros durante la perforación de pozos geotérmicos son, entre otros: el estudio del pozo, su diseño, su geometría y la manera en que son terminados; el estudio de la litología de la formación y las fracturas de la misma que son atravesadas por el pozo; determinar la temperatura del yacimiento y la presión a la que se encuentran confinados los fluidos e incluso la localización de zonas permeables que comuniquen al pozo con el yacimiento.

Este tipo de registros se toman en agujero abierto durante las operaciones de perforación para diferentes secciones del pozo e incluso cuando la formación objetivo es alcanzada. El arreglo estándar en una corrida de registros en pozos geotérmicos es:

- Registro de temperatura para localizar zonas permeables y evaluar el flujo de calor.
- Registro de diámetro de pozo (Caliper) para localizar zonas de lavado y estimar los volúmenes necesarios para realizar la cementación.
- Registros de Resistividad, Porosidad (neutrón - neutrón) y Rayos Gamma para evaluar las características geológicas de la formación.

Estos últimos son graficados y correlacionados con los datos arrojados por los estudios en los recortes de las formaciones.

3.2.1 Registro de Resistividad

Conocer la resistividad de las rocas dentro de la exploración geotérmica es de suma importancia. La actividad geotérmica natural influye en la resistividad de la formación mediante la alteración hidrotermal de la roca y de los minerales que la conforman.

La resistividad eléctrica específica de las formaciones en los yacimientos es resultado de dos factores diferentes, la resistividad de la matriz y la resistividad del fluido de formación. Entonces la resistividad de la formación variará en función del tipo de roca, contenido de agua, la salinidad del agua y la variación de temperatura.

La matriz de una roca ígnea es generalmente mala conductora con valores de resistividad en promedio de $10^4 - 10^6 \Omega\text{m}$; sin embargo, los fluidos geotérmicos, incluidos los de baja salinidad, son en general mucho más conductivos (resistividades $<10 \Omega\text{m}$) y por lo tanto, son estos últimos los que definirán la resistividad de la formación donde se encuentra el yacimiento; exceptuando los casos en donde la porosidad de la roca sea mucho menor al 1% o se trate de rocas altamente conductivas.

Por lo tanto, la resistividad de la formación estará en función de la porosidad contenido de agua, así como la salinidad y la temperatura principalmente. Es por ello que las variables involucradas en la Ecuación de Archie tendrán valores diferentes a los adoptados en la toma de Registros durante la perforación de pozos petroleros.

La ecuación de Archie es la siguiente:

$$F = a * \phi^{-m}$$

Donde, a es una constante, ϕ es la porosidad y finalmente m que es el factor de cementación.

Las constantes a y m son aproximadamente números fijos para rocas del mismo tipo, con porosidad intergranular e intercrystalina semejante. Los valores de a y m para arenas son aproximadamente $a \sim 1$ y $m \sim 2$, estos datos fueron obtenidos con base en estudios de núcleos, registros de resistividad y estudios empíricos.

Las rocas ígneas fracturadas son las más comunes en yacimientos geotérmicos, y por tanto la relación Resistividad – Porosidad está determinada por las fracturas, en la mayoría de los casos. Para el factor de cementación se tiene un valor de $m \sim 1$ es el predominante; sin embargo, un factor igual a 2 ha sido encontrado en lavas basálticas con intercalaciones sedimentarias. La constante a es variable en formaciones ígneas, oscilando en valores de 1 a 15.

Una vez obtenido el factor de formación, se puede calcular mediante una ley empírica la resistividad de interés o viceversa:

$$R_o = F * R_w$$

Donde, R_o es la resistividad de la formación, R_w la resistividad del fluido de la formación, y F el factor de formación.

3.2.1.1 Funcionamiento de la Herramienta

La herramienta de Registro de Resistividad Normal consiste en un arreglo de cuatro electrodos, dos de ellos establecidos en la sonda, un tercero en la superficie (normalmente en la presa de lodos) y la cobertura del cable es empleada como el cuarto electrodo. La parte superior del cable (hasta 20 o 25 metros) está eléctricamente aislada para distanciar el electrodo de la cobertura de los electrodos alojados en la sonda.

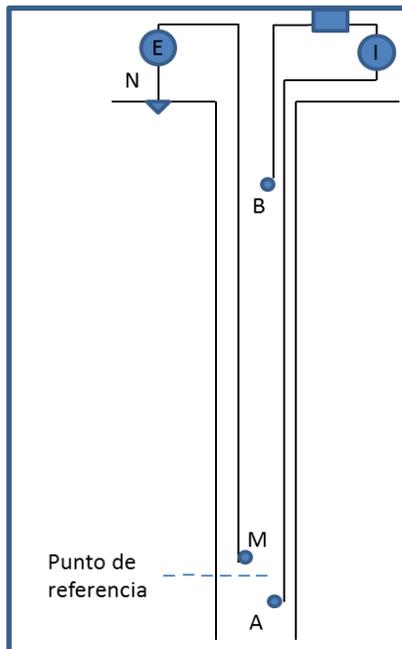


Figura 21. Configuración del registro de resistividad normal corta.

Durante la toma de Registros, una corriente eléctrica directa I es conducida entre el electrodo A de la sonda y la cubierta del cable, entonces la diferencia de potencial (voltaje) entre el electrodo M de la sonda y el electrodo N en superficie es registrada.

3.2.1.2 Aplicación del Registro

La aplicación del registro de Resistividad incluye el análisis cualitativo de la información, y su comparación con otros registros e información geológica. Para este propósito, el registro se grafica en paralelo con otros registros geofísicos, normalmente el de diámetro de pozo y la sección producto del análisis de recortes. La información obtenida a partir del registro es empleada para definir y localizar de manera precisa el contacto entre capas, determinar el espesor de las mismas y complementar la información geológica con la obtenida a partir de los recortes.

El valor aparente de resistividad es comparado con la información obtenida a partir de recortes y se evalúa si dichos resultados son correctos. Un contraste notable en la resistividad es observado cuando se tienen lavas volcánicas y unidades intrusivas, lo cual ayuda a los geólogos a diferenciar con facilidad la litología estudiada.

Además de esto, como evaluaciones cuantitativas del registro, se pueden eliminar los efectos del pozo para determinar la resistividad verdadera de la formación y por medio de la Ecuación de Archie determinar valores de porosidad para diferentes unidades de formaciones.

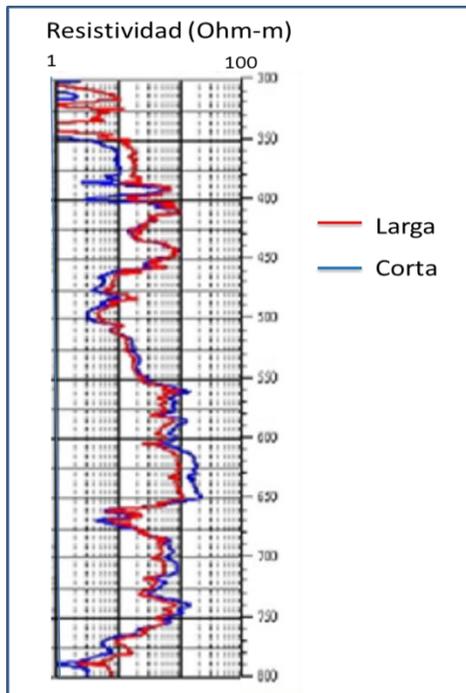


Figura 22. Ejemplo de registro de resistividad en un pozo geotérmico. Fuente: B. Steingrímsson (2011) "Geothermal well logging"

3.2.2 Registro de Rayos Gamma

Las rocas de la formación y los minerales que las componen contienen isótopos radioactivos que están en constante decaimiento, por lo que emiten partículas radioactivas y radiación a sus alrededores. Producen partículas α y β , así como radiaciones electromagnéticas γ . Los isótopos radioactivos que se encuentran principalmente en la corteza terrestre son potasio (^{40}K) y aquellos que se encuentran involucrados en el decaimiento de la serie de uranio y torio.

Los isótopos radioactivos se encuentran en pequeñas porciones en las rocas de la formación y los sedimentos, sin embargo su concentración varía en diferentes magnitudes a lo largo de la corteza. En rocas ígneas, la concentración de los tres isótopos es diez veces mayor en las rocas félsicas (ácidas) que en rocas ultramáficas (básicas) y la concentración de cada isótopo es en general proporcional a la concentración de cuarzo (SiO_2). En rocas sedimentarias la concentración relativa de los tres elementos es variable, pero el total de concentración de los isótopos radioactivos son diferentes para diferentes sedimentos y por tanto la radioactividad también lo es.

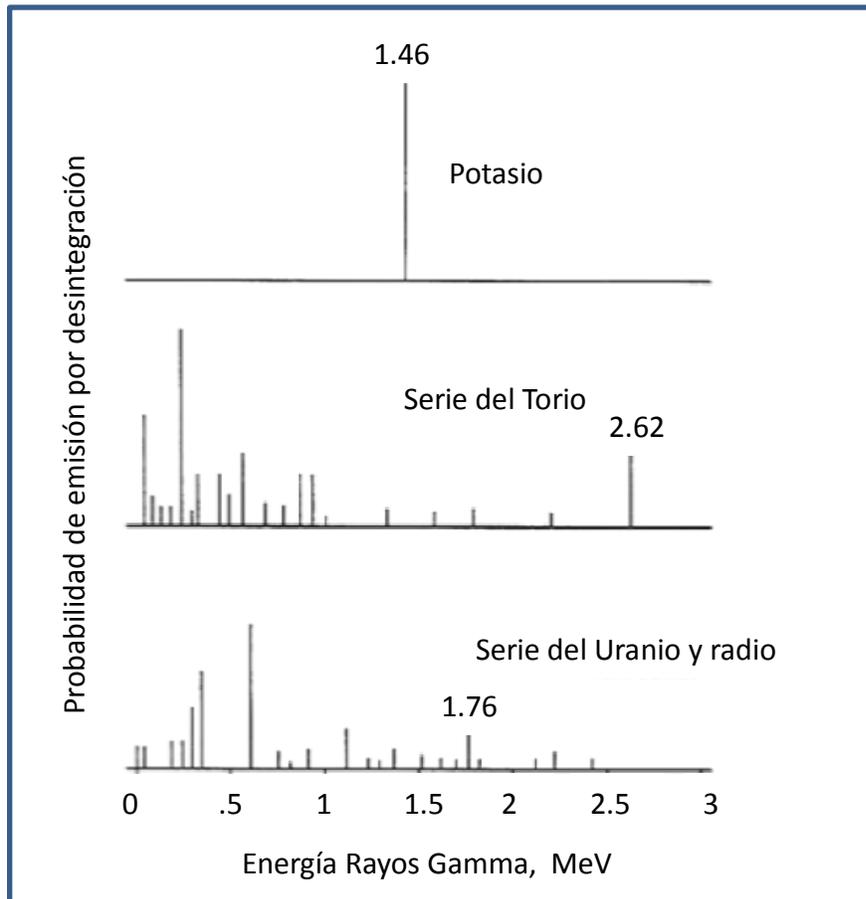


Figura 23. Distribución de la energía de los rayos gamma emitida por los tres isotopos naturales radioactivos. Fuente: B. Steingrímsson (2011) "Geothermal well logging"

3.2.2.1 Funcionamiento de la Herramienta

Aunque la concentración de isótopos radioactivos es muy baja, las radiaciones y de las rocas son fácilmente detectables. Las partículas α y β tienen una corta longitud de penetración en materiales fluidos y sólidos; siendo normalmente no detectable en los pozos. El registro de rayos gamma es una medida pasiva que se realiza mediante un detector que es bajado al pozo y va registrando la radiación natural de las formaciones geológicas que lo rodean.

El Instituto Americano del Petróleo (API) ha establecido una medida estándar para registros de rayos gamma, la unidad API - γ . Esta unidad se define como el 0,5% de la diferencia en la tasa de conteo registrado entre las zonas de baja y alta radioactividad en un pozo de pruebas situado en la Universidad de Houston.

3.2.2.2 Aplicación del Registro

La aplicación de los registros de rayos gamma está basada en el hecho de que la concentración de los isótopos radioactivos varía de un tipo de roca a otra y que las rocas félsicas son más radioactivas que las máficas. Los pasos más importantes para el análisis del registro se citan a continuación:

- La información proporcionada por el registro se revisa, las lecturas son convertidas a unidades API y por último la escala de profundidad es correlacionada con información geológica del pozo, antes de que la información obtenida por el registro sea almacenada en una base de datos.
- El registro de rayos gamma se grafica en forma paralela a otros registros, el de diámetro de pozo y una sección geológica obtenida a partir de los recortes. Las unidades con una misma litología que muestran alta radioactividad son identificadas y se determina su espesor. Las unidades con altas radioactividades deberán coincidir con rocas félsicas (dioritas, andesitas, riolitas) estimadas a partir de recortes y registradas en un carril paralelo, también las variaciones en la radioactividad pueden asociarse a altas concentraciones de isótopos radioactivos en intercalaciones sedimentarias en formaciones basálticas o en formaciones con intensa alteración hidrotermal.
- El registro de rayos gamma es corregido debido a los efectos del pozo y la acidez de las rocas ígneas.

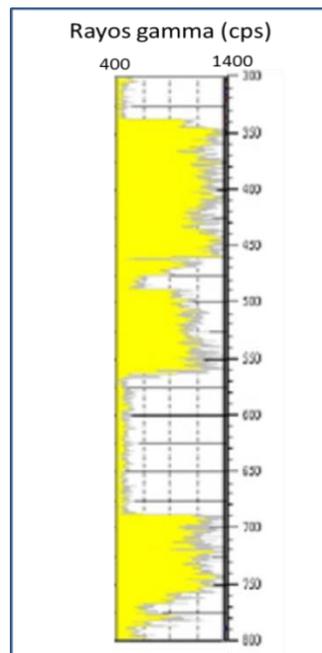


Figura 24. Ejemplo de registro de Rayos Gamma en un pozo geotérmico.
Fuente: Y. Gorbachev (1995) "Well logging: Fundamentals of method"

3.2.3 Registro de Porosidad (Neutrón–Neutrón)

El neutrón es una partícula eléctricamente neutral que aproximadamente tiene la misma masa que el protón. Esta partícula se encuentra en el núcleo de los elementos normalmente, sin embargo cuando están libres (alta energía), son producto del decaimiento de los isótopos radioactivos. Los neutrones libres son partículas en movimiento que interactúan con la materia a través de colisiones elásticas y no elásticas. Cuando los neutrones golpean al núcleo de la materia, reducen su velocidad (pierden energía) a velocidades térmicas antes de ser absorbidos o capturados por el núcleo, lo cual genera en ocasiones radioactividad y decaen emitiendo radiación gamma. La tasa a la que el neutrón reduce su velocidad está en función de la composición química del medio en el que están viajando.

En las rocas de la formación, el proceso de reducción de velocidad está dominado por colisiones elásticas entre los neutrones y el núcleo en los alrededores. Es conocido a partir de la teoría de colisión que cuando el neutrón golpea a una partícula de masa similar, se libera una mayor cantidad de energía. El núcleo con una masa similar a la del neutrón, dentro de los alrededores de la formación es el núcleo de hidrógeno, el cual consiste en un solo protón; estos núcleos de hidrogeno a su vez son encontrados en mayor medida en las moléculas de agua. Entonces, el proceso de liberación de energía está en función de la abundancia de agua en los alrededores de la formación, por ejemplo: el agua de los poros o en las fracturas, o enlaces acuosos en los minerales producto de la alteración hidrotermal en los mismos.

El efecto de disminución de velocidad que produce el agua de formación en los neutrones que viajan a altas velocidades es el principio físico que emplea la herramienta del registro para evaluar la porosidad de la roca.

3.2.3.1 Funcionamiento de la Herramienta

Una arreglo simple de la herramienta de registro de porosidad (neutrón – neutrón) consiste principalmente en una fuente de emisión de neutrones de alta energía y un detector (en ocasiones dos) sensitivo de neutrones termales, ubicados en la sonda a una distancia apropiada de la fuente. Un ejemplo de un detector simple es aquel en el que la fuente de neutrones es una mezcla de elementos radioactivos Americio y Berilio. El Americio emite partículas alfa que colisionan con los núcleos de Berilio causando que se emitan neutrones con mucha energía. La velocidad del neutrón es entonces del orden de 30.000 km/s y se vera disminuida a 500 km/s mediante la colisión, cuando los neutrones se conviertan en termales y sean detectados mediante el detector de neutrones de ^3He . Al igual que la herramienta de rayos gamma, una calibración estándar es empleada en los detectores de

neutrones, lo cual define una unidad de neutrones API como una parte de diferencia entre dos capas rocosas saturadas de agua en instalaciones de prueba de la Universidad de Texas.

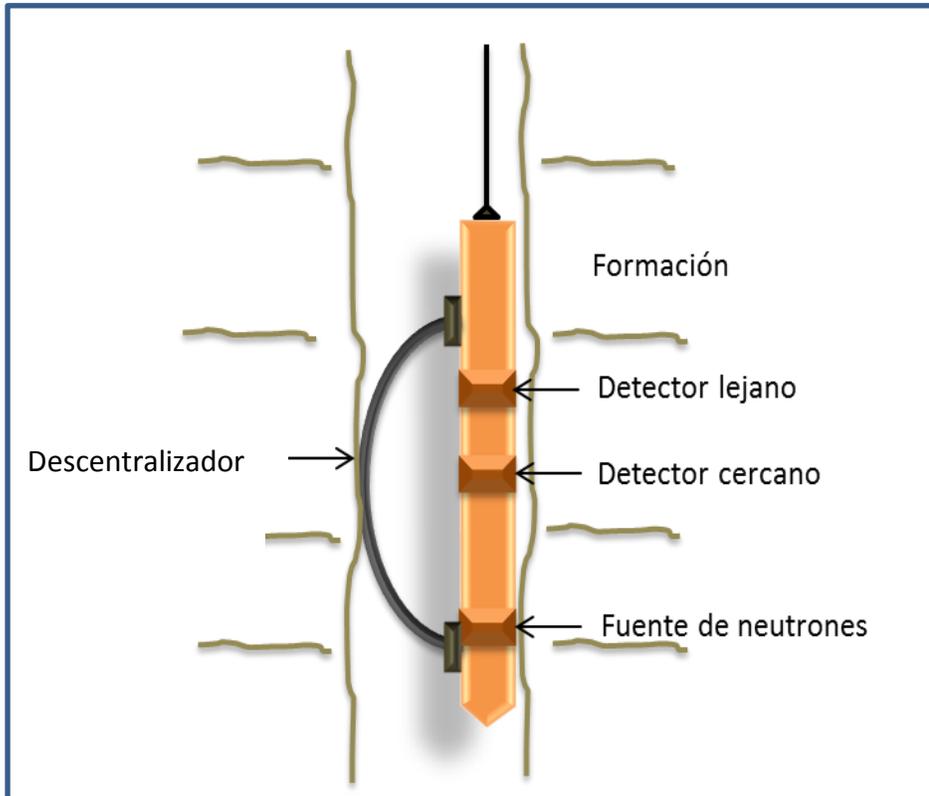


Figura 25. Herramienta de Registro Neutrón-Neutrón. Fuente: B. Steingrímsson (2011) "Geothermal well logging"

3.2.3.2 Aplicación de la Herramienta

Los registros de porosidad (neutrón – neutrón) se corren principalmente en agujero abierto, sin embargo también pueden ser tomados en agujero revestido. Los primeros pasos en el análisis de los registros de neutrones son:

1. la información del registro es calibrada y convertida a unidades API
2. la escala de profundidad es correlacionada con otros registros y almacenada
3. el registro es graficado en paralelo con otros registros que arrojen información geológica para determinar la estratigrafía y litología de las secciones y así comparar la información.

Otra aplicación más de este registro, es la evaluación de los efectos del pozo en la respuesta de los registros, principalmente los efectos causados por el agua en el pozo. Estos efectos deben ser eliminados del registro para obtener la verdadera

lectura, con lo cual se puede obtener la porosidad.

Las curvas de calibración que relacionan los registros de neutrón con la porosidad han sido desarrolladas en la industria de los hidrocarburos, basadas en medidas de porosidad en núcleos y registros de neutrón, así como del registro de resistividad. En estas curvas se define lo que se conoce como porosidad de las arcillas, las cuales se asemejan en gran medida a la porosidad de las rocas sedimentarias en yacimientos de hidrocarburos. Para el caso de yacimientos geotérmicos la calibración no es del todo válida, pues se tratan de rocas ígneas, en donde el enlace acuoso puede influir en la determinación de la porosidad. Sin embargo se ha comprobado mediante los registros de porosidad (neutrón – neutrón) que la diferencia entre las porosidades de las arcillas y la de las rocas ígneas no excede el 3%.

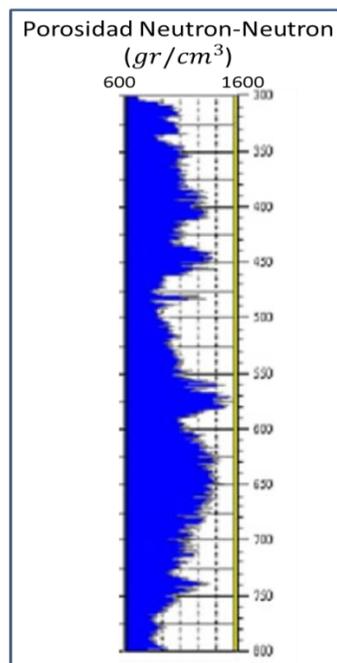


Figura 26. Ejemplo de registro Neutron-Neutron en un pozo geotérmico.
Fuente: Y. Gorbachev (1995) "Well logging: Fundamentals of method"

3.2.4 Registro de Imagen de pared de pozo

Contrario a la mayoría de los yacimientos sedimentarios, la permeabilidad de las rocas ígneas en los yacimientos geotérmicos está dominada principalmente por las fracturas, por lo que el mapeo de las fracturas en los yacimientos adquiere suma importancia. Distintas herramientas de registros geofísicos se han desarrollado para poder estudiar las fracturas intersectadas por los pozos, las cuales crean una imagen a manera de retrato de la pared del pozo, revelando las fracturas de la formación e incluso ciertas características geológicas visibles en la imagen. Una herramienta de esta tipo es el denominado registro de pared de pozo, desarrollado para la industria petrolera en 1970 y empleado en la industria

geotérmica para mapear las fracturas permeables.

3.2.4.1 Funcionamiento de la herramienta

Este registro es una herramienta que produce una imagen acústica de las paredes del pozo. La herramienta consiste de un transductor que actúa tanto como transmisor receptor de señal, la cual es enviada de la herramienta a la pared del pozo y reflejada de la pared al transductor; cuenta con un motor que hace girar el transductor, por lo que una señal reflejada es obtenida de la circunferencia total de la pared; y un magnetómetro que provee información sobre la orientación de la herramienta con respecto de los campos magnéticos de la Tierra junto con acelerómetros 3D para determinación la desviación con respecto a la vertical.

La imagen acústica obtenida a partir de este registro depende de muchos factores, incluyendo la reflectancia de la pared del pozo, la cual aumenta en rocas duras y disminuye en rocas blandas, de la rugosidad de la pared e incluso de la geometría del pozo (desviación de la forma circular). Los fluidos del pozo también afectan la calidad de la imagen, el agua lodosa causa dispersión de la señal acústica, lo que se traduce en la obtención de una imagen un poco borrosa.

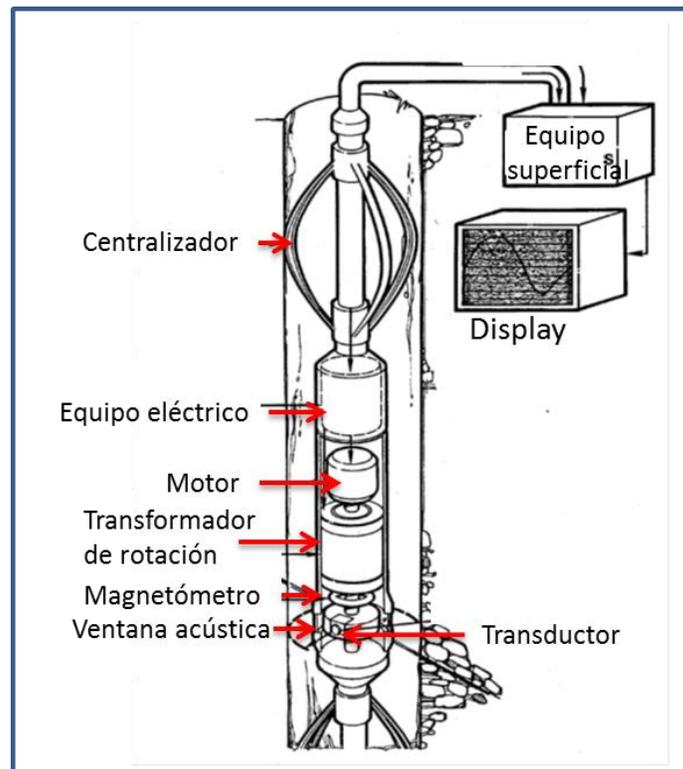


Figura 27. Herramienta de Registro de Imagen de pared de pozo.
Fuente: B. Steingrímsson (2011) "Geothermal well logging"

3.3 Registros de Temperatura y Presión

Los registros de temperatura y presión son los más importantes durante la exploración y el desarrollo de un campo geotérmico, por tanto son los que mayor aplicación tienen en la industria geotérmica. El objetivo primordial de la toma de estos registros es determinar la temperatura y la presión de la formación en donde se encuentran alojados los fluidos geotérmicos.

Durante la perforación, cuando las temperaturas se ven perturbadas por el fluido de perforación, los perfiles de temperatura obtenidos por los registros nos permiten identificar la ubicación de los acuíferos y su tamaño relativo, de la misma manera los registros de presión nos proporcionan información de la inyectabilidad o productividad del pozo.

Cuando se tienen los registros de presión y temperatura de varios pozos en un área determinada, se pueden elaborar mapas isotermales e isobáricos.

3.3.1 Herramientas para la toma de Registros de Temperatura y Presión

Una amplia gama de herramientas se han empleado para medir la temperatura y la presión durante la perforación de pozos geotérmicos. El primer termómetro empleado fue uno de mercurio, el cual era bajado al pozo en distintas ocasiones y detenido a la profundidad de interés en cada corrida, por tanto era necesario realizar muchas corridas para determinar el perfil del pozo. Durante la década de 1950 se comenzaron a emplear resistores eléctricos en pozos con temperaturas de hasta 150°C, en donde la resistencia medida era correlacionada y establecida como temperatura.

También se han empleado medidores mecánicos de temperatura y presión, los cuales constan de un muelle tubular (barómetro) que contiene un líquido especial, el cual hierve e incrementa la presión en un intervalo normalmente de 100 a 300°C. Otro tipo de herramienta mecánica emplea el muelle tubular en conjunto con un termómetro bimetálico para medir la temperatura. Ambas herramientas son bajadas al pozo mediante un cable de acero. Estas herramientas se pueden emplear en pozos de hasta 380°C.

A partir de la década de 1980 se desarrollaron distintas herramientas electrónicas para operar a altas temperaturas y se obtuviera información en superficie. Estas herramientas incluían medidores de temperatura, presión e incluso de gasto (spinner). La primera versión de este tipo de herramientas, consistía en una sonda con memoria integrada, la cual era bajada al pozo mediante un cable de acero para registrar y almacenar en su memoria interna la información. Los dispositivos electrónicos con los que contaba la herramienta eran aislados en una carcasa a prueba de presión y un protector térmico para mitigar los efectos del ambiente a altas temperaturas sobre los dispositivos por algunas horas.

Estas herramientas son bajadas al pozo a una velocidad promedio de 30 m/min y los datos son obtenidos aproximadamente a cada metro. La precisión de las herramientas es muy confiable, $\pm 0,5$ °C para la temperatura y $\pm 0,1$ bar para la presión.



Figura 28. Imagen de una sonda de medición de temperatura, presión y gasto modelo Kuster K-10 para pozos geotérmicos. *Fuente: B. Steingrímsson (2013) "Geothermal well logging: Temperature and pressure logs"*

3.3.2 Registro de Temperatura

Durante las operaciones de perforación, los pozos geotérmicos al igual que las formaciones sufren un enfriamiento debido al contacto con los fluidos de perforación; sin embargo, los registros de temperatura comúnmente se corren con diversos fines, a pesar de que rara vez muestran la temperatura real de la formación perforada. La información que puede ser obtenida es: localización de los acuíferos que acepten agua durante la inyección, existencia de posible flujo cruzado entre los acuíferos, lo cual es común en pozos con múltiples zonas de producción y se nota claramente en los registros de temperatura, así como la determinación de la temperatura del pozo, antes de bajar otras herramientas de registros o equipos de perforación.

El monitoreo constante durante horas o días de la temperatura de fondo del pozo puede ser extrapolado para determinar la temperatura real de la formación. Esto se realiza para tener la certeza de que el pozo está comunicado con un yacimiento geotérmico.

Los pozos que presentan algún tipo de daño a menudo son estimulados para mejorar la permeabilidad. La comparación de los registros de temperatura antes y después de la estimulación nos indica de manera indirecta si la estimulación tuvo éxito o no.

Un tipo de curva común de temperatura que se presenta en los registros de pozos durante la perforación se explicada a continuación, se asume que en el pozo

existen tres zonas productoras.

Perfil: Se ve a menudo en los pozos poco tiempo después de haberlos perforado, cuando la permeabilidad es baja. La temperatura en el fondo del pozo es baja y se muestran algunos indicadores de permeabilidad representados por los picos en el perfil de temperatura. Sin embargo la permeabilidad no es la suficiente para iniciar una producción masiva de las zonas de interés. Un gradiente de temperatura elevado se muestra en el fondo del pozo, en donde el enfriamiento debido a la perforación es el mínimo.

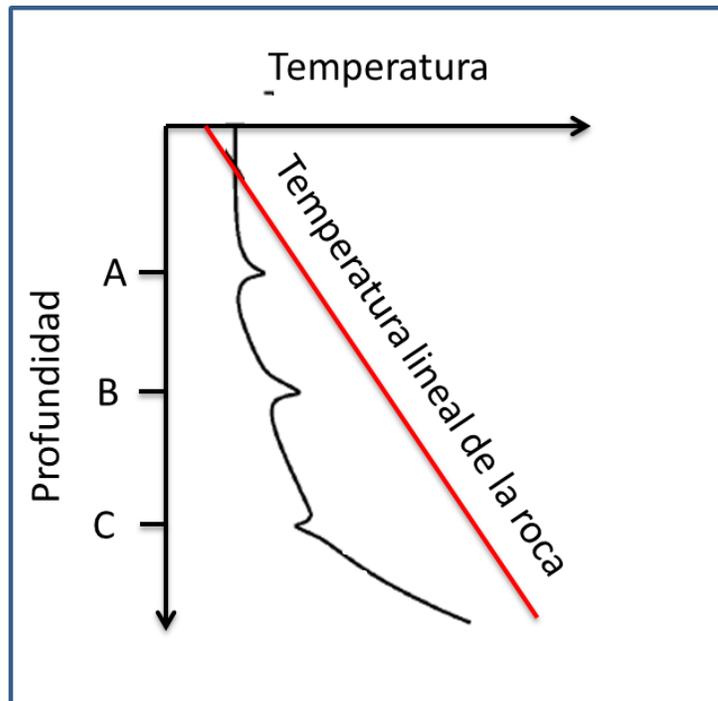


Figura 29. Perfil de temperatura en un pozo cerrado. Fuente: B. Steingrímsson (2013) "Geothermal well logging: Temperature and pressure logs"

Conocer la temperatura de la formación es de suma importancia durante la perforación debido a que gracias a la determinación de este parámetro se toman decisiones acerca de las profundidades de asentamiento de las TR's, así como la profundidad de la TR de producción.

La forma más común de tomar los registros de temperatura es, parar las operaciones de perforación durante determinado tiempo para que de esta manera se puedan correr los registros y obtener la información necesaria. Sin embargo, la perforación de pozos de alta temperatura es una operación que debe ser continua y no parar para medir la variación de temperatura, a menos que sea absolutamente necesario. Cuando la perforación y la circulación del fluido son detenidas, la herramienta de temperatura se corre hacia el fondo del pozo para monitorear la temperatura en un periodo de tiempo corto, generalmente de 12

horas hasta 2 días.

3.3.2.1 Mapas de temperatura de los yacimientos geotérmicos

Una vez corridos y analizados los registros de temperatura se obtienen los perfiles de temperatura de formación. Con estos datos obtenidos y trazándolos en una vista en planta, se realiza un mapa que muestra como la temperatura varia dentro del yacimiento. Estos mapas muestran las zonas de conducción y convección en el interior del sistema geotérmico. Los mapas isotermales antes de cualquier explotación, muestran las condiciones termales iniciales del yacimiento, pero los mapas isotermales basados en datos de temperatura de un yacimiento en explotación revela los cambios de temperatura causados por la producción, debidos a las caídas de presión.

3.3.3 Registro de Presión

La presión es un parámetro fundamental en el estudio de los yacimientos geotérmicos. Es una propiedad que se toma directamente del fluido geotérmico. Las variaciones de presión en los yacimientos son el principal mecanismos de empuje para que el fluido pueda ser producido. La presión en el yacimiento cambia con el tiempo, debido a la producción del fluido geotérmico y a la inyección de agua en el yacimiento. El monitoreo continuo de la presión del yacimiento es importante para predecir el comportamiento del yacimiento.

Los registros de presión se toman entre otras cosas, para estudiar las condiciones del pozo, para elaborar un mapa de las presiones del yacimiento y estudiar las variaciones de presión durante la producción o la inyección de fluido.

Presiones en pozo descubierto: El gradiente de presión en un pozo geotérmico fluyendo cambia con la profundidad (dirección z) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{dP}{dz} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{friccion} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_{aceleracion} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_{hidrostatica}$$

Cuando no hay flujo en el pozo los primeros dos términos son cero y el gradiente de presión se convierte en la presión hidrostática:

$$\frac{dP}{dz} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_{hidrostatica} = \rho g$$

donde ρ es la densidad del fluido y g es la constante de aceleración gravitacional.

La columna de fluido en un pozo geotérmico consiste de líquido, vapor y aire, con diferentes densidades. La densidad de cada fase solo cambia al variar la

temperatura. Sin embargo si asumimos condiciones isotermales en el pozo, la ecuación puede ser resuelta como se muestra a continuación:

$$P(z) = P_0 + \rho gz.$$

Cuando el pozo está lleno de líquido con una presión P_0 en la cabeza del pozo

$$P(z) = \rho g(z - z_0).$$

Cuando el nivel de fluido es z_0 por debajo de la cabeza del pozo.

El perfil de presión de un pozo se obtiene empleando los registros de presión, aunque también se puede estimar calculando la presión hidrostática a partir de las ecuaciones antes mencionadas, siempre y cuando el perfil de temperatura del pozo sea conocido.

Existen diferentes perfiles de pozo, dependiendo de la presión y de las condiciones de fase. Los principales tipos de pozos estáticos (no hay flujo) son:

- Pozos artesianos: Pozos de agua con alta presión en la cabeza de pozo. Estos pozos fluyen espontáneamente cuando se abren.
- Pozos no artesianos (pozos muertos): Pozos de agua con carga de agua en el fondo del pozo.
- Pozos presurizados con alta temperatura: La presión en la cabeza del pozo es de al menos de 80 bar, hay vapor hasta cierta profundidad y el resto es líquido hasta el fondo del pozo. La temperatura de la capa en donde hay vapor es la de ebullición del líquido y la presión dependerá de la fracción de vapor en el pozo.
- Pozos de vapor: El pozo está lleno de vapor en su totalidad. Debido a la pequeña densidad del vapor la presión en el fondo del pozo es solo un poco mayor que la presión en la cabeza del pozo.

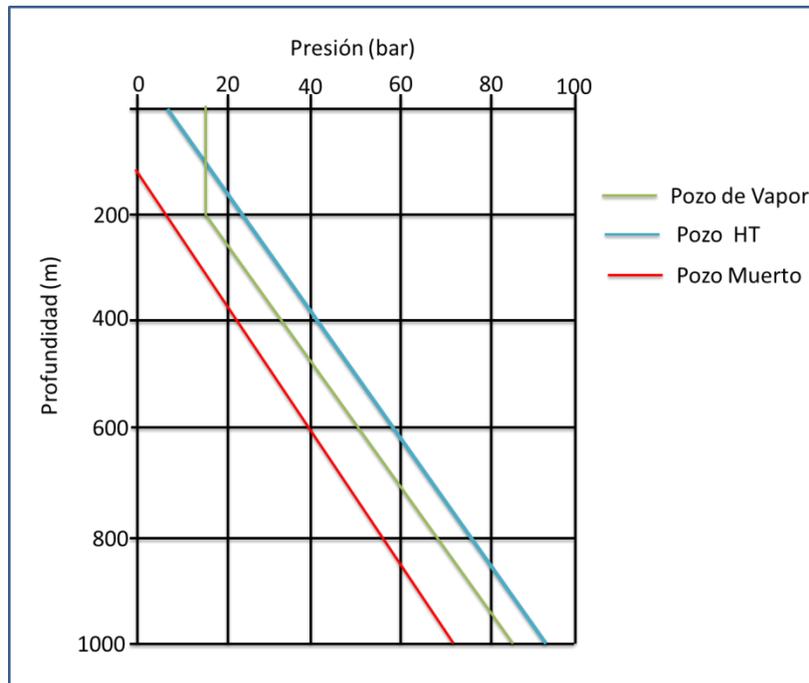


Figura 30. Perfiles de presión comunes en pozos geotérmicos. Fuente: B. Steingrímsson (2013) "Geothermal well logging: Temperature and pressure logs"

El gradiente de presión en los pozos estáticos está controlado por la densidad del fluido, la cual varía con la temperatura. La conexión hidrológica entre un pozo y un yacimiento geotérmico es a través de las zonas permeables intersectadas por el pozo (fracturas). Durante la perforación de pozos, la inyección o producción, la presión del pozo varía y es controlada por los operadores, pero cuando las operaciones se paran y el pozo es comunicado con el yacimiento, la presión del pozo cambiará hasta alcanzar el equilibrio con la presión del yacimiento. En un caso ideal, un pozo con una sola zona de interés, la presión del pozo a la profundidad de dicha zona cambiará hasta alcanzar la presión de la formación en un periodo corto de tiempo y no habrá intercambio de flujo entre el yacimiento y el pozo.

La presión en pozos con múltiples zonas permeables también cambiará y buscará alcanzar el equilibrio con la presión de las formaciones. La temperatura del agua en el pozo y por lo tanto el gradiente hidrostático al final del proceso de perforación, serán diferentes a la temperatura y presión del yacimiento. Esto significa que la presión del pozo no puede encontrar el equilibrio con todas las zonas de interés. Por lo que, el pozo buscará el equilibrio con la mejor zona permeable. Cuando esto sucede, da lugar al flujo de fluidos de las demás zonas permeables al pozo.

Lo primero que sucede en el pozo después de terminar la perforación y poner a producirlo es que se obtiene el equilibrio de presión entre el pozo y la formación.

Esto suele tardar unos días, al mismo tiempo el fluido dentro del pozo se calienta acompañado por un cambio en la densidad del fluido y, por lo tanto, la columna de agua en el pozo se expande, lo que resulta en un aumento en el nivel del agua, por esta razón los perfiles de presión medidos en el pozo en el periodo de calentamiento pivotean alrededor de la profundidad de la mejor zona permeable.

La información sobre las zonas de interés de un pozo y su tamaño relativo, se pueden observar en los registros de presión y en los registros de temperatura que se toman al final de la perforación, durante el calentamiento y durante las pruebas de producción. La mayoría de los pozos tienen varias zonas de interés, en estos casos el punto pivote se encuentra más cerca de la mejor zona de interés. Por consiguiente el punto pivote es un indicador de la zona más permeable, y determina la presión de la formación a esa profundidad.

Una vez determinada la presión del yacimiento a la profundidad de la zona de interés, los registros se analizan para conocer el perfil de presiones para el pozo. Este perfil de presión se puede estimar siempre y cuando la temperatura del pozo a la profundidad de la zona de interés sea igual a la temperatura de la formación. Sin embargo esto es poco común debido al fenómeno de ebullición que se presenta en los pozos. Entonces el perfil de presiones para el pozo puede ser estimado por extrapolación hidrostática desde el punto pivote, para determinar la densidad del agua como una función de la profundidad.

3.3.3.1 Mapas isobáricos

Una vez que se tienen los perfiles de presión de los pozos del mismo campo, se tienen que visualizar la distribución de la presión en el yacimiento. Por lo que los datos se representan de manera similar que los de temperatura, es decir, en vistas de planta y secciones transversales con contornos isobáricos, para representar como varían las presiones dentro del yacimiento y como es que varían a lo largo de la explotación.

3.4 Registro de Diámetro de pozo (Caliper)

El diámetro y la sección que es atravesada por el pozo perforado esta determinada por el tipo de roca y las condiciones de perforación. Si el diámetro del agujero es el mismo que el de la barrena, se le denomina diámetro nominal, esto sucede normalmente en rocas consolidadas, sin embargo un incremento en el diámetro ocurre cuando se atraviesan arcillas, rocas poco compactas o no compactas e incluso sedimentos hidroquímicos. Zonas con diámetros menores son localizadas en donde se han incrustado a las paredes de la formación los denominados enjarres.

La herramienta que proporciona un promedio del diámetro del agujero o la sección transversal es la herramienta conocida como caliper (registro de diámetro de

pozo). La mayoría de estas herramientas son mecánicas aunque también existen las de tipo acústico.

Existen dos diferentes tipos de herramientas de registro de diámetro de pozo (mecánico): la herramienta independiente para proporcionar información detallada acerca de las condiciones geométricas del pozo y la herramienta convencional ensamblada con otro tipo de registros geofísico para proporcionar información geométrica del pozo y corregir la demás información que proporciona la misma herramienta.

La herramienta mecánica convencional consiste de tres brazos montados concéntricamente y espaciados a 120° . Los brazos son expulsados hacia la pared del pozo mediante resortes y un transductor indica el ángulo de los brazos, el cual es convertido a la distancia que existe entre el centro de la sonda a la pared del pozo. La mayoría de las herramientas independientes tienen tres o cuatro brazos e incluso algunas hasta seis. Las herramientas más recientes de este registro están provisionadas con teleoperadores hidráulicos que expulsan los brazos para tomar mediciones y los pueden contraer a su posición original.

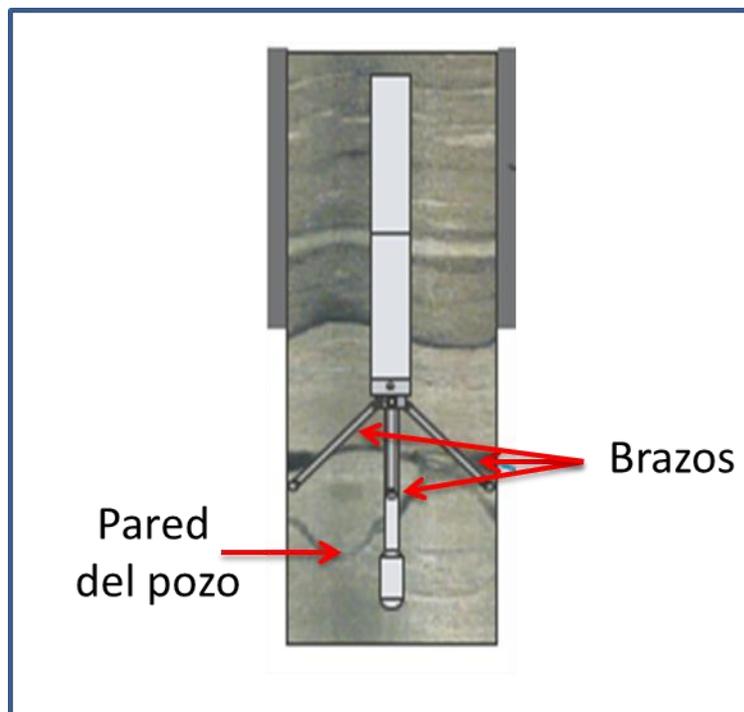


Figura 31. Funcionamiento de la herramienta mecánica convencional en el pozo. Fuente: Y. Gorbachev (1995) "Well logging: Fundamentals of method"

El registro de diámetro de pozo tiene una gran variedad de aplicaciones, es empleado durante la perforación de pozos geotérmicos principalmente para:

- Calcular el volumen de cemento en el espacio anular durante las

operaciones de cementación.

- Controlar las condiciones de agujero durante la perforación
- Servir de referencia en profundidad y condiciones del agujero en la interpretación de otros registros.
- Identificación de zonas con enjarre en el yacimiento.

Es importante mencionar que la herramienta para ser empleada en pozos de alta temperatura dentro de la industria geotérmica es corrida normalmente cuando el pozo esta frio.

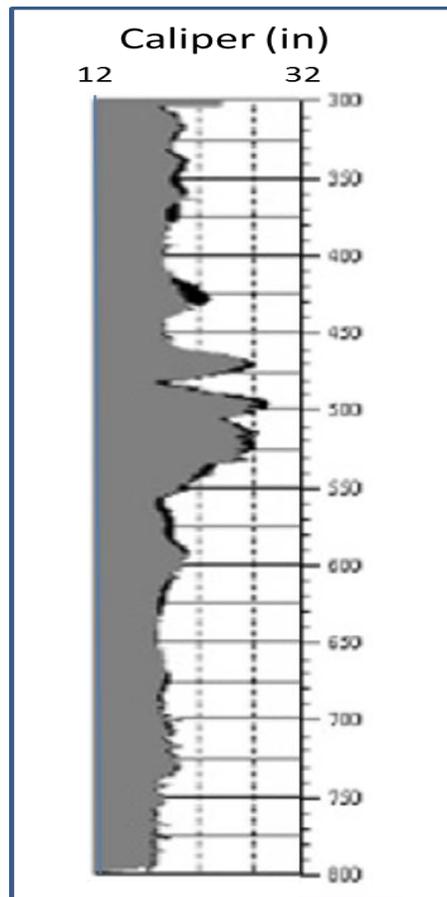


Figura 32. Ejemplo de registro de caliper en un pozo geotérmico.
Fuente: Y. Gorbachev (1995) "Well logging: Fundamentals of method"

CAPÍTULO 4. PROCESO DE PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS

Al igual que en la industria petrolera, en la industria geotérmica para acceder a los recursos (hidrocarburos en el caso de la industria petrolera y fluidos geotérmicos en el caso de la industria geotérmica), es necesario llevar a cabo la *perforación de pozos*.

La perforación de pozos geotérmicos es definida como el conjunto de operaciones mediante las cuales se crea y acondiciona un ducto (pozo) que servirá como medio para transportar los fluidos geotérmicos desde el subsuelo hasta la superficie; en ocasiones este ducto sirve para realizar la operación inversa, transportar agua desde la superficie hasta el subsuelo para confinarla en el interior, recibiendo entonces el nombre de pozo inyector.

Durante el proceso de perforación se pueden obtener muestras de las formaciones perforadas, con ello se pueden realizar estudios sobre la conductividad de la roca, porosidad y permeabilidad; también se realizan estudios sobre el gradiente de temperatura y presión, así como otros que puedan facilitar la evaluación del recurso. En la etapa de exploración de recursos geotérmicos, la perforación de pozos tiene por objeto confirmar la existencia del recurso.

Lo que distingue la perforación de pozos geotérmicos a la perforación de pozos petroleros convencionales es principalmente la hostilidad de los ambientes geológicos, por lo que el proceso en el caso de geotermia requiere de consideraciones especiales. Los principales retos son las altas presiones y temperaturas a la que se encuentran los fluidos, los ambientes geológicos y la presencia de fluidos químicamente agresivos.

4.1 Principales componentes del equipo de perforación rotaria en pozos geotérmicos

La perforación rotatoria es el método de perforación de pozos geotérmicos más común, al igual que en la perforación de pozos de agua y petróleo.

El método consiste básicamente en hacer rotar una herramienta de corte o desgaste de rocas (barrena) mediante una columna de tuberías (tubería de perforación) con algunos aditamentos que faciliten la operación. El torque es aplicado por una mesa rotaria a través de una flecha de transmisión (*Kelly*). El objetivo de la operación es perforar las formaciones hasta llegar a la profundidad del yacimiento, previamente establecida. Para lograr esta operación es necesario circular un fluido (fluido o lodo de perforación) con ciertas propiedades que ayude a levantar los recortes de la roca generados durante la perforación hasta la superficie, enfriar a la barrena, así como crear una columna hidrostática que mantenga presión sobre las paredes del pozo.

Los principales sistemas con los que cuentan estas unidades o equipos de perforación se describen a continuación.

4.1.1 Sistema de suministro de potencia

El sistema de potencia en un equipo de perforación normalmente consiste de una fuente primaria de potencia (generador) y de un medio de transmisión de potencia.

En los equipos modernos empleados en la industria geotérmica, la fuente de potencia generalmente es un motor diesel de combustión interna. La energía producida por la fuente es empleada para el funcionamiento de los sistemas restantes, como bombas, alumbrado desarenadores, preventores, etc.

La transmisión de potencia se realiza principalmente de manera mecánica a través de flechas y/o cadenas y de manera eléctrica mediante generadores (de corriente alterna y directa), rectificadores y motores de corriente directa.

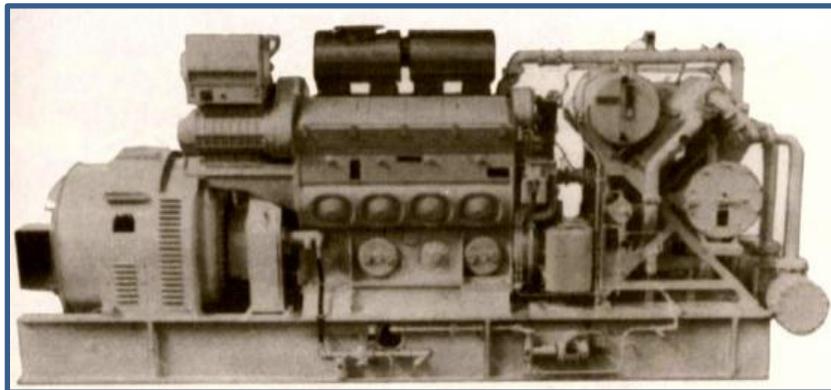


Figura 33. Motor de combustión interna.
Fuente: J. Tester (2011) “Geothermal well drilling”

4.1.2 Sistema de izaje

El sistema de izaje es el componente de mayor tamaño en una plataforma de perforación, la función primordial del sistema es proveer un medio para soportar, subir y bajar la sarta de perforación, la tubería de revestimiento (TR) y otros equipos subsuperficiales cuando se están llevando a cabo las operaciones de perforación.

Los principales componentes de este sistema son:

- Mástil y subestructura
- Malacate
- Corona y polea viajera
- Cable de perforación

- Equipo auxiliar (elevadores, gancho, etc.)

Con este sistema se realizan dos operaciones principales, viajes y conexiones. Las conexiones se refieren al proceso periódico de adicionar tubería conforme se va profundizando el pozo. Los viajes son referidos al proceso de remover la tubería del pozo para cambiar alguna porción de la tubería o algún equipo subsuperficial y posteriormente bajar nuevamente la sarta. Estos viajes son realizados normalmente para hacer el cambio de las barrenas desgastadas.

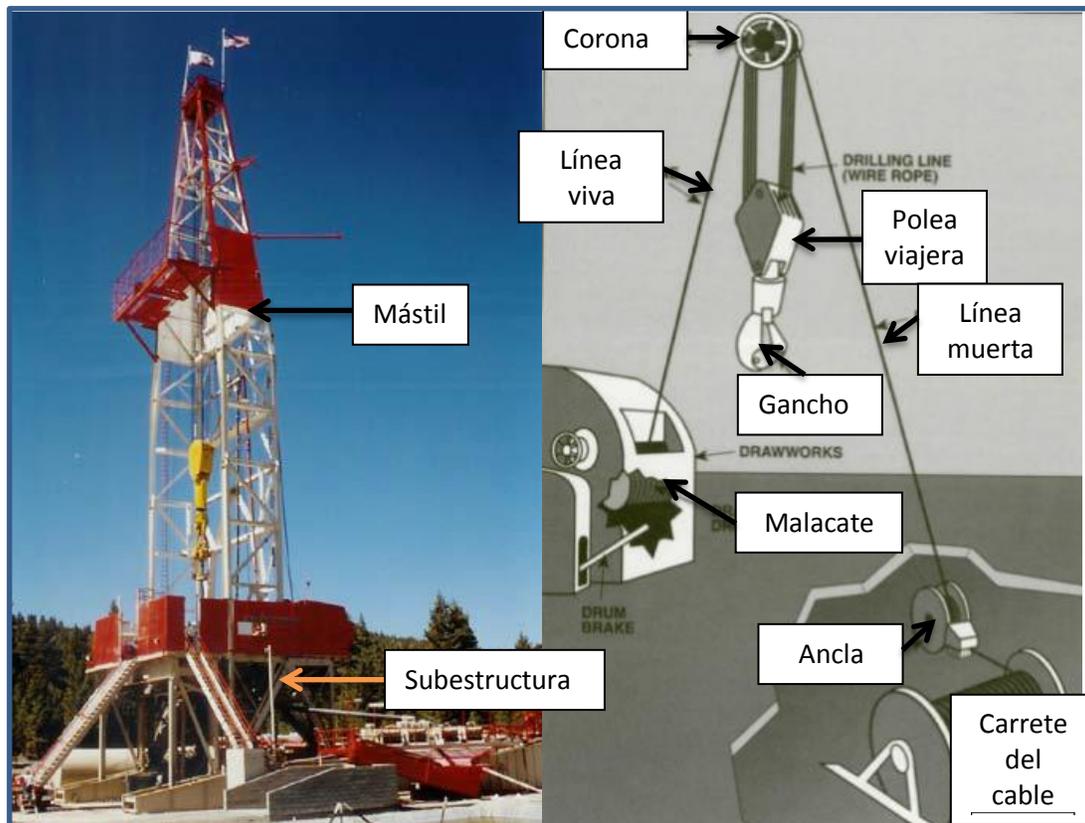


Figura 34. Componentes del sistema de izaje.

Fuente: J. Finger, (2010), "Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling"

4.1.3 Sistema circulación

La función principal del sistema de circulación es la de remover los recortes de la roca del pozo conforme la operación de perforación progresa. El sistema está compuesto por elementos superficiales y subsuperficiales a través de los cuales el fluido de perforación viaja hacia el pozo y retorna a la superficie transportando los recortes de roca.

Los componentes del equipo superficial son:

- Bombas
- Presas de lodos

- Tubo vertical (*Stand pipe*), unión giratoria y flecha
- Equipo de control de sólidos
- Desgasificador
- Temblorinas
- Torre de enfriamiento (opcional)

Los componentes del equipo subsuperficial son:

- Tubería de perforación
- Preventores
- Lastrabarrenas
- Barrena de perforación
- Aditamentos de la sarta de perforación

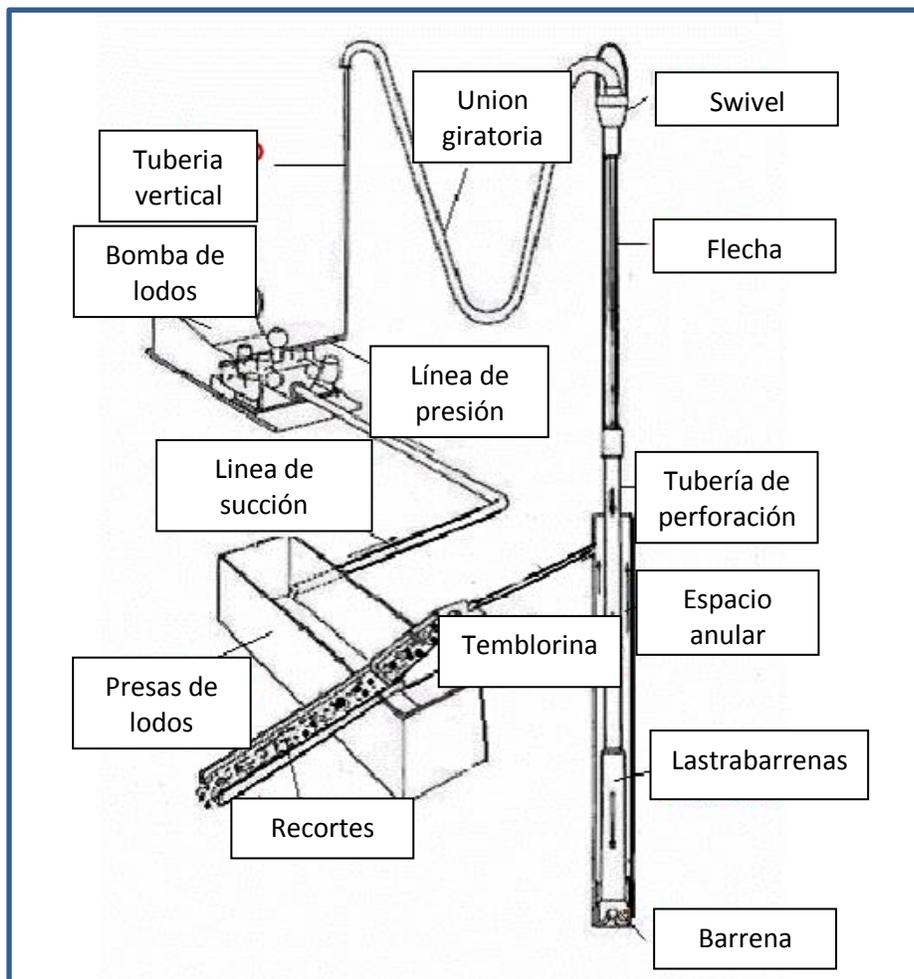


Figura 35. Sistema de circulación. Fuente: P. Ngugi, (2008), "Geothermal well drilling"

4.1.4 Sistema de rotación

El equipo incluye todos los elementos necesarios para lograr la rotación del equipo, por tanto su objetivo es el de proporcionar la acción de rotación a la barrena para que esta pueda llevar a cabo la perforación.

Durante la perforación de pozos geotérmicos, se emplean dos formas distintas de aplicar rotación a la sarta de perforación, las cuales son mediante:

- Sistema rotatorio convencional
- Sistema con *Top Drive*

El sistema rotatorio convencional es el más empleado en la industria geotérmica y está constituido por:

- Mesa rotaria
- Buje maestro
- *Bushing kelly*
- Flecha de transmisión (*kelly*)
- Unión giratoria
- Válvulas de seguridad
- Sarta de perforación

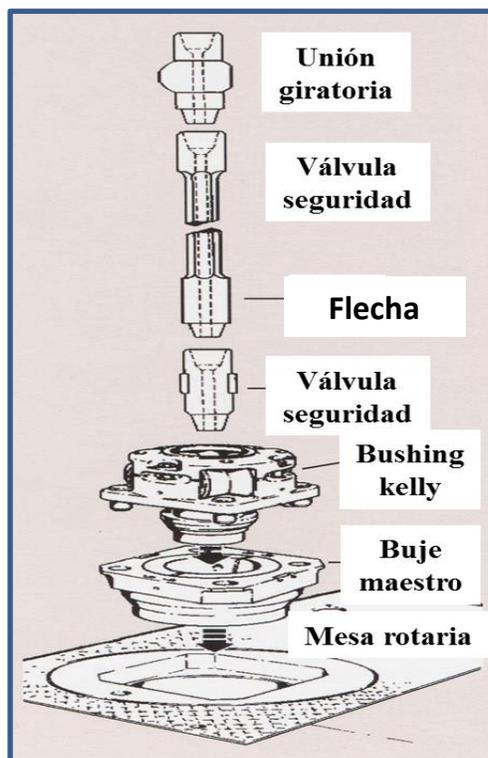


Figura 36. Sistema de rotación convencional.

El sistema con *Top Drive* es un equipo superficial que transmite la rotación a la sarta de perforación sin el uso de la mesa rotaria ni la flecha de transmisión. Es empleado en la industria geotérmica en casos especiales. Sus principales componentes son:

- Unión giratoria integrada
- Manguera flexible
- Motor eléctrico
- Árbol de transmisión
- Caja de transmisión
- Preventores
- Llave de apriete
- Sustitutos
- Control remoto para el gancho

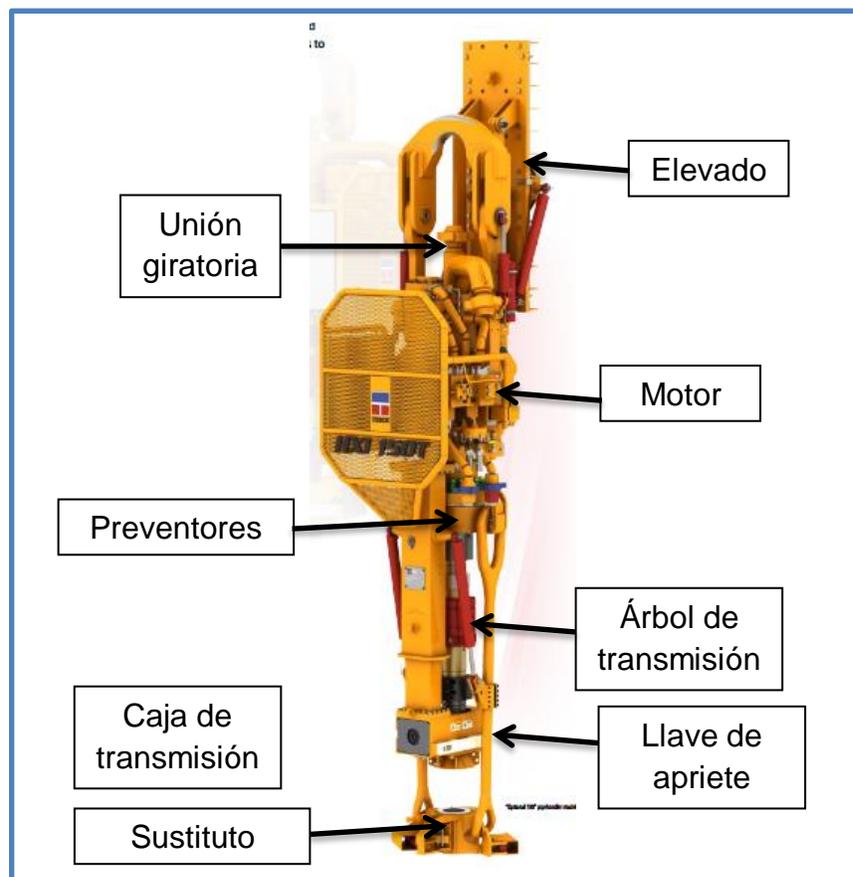


Figura 37. Componentes del Sistema Top Drive. Fuente: Página oficial Tesco Company

4.1.5 Sistema de control de brotes

Cuando la barrena penetra formaciones que contienen fluidos presurizados y estos vencen la columna hidrostática creada por el fluido de perforación desplazándolo hasta la superficie se produce el brote del pozo. Para evitar lo anterior se tiene el sistema de control es cual proporciona la seguridad del pozo en situaciones donde existen estas aportaciones de fluido de la formación al pozo.

Los elementos comunes del sistema de control de brotes en pozos geotérmicos son:

- Arreglo de preventores
- Sistema de acumulación (acumulador)

El arreglo de preventores consta de:

- Preventor rotatorio
- Preventor anular
- Arietes para diferentes diámetros de tubería
- Ariete ciego
- Ariete de corte
- Línea de estrangular
- Línea de matar

El acumulador es el dispositivo capaz de suministrar fluido a alta presión para accionar el arreglo de preventores cuando se requiera.



Figura 38. Arreglo de preventores usados en la perforación de pozos geotérmicos.
Fuente: P. Ngugi, (2008), "Geothermal well drilling"

4.1.6 Sistema de monitoreo

La función primordial de este sistema es la de monitorear en forma continua todos los parámetros más importantes involucrados en las operaciones de perforación, con el objeto de llevar a cabo las operaciones en forma segura y eficiente, así como, en caso de ocurrir algún imprevisto, poder actuar en forma rápida. Los parámetros más importantes que se monitorean son:

- Profundidad
- Velocidad de perforación
- Peso en el gancho
- Torque aplicado a la sarta
- Gasto de bombeo
- Presión en las bombas
- Densidad y temperatura del lodo
- Propiedades de la roca
- Peso sobre la barrena
- Nivel de presas
- Velocidad de rotación

4.1.7 Selección de la Unidad de perforación

La mayoría de los criterios empleados para seleccionar la unidad de perforación derivan de los parámetros del pozo a perforar, específicamente el diámetro, la profundidad y el diseño de las tuberías de revestimiento. El proceso de planeación y diseño del pozo establecerá el diámetro del mismo, con lo cual se tendrá el primer criterio para determinar si se perforará un pozo de diámetro reducido (*slimwell*) o un pozo convencional, para el caso de pozos exploratorios.

Algunos de los factores que definirán el diámetro mínimo del pozo son:

- Las herramientas para toma de registros
- Las herramientas para tomar núcleos
- El tipo de terminación
- Las pruebas de productividad

Si tomando en consideración los parámetros antes mencionados, un pozo estrecho puede satisfacer los requerimientos, entonces podemos utilizar una unidad de perforación tipo nucleadora.

Cuando se requiere un pozo con diámetro mayor, se debe utilizar una unidad convencional de perforación, entonces se escogerá si el sistema rotario será del tipo convencional o del tipo *Top Drive*.

Existen otros factores que se deben considerar para decidir qué equipo de

perforación emplear, independientes del factor económico, el cual afectará siempre cualquier decisión. Algunas de esas consideraciones son:

- Capacidad de la unidad
- Historial de uso de la unidad
- Capacidad de las bombas
- Acondicionamiento del fluido
- Sarta de perforación
- Preventores
- Capacidad de manejo de altas temperaturas
- Soporte de la unidad
- Equipo y personal empleados



Figura 39. Partes de una plataforma de perforación para pozos geotérmicos.
Fuente: P. Ngugi, (2008), "Geothermal well drilling"

4.2 Herramientas y fluidos de perforación para pozos geotérmicos

Los recursos geotérmicos están en su mayoría asociados a rocas ígneas y metamórficas, estratos que son duros, resistentes y difíciles de penetrar, a diferencia de las rocas sedimentarias que son más suaves y se logran perforar más rápidamente.

Las rocas ígneas y metamórficas también contienen una gran cantidad de materiales abrasivos, como el cuarzo, el cual causa vibración en las barrenas y por lo tanto acelera su desgaste. Este tipo de rocas en muchas ocasiones esta fracturada, lo cual hace variar la carga de impacto en la barrena causando daño a la misma. Estos factores y las altas temperaturas son los principales retos a vencer durante la selección de una barrena para perforar pozos geotérmicos.

4.2.1 Barrenas (*Bits*)

La barrena es la herramienta de corte ubicada en el extremo inferior de la sarta de perforación, es empleada para triturar o cortar la formación durante el proceso de perforación rotaria.

La función principal de esta herramienta es la de remover la roca al reducir y eliminar de su esfuerzo al corte, o mediante el vencimiento de su esfuerzo de compresión. De acuerdo a esto pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

4.2.1.1 Barrenas Tricónicas (*Roller-cone bits*)

El mecanismo de ataque de estas barrenas (tanto de dientes maquinados como insertos) es de trituración por impacto, fallando la roca por compresión.

Las barrenas tricónicas son las más empleadas durante las operaciones de perforación rotatoria de pozos geotérmicos, constan de tres conos cortadores que giran sobre su propio eje, los cuales pueden variar de acuerdo a la estructura de corte, ya que pueden tener dientes de acero fresados o insertos de carburo de tungsteno. Los principales componentes de esta barrena son:

- Estructura cortadora (dientes)
- Sistema de rodamiento (cojinetes)
- Cuerpo de la barrena
 - Conexión roscada para la tubería
 - Tres ejes para cojinetes
 - Depósito para lubricante
 - Toberas

Las barrenas de dientes fresados son relativamente económicas, sin embargo su mayor aplicación es solo en formaciones blandas, en cambio las barrenas con

insertos son empleadas en formaciones de medias a duras, dependiendo su aplicación del tamaño, la forma, los cojinetes y el número de insertos. Las barrenas tricónicas empleadas en la industria geotérmica deben tener especificaciones especiales principalmente para los cojinetes, los sellos y el fluido lubricante; deben estar adecuadas para resistir las altas temperaturas.

Las barrenas tricónicas son las más empleadas en la perforación de pozos geotérmicos debido a su alta durabilidad en rocas duras y fracturadas, característica principal de los yacimientos geotérmicos.

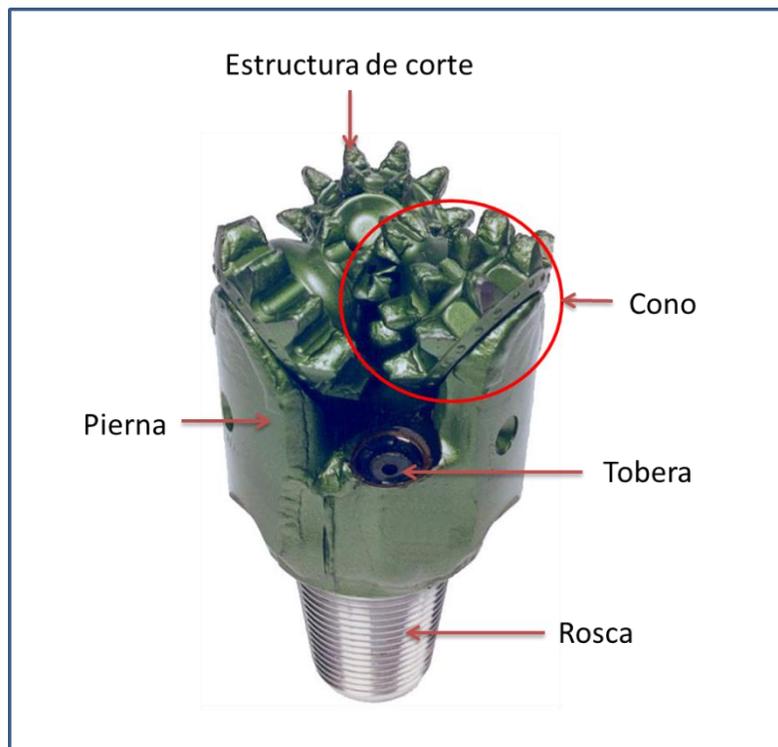


Figura 40. Barrena tricónica. Fuente: G. Culver (2000) "Drilling and well construction"

4.2.1.2 Barrenas de cortadores fijos (*Drag bits*)

El mecanismo de ataque de este tipo de barrenas es el de raspado, fallando la roca por esfuerzo de corte.

Estas barrenas tienen un diseño muy elemental, a diferencia de las tricónicas, carecen de partes móviles. Son fabricadas con diamante natural o sintético, según el tipo y características de las mismas. La alta dureza y conductividad térmica del diamante, lo hacen un material con alta resistencia para perforar todo tipo de formaciones.

Estas barrenas, a excepción de las que tienen cortadores de Diamante

Policristalino Compacto (PDC por sus siglas en ingles), no emplean toberas para circular el fluido de perforación, están diseñadas de tal manera que el fluido de perforación puede pasar a través del centro de la misma, alrededor de la cara de la barrena y entre los diamantes por unos canales llamados vías de agua o de circulación. Estas barrenas se pueden subclasificar como se muestra a continuación:

- De diamante natural
- De diamante térmicamente estable (TSP)
- De diamante policristalino compacto (PDC)
- Especiales

La ventaja que presentan las barrenas de cortadores fijos en pozos geotérmicos (en especial contra las de insertos de carburo de tungsteno). Es que carecen de partes móviles, por tanto la limitante de altas temperaturas en partes como los cojinetes, los sellos y el fluido lubricante característica de las tricónicas), para este caso es despreciable, sin embargo se ha comprobado con la experiencia que las barrenas de cortadores fijos no tienen un buen rendimiento en formaciones fracturadas.

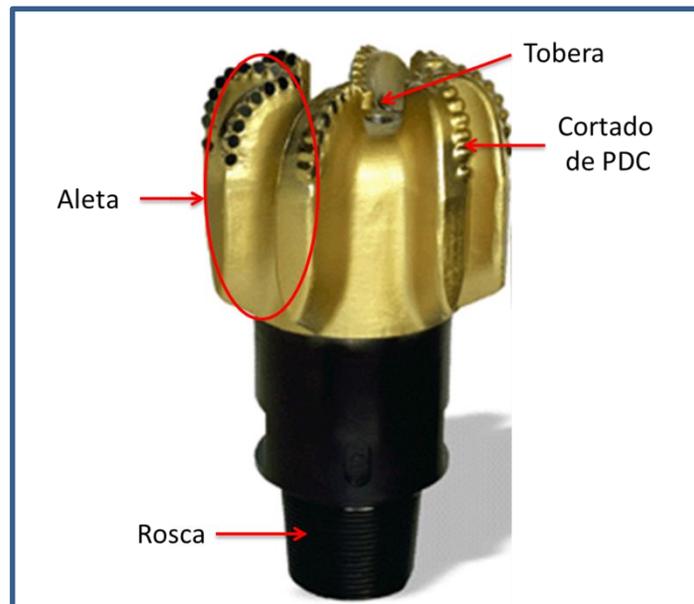


Figura 41. Barrena PDC. Fuente: G. Culver (2000) "Drilling and well construction"

4.2.1.3 Barrenas nucleadoras (*Core bits*)

Las barrenas nucleadoras adquieren gran importancia dentro de la industria geotérmica cuando se trata de pozos de diámetro reducido que normalmente son exploratorios. Estas barrenas funcionan como una barrena nucleadora convencional, con la única diferencia de que el porta núcleos ubicado en la sarta

puede ser removido sin detener la perforación mediante una línea de acero, sin embargo la velocidad de penetración de estas barrenas es menor a las tricónicas y de cortadores fijos convencionales. La mayor parte del volumen de roca extraído es en forma de núcleos, por tanto la cantidad de recortes es pequeña.

Estas barrenas son de cortadores fijos impregnadas de diamante. Su uso en pozos de diámetro reducido se limita a la perforación de la parte profunda del pozo, pues la primera parte se perfora normalmente con barrenas tricónicas.

En pozos de diámetro convencional estas barrenas sirven para obtener núcleos de la formación, los cuales servirán principalmente para realizar estudios sobre la densidad de las fracturas, espaciamiento y apertura de las mismas con el fin de obtener datos de la transmisibilidad de las formaciones.

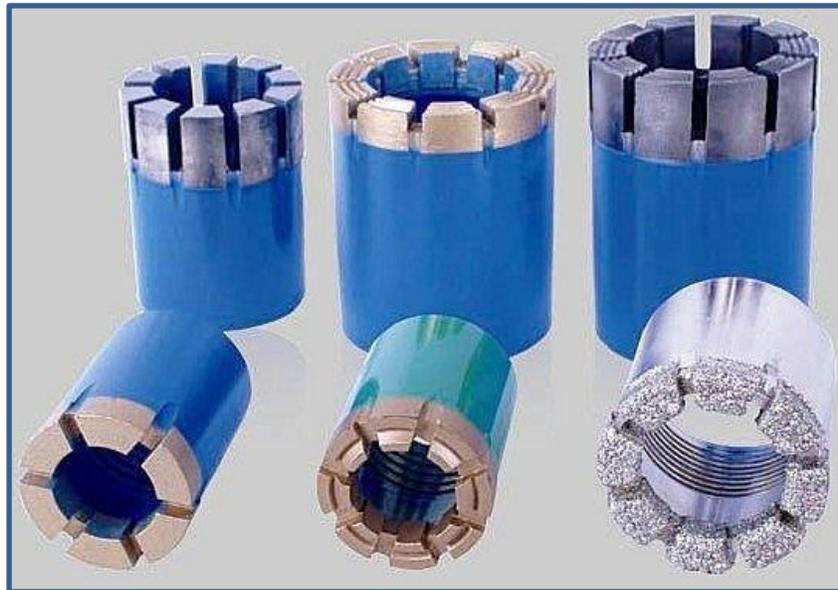


Figura 42. Barrenas nucleadoras. Fuente: Página oficial de “Huanyu bits”

4.2.1.4 Martillos para perforación por percusión (*Impax Hammer Bit System*)

Los martillos para perforación por percusión son herramientas que se colocan en la sarta de perforación, constan principalmente de una camisa-pistón recíprocante, la cual mediante un mecanismo de accionamiento proporciona una carga de impacto a la barrena. Las barrenas empleadas con esta herramienta son normalmente de cortadores fijos con insertos de carburo de tungsteno especiales.

La perforación por martilleo es un método en el cual se emplea la energía que el movimiento del martillo provee para incrementar el peso sobre la barrena mediante los impactos. Este método permite aumentar la velocidad de penetración en formaciones duras y fracturadas, sin embargo la mayoría de estas herramientas están diseñadas para operar con fluidos de perforación aireados

debido a las necesidades de un fluido limpio para accionar la herramienta.

Las formaciones asociadas a yacimientos geotérmicos típicamente duras y fracturadas son adecuadas para llevar a cabo operaciones de perforación mediante impacto, debido a que las rocas son muy poco plásticas.



Figura 43. Esquema de martillo para perforación por percusión.
Fuente: Catalogo Schlumberger.

4.2.2 Sarta de perforación (*Drill string*)

Su selección y diseño, requieren de análisis minuciosos para lograr resultados satisfactorios. En los cuales es muy importante tomar en cuenta la columna litológica que se habrá de perforar.

La selección correcta de la sarta de perforación es esencial para evitar muchos de los problemas durante la perforación. Una sarta de perforación se utiliza y diseña tomando en cuenta:

- Tipo de roca
- Peso requerido sobre la barrena
- Atrapamiento diferencial
- Presencia de H₂S
- Corrosión
- Requerimientos hidráulicos
- Desgaste de la tubería de perforación y revestimiento
- Altas temperaturas

Los objetivos más importantes de una sarta de perforación son:

- Transmitir el movimiento rotatorio a la barrena
- Proporcionar un ducto para circular el fluido de perforación
- Ejercer peso sobre la barrena
- Ser el medio para introducir y sacar la barrena

Los componentes de la sarta de perforación pueden variar de acuerdo a los requerimientos de configuración, sin embargo existen ciertos componentes que son empleados en la mayoría de las operaciones de perforación de pozos geotérmicos. Los cuales se describen a continuación.

4.2.2.1 Tubería de perforación (*Drill pipe*)

El conjunto de tuberías de perforación conforman la parte más larga de la sarta. Una tubería de perforación es un segmento cilíndrico hueco fabricado generalmente de acero con una geometría definida por el diámetro y espesor del cuerpo, el cual consta en ambos extremos de conexiones, en un extremo tiene una caja con cuerda y en el otro tiene un extremo cónico. En la industria geotérmica las tuberías de perforación más comunes son de 3 ½", 4 ½" y 5" de diámetro.

La correcta selección de la tubería de perforación en pozos geotérmicos puede ser complicada en ocasiones, por lo que las primeras consideraciones son citadas a continuación.

Esfuerzos a la que estará sometida: los principales son la tensión y la torsión, estos se presentan cuando se sube la sarta y cuando se aplica el torque a la misma.

Diámetros: los diámetros externos e internos de la tubería deben de estar diseñados tomando en cuenta el diámetro de las tuberías de revestimiento, las herramientas a emplear e incluso el gasto de fluido de perforación que circulará.

Resistencia a la corrosión: la mayoría de los fluidos geotérmicos son corrosivos, para ello existe un gran número de grados de tubería de perforación elaboradas con aleaciones diseñadas para ambientes corrosivos.

Presencia de H₂S: muchos sistemas geotérmicos requieren que la tubería de perforación esté adecuada para soportar los efectos del H₂S y cumpla con la normativa vigente.

Resistencia al desgaste: debido a que las formaciones asociadas a yacimientos geotérmicos son muy abrasivas, la tubería de perforación se

desgasta más que en formaciones sedimentarias. Es común en la perforación de pozos geotérmicos que las conexiones en su parte exterior lleven un recubrimiento, normalmente carburo de tungsteno, debido a que son las partes más vulnerables a lo largo de la tubería.

Debido al escaso valor del fluido geotérmico, los pozos geotérmicos producen grandes volúmenes de fluidos, por lo que tienden a tener diámetros mayores a los pozos petroleros, y a diferencia de estos últimos, los pozos geotérmicos producen en agujero descubierto o con tubería de revestimiento corta ranurada y sin tubería de producción.

4.2.2.2 Tubería de perforación con aislante térmico (*Insulated Drillpipe*)

Conforme el fluido de perforación fluye a través de la tubería de perforación y de la barrena en forma descendente, y asciende por medio del espacio anular, existe transferencia de calor hacia o desde la formación. Debido a que la tubería de acero funciona como un intercambiador de calor, la temperatura del fluido de perforación dentro de la tubería es cercana a la temperatura del fluido circulando por el espacio anular y esta a su vez cercana a la de la formación. Por tanto la sarta de perforación es humedecida por fluidos a altas y muy altas temperaturas, lo cual trae consecuencias severas como: la deformación de componentes elastómeros (sellos o estatores de motores de fondo), daño o destrucción de herramientas electrónicas para toma de registros, altas tasas de corrosión e incluso la degradación o alteración del fluido mismo.

Estos problemas pueden ser mitigados o resueltos mediante el aislamiento térmico de las paredes de la tubería de perforación, de manera que el fluido de perforación llega a superficie a una temperatura menor. En general el uso de tuberías con aislamiento térmicos en la perforación de pozos geotérmicos es común.

4.2.2.3 Portabarrenas (*Bit sub*)

Es el componente que va inmediatamente después de la barrena y puede alojar también una válvula de no retorno. Es una pieza tubular metálica con dos conexiones tipo caja y es empleada para conectar la barrena con el siguiente elemento de la sarta (normalmente los denominados lastrabarrenas). Su longitud varía normalmente entre 0.3 y 1 metro. La válvula de no retorno que aloja este elemento sirve para asegurar que el flujo no circule a la inversa dentro de la sarta, en la industria geotérmica esto adquiere interés debido a que los fluidos calientes causarían daño si regresaran hasta el piso de perforación.



Figura 44. Portabarrenas. Fuente: Catalogo Schlumberger.

4.2.2.4 Lastrabarrenas (*Drill Collar*)

Se colocan después del portabarrenas, son elementos de acero rígido con una longitud aproximada de 10 metros y un peso de entre 2.5 y 3.5 toneladas, los diámetros más comunes son de 6" a 10"; esto en la industria geotérmica. Su principal función es:

- Proporcionar peso sobre la barrena
- Transmitir la fuerza necesaria para trabajar a compresión
- Minimizar los problemas de estabilidad de la barrena, ocasionados por vibración y bamboleo.
- Proporcionar rigidez al aparejo de fondo

La forma típica de los lastrabarrenas es tubular helicoidal.



Figura 45. Lastrabarrenas.
Fuente: Catalogo Schlumberger.

4.2.2.5 Tubería pesada (*Heavy Weight*)

La tubería pesada es un elemento que duplica o triplica en peso unitario a la tubería de perforación, el cual ofrece una transición segura de torque entre la tubería de perforación y los lastrabarrenas, previniendo el desgaste por torque de la tubería de perforación.



Figura 46. Tubería pesada.
Fuente: Catalogo Schlumberger.

4.2.2.6 Estabilizadores (*Stabilizers*)

Debido a que los elementos de la sarta de perforación deben tener un diámetro menor que el diámetro del pozo para proveer de un camino al fluido de perforación en su retorno a la superficie, es muy probable que exista una deflexión lateral de la sarta. Esto puede provocar vibración, desgaste externo por abrasión en la tubería de perforación y fatiga en las conexiones entre tuberías.

Los estabilizadores son las herramientas que mitigan el problema, pues son una herramienta que a través de sus aletas permiten el flujo del fluido de perforación y estabilizan el movimiento de la sarta ya que tienen el mismo diámetro del pozo, estas herramientas son alojadas en diferentes puntos de la sarta de perforación, sin embargo debe existir un número óptimo de estabilizadores en una sarta para evitar los riesgos de atascamiento.



Figura 47. Estabilizadores.
Fuente: Catalogo Schlumberger.

4.2.2.7 Rimadores (*Reamers*)

Los rimadores o ampliadores de pared, tienen la función de desgastar las paredes del pozo (rimar) para garantizar que se tenga un diámetro de pozo igual o muy similar al de la barrena. Son empleados cuando se tiene la problemática de mantener el diámetro del pozo, lo cual ocurre con frecuencia en formaciones abrasivas (característica de las formaciones geotérmicas).

Estas herramientas son alojadas normalmente después de la barrena, creando la acción de rimado mediante unos conos giratorios que van sobre brazos extendibles, accionados por la presión del fluido de perforación cuando se está perforando.



Figura 48. Rimadores. Fuente: Catalogo Schlumberger.

4.2.2.8 Amortiguadores (*Shock sub*)

Cuando se perforan formaciones duras y fracturadas (ambientes geotérmicos) o incluso formaciones intercaladas, los efectos de alta vibración son comunes. Esta herramienta, como su nombre lo indica, funciona como amortiguador de esos efectos de vibración, atenuando los efectos que se transmiten hacia la parte superior de la sarta de perforación. Estas herramientas son de uso común cuando se emplean martillos de percusión.

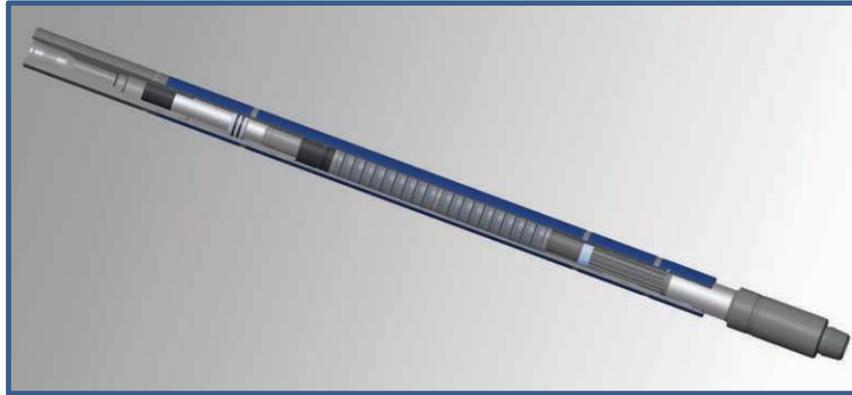


Figura 49. Amortiguadores. Fuente: Catalogo Schlumberger.

4.2.2.9 Martillos (*Jars*)

Cuando la sarta de perforación queda atrapada (atascada) en el pozo durante las operaciones de perforación, la herramienta que ayuda a su liberación es el martillo. Los martillos funcionan mediante la liberación de energía almacenada en la herramienta, tirando hacia arriba de la sarta y provocando su tensión. Existen dos tipos de martillos, los martillos hidráulicos y los mecánicos, ambos operan bajo el mismo principio. El asentamiento de esta herramienta en la sarta es crucial para garantizar la efectividad de la misma (no de ser alojada cerca del punto neutro).



Figura 50. Martillos. Fuente: Catalogo Schlumberger.

4.2.4 Fluidos de perforación para pozos geotérmicos

Los fluidos de perforación son aquellos fluidos que son circulados a través del pozo con el fin de remover los recortes producidos por las barrenas en el fondo del pozo. El fluido es bombeado a través la sarta de perforación hasta las toberas de la barrena, y regresa a la superficie por el espacio anular que se encuentra entre la sarta de perforación y la pared del pozo. Las principales funciones del fluido de perforación son:

- Limpiar el pozo de los recortes
- Enfriar y limpiar la barrena
- Lubricar la sarta de perforación
- Mantener la estabilidad del pozo
- Permitir la obtención de información geológica
- Controlar la presión de formación
- Proteger la formación perforada de daño
- Transmitir la potencia hidráulica

En la actualidad, existen cuatro principales tipos de fluidos de perforación utilizados en la industria geotérmica, los cuales son:

- Lodos base agua
- Salmueras
- Lodos aireados
- Espumas

Estos fluidos son similares a los fluidos de perforación utilizados en la industria petrolera, con la diferencia de no tienen que ser tratados con aditivos químicos en la misma medida.

Otra diferencia con la industria petrolera es la utilización de torres de enfriamiento para ser recirculados nuevamente, debido a que los fluidos de perforación geotérmicos regresan a la superficie a elevadas temperaturas.

4.2.4.1 Propiedades de los fluidos de perforación

Las propiedades de los fluidos de perforación determinan el comportamiento del fluido dentro y fuera del pozo. Las pruebas realizadas en campo son de gran importancia para realizar el reporte de lodos, el cual nos puede ayudar a identificar zonas de interés y mantener al lodo en óptimas condiciones.

Viscosidad: Es la oposición que pone un fluido a fluir o a ser deformado. Define la capacidad del lodo de lograr una buena limpieza tanto del pozo como de la barrena y de mantener en suspensión a los recortes. La viscosidad no debe de ser muy grande para que el lodo puede ser bombeado con facilidad, ni tampoco tan pequeña como para impedir la extracción de los recortes.

Para determinar la viscosidad en campo es necesario el denominado “embudo Marsh”, el cual nos indica el tiempo que tarda en salir (en segundos) por el orificio del embudo un determinado volumen de lodo (1 litro). Los rangos usuales para un fluido de perforación geotérmico van de 32 a 38 seg/l.

Densidad: Se define como la capacidad del lodo de ejercer una contrapresión en las paredes del pozo, controlando de este modo la presión de la formación perforada. Es definida como masa por unidad de volumen y es medida en gramos por centímetro cúbico (gr/cm^3). La densidad para los lodos de perforación geotérmicos generalmente debe tener valores de 1.03 a 1.15 gr/cm^3 .

Durante la perforación se pueden producir variaciones de la densidad del lodo, lo cual debe controlarse y corregirse. Por ejemplo un aporte de fluido geotérmico de una zona de interés puede disminuir la densidad del lodo, por otra parte la densidad puede incrementar por la incorporación de partículas finas procedentes de la formación que se esté perforando.

Tixotropía: Es la propiedad que tienen los fluidos de formar una estructura de gel, cuando el fluido se encuentra estático (al interrumpirse la circulación), y regresando al estado de fluido cuando se aplica un esfuerzo de corte, y de esta manera mantener los recortes en suspensión evitando que se depositen en el fondo del pozo y lo bloquen.

Filtrado: Es la propiedad del fluido de perforación a formar una capa impermeable (enjarre) en la pared del pozo, para evitar la filtración del fluido en zonas permeables. Dicho enjarre debe de ser resistente e impermeable; resistente para que no sea fácilmente erosionable e impermeable para evitar que el agua libre en el lodo invada las zonas permeables. Esta propiedad es mucho más importante en la industria petrolera que en la industria geotérmica.

Potencial de Hidrógeno (pH): Representa la cantidad del ion hidrógeno en el líquido e indica lo ácido o alcalino que es el fluido de perforación. Se expresa en valor numérico que va del 0 al 14. El pH del fluido de perforación puede afectar en su rendimiento y es importante para el control de la corrosión. Deberá tener valores de pH entre 9.5 a 11.5.

Contenido de sólidos: Es definido como cualquier material sólido mayor a 74 micras de tamaño contenido en el fluido. El contenido de arena debe de ser inferior a 2% para fluidos de perforación geotérmicos. Un alto contenido de sólidos

tiene por resultado el incremento de la densidad, por lo tanto una reducción de la velocidad de perforación, desgaste de las bombas y de la sarta de perforación.

Temperatura: La temperatura del fluido de perforación debe de ser monitoreada debido a que puede ayudar a entender que es lo que está pasando en el fondo del pozo y advertir de posibles problemas. Un cambio repentino de la temperatura del fluido de perforación podría indicar una zona permeable.

4.2.4.2 Principales Fluidos de perforación utilizados en la industria geotérmica

Lodos base agua: El agua utilizada para producir estos lodos pueden ser la producida por pozos vecinos, la cual es mezclada con bentonita (incrementa la viscosidad del fluido) y barita (incrementa la densidad del fluido sin afectar su viscosidad). Sin embargo, los lodos de alta densidad raramente son empleados en la industria geotérmica. Generalmente los pozos geotérmicos son perforados usando una simple mezcla de agua y bentonita, este tipo de lodos no requieren tratamientos químicos más allá de control de pH y algunos dispersantes.

Salmuera: La salmuera es generalmente el fluido de perforación geotérmico más económico. Se usa preferentemente en la última etapa de perforación, donde el pozo quedara en agujero descubierto. La salmuera como fluido de perforación es utilizada mientras se perforan zonas permeables de interés, con el fin de no dañar la formación.

Espumas: Es un fluido muy efectivo para perforar en formaciones secas, climas áridos o climas árticos. Para perforar a grandes profundidades se añade un agente espumante para ayudar a remover los recortes.

Lodos aireados: Consiste en la inyección de aire comprimido junto con el lodo de perforación, para reducir la densidad del fluido de tal manera de la columna hidrostática dentro del pozo es ligeramente menor a la presión de la formación del yacimiento geotérmico. La aplicación principal en pozos geotérmicos es la de perforar donde hay problemas significativos de pérdida de circulación. Los lodos de perforación aireados también se han utilizado donde la presión de los yacimientos geotérmicos es baja.

4.3 Asentamiento y diseño de tubería de revestimiento

Durante la etapa de diseño se consideran una gran variedad de factores que influirán en las decisiones sobre las herramientas y materiales a emplear durante el proceso. La litología, la presión y las altas temperaturas son unos de los principales factores a tomar en cuenta para comenzar a diseñar un pozo geotérmico.

El perforar un pozo tiene por objeto crear un ducto entubado que sirva como medio al fluido geotérmico para trasladarse del fondo del pozo hasta la superficie. Es por ello que deben considerarse materiales resistentes a las altas temperaturas para conseguir dicho ducto entubado. Las tuberías (tubería de revestimiento) que servirán para lograr este objetivo estarán sometidas a esfuerzos que las fatigan y desgastan, por tanto estos parámetros deberán ser tomados en cuenta durante el diseño y asentamiento de tuberías de revestimiento.

Para lograr que las dichas tuberías se mantengan en el pozo a pesar de las condiciones es necesario inyectar un material que las mantenga adheridas a las paredes del pozo. Dicho material es un cemento que igualmente deberá estar adecuado para soportar las condiciones de altas temperaturas durante la fase de bombeo, la fase de fraguado y la fase de permanencia en el pozo.

4.3.1 Geopresiones

Durante el proceso de perforación de pozos geotérmicos, es necesario conocer ciertos parámetros geológicos que servirán de referencia durante la etapa de diseño del pozo, de no conocerlos es importante determinarlos. Los principales parámetros son:

Presión de sobrecarga (P_{sc}). Se define como la carga o peso que ejerce la columna de roca (densidad del grano más los fluidos contenidos en el espacio poroso) que suprayace a determinada formación a una profundidad determinada.

$$P_{sc} = \frac{\rho_{grano} * h}{10} + \frac{\rho_{FF} * h}{10} \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

Dónde:

ρ_{grano} = Densidad de la roca (lb/gal)

h = profundidad de interés (ft)

ρ_{FF} = Densidad del fluido de formación (lb/gal)

Roca	Rango (gr/cm ³)	Promedio (gr/cm ³)
Riolita	2.35 – 2.70	2.52
Andesita	2.40 – 2.80	2.61
Granito	2.50 – 2.81	2.64
Porfídicas	2.60 – 2.89	2.74
Cuarzo diorita	2.62 – 2.96	2.79
Diorita	2.72 – 2.99	2.85
Lavas	2.80 – 3.00	2.90
Diabasa	2.50 – 3.20	2.91
Basalto	2.70 – 3.30	2.99
Gabro	2.70 – 3.50	3.03
Peridotita	2.78 – 3.37	3.15

Rocas félsicas	2.30 – 3.11	2.61
Rocas máficas	2.09 – 3.17	2.79

Tabla 6. Densidad de algunas rocas volcánicas, asociadas a yacimientos geotérmicos.

Presión hidrostática (P_h). Aquella presión producto del peso de una columna de fluido sobre una unidad de área.

$$P_h = \rho_f * h \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

Presión de poro (P_p). Es definida como la presión natural, originada por los procesos geológicos como la compactación a la que se encuentran sometidos los fluidos contenidos en los espacios porosos. Esta presión también es conocida como presión de formación.

- **Presión de poro normal:** se refiere a las causadas por la columna hidrostática que solo depende de la profundidad y densidad de los fluidos involucrados (agua).
- **Presión de poro anormal:** son las presiones que no cumplen con la definición de presión normal, pueden ser anormales negativas (menores a las esperadas o subpresiones) y anormales positivas (mayores a las esperadas o sobrepresiones).

Para determinar la presión de poro existen varios métodos, sin embargo solo se expondrá en método del exponente dc.

Se calcula el exponente d.

$$d = \frac{\log\left(\frac{R}{60N}\right)}{\log\left(\frac{12W}{17.5}\right)}$$

Dónde :

R= Ritmo de penetración ($\frac{ft}{hr}$)

N= Revoluciones por minuto en la rotaria (rpm)

W=Cambio de peso sobre la barrena (lb)

d_b =Diámetro de la barrena (pg)

Se calcula el exponente dc.

$$dc = \frac{d}{\rho_{lodo}}$$

Dónde:

ρ_{lodo} =densidad del lodo (lb/gal)

Por último la presión de poro la obtenemos de:

$$P_p = \left(\frac{9d}{dc}\right) - F_s$$

Dónde:

F_s = Factor de seguridad

Presión de fractura (P_{fr}). Definida como la presión aplicada necesaria para vencer la presión de formación y por tanto, la resistencia de la roca (fracturar). Para calcular la presión de fractura se utiliza el método de Eaton:

Calcular la relación de Poisson (ν).

$$\nu = 0.0645 \ln(h) - 0.0673$$

Dónde:

h = profundidad de interés (ft)

Y se determina la P_{fr} con la siguiente formula:

$$P_{fr} = P_p + \left(\frac{\nu}{1 - \nu}\right) [P_{sc} - P_p]$$

4.3.2 Asentamiento de tubería de revestimiento

La profundidad de asentamiento de las tuberías de revestimiento es determinada con base en distintos factores, incluyendo la geología (presión de fractura, zonas no consolidadas, zonas de aporte etc.), los fluidos de la formación, (presión de poro mayor o menor al fluido de perforación), control de pozo e incluso normas ambientales.

En general, el pozo es diseñado del fondo a la superficie (la profundidad será determinada por la zona productora), por lo que la zona de interés y el gasto esperado determinaran la geometría del pozo y el programa de tuberías de revestimiento, así como el equipo empleado durante las operaciones.

Las tuberías de revestimiento en un pozo geotérmico determinan el diámetro del pozo, por lo tanto son de mayor diámetro que un pozo de petróleo con tubería de producción. Los grandes diámetros de TR en pozos geotérmicos ayudan a reducir las caídas de presión cuando existe un flujo bifásico (agua y vapor) y el vapor es predominante.

Existen ciertos requerimientos para llevar a cabo el asentamiento de TR's en un pozo geotérmico, algunas de ellas son:

- *Proteger acuíferos:* las normas ambientales establecen que se deben sellar los acuíferos para prevenir su contaminación con el fluido de perforación.
- *Aislar zonas de riesgo:* normalmente zonas de pérdida de circulación fracturadas.

- *Mantener la integridad* del agujero
- *Proveer un medio* para ensamblar el Sistema de preventores o los Cabezales de producción.
- *Definir la zona productora*: en los yacimientos geotérmicos se tienen más de una zona de aporte, las TR's son asentadas para permitir el flujo de la zona establecida.

Una vez tomando en cuenta estos requerimientos, las TR's se clasifican en:

Tubería de revestimiento superficial o conductora: es la TR con mayor diámetro, es asentada en la parte más somera del pozo para prevenir pérdidas de circulación en zonas someras, se emplean como conexión primaria a preventores y cabezales. El asentamiento de la zapata de estas tuberías es estimado a partir de factores geológicos, sin embargo esto puede variar si se encuentran anomalías durante la perforación.

Tubería de revestimiento intermedia: pueden ser más de una sección con diferentes diámetros, empleadas para prevenir contaminación de acuíferos, aísla influjos de formaciones inferiores a formaciones superiores y son el medio de conexión a preventores y cabezales (normalmente la conexión final).

Tubería de revestimiento de producción: tubería de menor diámetro a sus predecesoras, provee un ducto seguro a los fluidos geotérmicos y protege a los fluidos de formación someros de los fluidos a altas temperaturas del yacimiento. Su asentamiento se determina con base en la profundidad y temperatura de la zona de interés.

Tubería corta ranurada: el objetivo principal de esta tubería es la de evitar el colapso del pozo en la zona de producción. Funge como el medio de entrada de los fluidos geotérmicos del yacimiento al pozo. Es de uso común durante la terminación de pozos geotérmicos al igual que las terminaciones en agujero descubierto.

La tubería ranurada es una sección de tubo que presenta perforaciones o ranuras uniformes a lo largo de su área, estas ranuras constituyen normalmente el 6% de dicha área, las cuales sirven a la tubería para comunicar la sección interna de la tubería con el exterior. Debido a que es difícil determinar exactamente cuáles son las secciones permeables dentro de la zona productora, es común que toda la tubería corta corrida sea ranurada.

Esta tubería no es cementada, usualmente es colgada sobre la última sección de la TR de producción, también puede ser asentada sobre el fondo del pozo con la parte superior de la tubería de 20 a 40 metros dentro de la zapata de la TR de producción, dejando esta sección superior libre para moverse por efectos de expansión y contracción.

4.3.2.1 Ventana operacional

La ventana operacional está constituida por un par de parámetros que sirven de referencia para realizar el diseño del programa de fluidos de perforación y asentamiento de TR's principalmente, pues a partir de estos es posible ir desarrollando en general el programa de perforación.

Entonces podemos definir a la ventana como el área establecida por las curvas de presión de poro y gradiente de fractura en función de la profundidad para un perfil de pozo.

La información relevante que puede proporcionar una ventana operacional para el diseño de fluidos y asentamiento de TR's principalmente es:

- Zonas de colapso
- Zonas estables
- Zonas de pérdidas de circulación (frecuentes en yacimientos geotérmicos)

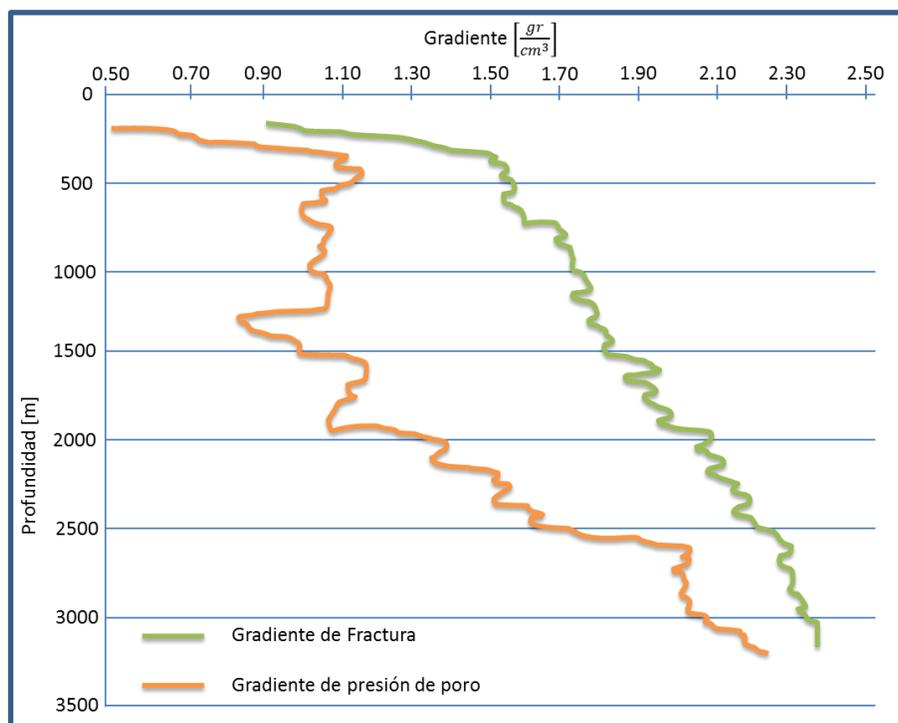


Figura 51. Esquema de una ventana operacional de un pozo geotérmico.

4.3.2.2 Selección de asentamiento de la tubería de revestimiento (TR)

Una vez obtenida la ventana operacional, se tiene que definir un arreglo de tuberías de revestimiento, el cual proporcione la profundidad de asentamiento de cada tramo de TR.

La profundidad de asentamiento de cada tramo de TR, se puede determinar gráficamente con ayuda de la ventana operacional. Como se explica a continuación.

1. Se traza la ventana operacional (curva de P_p , P_{fr}), con los factores de seguridad correspondiente.

Se procede a seleccionar la profundidad de asentamiento de las tuberías de revestimiento.

2. Trabajando de abajo hacia arriba, tomando como el punto A el punto de la curva de presión de poro a mayor profundidad.
3. Se traza la vertical hasta intersectar la curva de gradiente de fractura, este será el punto B, el cual determina el estimado de colocación de la tubería de revestimiento de producción.
4. Desde el punto B se traza la horizontal hasta intersectar la curva de presión de poro, este será el punto C, el cual nos determina el peso del fluido de perforación para esta profundidad.
5. Desde el punto C se traza la vertical hasta intersectar la curva de gradiente de fractura, este será el punto D. Y nos indica la profundidad de asentamiento de la tubería de revestimiento intermedia
6. Trazando la horizontal hasta intersectar la curva de presión de poro se obtiene el peso del fluido de perforación para esta profundidad.

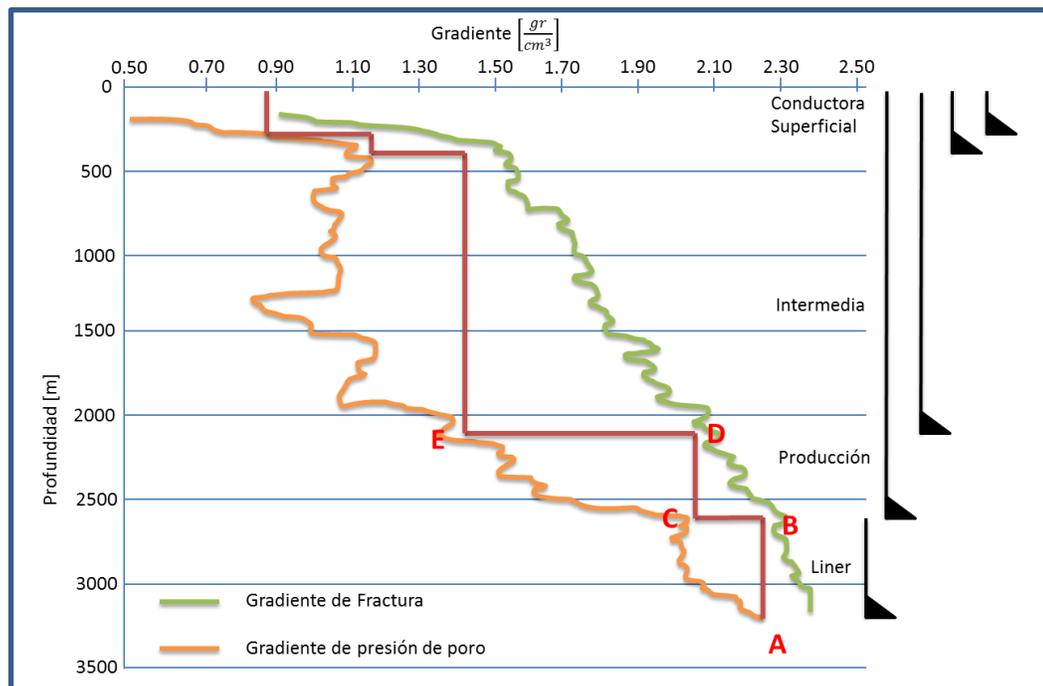


Figura 52. Método gráfico de asentamiento de tubería.

Una vez que se obtienen las profundidades de asentamiento de la tuberías de revestimiento se tiene que tomar en cuenta los problemas de pegadura por presión diferencial, para esto, se evalúa la máxima presión diferencial que se

puede presentar.

La presión diferencial (Δp) se obtiene:

$$\Delta p = \frac{(\rho_{fin} - \rho_{inicio})(h)}{10}$$

Dónde:

ρ_{fin} = Densidad del fluido de perforación a la profundidad final de la TR (g/cm^3).

ρ_{inicio} = Densidad del fluido de control a la profundidad de la etapa anterior (g/cm^3).

h = Profundidad TR (m).

4.3.3 Propiedades físicas de las tuberías de revestimiento

- **Grado:** es la designación que define la resistencia mínima o punto de cedencia del material y sus características especiales.
- **Diámetro:** diámetro exterior, diámetro interior y *drift*. El diámetro interior de la tubería está en función del diámetro exterior y del espesor, el *drift* en tuberías se refiere al diámetro mayor de una herramienta circular que puede ser introducido a la tubería sin problemas, siendo menor que el diámetro interno nominal de la tubería debido a la excentricidad.
- **Peso:** expresado en unidades de peso por unidad de longitud, normalmente libras por pie.
- **Conexiones:** juntas metálicas que sirven para conectar un tramo de tubería con otro, son las partes más vulnerables de las TR's.

4.3.4 Diseño de la tubería de revestimiento

El diseño de la TR tiene como objetivo el seleccionar la tubería que resista el contacto con los fluidos corrosivos y los esfuerzos a los que estará sometida durante la introducción, cementación terminación y vida productiva del pozo al menor precio.

Los esfuerzos a los que se somete la TR son: presión interna, colapso y tensión. Para empezar el diseño se debe considerar la presión interna en primer lugar, ya que nos dictará las condiciones iniciales, el siguiente criterio a considerar es el colapso. Una vez obtenidos los pesos, grados y longitudes de la tubería, se tendrá que evaluar la carga por tensión.

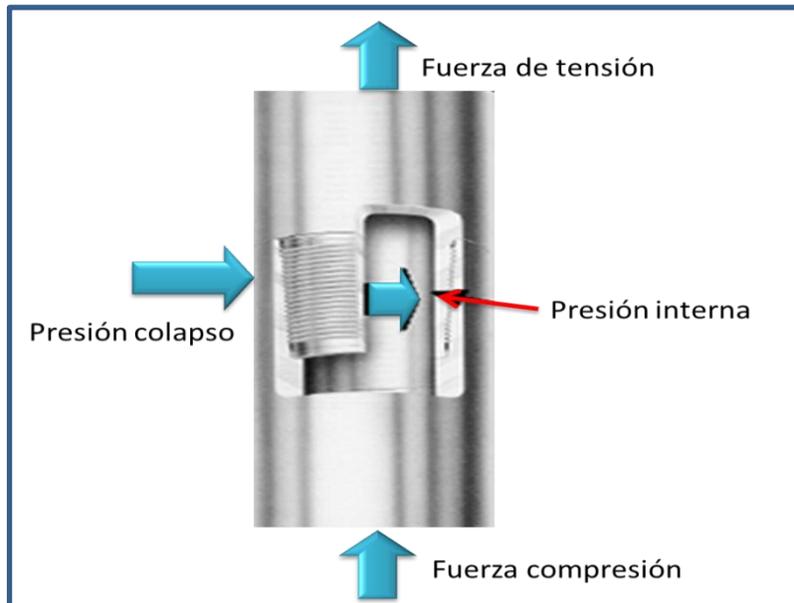


Imagen 53. Esfuerzos axiales que actúan en la tubería de revestimiento.

Para el diseño de la TR se debe considerar un factor de seguridad o diseño, debido a que durante la perforación terminación y vida productiva del pozo se pueden presentar cambios en las propiedades del acero debidas a la temperatura, corrosión y desgaste.

Diseño	Factor de seguridad	F. S. recomendado para pozos geotérmicos
Presión interna	1.00-1.125	1.125
Colapso	1.00-1.125	1.125
Tensión	1.60-1.80	1.80

Tabla 7. Factores de seguridad en pozos geotérmicos

En la etapa de diseño adquiere relevancia el concepto de cedencia, el cual se define como una propiedad del material de soportar la deformación ante la exposición de una carga. El acero es un material elástico hasta ciertos límites, pues este se deformara al aplicarse una carga y recuperara su forma original al retirarla. Sin embargo, si el límite elástico es excedido, la estructura del acero no regresará a su forma original. El punto a partir del cual el material se fractura, se dice que ha alcanzado el último valor de resistencia a la cedencia. La cedencia es medida en fuerza por unidad de área (psi).

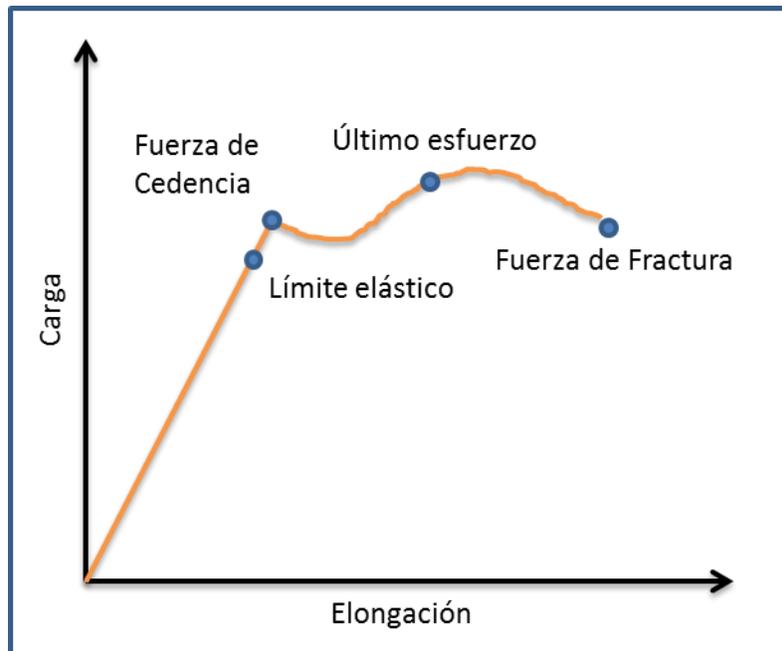


Figura 54. Comportamiento elástico de un tubo.

4.3.4.1 Diseño uniaxial.

Para el diseño axial se considera únicamente los efectos causados únicamente por la presión interna, presión de colapso y la tensión.

Diseño a presión interna (P_i). Cuando la tubería está expuesta a una presión interna mayor que la presión externa se dice que la tubería está expuesta a una presión de ruptura o estallamiento. La resistencia de una tubería a la presión interna está dada por el API.

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2Y_p t}{D} \right)$$

Dónde:

P_i = Presión Interna mínima de cedencia (psi).

Y_p = Mínimo esfuerzo de cedencia (psi).

t = Espesor nominal (pg) = $(D-d)/2$

D = Diámetro externo (pg).

d = Diámetro Interno (pg).

El caso más crítico del diseño a P_i es durante el control del pozo, durante un brote y durante la inyección de fluidos.

Las máximas presiones que se pueden tener en el fondo y superficie, dependerán del gradiente de fractura de la formación que estará debajo de la zapata guía, por lo tanto, la tubería seleccionada deberá tener la resistencia a la presión interna igual o mayor al gradiente de fractura más un factor de seguridad, a esto se

conoce como *presión de inyección*. A continuación se muestran los pasos a seguir para diseñar la tubería por presión interna.

1. Se calcula la *presión de inyección*:

$$P_{iny} = \frac{(Gfr + F_s)(h_{zapata})(14.22)}{10}$$

Dónde:

P_{iny} = Presión de inyección (psi).

h_{zapata} = Profundidad de la zapata (m).

Gfr = Gradiente de Fractura (gr/cm^3)

F_s = Factor de seguridad.

2. Se calcula la presión en la superficie:

$$P_s = P_{iny} - \frac{(\rho_f)(h_{zapata})(14.22)}{10}$$

Dónde:

P_s = Presión en superficie (psi)

ρ_f = Densidad del fluido en el pozo (lb/gal)

3. Se calcula la presión de respaldo:

$$P_{respaldo} = \frac{(\rho_{agua\ de\ formacion})(h)(14.22)}{10}$$

Dónde:

$P_{respaldo}$ = Presión en la parte externa del pozo (psi)

$\rho_{agua\ de\ formacion}$ = Densidad del agua de la formación (lb/gal)

4. Presión resultante

$$P_{resultante} = P_{iny} - P_{respaldo}$$

5. Presión de diseño

$$P_{diseño} = P_{resultante}(1.125)$$

Graficar

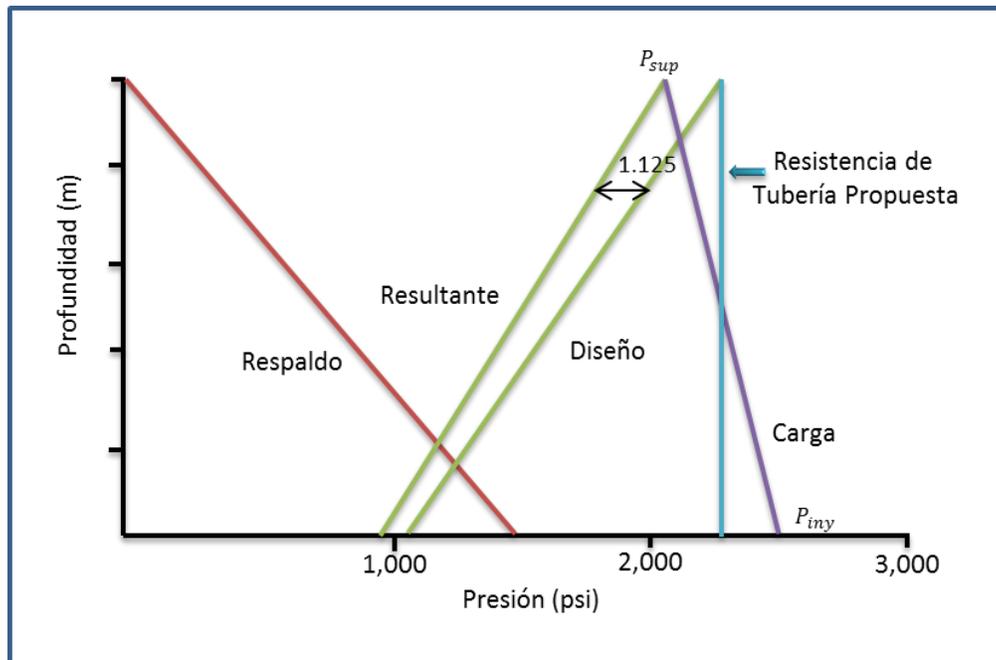


Figura 55. Grafica de diseño por presión interna

La resistencia a la presión interna de la tubería debe de ser igual o mayor a la presión resultante.

Diseño a la Presión de colapso (P_c). El colapso está definido como la fuerza externa aplicada a la tubería y es generada por la columna hidrostática de fluidos que se encuentran fuera de la tubería. Cuando una tubería está expuesta a una presión externa mucho mayor que la presión interna, se dice que está expuesta a una presión de colapso. El colapso es una de las causas más comunes de falla de las tuberías colocadas en un pozo.

$$P_c = 2Y_p \left[\frac{\left(\frac{D}{t} - 1\right)}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \right]$$

Dónde:

P_c = Presión al colapso (psi).

t = Espesor del tubo (pg) = $(D-d)/2$

La falla al colapso depende de diversos factores, entre los que resaltan: La cedencia del material, la geometría de la tubería, imperfecciones, y condiciones de esfuerzo en la tubería. Para efectos de diseño se considera el caso más crítico (TR vacía en su interior). A continuación se muestra el método para diseñar la tubería de revestimiento por colapso.

1. Calcular la carga máxima de colapso.

$$P_c = \frac{(\rho_{Fluido})(h)(14.22)}{10}$$

Dónde:

P_c =Presión de colapso (psi).

ρ_{Fluido} = Densidad del fluido en la parte externa de la tubería (lb/gal).

2. Calcular la presión de colapso de diseño.

$$P_{c \text{ diseño}} = P_c (1.125)$$

3. Graficar.

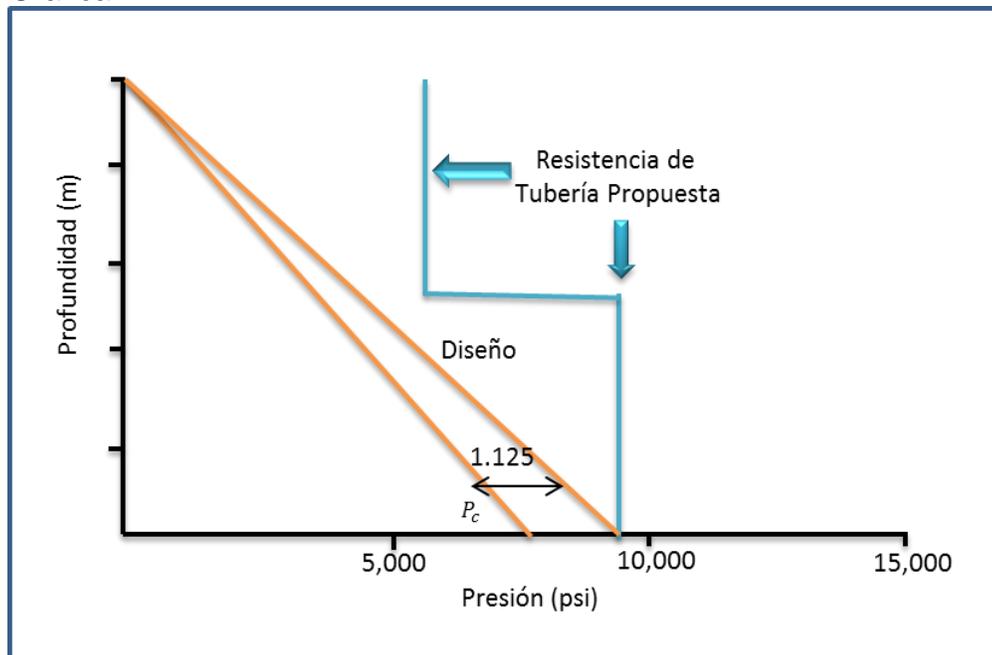


Figura 56. Grafica diseño por colapso.

De ser necesario se tendrá que reajustar las tuberías seleccionadas.

Diseño a la tensión (T). La carga a la tensión en una tubería es generada por su propio peso o cuando se aplica una fuerza externa (jalón). La carga por tensión se obtiene una vez conociendo los pesos, grados y longitudes de las secciones que se obtuvieron en los diseños por presión interna y por colapso. Por lo tanto, el diseño por tensión se lleva a cabo desde el fondo hasta la superficie, y los puntos de interés son los cambios de peso entre secciones de tubería.

$$R_T = 0.7854Y_p (D^2 - d^2)$$

Dónde:

R_T = Resistencia a la tensión del tubo (lb).

A continuación se muestran los pasos a seguir para diseñar la tubería a la tensión, considerando solo una sección de tubería.

1. Calcular el peso de la TR en el aire

$$W_{aire} = 1.4913(L)(P_u)$$

Dónde:

W_{aire} = Peso al aire de la tubería (Kg).

L = Longitud de la sección de tubería (m).

P_u = Peso unitario de la tubería (lb/pie)

2. Calcular las fuerza de flotación

$$F = 6.45 (L)(G_f)(A_s)$$

Dónde:

F = Fuerza de flotación (kg).

G_f = Gradiente de Fluido empleado (Kg/cm²/m).

A_s = Área de la sección transversal de la tubería (pg²)

3. Calcula la carga a la tensión

$$T = W_{aire} - F$$

4. Calcular la línea de diseño.

$$T_{diseño} = 1.8 (T)$$

5. Graficar

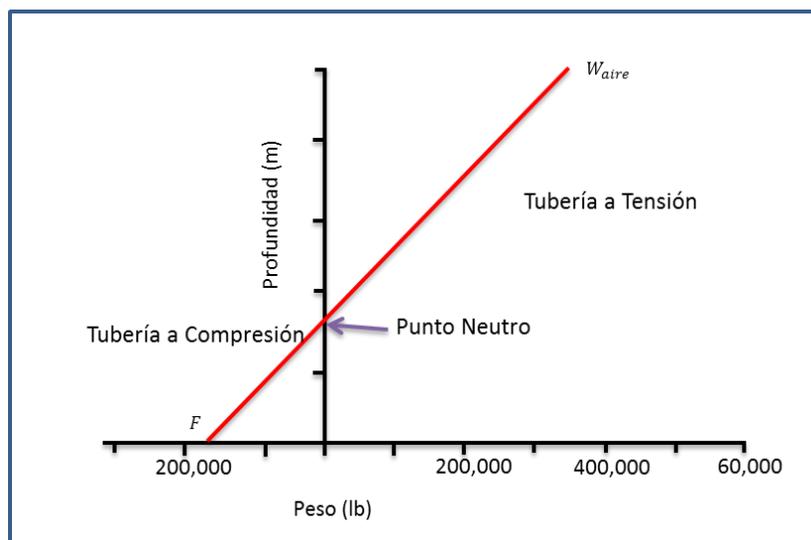


Figura 57. Grafica de diseño por tensión.

4.3.4.2 Diseño biaxial

Al estar sometido una tubería a tensión o compresión implica que tengan cambios en sus dimensiones, que a su vez, modifican los valores de resistencia al colapso y presión interna.

	Colapso	P. Interna
Tensión	Reduce	Aumenta
Compresión	Aumenta	Reduce

Tabla 8. Esfuerzos biaxiales en tuberías

Estos esfuerzos son conocidos como esfuerzos biaxiales. El efecto biaxial considera el cambio en la resistencia al colapso y presión interna. Estas modificaciones pueden obtenerse usando la elipse de Holmquist y Nadia.

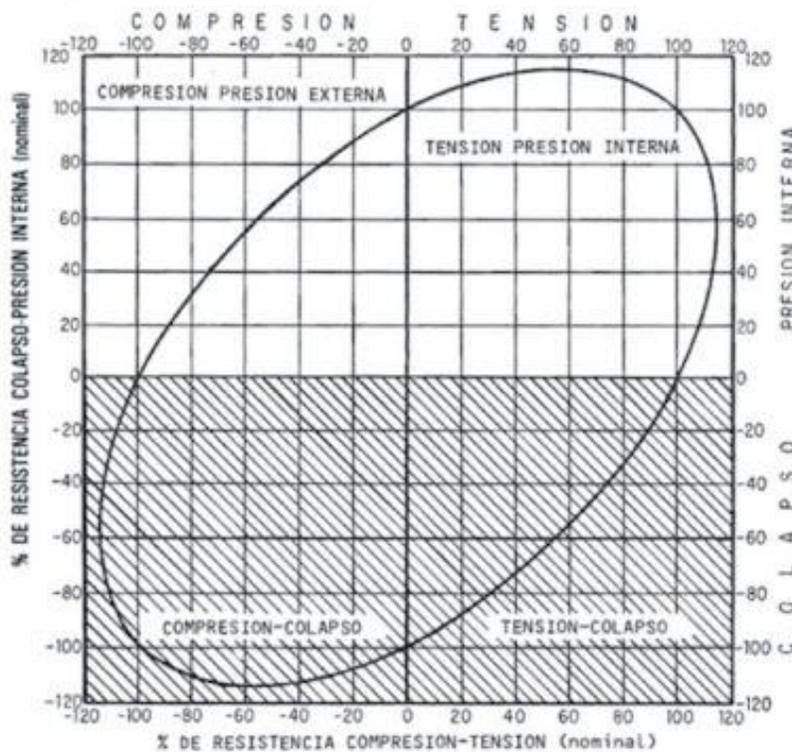


Imagen 58. Elipse de esfuerzos biaxiales.

4.3.4.3 Efectos de la temperatura en la tubería de revestimiento.

La cedencia de los materiales se ve afectada considerablemente por la temperatura a la que estén expuestos. Las pruebas de tensión que se realizan a las tuberías se realizan a temperatura ambiente, y con forme aumenta la temperatura la cedencia de los materiales se ve disminuida.

Entonces, los efectos de la temperatura deben de ser tomados en cuenta para el diseño de la tubería de revestimientos en pozos geotérmicos. Por lo que se deben de ajustar los valores nominales de las tuberías para la resistencia a la tensión, presión interna y colapso.

Para diseñar, se debe tener en cuenta los cambios del esfuerzo a la cedencia por efecto de temperatura, lo cual puede ser con el uso de nuevas ecuaciones o bien usando un factor de seguridad en función del grado del acero y de la temperatura.

Temperatura (°C)	N-80	TRC-95	P-110	TAC-110	TAC-140
300	1.11	1.08	1.08	1.1	1.17
400	1.16	1.14	1.19	1.19	1.19

Tabla 9. Factores de corrección en industria geotérmica debido a las altas temperaturas en las tuberías de mayor uso.

4.3.5 Cementación

La cementación es el proceso mediante el cual se mezcla y se bombea la lechada de cemento hacia el fondo del pozo a través de la tubería de revestimiento (TR), con el objetivo de llenar el espacio anular producido entre TR y la pared del pozo, sirviendo como material adherente de las tuberías con la pared. Las TR de los pozos geotérmicos son cementadas hasta la superficie, a diferencia de los pozos de hidrocarburos.

La cementación de las TR es una de las operaciones críticas durante la perforación de un pozo geotérmico debido a que una mala operación puede afectar la vida productiva del pozo. Las TR's son cementadas por las siguientes razones:

- Formar un sello hidráulico entre la TR y la formación.
- Reduce el proceso de corrosión exterior de la TR.
- Proteger las zonas productoras de fluido geotérmico a alta temperatura de ser enfriado por fluidos a baja temperatura de formaciones a poca profundidad.
- Aislar las formaciones de poco interés, para permitir la perforación más profunda.

En general existen 5 pasos en el diseño de una cementación exitosa:

- Analizar las condiciones del pozo.
- Determinar la composición de la lechada.
- Determinar el volumen de lechada que será bombeada.

- Monitorear el desplazamiento del cemento en tiempo real.
- Evaluación de la cementación.

Equipo utilizado durante la cementación de pozos geotérmicos.

- **Zapata guía:** sirve únicamente como una guía para la introducción de la TR.
- **Cople flotador:** se instala generalmente dos o tres tramos arriba de la zapata guía, sirve para alojar al tapón limpiador o desplazador.
- **Centradores:** se utilizan para centrar la TR, se colocan en el exterior de la TR con el objetivo de garantizar que la TR no se pegue a la pared del pozo y mejorar la cementación.
- **Tapón limpiador:** es un tapón de hule que se introduce antes de iniciar el bombeo de la lechada, también se conoce como tapón de diafragma por que se rompe fácilmente con una mínima presión diferencial.
- **Tapón desplazador:** después de bombear la lechada se suelta este tapón, con el objetivo de separar el cemento del fluido de desplazamiento. Este tapón es de hule pero el centro es sólido.
- **Cabezal de cementación:** es el contenedor de los tapones de desplazamiento. También comprende las conexiones superficiales y la parte superior de la TR.

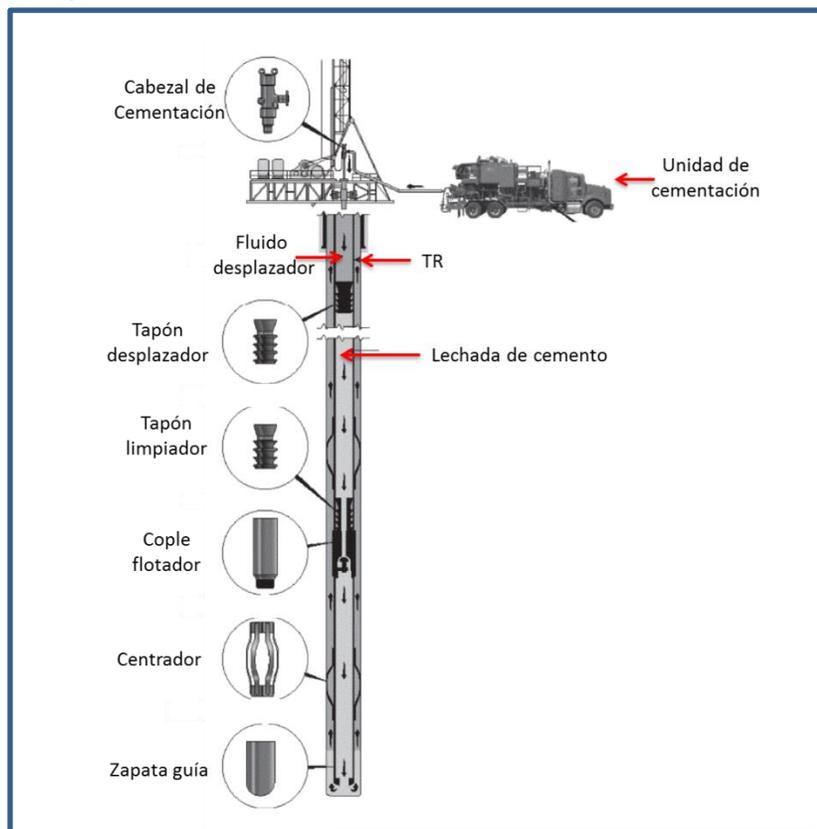


Figura 59. Equipo utilizado durante la cementación de pozos geotérmicos.

Debido a que el lodo de perforación forma un enjarre en la formación y una película en la TR, se utilizan los baches lavador y espaciador con el fin de que el cemento no entre en contacto con ninguno de los dos, y así evitar la contaminación del cemento.

- **Bache lavador:** normalmente se utiliza agua, su función principal es remover el enjarre de la formación y la película de lodo de perforación de la TR (es el primero en bombearse y está en contacto con el lodo).
- **Bache espaciador:** es un fluido viscoso, cuya densidad debe de estar entre la densidad del lodo y la del cemento. Se bombea detrás del bache lavador y es el que está en contacto con el cemento.

4.3.5.1 Proceso de Cementación Primaria (Método convencional)

La cementación primaria es el más importante de todos los procesos de cementación. Es realizada inmediatamente después de que la TR es corrida dentro del pozo. Para realizar este trabajo existen varios métodos, pero el más usado en la cementación de pozos geotérmicos es el denominado como convencional.

El método convencional puede ser simple etapa o de etapas múltiples. A continuación se describe el método de simple etapa.

1. La tubería es bajada con todos el equipo necesario para la cementación, hasta que la zapata guía se encuentra a pocos metros del fondo
2. El cabezal de cementación se conecta en la parte superior de la tubería. Es muy importante que los taponés de desplazamiento (limpiador y de desplazamiento) se coloquen correctamente en el cabezal de cementación.
3. Antes de empezar el proceso de cementación, se realizan las pruebas de presión.
4. Se bombea el bache limpiador.
5. Se coloca en la parte inferior el tapón limpiador, se libera y se bombea para limpiar el interior de la tubería, seguido por un bache espaciador. El bache espaciador está destinado a proporcionar una barrera para que la lechada de cemento no se mezcle con el fluido de perforación. Cuando el tapón limpiador alcance el cople flotador, su diafragma de goma se rompe, permitiendo que el bache espaciador y la lechada fluyan a través del tapón, alrededor de la zapata y suba por el espacio anular.
6. Al tiempo en que se termina de bombear la lechada se suelta el tapón desplazador y el fluido de desplazamiento se bombea. Cuando el tapón desplazador llegue al cople flotador y se coloque por encima del tapón limpiador, el proceso de bombeo se detiene.

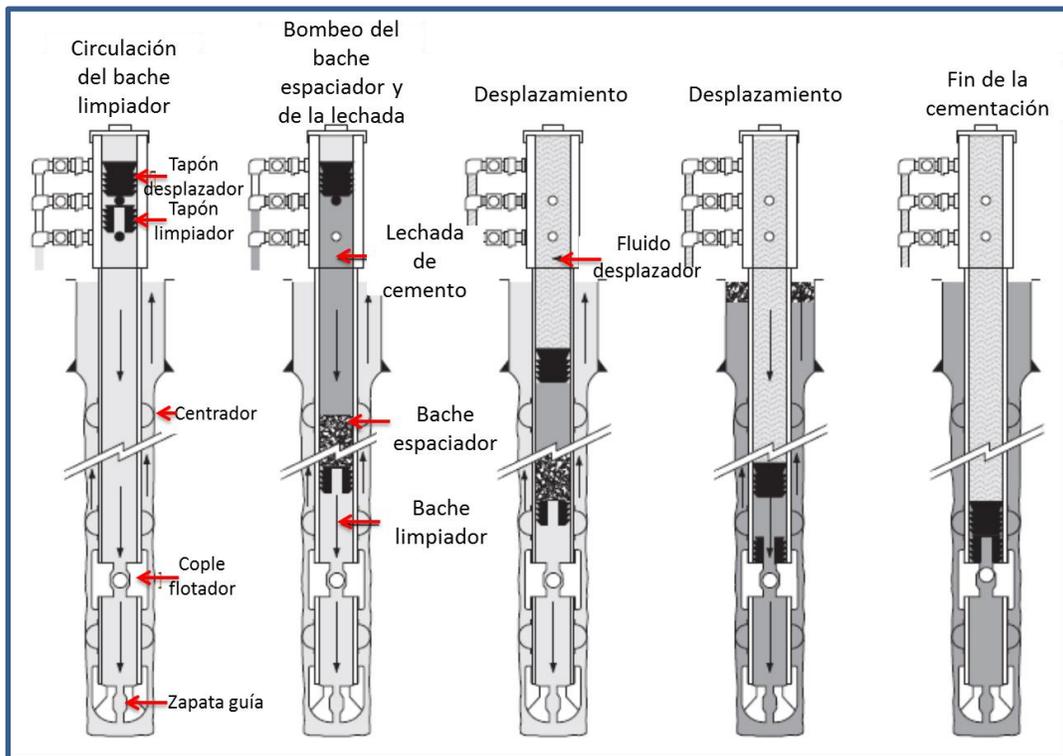


Figura 60. Proceso convencional de cementación primaria en pozos geotérmicos.

La velocidad de bombeo debe de disminuir cuando el tapón de desplazamiento se acerque al cople flotador, por lo tanto su desplazamiento debe de ser vigilado de cerca. El volumen de fluido de desplazamiento debe de ser calculado antes de comenzar los trabajos de cementación.

Durante el fraguado del cemento las válvulas del cabezal de cementación no deben de cerrarse, debido a que la temperatura del fluido de desplazamiento que queda en la TR aumentará, y por lo tanto, causará un aumento de presión dentro de la TR.

4.3.5.2 Tipos de cementos utilizados en la industria geotérmica.

El cemento Portland, fabricado según las especificaciones de la American Petroleum Institute (API), en general los cementos Clase A o Clase G, son los empleados comúnmente en la cementación de pozos geotérmicos. El cemento Portland es básicamente un material de silicato de calcio, y los componentes más abundantes son silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S) y aluminato tricálcico (C_3A).

Clase	Profundidad (m)	Temperatura (°C)	Observaciones
A	1830	77	Donde no se requieren propiedades específicas
B	1830	77	Moderada resistencia a los sulfuros
C	1830	77	Donde se requiera alta resistencia a la compresión y alta resistencia a los sulfuros
D	1830 a 3050	110	Para moderada y alta resistencia a los sulfuros
E	1830 a 4270	143	Para moderada y alta resistencia a los sulfuros
F	3050 a 4880	160	Para moderada y alta resistencia a los sulfuros y alta presión
G	3050 a 4880	350	Son los más usados en la industria geotérmica, por su resistencia a la alta temperatura
H	3050 a 4880	250	Son los más usados en la industria petrolera
J	3060 a 4880	177	En etapa de experimentación

Tabla 10. Clasificación de cementos, según la API.

El diseño y las especificaciones de las lechadas del cemento deben de realizarse en base a las condiciones de cada pozo. Adoptar una fórmula de lechada normalizada es una receta no recomendada, ya que siempre habrá un pozo que no se ajuste a las especificaciones estándar. Las condiciones de temperatura del pozo son de suma importancia debido a que afectan las características de los cementos.

Por lo general, los cementos utilizados en la industria geotérmica se mezclan con 35 a 40% de sílice en polvo para la resistencia al calor. Esto asegura la longevidad del cemento, evita el aumento de porosidad y por lo tanto mayor permeabilidad, lo que provoca que sea más sensible a los fluidos geotérmicos corrosivos.

Para conseguir las propiedades deseadas para un diseño específico de la lechada de cemento, se logran mediante la adición de diversos productos químicos y materiales que alteran las propiedades del cemento Portland. Los aditivos son clasificados de la siguiente manera:

- **Aceleradores:** reducen el tiempo de fraguado de la lechada y aceleran el desarrollo de la resistencia a la compresión.
- **Retardadores:** utilizados para prolongar el tiempo de fraguado de la lechada, esto para aumentar el tiempo de bombeo.
- **Controladores de filtrado:** son utilizados para reducir la pérdida de agua de la lechada durante y después de la cementación.
- **Densificantes:** aumenta la densidad de la lechada, para un óptimo control de la presión de la formación.
- **Reductores de densidad:** necesarios para reducir la presión hidrostática.
- **Dispersantes:** permiten bajar la viscosidad de la lechada y reduce las pérdidas de presión por fricción.

- **Extendedores:** mejoran la adherencia del cemento con la TR y la formación.
- **Controladores de pérdida de circulación:** previenen la pérdida de circulación antes y después de la cementación.
- **Antiespumantes:** utilizados para liberar el aire entrampado en la lechada de cemento durante su mezclado.

4.6 Perforación direccional de pozos geotérmicos

Un pozo direccional es aquel que se perfora a lo largo de una trayectoria planificada, con el objeto de perforar el yacimiento en una posición predeterminada, ubicada a determinada distancia lateral de la localización superficial del equipo de perforación. Para lograr este objetivo es necesario tener control del ángulo y la dirección del pozo, las cuales son referidas al plano vertical (inclinación) y al horizontal (dirección) respectivamente.

El principio general de la perforación de un pozo direccional es el dirigir la barrena en la dirección deseada. Esto se logra mediante el uso de herramientas y equipo especial.

4.6.1 Tipos de trayectorias

Incrementar – Mantener (Tipo Slant): esta trayectoria consta de una sección vertical, seguida de una sección curva donde el ángulo de inclinación se incrementa hasta alcanzar el valor deseado, el cual es mantenido (sección tangente o sección de mantener) hasta alcanzar el objetivo.

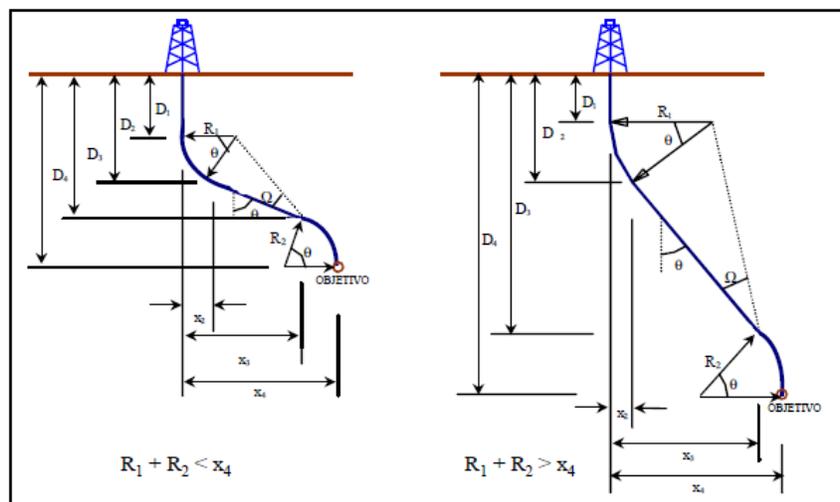


Figura 61. Trayectoria Tipo Slant. Fuente: Guía práctica para el diseño de la perforación direccional, PEMEX.

Incrementar – Mantener – Disminuir (Tipo S): este tipo de trayectoria está formada

por una sección vertical, seguida por un ángulo de inclinación que se incrementa hasta alcanzar el valor deseado, luego se tiene una sección recta (sección de mantener) y por último se tiene una sección en la que se disminuye el ángulo para entrar verticalmente al objetivo.

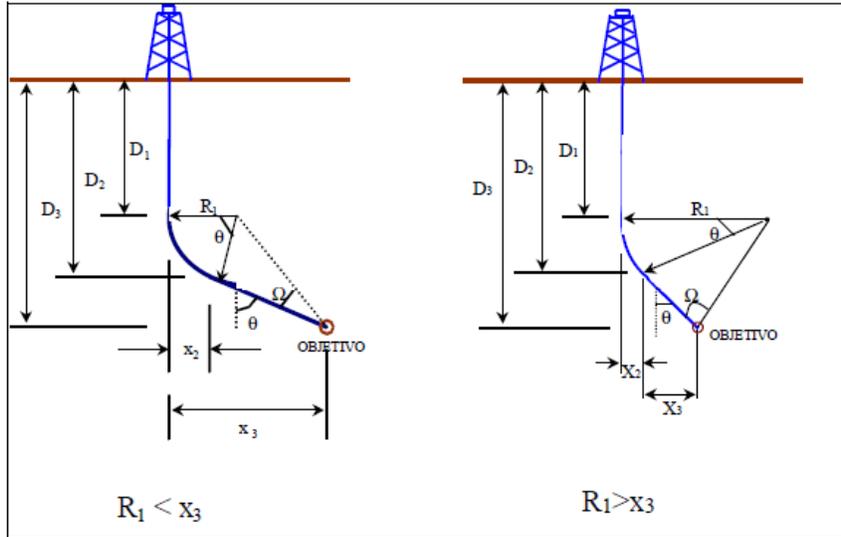


Figura 62. Trayectoria Tipo S. Fuente: Guía práctica para el diseño de la perforación direccional, PEMEX.

Incrementar – Mantener - Disminuir y/o Mantener (Tipo S modificada): está conformada por una sección vertical, un ángulo de inclinación que se incrementa hasta alcanzar el valor deseado, a continuación se tiene una sección recta (sección de mantener), seguida de una sección en la que se disminuye el ángulo parcialmente (menor al ángulo de incremento) y por último se tiene una sección de mantener con la que se logra entrar de forma inclinada al objetivo.

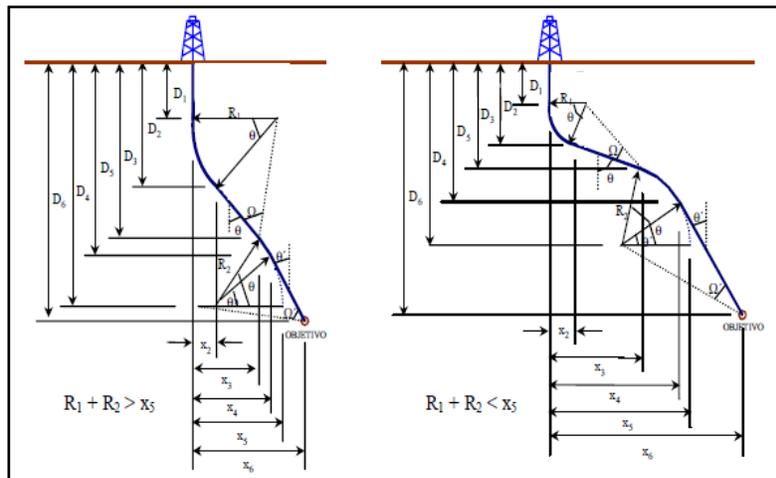


Figura 63. Trayectoria Tipo S modificada. Fuente: Guía práctica para el diseño de la perforación direccional, PEMEX.

Incremento continuo: esta trayectoria consiste de una sección vertical, continúa con ángulo de inclinación el cual se incrementa hasta alcanzar el objetivo.

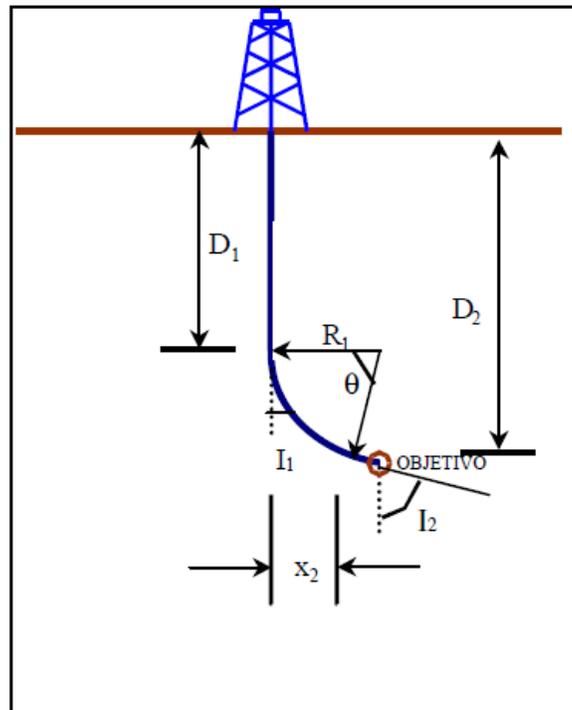


Figura 64. Trayectoria de incremento continuo. Fuente: Guía práctica para el diseño de la perforación direccional, PEMEX.

La selección del tipo de trayectoria dependerá principalmente de los siguientes factores:

- Características de la estructura geológica
- Espaciamiento entre pozos
- Profundidad vertical
- Desplazamiento horizontal del objetivo

4.6.2 Principales herramientas especiales para desviar trayectoria

Para lograr la perforación de un pozo direccional, se necesitan herramientas que permitan realizar el cambio de dirección del pozo, desde un punto vertical a la dirección deseada. El objetivo es orientar a la barrena hacia el punto de inicio (KOP). Las principales herramientas que facilitan esta operación son:

- Motor de fondo (Downhole Motor): los hay de desplazamiento positivo y accionados por el fluido de perforación.
- Sustituto de acople curvo (Bent Sub): la desviación del pozo cuando se

emplea un motor de fondo accionado por el fluido de perforación se logra con el uso de esta herramienta, la cual crea una fuerza lateral que transmitirá la barrena.

4.6.3 Perforación de pozos direccionales en la industria geotérmica

La energía geotérmica es explotada en ciertas áreas del mundo, donde existen gradientes geotérmicos anormales (mayores a los normales) en cierto tipo de rocas, normalmente asociadas a intrusiones volcánicas. El calor se extrae a través de la perforación de pozos. La roca que contiene al fluido geotérmico es en ocasiones impermeable, excepto por algunas fracturas verticales cercanas entre sí. Para explotar este tipo de recurso, se requiere de un tipo especial de perforación de pozos, el cual deberá de intersectar estas fracturas en mayor medida posible, ya que los pozos verticales no lo hacen. Es por ello que en la industria geotérmica al igual que en la industria petrolera se recurre a la perforación de pozos direccionales y así garantizar el éxito de las operaciones.

Dentro de la industria geotérmica, a pesar de que la perforación direccional incrementa los costos de operación (en promedio 22 – 41%), tiene ciertos beneficios, algunos de ellos son mencionados a continuación:

- Intersección de objetivos verticales en mayor medida
- Pozos desviados y multilaterales: cuando existen problemas de pescados en los pozos y se necesita redireccionar el pozo hacia un nuevo objetivo, o simplemente se perforan varios pozos.
- Perforación hacia ubicaciones inaccesibles: cuando existen obstrucciones naturales, tales como comunidades, lagos o montañas.
- Consideraciones ambientales: mediante la perforación de pozos multilaterales desde un mismo sitio superficial se pueden evitar daños ecológicos durante el acondicionamiento en superficie.

4.7 Problemas durante la perforación de pozos geotérmicos

4.7.1 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.

4.7.2 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.

4.7.3 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.

4.7.4 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/cm^3). 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 los que es común que las primeras dos conexiones superficiales de las TR's no lleven centralizadores.

4.7.5 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 5. PROCESO DE TERMINACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS

La perforación de pozos geotérmicos generalmente se realiza con el objetivo de extraer los fluidos a altas temperaturas del subsuelo a la superficie, sin embargo es normal que para la explotación de un campo también se perforen pozos que realicen el proceso inverso (inyección), a manera de mantener el volumen de fluido en el yacimiento. Por ello, el tipo de terminación dependerá del objetivo del pozo (tipos de pozos) y las condiciones geológicas de la formación.

La terminación de un pozo geotérmico es el proceso operativo que se realiza después de haber cementado la última tubería de revestimiento (TR de producción) con el objeto de crear óptimas condiciones tanto para dejar produciendo el pozo (pozos productores) como para permitir la inyección de fluidos (pozos inyectoros).

El proceso de terminación de un pozo geotérmico dependerá en primera instancia del tipo de pozo, principalmente si es exploratorio, productor o inyector (muy poca variación), dado que en la industria geotérmica es necesario perforar pozos de inyección donde se pretenda explotar un campo geotérmico, por lo que son muy comunes.

Durante la etapa de exploración de campos geotérmicos, es común que se perforen los denominados pozos de diámetro reducido (slim wells), sin embargo para su terminación no difieren de los pozos convencionales más que en el diámetro.

5.1 Tipos de pozos geotérmicos

5.1.1 Pozos exploratorios

Estos pozos son los primeros en ser perforados durante un proyecto geotérmico. Su objetivo principal es verificar la presencia de fluidos geotérmicos con potencial para lograr la generación de electricidad. Dado que estos pozos se realizan con escasa información geológica, otro de los objetivos de estos pozos es la recopilación de información. En la industria geotérmica estos pozos se pueden clasificar como:

- **Pozos de diámetro convencional:** pozos con diámetro de tubería de explotación ranurada o agujero descubierto mayor a 6", perforados con unidades de perforación convencional.
- **Pozos de diámetro reducido (slim well):** pozos normalmente terminados con tubería ranurada de diámetro menor a 6" y pueden emplear unidades de perforación convencional o unidades nucleadoras.

5.1.2 Pozos de desarrollo

Este tipo de pozos son perforados para desarrollar el campo geotérmico, con el objetivo de producir la mayor cantidad de fluido geotérmico posible de manera sustentable. Se clasifican en dos tipos:

- **Pozos de producción:** El objetivo principal de estos pozos es el de permitir el ascenso de los fluidos geotérmicos (producción) del yacimiento a las instalaciones superficiales, en ellos se pueden realizar mediciones que sirvan para optimizar la producción (registros de temperatura, presión y gasto).
- **Pozos de inyección:** Estos pozos sirven de conducto para inyectar fluido (agua o salmuera generalmente) desde la superficie al yacimiento con el objetivo de alimentar al yacimiento con fluido y mantener la presión del mismo, creando un *circuito cerrado* entre estos y los pozos productores, dando así la condición de recurso renovable.

5.2 Terminación de pozos geotérmicos productores

5.2.1 Terminación en agujero descubierto

En este tipo de terminaciones, la zona productora se perfora después de cementar la última tubería de revestimiento cementada por encima del intervalo productor, por lo tanto la producción sale directamente del yacimiento, viajando a través de las TR's superiores hasta alcanzar el cabezal.

Ventajas:

- El proceso es más simple, por lo que los costos disminuyen
- No existe obstrucción durante el aporte de flujo del yacimiento al pozo
- En formaciones volcánicas completamente consolidadas permite gran acceso a las fracturas.

Desventajas:

- El enjarre del fluido de perforación, puede afectar el aporte de fluidos
- No hay protección contra el colapso del pozo
- No existe aislamiento de zonas en el intervalo productor
- Está limitada a formaciones poco fracturadas y consolidadas

Dada la naturaleza de los yacimientos geotérmicos, en su mayoría en formaciones volcánicas, esta terminación es muy limitada, por lo que es poco común.

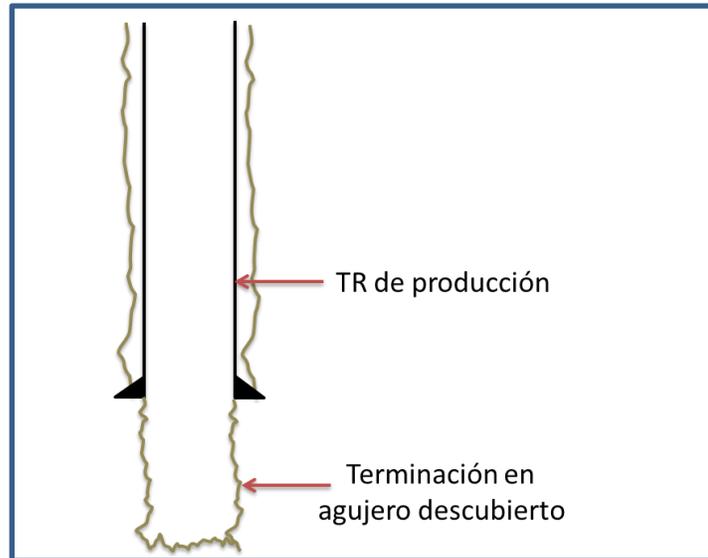


Figura 65. Terminación de un pozo geotérmico en agujero descubierto con una profundización del mismo.

5.2.2 Terminación con tubería corta ranurada

Después de perforado el intervalo productor, es bajada una tubería corta ranurada que puede ser anclada a la zapata de la última TR cementada (colgada) o puede ser asentada en el fondo del pozos, dejando un tramo superficial dentro de la zapata de la TR de producción. Esta tubería no es cementada y el flujo entra al pozo a través de las ranuras.

Ventajas:

- Previene el colapso del pozo en la zona productora
- Las ranuras proveen cierto control a la entrada de detritos de la formación
- El pozo queda en contacto directo con el yacimiento
- Empleada en la mayoría de los pozos geotérmicos en rocas volcánicas fracturadas

Desventajas

- Mayores costos y tiempos de operación
- El flujo del yacimiento al pozo se ve en cierta medida obstruido
- Vulnerabilidad a la corrosión y agentes químicos propios de las formaciones geotérmicas

Este tipo de terminación es la más recurrida en pozos geotérmicos debido a la naturaleza de las formaciones productoras (volcánicas fracturadas normalmente) y los fluidos producidos.

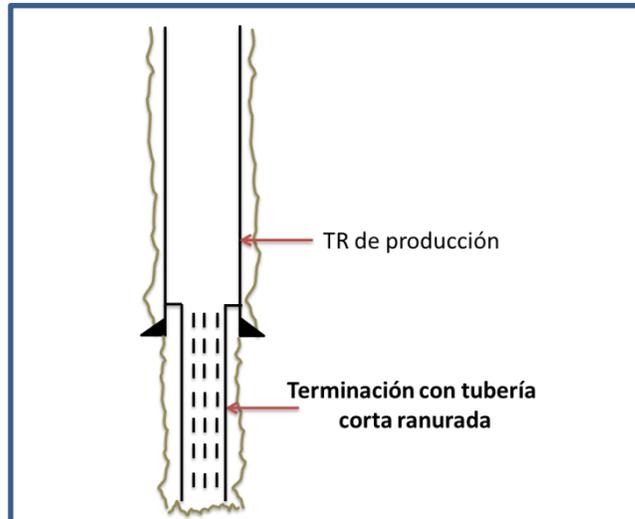


Figura 66. Terminación con tubería corta ranurada.

5.2.3 Terminación con tubería corta ranurada y extensión de agujero

En este tipo de terminación, después de perforado el intervalo productor se baja una tubería corta ranurada que es anclada a la zapata de la última TR cementada y posteriormente es cementada con un tapón en la parte más inferior para mantenerla fija, pues en seguida hay una extensión del agujero con un menor diámetro de barrena, quedando esta última etapa en agujero descubierto.

Ventajas:

- Profundizar en la zona de interés
- Previene del colapso en al menos una parte de la zona de interés
- Una parte de la zona de interés aporta fluido sin restricción alguna
- Maximiza el volumen de producción

Desventajas:

- Mayores costos y tiempo de operación que las otras
- Una parte de la zona de interés se ve un tanto obstruida
- Limitada a condiciones propicias (geología y fluidos) para llevarla a cabo

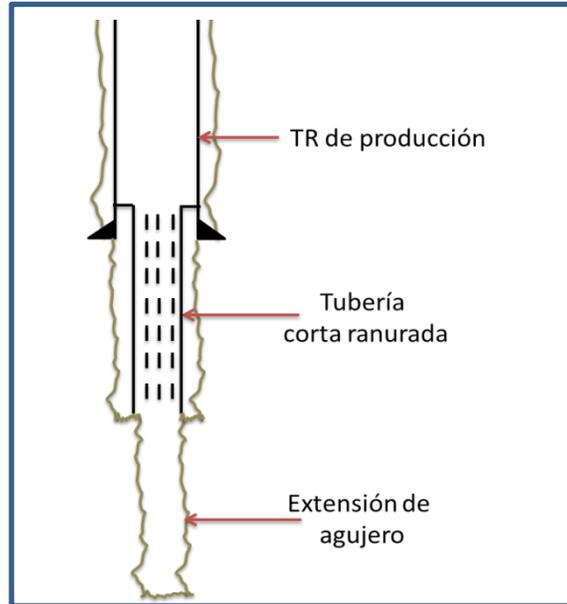


Figura 67. Terminación de un pozo exploratorio con tubería ranurada colgada y extensión de agujero.

5.2.4 Terminación bilateral

Una vez perforado y terminado un pozo vertical, se procede a crear una segunda pierna a determinada profundidad del pozo ya terminado, por lo que se tendrá un mismo cabezal de producción para dos diferentes puntos de interés. Para realizar la bifurcación del pozo es necesario contar con herramientas especiales, empleadas también durante la desviación de pozos.

Ventajas:

- Aumento de la productividad de los pozos
- Acceso a dos horizontes productivos
- Costos menores en comparación con otro pozo nuevo por perforar.
- Menor tiempo de operación en comparación con un segundo pozo nuevo a perforar.
- Reducen el riesgo de una producción nula.

Desventajas

- Uso de herramientas especiales
- La zona de bifurcación puede ser menos estable y por tanto crítica.
- Las operaciones de reentradas pueden ser difíciles
- Requiere de inyección de un inhibidor de incrustaciones por debajo del punto de bifurcación.
- Uso de equipo de perforación direccional más grande que el convencional

Para que se pueda llevar a cabo esta tipo de terminación es necesario que los pozos candidatos cumplan con ciertos requisitos, los cuales son: yacimiento de

vapor dominante, no sobre explotados y alojado en rocas no deleznable.

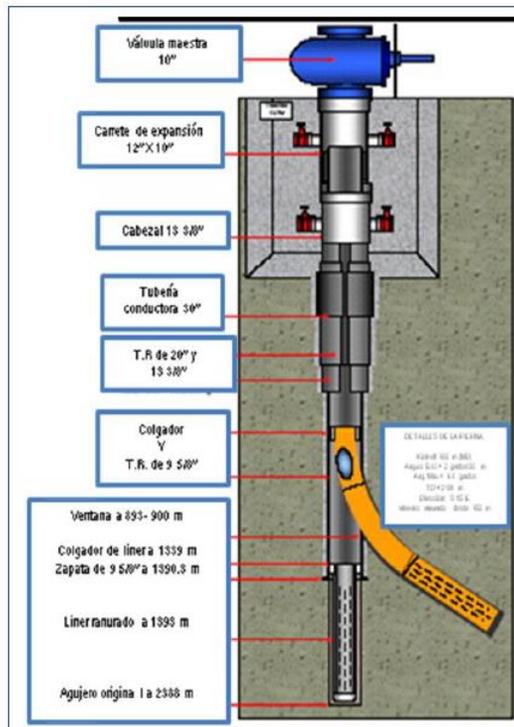


Figura 68. Estado mecánico (diseño) del pozo bilateral H-8D en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Fuente: Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía.

5.2.5 Cabezal de pozo y árbol de válvulas

El cabezal del pozo es una base asentada en superficie, sobre la cual se construye el pozo durante las operaciones de perforación. Estos dispositivos proveen el medio para colgar las TR's y conectar los preventores durante la perforación.

Durante la etapa de terminación de pozos en la parte superficial, el sistema de preventores es sustituido por el árbol de válvulas, para poder poner a producir los pozos geotérmicos de manera controlada. Los principales componentes de los cabezales de producción y el árbol de válvulas en pozos geotérmicos son:

- Cabezal para TR's
- Carrete de expansión
- Válvula maestra
- Válvula de compuerta
- Válvulas laterales

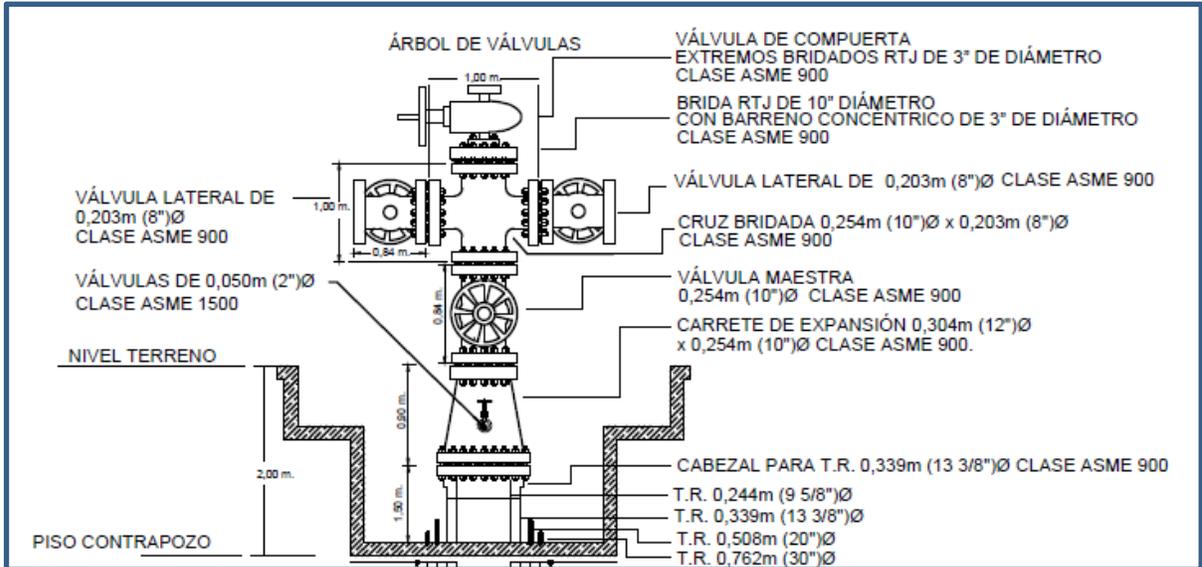


Figura 69. Cabezal de TR's y árbol de válvulas típico de un pozo geotérmico.

Fuente: Confidencial

5.3 Terminación de pozos geotérmicos inyectores

La terminación en pozos inyectores depende de varios factores, si fueron perforados para ser inyectores o se acondicionaron, debido a esto la terminación puede ser:

5.3.1 Terminación en agujero descubierto

Durante la explotación de un campo geotérmico es común que los pozos productores se les adecue para volverlos inyectores, cuando esto sucede, el pozo productor puede estar terminado con agujero descubierto o con tubería ranurada.

Cuando se perforan pozos con el objetivo de ser inyectores, lo más común es que sean terminados en agujero descubierto, para no crear obstrucciones de flujo a la entrada del yacimiento. Existen dos métodos de inyección de fluidos hacia el yacimiento para este tipo de pozos:

- **Inyección por gravedad (sin bombeo):** el pozo es alimentado con fluidos (agua o salmueras) proveniente de los estanques de almacenamiento, bombeando desde lejos el fluido para que llegue al pozo.
- **Inyección con bomba a boca de pozo:** es instalada una bomba a boca de pozo para aumentar la cantidad de fluido inyectado. El uso de estas bombas está limitado a los análisis de admisión de fluido en los yacimientos.

5.3.2 Terminación con tubería corta ranurada

Este tipo de terminación para pozos inyectores, es mas común cuando se convierten pozos productores a inyectores, debido a la baja producción que muestran, es común también que se lleven a cabo cambios de intervalo, tanto someros como profundos para la inyección de fluidos. Al igual que los pozos en agujero descubierto, después de un análisis de admisión en el intervalo del yacimiento, la inyección se puede llevar a cabo por gravedad o con bomba a boca de pozo.

5.4 Empacadores

Los empacadores son herramientas que emplean elementos elastoméricos, con el fin de aislar las TR's de los fluidos de la formación, durante las operaciones de inyección o estimulación. Para hacer la selección del empacador se debe de tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Diámetro de la tubería de revestimiento
- Temperatura a la que estará sometido
- Presión de trabajo
- Diseño de operación

En la industria geotérmica se usan solamente los empacadores de servicio, debido a que solo se utilizan durante las estimulaciones y/o fracturamiento hidráulicos. Son instalados temporalmente y removidos una vez que la operación haya finalizado.

Los empacados son clasificados como recuperables y permanentes. Los recuperables están diseñados para ser removidos del pozo con herramientas de pesca o manipulación de la tubería. Mientras que los permanentes tienen que ser molidos para ser retirado del pozo. Por lo que, el empacador permanente es inservible una vez retirado del pozo.

Debido a las altas temperaturas encontradas en los pozos geotérmicos, el elastómero de los empacadores puede verse afectado al suavizarse o destruirse parcialmente, permitiendo fugas. Por lo que en la elección del elastómero debe de considerarse las altas temperaturas a las que estará sometido.

Otro tipo de empacadores utilizados en la industria geotérmica es el empacador para agujero descubierto. Es un empacador diseñado para aislar zonas productivas durante las operaciones de estimulación. Están fabricados habitualmente con un elemento de gran tamaño que puede deformarse fácilmente para entrar en contacto con la superficie irregular de la formación y de esta manera no afectar la zona aislada de la formación.



Figura 70. Esquema de un pozo terminado en TR corta ranurada, donde se muestra un empacador para agujero descubierto.

5.5 Corrosión e incrustaciones en la tubería de revestimiento

Los procesos de corrosión que ocurren en las TR's son promovidos por las características fisicoquímicas del fluido geotérmico. La mezcla de vapor y salmuera rica en sales, alta temperatura, presencia de ácido sulfúrico (H_2S) y bióxido de carbono (CO_2) hacen del fluido geotérmico una solución muy corrosiva. Cuando el fluido caliente se va a enfriando, el sílice presente en el fluido geotérmico se hace menos soluble, lo que incrementa la formación de incrustaciones.

Los aceros utilizados en la TR de pozos geotérmicos tienen una limitada resistencia a la corrosión, por lo que deben de ser protegidas con pinturas recubrimientos y sistemas de protección catódica en caso de ser necesario.

Los parámetros que tienen mayor influencia sobre la corrosión y la incrustación son: el contenido de sales y el calor. La corrosión es influenciada por iones agresivos como Cl^- y SO_4^{2-} .

Los pozos inyectoros son pozos de desecho que reciben las aguas geotérmicas después de haber sido sometidas a sedimentación donde pierden una gran cantidad de sólidos y sales. Aun así, este fluido es muy corrosivo por lo que los pozos deben de tener recubrimiento especial anticorrosión.

Una forma de controlar la corrosión, es mediante el uso de materiales resistentes a la corrosión, el proceso de selección de materiales involucra tres etapas principales:

- Análisis de los requerimientos y condiciones de operación del campo.
- Selección y evaluación de los posibles materiales a utilizar.
- Selección del material más apropiado.

Los materiales seleccionados deben de tener las características apropiadas que le permitan un desempeño seguro en su funcionamiento durante un periodo de tiempo razonable y un costo aceptable.

La manera más sencilla de proteger las TR's contra los efectos de corrosión es formar una barrera física sobre las superficies que las separe del medio que las rodea, evitando de esta manera las interacciones. Las pinturas anticorrosivas, los recubrimientos poliméricos y metálicos, o recubrimientos con hule, son las mediadas más utilizadas en los campos geotérmicos para proteger instalaciones y equipos.

Por otro lado, la formación y depósito de incrustaciones y tuberías de campos geotérmicos es controlada mediante métodos mecánicos, la acidificación de la salmuera y la adición de inhibidores orgánicos. El ácido, deberá ser adecuado a la naturaleza química de la incrustación: carbonato, sulfato o silicato.

En el caso de los inhibidores, estos son sustancias químicas que modifican el comportamiento de los fluidos geotérmicos y la velocidad de reacción de la incrustación cuando son adicionados en cantidades relativamente pequeñas.

5.6 Estimulación química de pozos geotérmicos

El ácido tiene la habilidad de disolver minerales y material proveniente del exterior, como el lodo de perforación, el cual puede introducirse a la formación durante el proceso de perforación. Por esta razón es necesario utilizar la estimulación acida en los pozos geotérmicos, para incrementar la producción o la capacidad de inyección.

La estimulación acida se usa normalmente para eliminar el daño en la formación, así como incrementar la permeabilidad de la formación.

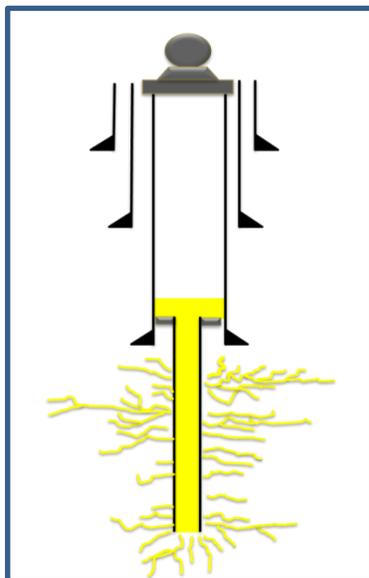


Figura 71. Estimulación ácida.

Fuente: L. Morales (2012) "Acid stimulation of geothermal wells in Mexico, el salvador and the Philippines"

El daño a la formación es la alteración de las características originales de la formación productora, puede ocurrir durante cualquier operación del pozo: perforación, cementación, producción o trabajos de mantenimiento.

En general el tratamiento ácido para pozos geotérmicos, se puede resumir en la siguiente tabla:

Etapa	Tipo de ácido	Papel desempeñado
Pre limpieza	Ácido clorhídrico (HCl).	Disolución rápida en rocas carbonatadas. Evita la reacción con el ácido fluorhídrico en la siguiente etapa.
Limpieza	Una mezcla de ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico (HCl – HF), normalmente llamado lodo ácido.	Reacciona con los minerales asociados a areniscas. El uso de ácido clorhídrico permite mantener un pH bajo y evita la precipitación de materiales que reaccionan con el ácido fluorhídrico.
Post limpieza	Ácido clorhídrico (HCl).	Reducción del daño, por las incrustaciones indeseables después del tratamiento
Desplazamiento	Agua o fluidos geotérmicos.	Desplazar la solución ácida y limpiar la TR de suspensión ácida.

Tabla 11. Etapas del tratamiento ácido para pozos geotérmicos.

Fuente: L. Morales (2012) "Acid stimulation of geothermal wells in Mexico, el salvador and the Philippines"

Las concentraciones de ácido varían del 6 al 12 % para HCl y de 0.5 al 3 para HF. Estos dos ácidos son los más eficaces y la concentración que se utiliza depende de las características del yacimiento y el propósito del tratamiento.

Los pozos geotérmicos que son candidatos para tratamientos de estimulación acida son: los que han sido dañados por el lodo de perforación, aquellos en los que los recortes de perforación se han perdido en las fracturas de la formación y en los que existe incrustaciones.

5.7 Proceso de producción de pozos geotérmicos

El proceso de producción de fluido geotérmico (con mayor interés en el vapor), para los pozos geotérmicos se puede dividir en tres etapas como se puede apreciar en la figura X:

- Del punto 1 al punto 2 el fluido se mueve del yacimiento no perturbado por la misma producción hacia el pozo, compuesto a esa profundidad por la tubería ranurada o el pozo mismo en descubierto.
- Del punto 2 al punto 3 el fluido se mueve por el interior del pozo desde el fondo hasta el cabezal en superficie. Es importante destacar que en este trayecto, la presión y temperatura decrecen, sin embargo la presión es la que tiene mayores efectos sobre el fluido, pues es en esta etapa en donde se libera vapor, aligerando la columna hidrostática y permitiendo la producción del pozo con su misma energía.
- Finalmente del punto 3 al punto 4 el fluido total producido pasa por las válvulas laterales de producción, lo cual permite tener diferentes presiones, permitiendo la liberación de mas vapor al pasar de una presión mayor (presión de cabezal) a una presión menor (presión de separación), descargando el flujo total en el separador, en donde se separan las fases vapor y liquido, obteniéndose finalmente el flujo de vapor deseado.

En cada una de las etapas mencionadas el fluido va perdiendo presión, de tal forma que el comportamiento de este parámetro a lo largo del proceso de producción es de la siguiente manera:

$$P_1 > P_2 > P_3 > P_4 \text{ ó } P_y > P_{ff} > P_{cab} > P_s$$

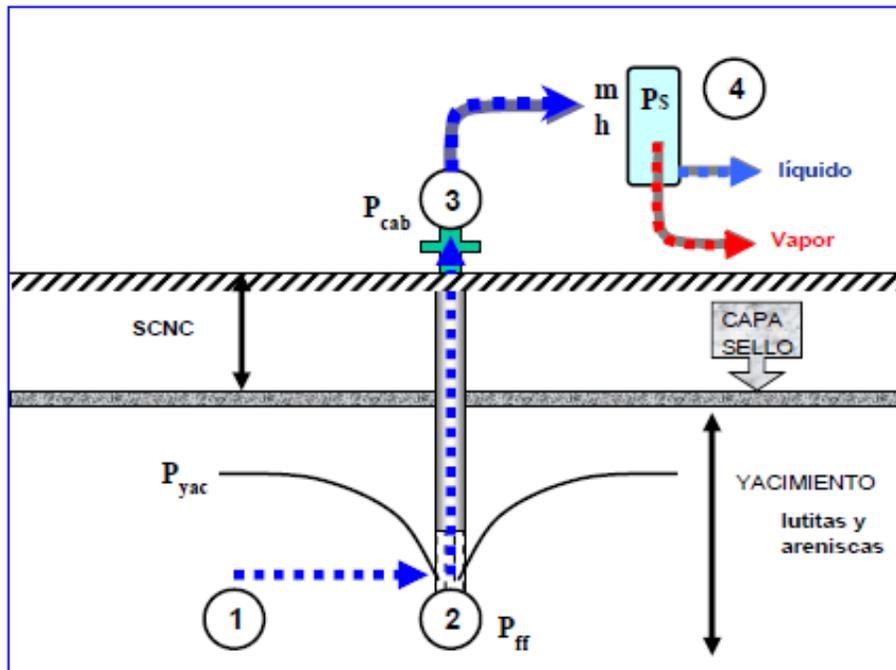


Figura 72. Proceso de producción de vapor en un pozo geotérmico.

CONCLUSIONES

La energía calorífica obtenida del interior de la Tierra (energía geotérmica), actualmente es 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 están asociados principalmente 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 de 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 podemos 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 poder 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 nucleadoras (similares a las empleadas en la industria minera).

Los equipos de perforación convencionales están compuestos de los sistemas de suministro de potencia, de izaje, rotación, de control de brotes, de monitoreo y de circulación al igual que la industria petrolera, con la única diferencia que el sistema de circulación deberá estar 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 deberán de ser diseñadas para trabajar a altas temperaturas, 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 deberán estar adecuados para trabajar a altas temperaturas, deberán 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 es estimada a partir de las densidades de las rocas volcánicas asociadas a los yacimientos.

El diseño de tuberías de revestimiento se hace considerando los esfuerzos a los que estará sometida 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.

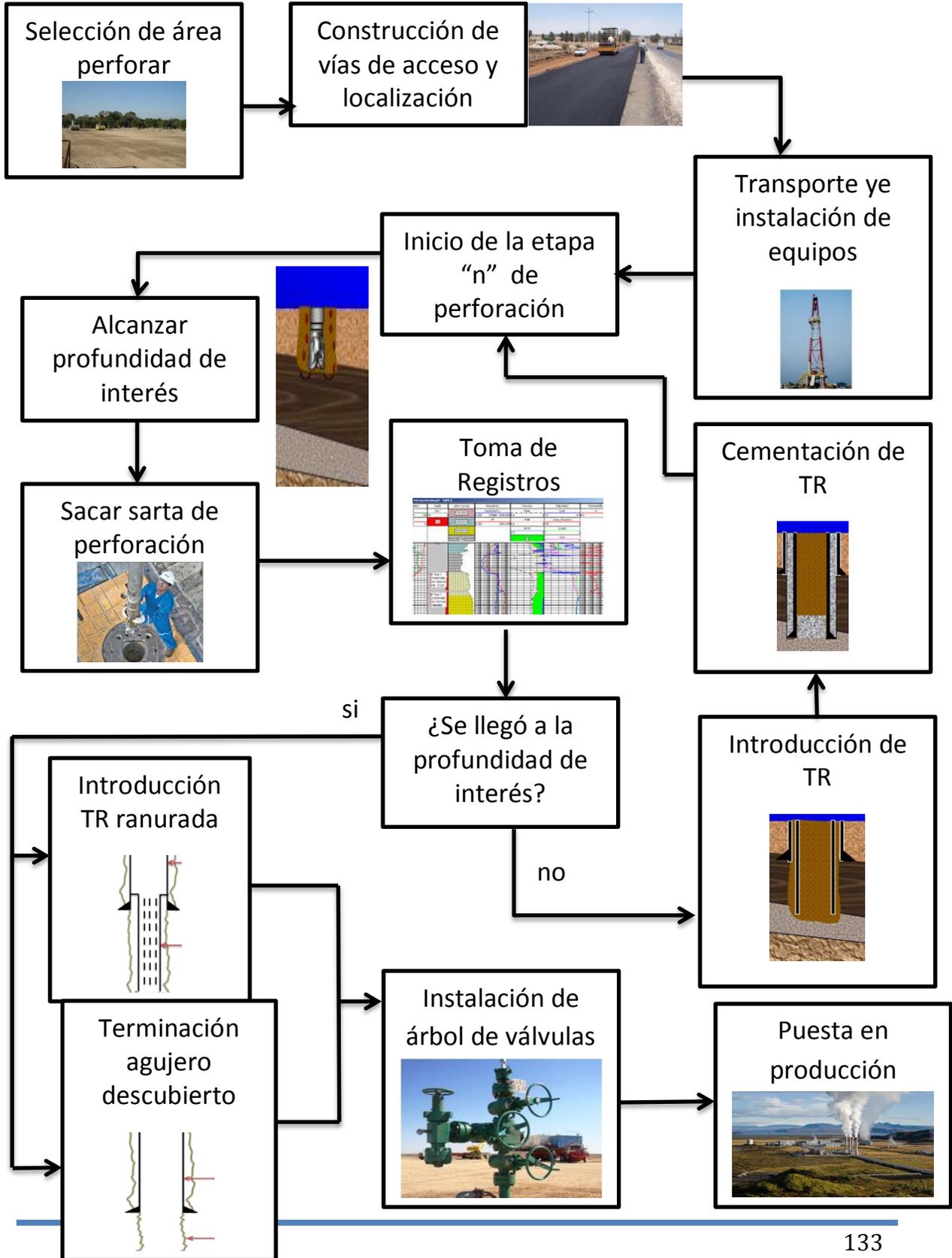
Los cementos más comunes en la industria geotérmica son del tipo Portland en sus clases A y G, empleando normalmente del 35 al 40% de sílice en polvo para que resistan las altas temperaturas. El procedimiento de cementado es similar al realizado en pozos petroleros, empleando una unidad de alta, sin 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 dependerá 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.

Anexo 2. Diagrama del proceso operativo de perforación de pozos geotérmicos



Glosario

Acuicultura: Así se le denomina a la producción controlada de organismos vegetales y animales, que transcurren al menos parte de su ciclo vital en relación con el agua. Organismos susceptibles de ser cultivados que pertenecen a varios grupos de especies, ofrecen amplias oportunidades de negocio y alternativas alimenticias, o recuperación de las poblaciones naturales que se han visto disminuidas.

Árbol de válvulas: Un arreglo de válvulas, tambores, medidores de presión y estranguladores fijados en el cabezal de un pozo terminado para controlar la producción. Los árboles de válvulas se encuentran disponibles en una amplia gama de tamaños y configuraciones, tales como configuraciones con capacidad de baja o alta presión y con capacidad para terminaciones simples o múltiples.

Astenosfera: Capa del interior de la Tierra que se extiende aproximadamente entre los 50 y los 150 km de profundidad, formada principalmente por rocas plásticas parcialmente fundidas que pueden deformarse: la astenosfera está situada entre la litosfera y la mesosfera.

Balneología: La balneología es una disciplina que se dedica a estudiar los beneficios que las aguas termales o minerales aportan al cuerpo humano. Se estima que los efectos benéficos de determinadas aguas para el organismo hayan sido conocidos desde la antigüedad y que en formas distintas hayan aportado una ayuda importante para preservar el organismo en buena eficiencia y curar las enfermedades

Bit sub (portabarrena): Es el componente que va inmediatamente después de la barrena y puede alojar también una válvula de no retorno. Es una pieza tubular metálica con dos conexiones tipo caja y es empleada para conectar la barrena con el siguiente elemento de la sarta

Bit (barrena): Es la herramienta de corte ubicada en el extremo inferior de la sarta de perforación, es empleada para triturar o cortar la formación durante el proceso de perforación rotaria.

Bomba de calor: Instalación que transfiere calor de un lugar frío a uno caliente, de manera opuesta a la dirección natural de flujo de calor. De manera similar a un refrigerador, las bombas de calor se usan para extraer calor de ambientes como el suelo (bombas de calor geotérmico), el agua o el aire, y pueden invertir su funcionamiento para proveer enfriamiento en verano.

Bushing Kelly: Dispositivo instalado en la mesa rotaria, a través del cual pasa la flecha. Es el medio por el cual el torque de la mesa rotaria se trasmite a la flecha.

Cedencia: Es una propiedad de la materia de soportar la deformación ante la exposición de una carga

Conducción: un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, por el que el calor fluye desde un cuerpo a mayor temperatura a otro a menor temperatura que está en contacto con el primero.

Conductividad térmica: Propiedad de un material que mide su capacidad de conducir calor.

Convección: es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por medio de un fluido(líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos.

Corrosión: se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.

Corteza terrestre: es la capa de roca externa de la Tierra. Es comparativamente fina, con un espesor que varía de 5 km, en el fondo oceánico, hasta 70 km en las zonas montañosas de los continentes.

Daño: El daño a la formación se puede definir como una reducción en la permeabilidad de una zona productora en la vecindad del pozo. Esta reducción puede ser causada durante el período de perforación, terminación o producción del pozo.

Drill collar (lastrabarrenas): Se colocan después del portabarrenas, son elementos de acero rígido con una longitud aproximada de 10 metros, su función es proporcionar peso sobre la barrena

Drill string (sarta de perforación): es el conjunto de herramientas encargada de transmitir las fuerzas de empuje y rotación a la barrena.

Eficiencia del ciclo: En termodinámica, es la relación entre la energía que entrega una máquina y el calor total disponible para la moverla.

EGS: Siglas de Enhanced (or Engineered) Geothermal System: Sistema geotérmico mejorado. Un sistema para recuperar energía primaria mediante tecnologías de extracción de calor, diseñado para extraer y utilizar la energía térmica almacenada en el interior de la Tierra.

Energía geotérmica: es aquella energía que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra.

Estimulación: En sistemas tipo EGS, es el mejoramiento de la permeabilidad natural, o su creación cuando no hay ninguna. La estimulación se realiza usualmente por medios hidráulicos inyectando fluidos a tasas y presiones variables, o bien por medios químicos inyectando ácidos u otros compuestos para disolver partes de la roca en el subsuelo. La extensión de las fracturas mejoradas o creadas y su transmisibilidad final dependerán de los esfuerzos actuantes sobre las rocas y de sus propiedades térmicas y elásticas.

Fluido geotérmico : Cualquier fluido producido por un pozo geotérmico. Puede ser vapor seco o sobrecalentado, líquido presurizado o una mezcla de líquido y vapor saturado, acompañada usualmente de gases incondensables.

Fluido de perforación: El fluido utilizado durante las labores de perforación de un pozo es llamado también lodo de perforación; siendo éste, el componente más importante que existe durante este proceso. El lodo es un fluido preparado con materiales químicos, en circulando en circuito dentro del agujero por el interior de la tubería, impulsado por bombas y finalmente, devuelto a la superficie por el espacio anular

Fracturamiento hidráulico: Técnica que implica la inyección de un fluido a elevada presión en un yacimiento para mejorar la permeabilidad natural existente y para establecer una conexión entre pozos, abriendo las fracturas selladas o creando nuevas para permitir que el fluido se mueva más libremente en la formación rocosa.

Gradiente geotérmico: Proporción en la cual se incrementa la temperatura de la Tierra con la profundidad, reflejando el flujo de calor del interior de la misma hacia su superficie. El gradiente geotérmico normal medio en la litósfera se estima entre 25 y 30°C por cada kilómetro de profundidad, pero puede ser mucho más alto en zonas geotérmicas.

Hidrotermal: En el contexto de un sistema geotérmico, se refiere a soluciones mineralizadas calentadas por contacto con rocas calientes y/o por magmas en enfriamiento, que sufren movimientos de convección en un yacimiento.

Impax Hammer Bit System (martillos para perforación por percusión): son herramientas que se colocan en la sarta de perforación, constan principalmente de una camisa-pistón reciprocante, la cual mediante un mecanismo de accionamiento proporciona una carga de impacto a la barrena.

Intercambiador de calor: Equipo que logra una transferencia de calor eficiente entre uno y otro medio sin que estos se mezclen, por ejemplo: radiadores, calderas, intercambiadores de calor, condensadores.

Litosfera: es la capa exterior rocosa y rígida de la Tierra sobre la que vive la biósfera y se extiende en promedio hasta aproximadamente 100 km de profundidad hundida en el manto.

Mesosfera: es la parte de la atmósfera situada por encima de la estratosfera y por debajo de la termosfera.

Motor de fondo (Downhole Motor): motor que va alojado en la sarta de perforación, el cual transmite la potencia a la barrena mediante dos diferentes principios de operación.

Permeabilidad: La capacidad, o medición de la capacidad de una roca, para transmitir fluidos, medida normalmente en darcies o milidarcies. El término fue definido básicamente por Henry Darcy, quien demostró que la matemática común de la transferencia del calor podía ser modificada para describir correctamente el flujo de fluidos en medios porosos.

Placas tectónicas: es un fragmento de litosfera que se mueve como bloque rígido sin que ocurra deformación interna sobre la astenósfera (manto exterior o superior) de la Tierra.

Planta geotermoeléctrica: es una instalación donde se obtiene energía eléctrica a partir del calor interno de la Tierra. Estas centrales son muy similares a las térmicas, la única diferencia es que no queman nada para calentar el agua.

Porosidad: El porcentaje de volumen de poros o espacio poroso, o el volumen de roca que puede contener fluidos.

Pozo artesiano: es la perforación en el subsuelo hasta dar con agua contenida a presión entre capas subterráneas.

Punto pivote: es un indicador de la zona más permeable, y determina la presión de la formación a esa profundidad.

Puntos calientes: son áreas de actividad volcánica alta, no son necesariamente asociados a los límites de placas tectónicas.

Punto de desvío (Kick Off Point, KOP): en perforación direccional es el punto en donde se inicia el desvío de la trayectoria del pozo vertical.

Radiación: Es el calor emitido por un cuerpo debido a su temperatura, en este caso no existe contacto entre los cuerpos, ni fluidos intermedios que transporten el calor.

Recursos geotérmicos: constituyen la parte de la energía geotérmica o calor

interno de la Tierra, que puede ser aprovechada en términos económicos por el hombre.

Registros geofísicos: es un gráfico X-Y en donde el eje Y representa la profundidad del pozo y el eje X representa los valores de algunos parámetros del pozo tales como: resistividad, densidad, porosidad, tiempo de tránsito, radioactividad, entre otros.

Shock sub (Amortiguadores): herramientas utilizadas durante la perforación de formaciones duras, su función es amortiguar los efectos de vibración.

Slimwell: son pozos normalmente terminados con tubería ranurada de diámetro menor a 6" y pueden emplear unidades de perforación convencional o unidades nucleadoras.

Sustituto de acople curvo (Bent Sub): herramienta subsuperficial que permite direccionar a la barrena durante las operaciones de perforación direccional.

Tectónica: Rama de las Ciencias de la Tierra que trata con las características y movimiento de las placas que componen la litósfera, y que resulta en la creación y deformación del magma y de las rocas.

Top Drive: es un motor eléctrico que se suspende en un mástil del equipo de perforación. Esta herramienta se encarga de hacer rotar la sarta de perforación y la barrena.

Tubería corta ranurada: es una sección de tubo que presenta perforaciones o ranuras uniformes a lo largo de su área, estas ranuras constituyen normalmente el 6% de dicha área, las cuales sirven a la tubería para comunicar la sección interna de la tubería con el exterior.

Yacimiento: En geotermia, es una zona del subsuelo compuesta por rocas calientes con fluidos naturales calientes cuya energía térmica puede ser económicamente explotada para generar energía eléctrica o en diversas aplicaciones directas.

BIBLIOGRAFÍA

Gorbachev Yuri I. 1995 Well logging: Fundamentals of methods. First Edition. John Wiley & Sons Ltd. England. 324 p.

Glassey William E. 2010. Geothermal energy: Renewable energy and the environment. First Edition. CRC Press. United States. 290 p.

Wicander Reed y Monroe James S. 2000. Fundamentos de geología. Segunda Edición. Thomson Editores. México. 445 p.

G. Gorshkov, A. Yakushova. 1970. Geología general. Primera Edición. Editorial MIR. México. 624 p.

Streingrimsson Benedikt. 2011. Geothermal well logging: Geological wireline logs and fracture imaging. El Salvador.

Streingrimsson Benedikt. 2013. Geothermal well logging: Temperature and pressure logs. El Salvador.

Arévalo M. Jaime A. 1992. Report 3: Geothermal drilling techniques. Iceland.
Vv v

Hole Hagen M. 2007. Report 3: Lectures on geothermal drilling and direct uses. New Zealand.

Kangogo C. Stephen. 2009. Report number 8: Rig selection and comparison of top drive and rotary table drive systems for cost effective drilling projects in Kenya. Iceland.

Miyora Thomas O. 2010. Report number 20: Controlled directional drilling in Kenya and Iceland. Iceland.

Thorhallsson Sverrir. 2011. Advanced geothermal drilling. El Salvador.

Axelsson Gudni and Franzson Hjalti. 2012. Geothermal drilling targets and well siting. El Salvador.

Thorhallsson Sverrir and Sturla Gunnsteinsson Stefan. 2012. Slim well for geothermal exploration. El Salvador.

Ngugi Paul K. 2008. Geothermal well drilling. Kenya.

Glowka David A. 1997. Sandia Report: Recommendations of the workshop on advanced geothermal drilling systems. United States.

Finger John and Doug Blankenship. 2010. Sandia Report: Handbook of best practices for geothermal drilling. United States.

Bourgoyne Adam, Chenovert Martin, Millheim K. Keith and Young F. S. 1991. Applied drilling engineering. Society of Petroleum Engineering. United States. 502 p.

Dumas P, Antics M and Ungemach P. 2013. Geo Elec: Report on geothermal drilling. Europe.

Tylor A. Mark. 2007. The state of geothermal technology, Part 1: Subsurface technology. United States.

Hossein-Pourazard Hossein. 2005. Report Number 9: High temperature geothermal well design. Iran.

Bett Evans K. 2010. Report Number 10. Geothermal well cementing, materials and placement techniques. Kenya.

Kaldal Gunnar, Jónsson Magnús, Halldór Pálson and Karlsdótti Sigrún. 2012. Thermal and structural analysis of the casing in a high temperature geothermal well during discharge. Iceland.

Gollymer Eric, Mitchell Sarah, Bailey Alan, Rickard Bill and Pye Stephen. 2011. Casing protection for geothermal wells.

Hole Hagen. 2008. Geothermal well design – casing and wellhead. Petroleum Engineering Summer School. Croatia.

Teodoriu Catalin. 2011. Use of down hole mud-driven hammer for geothermal applications. Germany.

Orazzini Simone, Kasirni Regillio, Ferrari Giampaolo, Bertini Alessandro, Bizzocchi Isabella, Ford Robert, Zhang Ming. 2011. New roller cone bit technology for geothermal application significantly increases on-bottom drilling hours. United States.

Chepkoch Chemwotei Sichei. 2011. Report Number 11: Geothermal drilling fluids. Kenya.

Costo Bob, Cunningham W. Larry, Mercado José, Mohon Brian, Liengjun Xie. Schlumberger Oilfield Review primavera 2012. Cómo salir de un aprieto. Estados Unidos.

Prestwich S. M. and Bowman J.A. et al. 1980. Completion and testing report; INEL

geothermal exploratory well one (INEL-1). United States.

Polsky Yarom, Capuano Jr. Louis, Fonger John, Huh Michael, Knudsen Steve, Mansure Chip, Raymond David and Swanson Robert. 2008. Sandia Report: Enhanced geothermal systems (EGS) well construction technology evaluation report. United States.

Sarmiento, Zosimo F. 2007. A snapshot of the drilling and completion practices in high temperatures geothermal wells in the Philippines. Philippines.

Domínguez A. B. y Sánchez G. G. Comentarios de algunos problemas de perforación y terminación de pozos geotérmicos en Cerro Prieto. Comisión Federal de Electricidad. México.

Rivenbark Mark, Theming Dan, Radtke Cameron, Elliot Rod, Hindle Dean and Clyne Iain. 2011. Deep geothermal well completions: A review of downhole problems and specialized technology needs. United Arab Emirates.
Teodoriu G. and Falcone G. 2008. Comparison of well completion used in oil/gas production and geothermal operations: a new approach to technology transfer. United States.

Arévalo Jaime Armando. 2012. Workover operations in El Salvador. El Salvador.

Barrios Luz, Guerra Emilio, Jacobo Patricia and Mayorga Herbert. 2012. Acid stimulation of geothermal reservoirs. El Salvador.

Thorhallsson Sverrir. 2012. Corrosion in geothermal Wells and installations. Iceland.

Flores Armenta Magaly. 2012. Geothermal activity and development in Mexico keeping the production going. Mexico.

Llopis Trillo Guillermo y Rodrigo Angulo Vicente. Guía de la energía geotérmica. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. España. 185 p.

Frolava J. V, Ladygin V. M. and Rychagov S. N. 2001. Geothermal reservoir study through petrophysical data. Russia.

Hernández Adriana, Ávila Adalberto, Medina Nohemí y Sandoval Alejandro. Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía Enero – Junio 2012. Nuevas Tecnologías en el perfilado de pozos del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. México.

García Alfonso y Martínez Ignacio. Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía Julio – Diciembre 2012. Estado actual de desarrollo de las bombas de calor

geotérmico. México.

Flores Magaly, Medina Nohemí, Ramírez Miguel y Morales Lilibeth. Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía Enero – Junio 2012. Estimulación ácida del pozo Az-68D en el campo geotérmico de Los Azufres. Mich. México.

Ordaz Arturo, Flores Magaly y Ramírez German. Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía Enero – Junio 2011. Potencial geotérmico de la República Mexicana. México.

Ramírez Miguel y Flores Magaly. Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía Enero – Junio 2010. Perforación de pozos bilaterales: análisis y selección de pozos en el campo de Los Humeros, Pue. México.

Miranda Carlos, Canchola Ismael, Raygoza Joaquín y Mora Othón. Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía Julio – Diciembre 2009. Corrosión en tuberías de línea y de revestimiento de pozos en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. México.

Murillo Isaac, Ocampo Juan y Dela Peña Gilberto. Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía Julio – Diciembre 2005. Análisis de la automatización y del control de las condiciones de producción de los pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, México. México.

Flores Magaly, Lorenzo Cecilia, Palma Sergio, Rocha Víctor y Sandoval Fernando. WEC México 2010 Capítulo 1. La geotermia y los sistemas geotérmicos. México.

Beasley Craig, Du Castel Bertrand, Zimmerman Tom, Lestz Robert, Yoshioka Keita, Long Amy, Juch Susan, Riedel Kenneth, Sheppard Mike y Shood Sanjaya. Schlumberger Oilfield Review Invierno 2009. Aprovechamiento del calor de la Tierra.

Maya Raúl y Gutiérrez Negrín Luis. Revista Digital Universitaria. Volumen 8 Número 12. 2007. Recursos geotérmicos para generar electricidad en México. México.

UPMP – Pemex. 2001. Libro: Cien años de la perforación en México. México.

Arellano Víctor, Iglesias Eduardo y García Alfonso. 2008. Boletín IIE Tendencias tecnológicas. La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura. México.