



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

MÉTODOS ELÉCTRICOS PARA LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

Fernando Josué Marroquín de Paz

Asesorado por el Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, octubre de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MÉTODOS ELÉCTRICOS PARA LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS
GEOTÉRMICOS**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

FERNANDO JOSUÉ MARROQUÍN DE PAZ

ASESORADO POR EL ING. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE ÉL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Inga. Glenda Patricia García Soria |
| VOCAL II | Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López |
| VOCAL III | Ing. Miguel Ángel Davila Calderón |
| VOCAL IV | Br. Milton De León Bran |
| VOCAL V | Br. Isaac Sultan Mejía |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

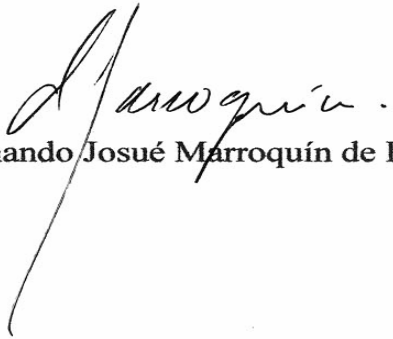
| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Guillermo Antonio Puente Romero |
| EXAMINADOR | Ing. Francisco Javier González López |
| EXAMINADOR | Ing. José Antonio de León Escobar |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**MÉTODOS ELÉCTRICOS PARA LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS
GEOTÉRMICOS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, el 4 de febrero de 2008.


Fernando Josué Marroquín de Paz.

Guatemala 19 de agosto del 2008

Ingeniero
Julio César Solares Peñate
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.


Estimado Ingeniero Solares.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: “Métodos eléctricos para la exploración de recursos geotérmicos”, del señor Fernando Josué Marroquín de Paz, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
Colegiado 2225
Asesor

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 10 de septiembre 2008.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
MÉTODOS ELÉCTRICOS PARA LA EXPLORACIÓN DE
RECURSOS GEOTÉRMICOS, del estudiante; Fernando Josué
Marroquin de Paz, que cumple con los requisitos establecidos para tal
fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑANZA A TODOS




Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador Área de Electrónica

JCSP/sro

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante; Fernando Josué Maroquin de Paz, titulado: MÉTODOS ELÉCTRICOS PARA LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobar Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 16 DE SEPTIEMBRE 2008.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 330.2008

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **MÉTODOS ELÉCTRICOS PARA LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS**, presentado por el estudiante universitario **Fernando Josué Marroquín de Paz**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, octubre de 2008



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|-------------------------------------|--|
| Dios | Por haberme ayudado a culminar esta meta. |
| Mis padres | Por brindarme el apoyo económico y motivacional. Además de la confianza que tuvieron en mi esfuerzo de mis estudios. |
| Mis hermanos | Por brindarme apoyo y compañía en mi vida. |
| Mi asesor | Por ser esa persona ejemplo que me motivó siempre a superarme y esforzarme. |
| Mis amigos | Por haber compartido conmigo su amistad. |
| La Universidad de San Carlos | Por ofrecerme los conocimientos con los que podré ser de beneficio al desarrollo de nuestro país. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | III |
| LISTA DE SÍMBOLOS | V |
| GLOSARIO | VI |
| RESUMEN | VIII |
| OBJETIVOS | XI |
| INTRODUCCIÓN | XII |
| | |
| 1. CONSIDERACIONES GENERALES | |
| 1.1 Qué es un recurso geotérmico..... | 1 |
| 1.2 Origen de los sistemas geotermiales..... | 2 |
| 1.3 Flujo de calor y gradiente geotérmico..... | 5 |
| 1.4 Campos geotérmicos..... | 6 |
| 1.4.1 Reservorio geotérmico..... | 7 |
| 1.4.2 Manifestaciones superficiales..... | 8 |
| 1.5 Sistemas Geotérmicos..... | 9 |
| 1.5.1 Sistemas geotérmicos convectivos..... | 9 |
| 1.5.2 Sistemas geotérmicos conductivos..... | 9 |
| | |
| 2. EXPLORACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS | |
| 2.1 Introducción..... | 12 |
| 2.2 Etapas de un proyecto geotérmico..... | 12 |
| 2.2.1 Exploración de superficie..... | 14 |
| 2.2.1.1 Aspectos relevantes en la exploración de superficie..... | 14 |
| 2.2.2 Interpretación integrada y modelación del recurso geotérmico..... | 15 |
| 2.2.3 Exploración profunda..... | 16 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2.3.1 | Perforación exploratoria..... | 16 |
| 2.2.3.2 | Confirmación del recurso..... | 17 |
| 2.2.3.3 | Delineación del recurso geotérmico..... | 17 |
| 2.2.4 | Estudio de reconocimiento..... | 18 |
| 2.2.5 | Estudio de prefactibilidad..... | 18 |
| 2.2.6 | Estudio de factibilidad..... | 19 |
| 3. | MÉTODOS ELÉCTRICOS DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA | |
| 3.1 | Introducción..... | 20 |
| 3.2 | Métodos dc..... | 21 |
| 3.2.1 | Introducción..... | 21 |
| 3.2.2 | Método de sondeo schlumberger..... | 24 |
| 3.2.3 | Método <i>head-on</i> | 32 |
| 3.3 | Métodos Electro-magnéticos..... | 37 |
| 3.3.1 | Introducción..... | 37 |
| 3.3.2 | Método magneto-telúrico: MT y AMT..... | 37 |
| 3.3.3 | Método de trasciendes electro-magnéticas..... | 43 |
| 3.4 | Métodos naturales..... | 47 |
| 3.4.1 | Método del potencial natural..... | 47 |
| | CONCLUSIONES..... | 49 |
| | RECOMENDACIONES..... | 51 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 52 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Capas que componen la tierra | 3 |
| 2 | Dorsales oceánicas y fosas abisales | 3 |
| 3 | Modelo de campo geotérmico | 6 |
| 4 | Gráfica de frecuencia de temperatura de reservorio | 11 |
| 5 | Cuadro de las etapas que componen un proyecto geotérmico | 13 |
| 6 | Interpretación integrada de la exploración de recurso geotérmico | 16 |
| 7 | Método dc | 22 |
| 8 | Método de sondeo schlumberger | 24 |
| 9 | Corriente transmitida del método schlumberger | 25 |
| 10 | Voltaje medido del método schlumberger | 25 |
| 11 | Gráfica de resistividad aparente de sondeo schlumberger | 27 |
| 12 | Gráfica de resistividad aparente de sondeo schlumberger para diferentes valores de “p” | 27 |
| 13 | Modelo de tres capas de la distribución de resistividad en un sondeo schlumberger | 28 |
| 14 | Gráfica de resistividad aparente para un modelo de dos capas en función de S-P | 29 |
| 15 | Gráfica de resistividad aparente que presenta el efecto de no homogeneidad en la resistividad | 31 |
| 16 | Arreglo de electrodos en el método <i>head-on</i> | 32 |
| 17 | Gráfica de resistividades aparentes en el método <i>head-on</i> | 34 |
| 18 | Método <i>head-on</i> sobre una estructura conductiva | 35 |
| 19 | Curvas de resistividades aparentes en un área geotermal | 35 |

| | | |
|----|---|----|
| 20 | Interpretación gráfica de los sondeos <i>head-on</i> en nauteyri | 36 |
| 21 | Espectro de frecuencias del campo electro-magnético de la tierra | 38 |
| 22 | Principio básico del método MT | 39 |
| 23 | Arreglo de magnetómetros y electrodos de potencial en las mediciones MT | 41 |
| 24 | Profundidad de penetración en los métodos AMT y MT | 42 |
| 25 | Método TEM | 45 |
| 26 | Figura 26. Resistividad aparente de sondeo TEM en África | 46 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|---------------------------------|---------------------------------|
| mW | Mili vatios |
| m^2 | Metros cuadrados |
| mCal | Mili caloría |
| cm^2 | Centímetros cuadrados |
| °C | Grados centígrados |
| $\frac{\partial T}{\partial Z}$ | Cambio de “T” con respecto “Z” |
| ρ | Resistividad específica |
| E | Campo Eléctrico |
| v/m | Voltio sobre metro |
| J | Densidad de corriente |
| A/m^2 | Amperios sobre metros cuadrados |
| Ωm | Ohm-metro |
| σ | Conductividad |
| μV | Micro voltios |
| Ω | Ohmios |
| V | Voltios |
| I | Corriente |

GLOSARIO

| | |
|----------------------|---|
| Acuífero | Capa subterránea de tierra que contiene agua. |
| Agua freática | Aguas acumuladas en el sub-suelo sobre una capa impermeable. |
| Conductividad | Calidad de conductivo. |
| Conductivo | Que tiene virtud de conducir. |
| Convección | Es una de las tres formas de transferencia de calor, y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. |
| Gradiente | Pendiente, declive. |
| Homogéneo | Que tiene una composición uniforme en toda su superficie o estructura. |
| Impedancia | Oposición que representa un componente o componentes al paso de la corriente alterna. |
| Magma | Conjunto de rocas que existe debajo de la corteza terrestre cuya temperatura es superior a los 1,000 °C. |
| Resistividad | Resistencia específica de una substancia. |
| Permeable | Que se deja atravesar por los cuerpos fluidos. |

Sistema convectivo Sistema en que se da la transferencia de calor por convección.

Voltímetro Es un instrumento utilizado para medir la diferencia de voltaje de dos puntos distintos.

RESUMEN

Consideraciones generales:

El término geotérmico se refiere al calor contenido en el interior de la tierra. Se consideran recursos geotérmicos las fuentes de calor terrestre que pueden ser recuperadas y explotadas por el hombre.

Los recursos geotérmicos pueden ser: vapor, agua caliente, rocas secas calientes, rocas geopresionadas, es decir, rocas porosas que contienen una mezcla de agua y gases a elevada presión y temperatura y rocas fundidas (magma).

Flujo de calor y gradiente geotérmico

La temperatura de la corteza terrestre aumenta con la profundidad, a esto se le denomina el Gradiente Geotérmico. El gradiente geotérmico puede variar por los siguientes factores: espesor de la corteza terrestre, por presencia de material magmático, por los sistemas de fallas, o por sistemas de agua subterránea que pueden transportar el calor terrestre en dirección vertical.

Campos geotérmicos

Los campos geotérmicos son los lugares en los cuales existe un flujo de calor anormal, es decir, tienen un gradiente geotérmico mucho mayor al normal.

Reservorio geotérmico

Se le denomina reservorio geotérmico, a las formaciones de roca con alta permeabilidad que contenga un volumen de agua con una cantidad de flujo de calor que asegure su explotación comercial.

Exploración de recursos geotérmicos

La exploración de recursos geotérmicos, son las actividades que se realizan con el propósito de descubrir y caracterizar un recurso geotérmico, y evaluar su capacidad de explotación para determinar si se cuenta con un proyecto rentable económicamente. Los resultados de la fase de exploración deben proporcionar todos los elementos para evaluar la viabilidad de la explotación del recurso geotérmico en términos comercialmente rentables.

Métodos eléctricos para la exploración de recursos geotérmicos

Los métodos más eficientes en lo que a exploración geotérmica respecta, son los que utilizan la medición de la resistividad del subsuelo. La resistividad del subsuelo es directamente proporcional a las características que son de interés en un reservorio: salinidad, temperatura, alteración y porosidad (permeabilidad).

Los métodos eléctricos de exploración pueden ser divididos en las siguientes categorías y subcategorías:

- Método dc: una corriente constante “I” (independiente del tiempo) es introducida dentro del suelo por medio de un par de electrodos en la superficie de la tierra. La corriente crea un campo de potencial eléctrico por medio del cual la resistividad puede ser obtenida: método de sondeo schlumberger, método *Head-on* y métodos por sondeo de dipolos.
- Métodos EM (Electro-magnéticos, Métodos A.C.): una corriente alterna en varias frecuencias preestablecidas o una corriente variante con el tiempo es usada en lugar de una corriente DC. En él se utilizan muchas configuraciones para transmitir y recibir dicha corriente alterna, teniendo como característica el contacto directo con la tierra o acoplamiento por inducción: Magneto-telúricos y Trasciendes Electro-magnéticos.
- Potencial natural: por medio de medir los voltajes dc naturales en la tierra podemos obtener la resistividad eléctrica de la tierra.

OBJETIVOS

General:

Dar a conocer los métodos eléctricos utilizados para determinar recursos geotérmicos de energía renovable como los más eficientes y rentables, por medio de la explicación del funcionamiento de los mismos.

Específicos:

1. Dar a conocer los diferentes tipos de métodos eléctricos para la exploración de recursos geotérmicos.
2. Explicar el funcionamiento de cada uno de los métodos eléctricos para la exploración de recursos geotérmicos renovables.
3. Mostrar las ventajas y desventajas que corresponden entre los diferentes tipos de métodos eléctricos para la exploración de recursos geotérmicos.
4. Dar a conocer el medio por el cual cada uno de los diferentes tipos de métodos eléctricos determina un recurso geotérmico, proporcionando sus características.

INTRODUCCIÓN

La exploración geotérmica es el conjunto de actividades que se llevan a cabo para descubrir y caracterizar un recurso geotérmico, y sucesivamente evaluar su potencial de explotación geotérmica (en MW). Los resultados de la fase de exploración geotérmica deben proporcionar todos los elementos para evaluar la viabilidad de la explotación del recurso geotérmico en términos comercialmente rentables.

Para que un recurso geotérmico sea comercialmente atractivo, debe poseer una temperatura mayor a los 150 °C. Y éste es generalmente caracterizado por una estructura resistiva del suelo formada de tal forma que una capa de baja resistividad encierra una cantidad de suelo con una alta resistividad. La resistividad del subsuelo es directamente proporcional a las características que son de interés en un reservorio: salinidad, temperatura, alteración y porosidad (permeabilidad). Siendo de nuestro interés el conocimiento de la estructura resistiva del suelo a analizar.

El principio para sondear resistividad del suelo es el de inducir una corriente eléctrica en la tierra para luego monitorear las señales que se generan por la distribución de corriente. Es por ello que recurrimos a los métodos eléctricos que por su naturaleza pueden determinar con cierta precisión la estructura resistiva del suelo. Consisten en métodos de Sondeo o métodos de perfil, dependiendo de qué tipo de estructura resistiva es investigada. El método de sondeo es usado para mapear la resistividad como una función de la profundidad. El método de perfil mapea la resistividad en más o menos una profundidad constante y es usado para mapear cambios laterales de resistividad.

El método de sondeo Schlumberger utiliza una corriente inyectada dentro de la tierra por medio de electrodos, y la señal medida es el campo eléctrico (diferencia de potencial sobre una distancia corta) generado en la superficie. En los métodos magnetotelúricos (MT) la corriente en la tierra es inducida por cambios en el tiempo del campo magnético propio de la tierra, y la señal medida es el campo eléctrico en la superficie. En los métodos de trasciendes electro-magnéticas (TEM) la corriente es también inducida por variaciones de campo magnético, pero en este caso el campo magnético no es el natural de la tierra, éste es generado por un dipolo y la señal medida es el decaimiento del campo magnético en la superficie.

1. CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 Qué es un recurso geotérmico

El término geotérmico se refiere al calor contenido en el interior de la tierra. El calor geotérmico es conducido desde el interior de la tierra hacia afuera, con un flujo promedio de 63 mili vatios por metro cuadrado (mW/m^2), el cual es demasiado difuso para utilizarlo en alguna aplicación. Sin embargo, la corteza terrestre no es homogénea y transmite más calor en lugares especialmente delgados o compuestos de materiales de alta conductividad. También existen alteraciones en la corteza terrestre o fallas geológicas que permiten la subida del calor geotérmico a la superficie terrestre en diferentes formas naturales.

Fracturas en los bordes de las placas corticales llevan grandes cantidades de calor hacia la superficie en forma de gases y magmas, el agua subterránea, al ser calentada, forma sistemas dinámicos (convectivos) que transportan hacia arriba el calor de las profundidades; si además existen estratos de roca porosa o fracturada, envuelta por rocas impermeables, se obtiene un “Reservorio Geotérmico”, el que puede o no manifestarse en superficie. El conocimiento sistemático de los procesos terrestres, permite pronosticar la ubicación de zonas favorables para la exploración geotérmica. Usualmente se centra la atención en los terrenos con un alto flujo de calor, cerca de volcanes jóvenes, de fuentes termales y próximos a fallas geológicas. En general, estas condiciones se producen cerca de las zonas de contacto entre las placas corticales y son denominadas fuentes de calor terrestre.

En general, estas condiciones se producen cerca de las zonas de contacto entre las placas corticales y son denominadas fuentes de calor terrestre.

El calor geotérmico es una forma de energía que se explota de manera comercialmente en: calefacción, procesos industriales, aplicaciones en la agricultura, etc., cuando se trata de sistemas geotérmicos de baja temperatura. Y con mayor interés comercial en la generación de energía eléctrica cuando se trata de sistemas de alta temperatura.

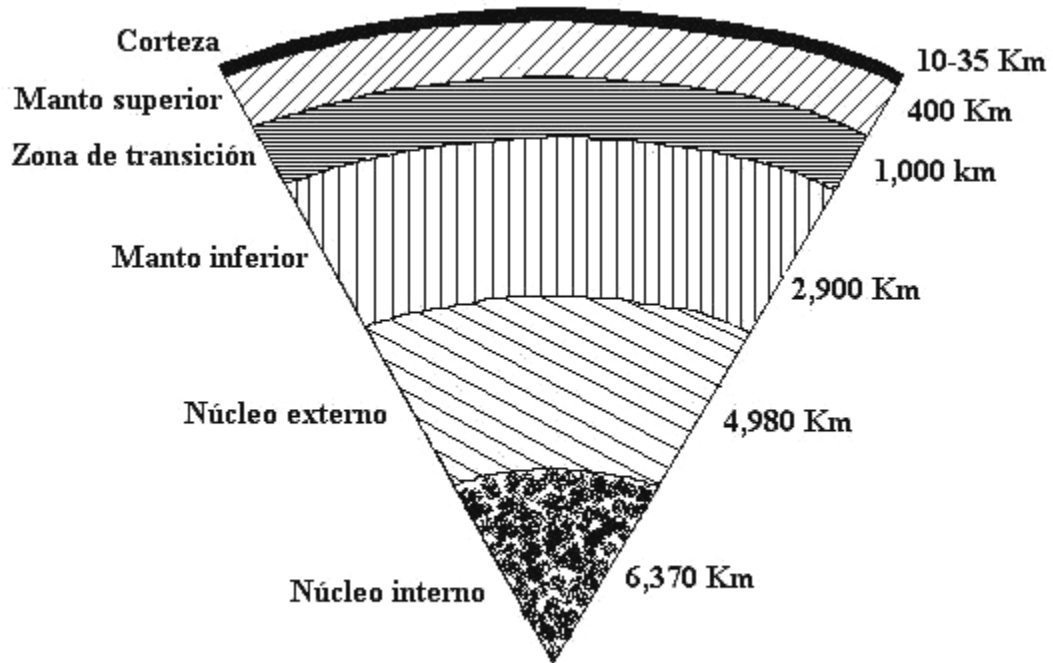
En términos generales se consideran recursos geotérmicos las fuentes de calor terrestre que pueden ser recuperadas y explotadas por el hombre.

Los recursos geotérmicos pueden ser: vapor, agua caliente, rocas secas calientes, rocas geopresionadas, es decir rocas porosas que contienen una mezcla de agua y gases a elevada presión y temperatura y rocas fundidas (magma). Por razones económicas los fluidos con temperaturas inferiores a 150°C se destinan a usos térmicos directos y cuando la temperatura es superior a la producción de energía eléctrica.

1.2 Origen de los sistemas geotermiales

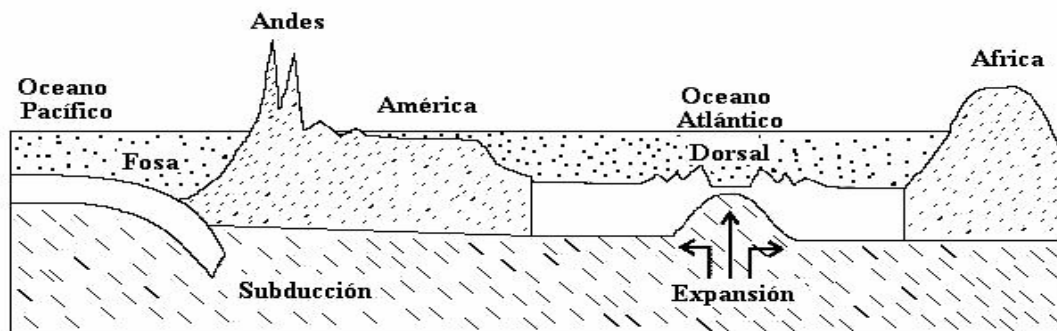
La tierra esta formada por capas: la más externa llamada “corteza terrestre” tiene un grosor de 35 Km, la siguiente de afuera hacia dentro es la capa llamada “manto” que se divide en las sub-capas: manto superior, zona de transición y manto inferior, teniendo un grosor de 2,900Km. La última capa llamada “núcleo” se supone de naturaleza metálica y se divide en las subcapas: núcleo externo y núcleo interno. Ver fig. 1.

Figura 1. Capas que componen la tierra



La tierra sufre cambios continuamente con el tiempo, los continentes están en constante movimiento debido a la constante expansión del suelo oceánico. En el fenómeno de expansión del suelo oceánico se da lugar a dos estructuras: las dorsales oceánicas y las fosas abisales, fig. 2:

Figura 2. Dorsales oceánicas y fosas abisales



Las dorsales oceánicas se forman por la subida de material fundido que proviene del manto, el material fundido llega a la superficie del suelo oceánico por medio de una fosa que hace la conexión entre el manto y la superficie misma, son grandes movimientos de materia volcánica llamados corrientes de convección originados por la variación de sus densidades con las altas temperaturas, también por el decaimiento de ciertos elementos en el interior de la tierra que libera energía. El continuo flujo de material volcánico que llega a la superficie crea cordilleras submarinas que llegan a extenderse por más de 50,000Km de longitud haciendo de esta manera que la corteza oceánica se expanda, y esta expansión es la que empuja a los grandes continentes. Además las dorsales oceánicas aparecen cortadas transversalmente por grandes fallas denominadas de transformación, que dividen a las grandes cordilleras en segmentos uno tras otro, separados entre sí. El conocimiento de estos fenómenos dio origen a la formulación de la teoría “Tectónica de Placas” o “Tectónica Global” la cual dice que la corteza terrestre en conjunto con el manto superior está formado por fragmentos de esfera llamados “Placas” que están movimiento continuo. Los límites de estas placas son las dorsales oceánicas, las fosas abisales y las fallas de transformación, existiendo seis grandes placas: Pacífica, Norteamericana, Eurasiática, Africana, Sudamericana e Indo australiana. Es en los bordes de estas placas en donde se producen los principales procesos geológicos: se forman los sistemas montañosos, terremotos, fenómenos volcánicos y allí están las principales áreas geotérmicas del mundo.

Las fosas abisales son los lugares en donde dos placas chocan hundiéndose una debajo de la otra y reabsorbiéndose en el manto, estas zonas son de poco ancho y gran longitud, su profundidad puede superar los 6000metros denominándoles “Zonas de Subducción”. Y las fallas de transformación son los lugares donde las placas se rozan unas a lo largo de otras.

1.3 Flujo de calor y gradiente geotérmico

Se ha encontrado que la temperatura de la corteza terrestre aumenta con la profundidad; decimos entonces que existe un número de grados centígrados en que se aumenta la temperatura conforme se incrementa la profundidad, a esto se le denomina el Gradiente Geotérmico, su valor promedio es de 3°C por cada 100m de profundidad que avanzamos. El gradiente geotérmico puede variar por los siguientes factores: espesor de la corteza terrestre, por presencia de material magmático, por los sistemas de fallas, o por sistemas de agua subterránea que pueden transportar el calor terrestre en dirección vertical. Otros factores pueden ser la conductividad térmica de las rocas, la reacción química de las rocas y sus elementos radioactivos en las mismas.

Flujo de Calor: Esta definido como el producto del gradiente geotérmico por la conductividad térmica de la roca. Este se mide en forma perpendicular a la superficie de la tierra y tiene un valor medio de 1.5 milicalorias por centímetro cuadrado cada segundo ($mCal / cm^2s$) ó 63 milivatios por metro cuadrado (mW / m^2):

$$Q = -K \frac{\partial T}{\partial Z} = K \cdot G$$

Esta ecuación es válida para un medio impermeable, donde la transferencia de calor a la superficie se efectúa por conducción, donde:

Q = Flujo de calor ($mCal / cm^2s$ ó mW / m^2)

K = Conductividad térmica de las rocas (mcal/cm seg °C ó W/m °C)

G = Gradiente geotérmico (°C/cm ó °C/m)

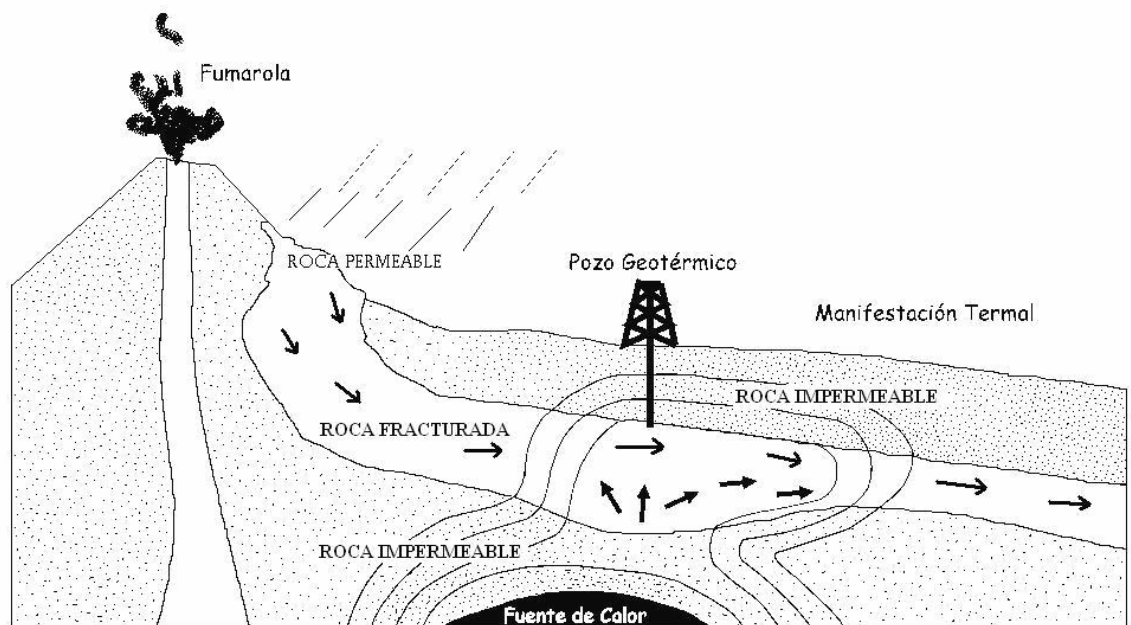
T = Temperatura °C

Z = Profundidad en metros.

1.4 Campos geotérmicos

Los campos geotérmicos son los lugares en los cuales existe un flujo de calor anormal es decir; tienen un gradiente geotérmico mucho mayor al normal. Este calentamiento anormal calienta el agua contenida en estratos de rocas permeables las cuales están cubiertas por un manto formado de rocas impermeables que impiden el escape del fluido caliente. Ver fig. 3.

Figura 3. Modelo de campo geotérmico



Existen también campos geotérmicos en los cuales el flujo de calor es normal, pero se justifican como campos geotérmicos por el hecho de poseer grandes cantidades de agua caliente con temperatura inferior a los 100°C y que es aprovechada directamente para usos de industria y no para usos eléctricos.

La fuente de calor de los sistemas geotermales generalmente la constituye una cámara de masa magmática a una temperatura de 600°C a 900°C ubicada entre los 7 y 15 Km de profundidad. La cámara de masa magmática es originada por la subida de magma desde el centro de la tierra a través de fracturas en las capas terrestres quedando atrapada en la corteza terrestre como una intrusión magmática, esto sin producir fenómenos volcánicos. Cuando la subida de magma desde el centro de la tierra a través de las fracturas en las capas terrestres es en forma rápida y directa hacia la superficie se forman basaltos, andesitas y rocas similares produciendo una gran dispersión de calor, por lo cual no se pueden formar sistemas geotérmicos para ser explotados. Este es un tipo de fenómeno volcánico que es propio de los sistemas de dorsales oceánicas.

1.4.1 Reservorio geotérmico

Se le denomina reservorio geotérmico a las formaciones de roca con alta permeabilidad que contenga un volumen de agua con una cantidad de flujo de calor que asegure su explotación comercial. El agua contenida en el reservorio generalmente es de origen meteórico, es decir; el reservorio geotérmico se recarga con las aguas meteóricas, manteniéndose parcialmente el balance hidrológico ya que puede existir una remoción natural de fluido caliente en manantiales termales. Sobre el reservorio existe una capa rocosa de muy baja permeabilidad o muy alta impermeabilidad que se origina por la misma actividad hidrotermal, las rocas se llenan de minerales y productos que tapan los poros y fracturas de las rocas mismas. Este tipo de rocas ayuda a que no se escape el flujo de calor contenido en las rocas permeables.

1.4.2 Manifestaciones superficiales:

Una manifestación Superficial de campo geotérmico se da cuando la capa rocosa impermeable que cubre el reservorio geotérmico permite que el fluido caliente escape hacia la superficie, ya sea en forma de agua, vapor, o ambos, dependiendo de su estado físico y químico del fluido mismo, presentándose en: fuentes termales, o géiseres.

Las fuentes termales son emanaciones de agua, vapor de agua que contienen una mezcla de gases a alta temperatura: hidrógeno, metano, sulfuro de hidrógeno, anhídrido carbónico, etc.

Los géiseres son proyecciones violentas de agua freática hacia el exterior de la corteza terrestre por medio de grietas o fisuras profundas que se llenan de agua, que al entrar en ebullición por las altas temperaturas la presión misma hace que el agua busque un camino por donde liberarse. Una vez expulsada el agua de la grieta o fisura ésta se vuelve a llenar y se reinicia el ciclo.

Las fumarolas son de origen volcánico, presentándose en lugares donde hay volcanes activos. Éstas son emanaciones de vapor de agua y gases como: ácido clorhídrico, anhídrido carbónico y compuestos sulfurados. Cuando predominan los compuestos sulfurados se denominan solfataras y producen depósitos de azufre; Y en las que el mayor componente es el anhídrido carbónico se llaman mofetas.

La existencia de vapor y gases en la superficie terrestre son un indicio de la posible existencia de un campo geotérmico, no obstante, existen campos geotérmicos en los que no hay manifestaciones termales en superficie.

1.5 Sistemas geotérmicos

Según el mecanismo de transferencia de calor los sistemas geotermales se pueden clasificar en:

1.5.1 Sistemas geotérmicos convectivos

En estos sistemas el calor es transferido por convección, y se dividen en:

1. Sistemas hidrotermales: en estos sistemas existe una circulación de agua subterránea que se le transfiere calor proporcionado por una intrusión magmática.
2. Sistemas de circulación: en estos sistemas existe una circulación de agua subterránea hacia áreas muy profundas en las cuales el flujo de calor es mayor, proporcionando de calor al agua.

1.5.2 Sistemas geotérmicos conductivos

En estos sistemas la transferencia de calor es por conducción, y se dividen en:

1. Acuíferos profundos en lechos sedimentarios.
2. Roca seca caliente: La formación de roca es impermeable y el agua debe introducirse a través de fracturas producidas artificialmente, para obtener el flujo de calor de las rocas calientes.

Los sistemas hidrotermales, en función de las características del fluido producido se dividen en:

1. Campos que producen agua caliente

En estos campos el agua del reservorio tiene una temperatura entre 60-100°C. Y pueden encontrarse en áreas de calor normal o superior al normal. Para su explotación comercial la profundidad del reservorio no debe superar los 2,000 metros, utilizándose el fluido con fines agrícolas e industriales, así como para calefacción y suministro de agua caliente.

2. Campos que producen vapor húmedo

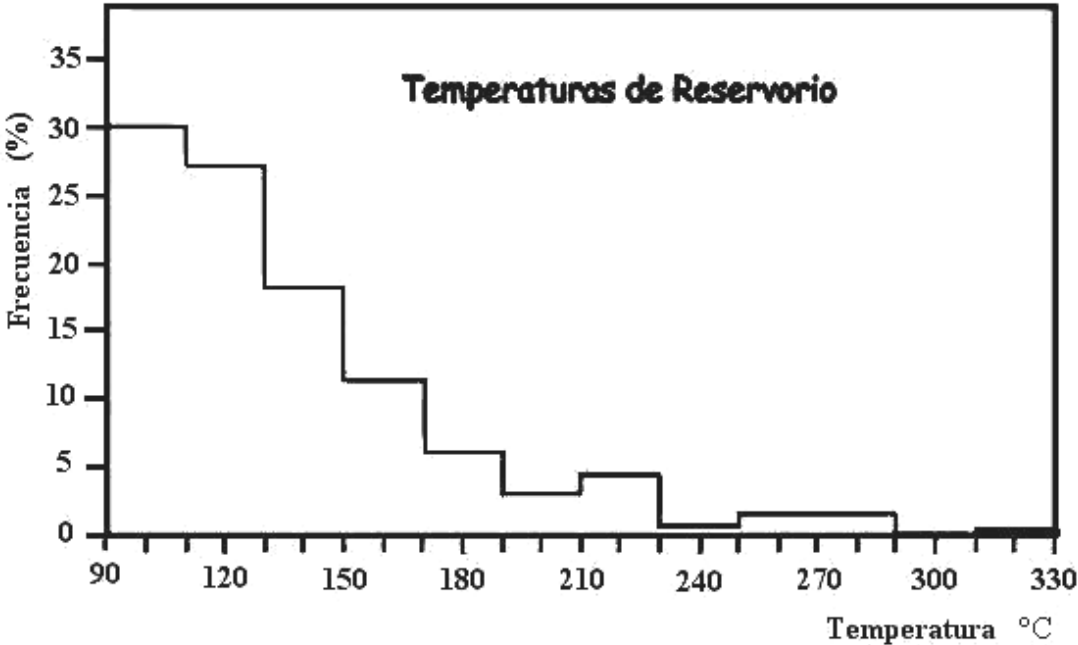
En estos campos el reservorio contiene agua a una temperatura mayor a los 100°C y una cantidad pequeña de vapor. En el proceso de extracción la presión del líquido disminuye y por lo tanto, se origina una vaporización de agua, obteniéndose una mezcla de agua y vapor. La principal utilización de esta mezcla de vapor y agua es la de generación eléctrica y utilización directa del agua caliente. Estos campos son denominados de "líquido dominante".

3. Campos que producen vapor sobrecalentado

Estos campos proporcionan vapor seco caliente con una cantidad alta de gases incondensables, este vapor es utilizado directamente para la generación de energía eléctrica. Estos campos son denominados de "vapor-dominante".

En general, la probabilidad de encontrar un reservorio geotérmico de alta temperatura es una función inversa de la misma temperatura. Los reservorios que contienen temperaturas comprendidas entre 90 y 110°C que son los de menor temperatura son los que se encuentran con mayor frecuencia. En la figura 4 se representa la frecuencia en que se encuentran los reservorios en relación a su temperatura.

Figura 4. Gráfica de frecuencia de temperaturas de reservorio



Fuente: J.L. Sierra, G. Pedro. *Energía Geotérmica*. Pág. 13

2. EXPLORACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

2.1 Introducción

La exploración de recursos geotérmicos son las actividades que se realizan con el propósito de descubrir y caracterizar un recurso geotérmico y evaluar su capacidad de explotación para determinar si se cuenta con un proyecto rentable económicamente.

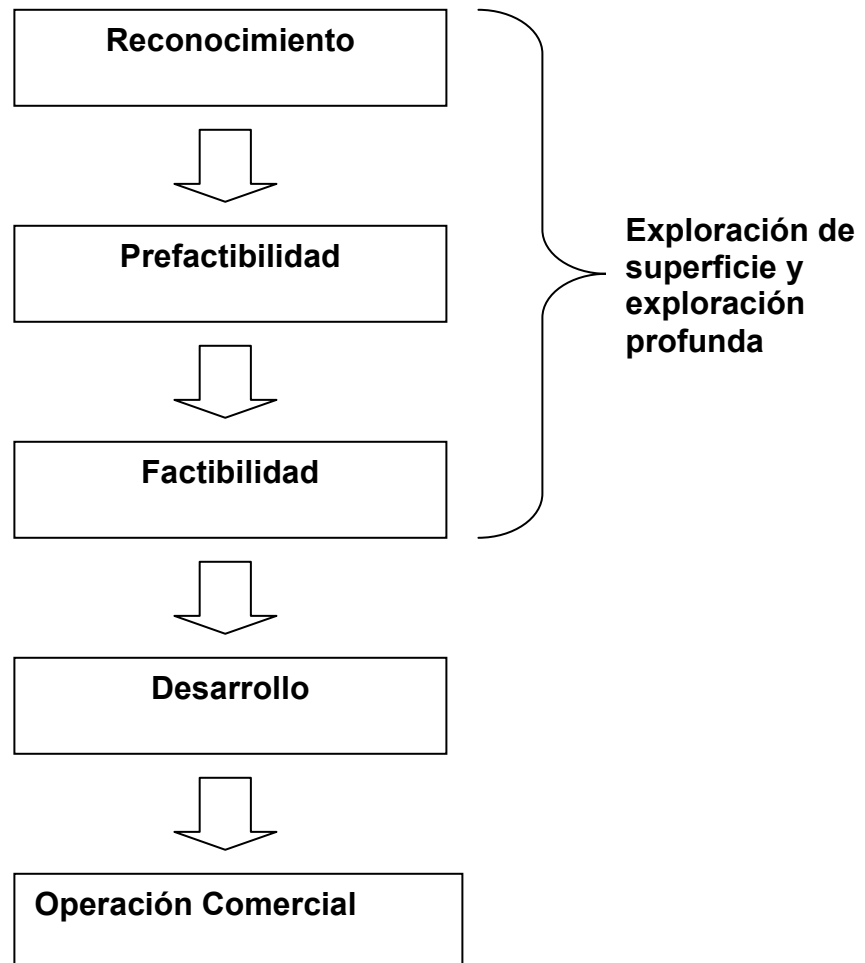
En la exploración geotérmica se utilizan varias metodologías de las geociencias (geología, geoquímica y geofísica) y las tecnologías de perforación. Varios de estos métodos son comunes con otros sectores de la exploración de recursos naturales mientras que otros, como la geoquímica de aguas y gases termales y ciertas prácticas de perforación han sido desarrolladas específicamente para el sector geotérmico.

Los resultados de la fase de exploración deben de proporcionar todos los elementos para evaluar la viabilidad de la explotación del recurso geotérmico en términos comercialmente rentables.

2.2 Etapas de un proyecto geotérmico

Las etapas que componen un proyecto geotérmico completo propuesto por la OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) se muestran en el siguiente cuadro de la figura 5:

Figura 5. Cuadro de las etapas que componen un proyecto geotérmico



La etapa de exploración de superficie y exploración profunda tienen como objetivos: Definir las perspectivas de existencia de recursos geotérmicos e identificar las áreas de mayor interés. Reconstruir un modelo del recurso por integración de datos neocientíficos y ubicar pozos de exploración profunda. Confirmar la existencia del recurso, definir sus características y los aspectos técnico-económicos de su explotación.

2.2.1 Exploración de superficie

Como hemos visto, los fenómenos geotérmicos se caracterizan por manifestaciones termales en superficie y por provocar cambios en las condiciones petrofísicas del subsuelo relacionadas con alteración hidrotermal y zonas de roca permeable fracturada que contienen fluidos calientes y salinos.

Estas características pueden ser investigadas con metodologías geológicas, geoquímicas y geofísicas. El objetivo de los métodos de estudio de superficie en las primeras etapas de exploración es el de identificar la existencia de los siguientes aspectos fundamentales:

1. Fuente de calor
2. Condiciones geológico-estructurales y geofísicas favorables para la existencia del conjunto reservorio-capa sello
3. Presencia de fluido geotérmico en el subsuelo

2.2.1.1 Aspectos relevantes en la exploración de superficie

Los fluidos geotérmicos, ya sean gases, agua o ambos pueden ser identificados aún cuando no emerjan hacia la superficie debido a su composición química e isotópica. Permitiendo además calcular la temperatura en la que se logro enlace químico entre agua y roca del reservorio.

Con el objetivo de delimitar áreas mayormente favorecidas para el desarrollo de reservorios la exploración de superficie utiliza como herramienta, el estudio de la deformación tectónica y sus relaciones con la estratigrafía.

Dependiendo de la temperatura en una alteración hidrotermal, ésta provoca cambios en las rocas: resistividad, densidad, magnetización y velocidad de propagación de ondas sísmicas:

- A temperaturas menores a los 200°C se forman abundantes minerales arcillosos que producen un aumento de conductividad eléctrica de la roca o una pérdida de magnetización por destrucción de minerales magnéticos.

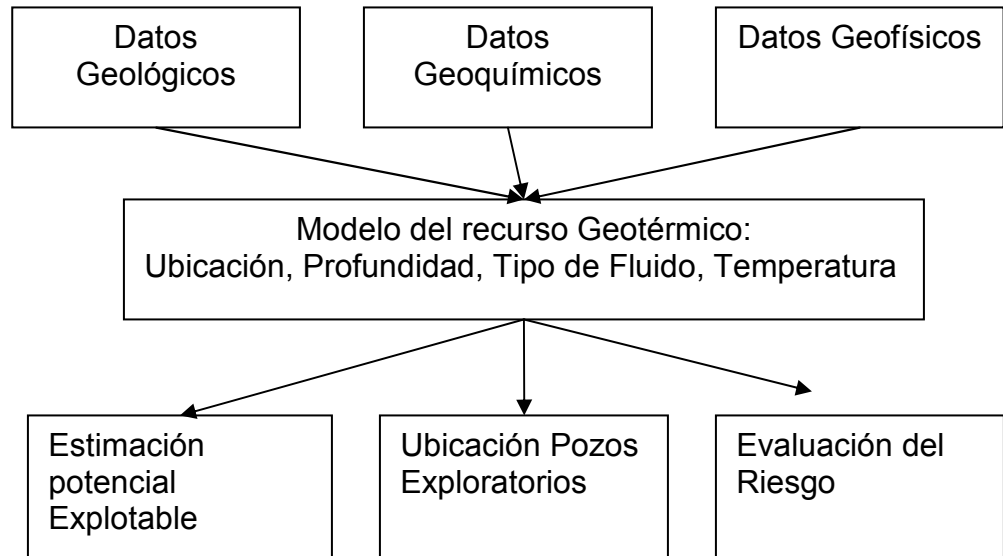
- A temperaturas mayores a los 230°C la alteración hidrotermal produce un aumento de la densidad y una reducción de la conductividad eléctrica.

En las zonas de roca fracturada que contienen agua geotérmica caliente y salina causan una reducción en la densidad de la masa rocosa y también pueden causar un aumento en la conductividad eléctrica. Pero la experiencia ha demostrado que la conductividad causada por la presencia de agua geotérmica en las rocas fracturadas no logra prevalecer sobre la conductividad propia de la masa rocosa. Se conocen pocos casos en donde la conductividad este controlada por el fluido geotérmico.

2.2.2 Interpretación integrada y modelación del recurso geotérmico

La interpretación integrada de datos procedentes de diferentes disciplinas permiten llegar a una evaluación confiable de la exploración de superficie. El cuadro en la figura 6 explica este proceso:

Figura 6. Interpretación integrada de la exploración de recurso geotérmico



2.2.3 Exploración profunda

2.2.3.1 Perforación exploratoria

La perforación exploratoria se lleva a cabo una vez que los resultados de la exploración de superficie sean satisfactorios y que se cumplan los siguientes requisitos:

1. Que el modelo geotérmico integrado obtenido en la fase de exploración de superficie sea coherente y consistente.
2. Que el potencial del recurso geotérmico sea económicamente atractivo.
3. Que no exista riesgo técnico a la hora de hacer la exploración por perforación, o al menos que sea aceptable.

Los principales objetivos de la perforación exploratoria son los siguientes:

1. Comprobar la existencia del recurso y sus características: temperatura, tipo de fluido, contenido de gases, etc.
2. Establecer la profundidad y características del reservorio.
3. Comprobar y ajustar el modelo geotérmico obtenido al final de la fase de exploración de superficie.
4. Delimitar la zona comercialmente productiva, identificando los sectores más adecuados para la producción de vapor y la reinyección de aguas residuales.

2.2.3.2 Confirmación del recurso:

Pozos de confirmación: son los primeros dos o tres pozos perforados en un campo, con el objetivo de confirmar existencia del recurso geotérmico. Estos se perforan en el sector que tenga mayor perspectiva.

2.2.3.3 Delineación del recurso geotérmico

- Pozos de delineación “Clásicos”: Estos pozos son perforados una vez que los primeros hayan confirmado la existencia de un recurso de interés y dirigidos a explorar sectores periféricos del reservorio geotérmico
- Pozos de delineación tipo “*Step-out*”: Estos pozos son perforados para explorar la zona del recurso cuando el modelo geotérmico disponible no es suficientemente claro y se considere oportuno implementar una estrategia de delineación mediante perforaciones en sectores progresivamente más alejados del núcleo del recurso.

Las etapas en las que se divide la etapa de exploración de superficie y exploración profunda son:

2.2.4 Estudio de reconocimiento

Se lleva a cabo en una región cuya extensión puede variar entre 10,000 y 100,000 Km^2 , con el objetivo de evaluar las posibilidades geotérmicas a nivel regional, seleccionar áreas más pequeñas de mayor interés y planificar las etapas siguientes de exploración. En esta etapa se realiza:

- La recopilación y evaluación de toda la información existente, esto es, geología regional, mapas geológicos y topográficos, fotografías aéreas e imágenes de satélite, datos geofísicos, meteorológicos, hidrológicos e información sobre manifestaciones termales.
- El reconocimiento de campo, que incluye la toma de muestras, tanto de rocas como de aguas, para su posterior análisis.

2.2.5 Estudio de prefactibilidad

El estudio de prefactibilidad abarca un área entre 500 y 2,000 Km^2 . En esta fase se pretende lograr una evaluación preliminar del recurso y, eventualmente, ubicar los sitios para la perforación de pozos exploratorios profundos. Los estudios geológicos, hidrogeológicos y geoquímicos se orientan a la determinación de la presencia y origen de la anomalía térmica, las características del reservorio y de la formación rocosa superior.

2.2.6 Estudio de factibilidad

El objetivo del estudio de factibilidad es la delimitación del campo geotérmico, la estimación de las reservas explotables, el estudio de los fluidos geotérmicos y sus usos posibles.

En esta etapa se realizan los primeros pozos exploratorios, estudios del reservorio, estudios económicos y diseño de planta piloto. La extensión del área de estudio se halla entre 10 y 100 Km^2 .

3. MÉTODOS ELÉCTRICOS DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

3.1 Introducción

Los métodos más eficientes en lo que a exploración geotérmica respecta son los que utilizan la medición de la resistividad del subsuelo. La resistividad del subsuelo es directamente proporcional a las características que son de interés en un reservorio: salinidad, temperatura, alteración y porosidad (permeabilidad).

La resistividad específica “ ρ ” es definida por la ley de Ohm. La magnitud del campo eléctrico, \mathbf{E} [v/m] en un punto en un material es proporcional a la densidad de corriente, \mathbf{j} [A/m²]:

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{j}$$

La constante ρ depende del material en el cual se está trabajando, sus dimensionales son el Ohm-metro [Ωm] y es el recíproco de la conductividad ($1/\rho = \sigma$). La resistividad del material también puede ser definida como la razón de la diferencia de potencial (Δv) con la corriente (I) que atraviesa una sección transversal de un metro cuadrado por un metro de largo.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I}$$

La conducción eléctrica en las rocas subterráneas es llevada a cabo por el movimiento de electrones e iones a través de minerales y soluciones contenidos en los poros de las rocas.

El principio en común de todos los métodos de sondeo de resistividad es el de inducir una corriente eléctrica en la tierra para luego monitorear las señales que se generan por la distribución de corriente. El método de sondeo Schlumberger utiliza una corriente inyectada dentro de la tierra por medio de electrodos, y la señal medida es el campo eléctrico (diferencia de potencial sobre una distancia corta) generado en la superficie. En los métodos magneto-telúricos (MT) la corriente en la tierra es inducida por cambios en el tiempo del campo magnético propio de la tierra, y la señal medida es el campo eléctrico en la superficie. En los métodos de trascientes electro-magnéticas (TEM) la corriente es también inducida por variaciones de campo magnético, pero en este caso el campo magnético no es el natural de la tierra, éste es generado por un dipolo y la señal medida es el decaimiento del campo magnético en la superficie.

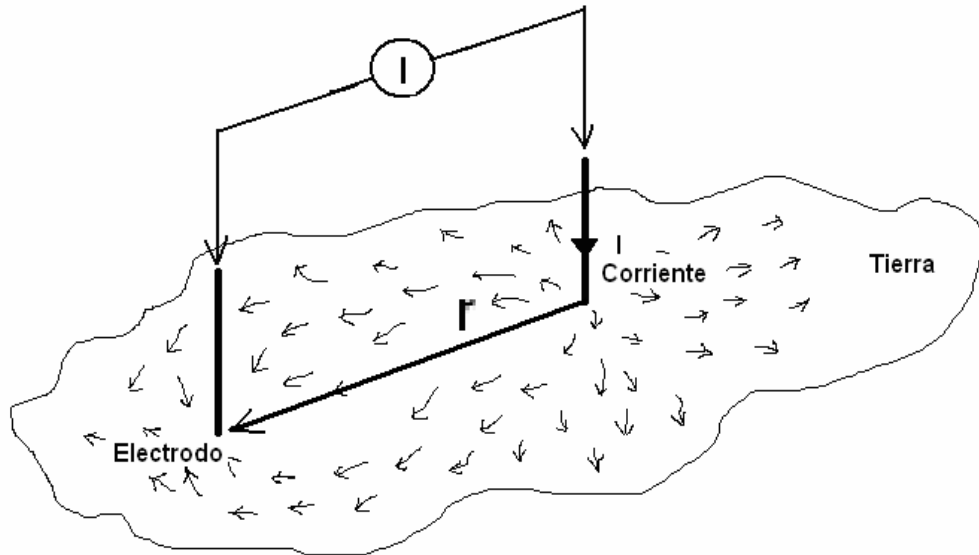
3.2 Métodos dc

3.2.1 Introducción

La base del funcionamiento de los métodos DC es introducir una corriente “I” en tierra homogénea que posee resistividad “ ρ ” por medio de una fuente de corriente a través de un electrodo enterrado en la tierra. Entonces el potencial $v(r)$, medido a una distancia “r” de la fuente de corriente, esta determinado por la ecuación:

$$V (r) = \frac{I \rho}{2 \pi r}$$

Figura 7. Método dc



Teniendo los valores medidos de voltaje a una distancia “r” y conociendo el valor de la corriente que esta suministrando la fuente de corriente podemos despejar la resistividad de la ecuación anterior y obtener la resistividad del terreno:

$$\rho = K * \frac{V}{I} \quad K = \text{factor geométrico}$$

Si la corriente es introducida por dos electrodos +I a una distancia r1 y -I a una distancia r2, entonces tenemos:

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi} (1/r1 - 1/r2) \quad \rho = K * \frac{V}{I} \quad K = \text{factor geométrico}$$

Sí la tierra no es homogénea, una resistividad aparente “ ρ_a ” se calcula a partir de los valores V, I, r_1 y r_2 como si ésta fuera homogénea. La ecuación es válida para calcular la resistividad de tierra homogénea y tierra no homogénea.

Los métodos de pueden ser divididos en varias sub-categorías dependiendo del arreglo de electrodos utilizado para introducir la corriente en la tierra como para medición, los métodos más utilizados en exploración geotérmica son:

- Método de sondeo Schlumberger
- *Head-on*

En los cuales existen dos tipos de medición de resistividad:

Sondeo geoelectrico: Las mediciones se hacen en un punto fijo específico de estudio para diferentes distancias entre el electrodo que induce la corriente en la tierra y el punto de importancia. Este tipo de medición es utilizado para medir los cambios de la resistividad con respecto a la profundidad en el punto específico de estudio.

Contorno geoelectrico: El arreglo de electrodos es el mismo que en el sondeo geoelectrico, pero en este caso las mediciones se hacen en varios puntos contenidos en un área de estudio. El electrodo que induce corriente se va colocando en el contorno del área mientras una medición se hace. Este tipo de medición se hace con el fin de encontrar cambios laterales en resistividad y localizar estructuras resistivas verticales.

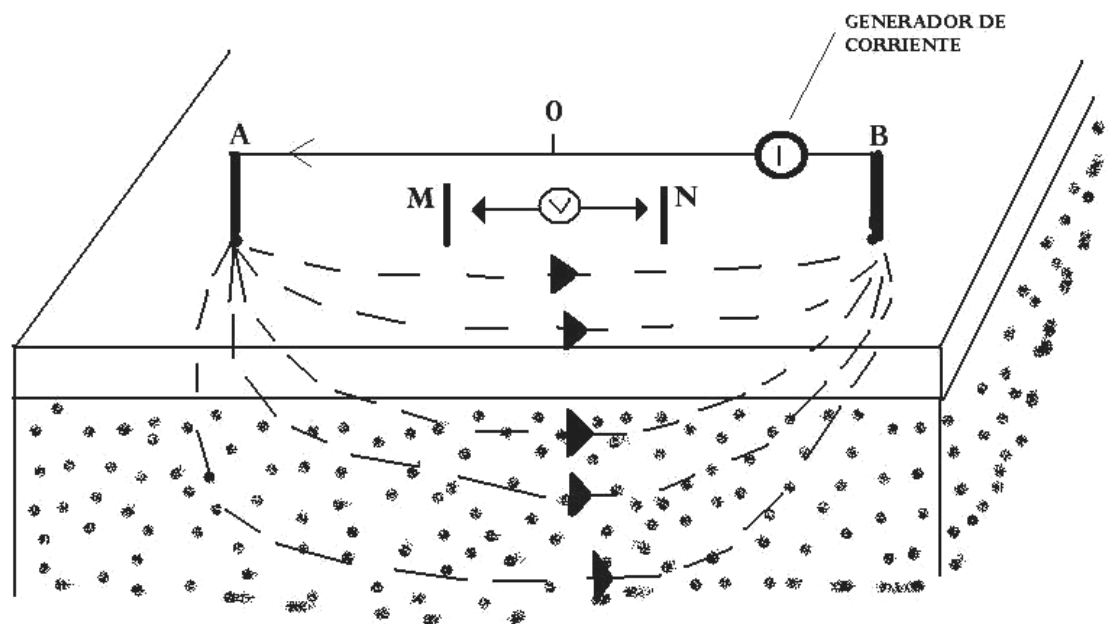
Instrumentos: los instrumentos utilizados para los métodos de típicamente consisten en un transmisor de corriente con una salida de aproximadamente 100 a 500 w y un voltaje máximo de 1,000 v con un receptor que es básicamente un Voltímetro.

El receptor puede tener una impedancia de entrada del orden de los $10^6 \Omega$ y sensibilidad del orden de $1 \mu v$.

3.2.2 Método de sondeo Schlumberger

En el método de sondeo schlumberger se utiliza un arreglo de cuatro electrodos ubicados en una línea recta, dos electrodos de potencial y dos electrodos de corriente. La ubicación de los electrodos es simétrica al punto medio "O" sobre la línea recta como se muestra en la figura 8:

Figura 8. Método de sondeo schlumberger



Los electrodos de corriente están ubicados en las posiciones A y B, mientras que los electrodos de potencial están ubicados en las posiciones M y N. Las distancias están dadas como: $AO = OB = S$ y $MO = ON = P$.

Una corriente I es inyectada dentro de la tierra por el electrodo A, cerrando circuito en el electrodo B. La corriente tiene la forma de la figura 9:

Figura 9. Corriente transmitida del método Schlumberger

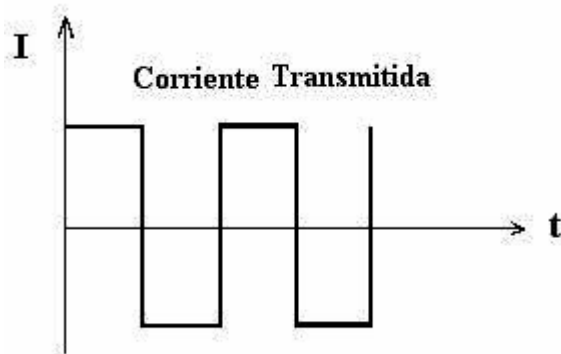
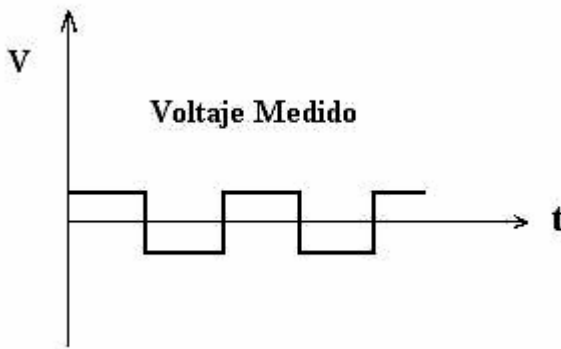


Figura 10. Voltaje medido del método schlumberger



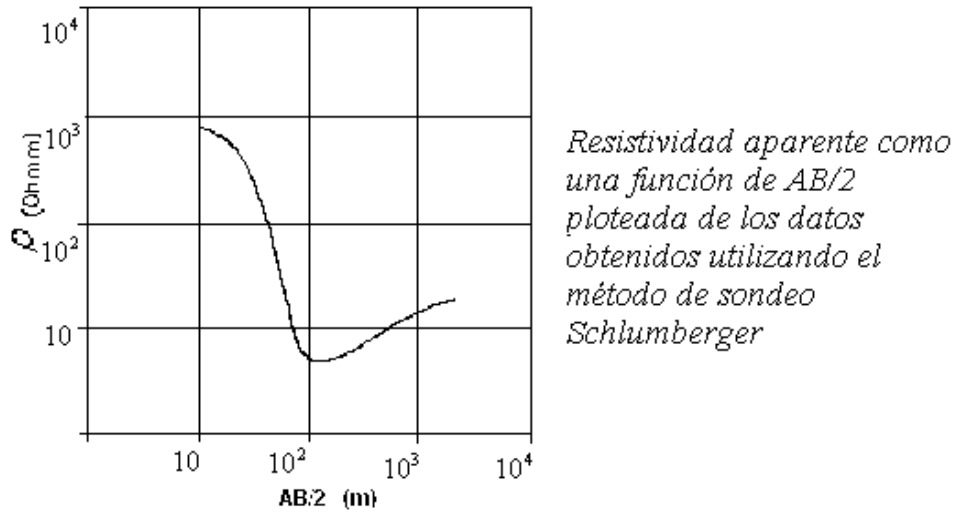
La diferencia de potencial resultante ΔV entre los electrodos M y N, y los valores medidos de I , S y P son utilizados para calcular la resistividad aparente ρ_a :

$$\rho_a = \frac{\pi S^2 - P^2}{2P} \frac{\Delta V}{I}$$

La profundidad a la que penetra la corriente incrementa con la separación de los electrodos A y B. Entonces, para obtener la resistividad a grandes profundidades es necesario incrementar la distancia A-B pero dejando fija la distancia entre los electrodos de potencial.

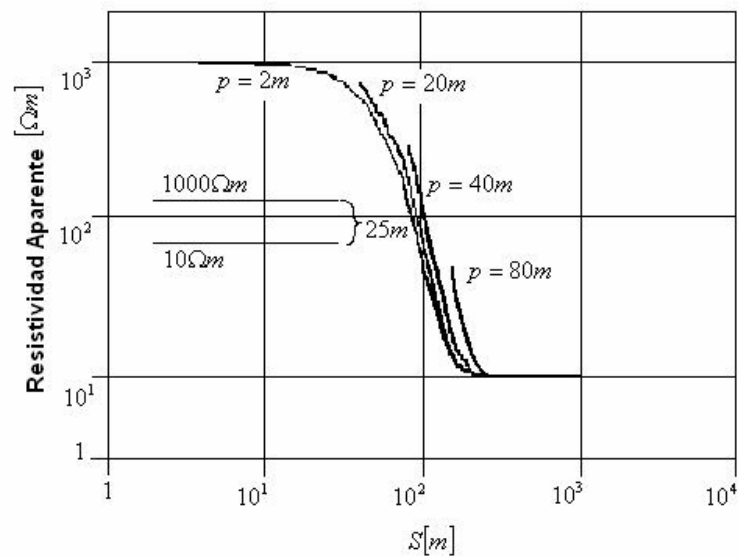
La resistividad aparente es ploteada sobre un papel logarítmico como una función del incremento de “S”, donde $S = AB/2$ (ver figura 11). A como S se incrementa la diferencia de potencial ΔV se decrementa. En el caso en que ΔV se decrementa mucho es necesario incrementar P para incrementar ΔV . A causa de esto la curva ploteada esta compuesta por segmentos, uno para cada valor diferente de P (ver figura 12). Esto sucede frecuentemente porque los segmentos están relativamente fijos unos con otros. Las mediciones usualmente están hechas para unos pocos metros de S y entre los 1,500 y 3,000 metros. Los valores de S usualmente están distribuidos sobre una escala logarítmica, más frecuentemente 10 puntos por década.

Figura 11. Gráfica de resistividad aparente de sondeo schlumberger



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 38**

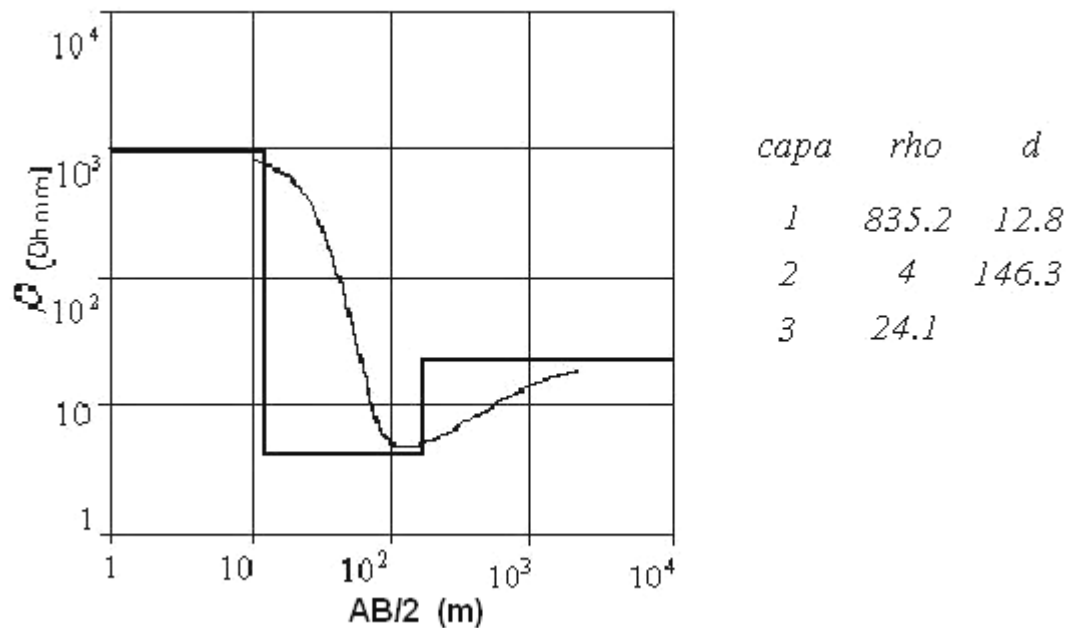
Figura 12. Gráfica de resistividad aparente de sondeo schlumberger para diferentes valores de “p”



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 38**

La curva de resistividad aparente es interpretada como la distribución de resistividad en la tierra en una sola dimensión, donde la resistividad es una función únicamente de la profundidad de la tierra, la figura 13 representa la interpretación en un modelo de 3 capas:

Figura 13. Modelo de tres capas de la distribución de resistividad en un sondeo Schlumberger

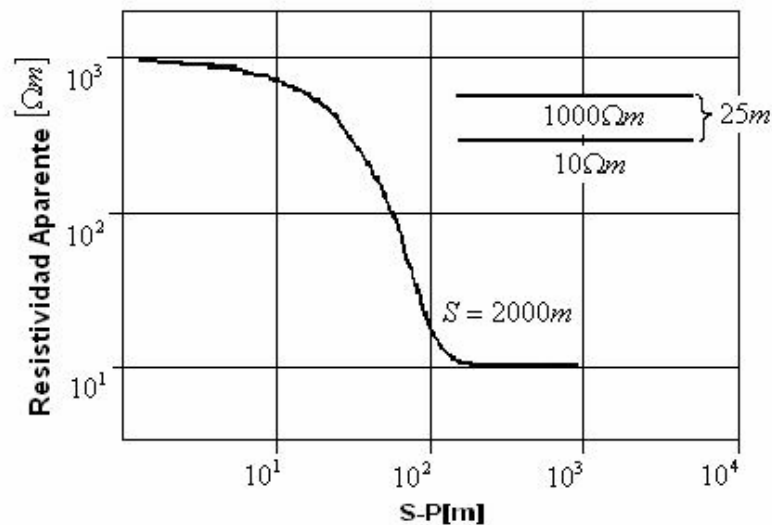


Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 38**

Como podemos ver en la figura 13 se ha modelado la resistividad aparente a tres capas consecutivas de profundidad de tierra. Esto significa que para la primera distancia $AB/2 = 12.8\text{m}$ a cierta profundidad existe una resistividad de 835.2 ohmios, para la segunda distancia de 146.3m existe una resistividad de 4 ohmios y que para una distancia mayor a los 146.3m encontramos una resistividad de 24.1 ohmios. De esta manera se puede encontrar resistividades bajas en la tierra debido a intervención geotérmica.

La profundidad de penetración de los sondeos schlumberger no solamente dependen de la distancia de los electrodos de corriente: 2S. Dependen también de la distancia entre el electrodo de corriente y el electrodo de potencial, S-P. Para el caso de un modelo de dos capas podemos ver el ejemplo de la figura 14:

Figura 14. Gráfica de resistividad aparente para un modelo de dos capas en función de S-P



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 38**

Para el mismo valor de S y diferente valor de P, diferentes valores de ρ_a reflejan diferentes resistividades a diferentes profundidades.

En el caso de un modelo de dos capas en que la diferencia S-P es de la misma magnitud o menor que la última capa, el valor medido de resistividad aparente ρ_a podría ser dominado por la resistividad de la primera capa ρ_1 , independientemente de la distancia entre los electrodos de corriente (ver figura 14).

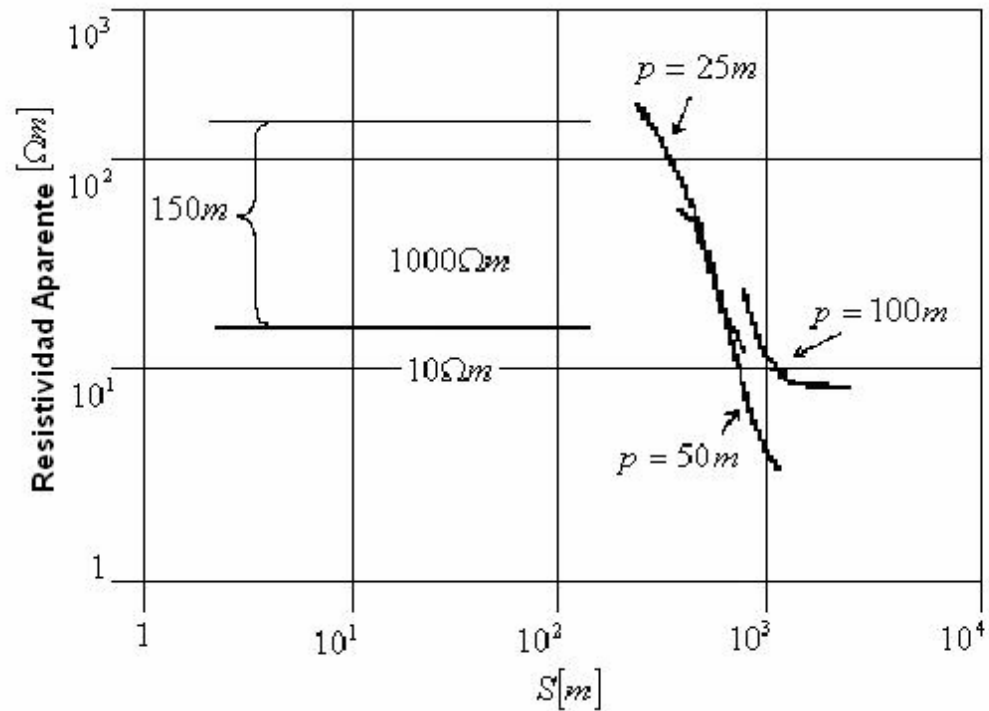
El procedimiento usual llevado a cabo en los sondeos Schlumberger es el de mantener P pequeño como sea posible. Al incremento de S, ΔV decrece, y de esto resulta necesario engrandecer P. Los cambios de S y P son reflejados en la curva de resistividad aparente ρ_a , que esta compuesta por segmentos desplazados, ver figura 12. Estas curvas desplazadas convergen a como (S-P) se hace grande, los valores más claros de resistividad medidos con el mismo valor de S, se aproximan al gradiente del lugar donde se hace la medición.

En los sondeos Schlumberger se hace necesario conocer la cantidad exacta de corriente inyectada a la tierra por los electrodos de corriente, como el potencial inducido asociado. Excepto el potencial inducido por campos eléctricos, en la medición del potencial se presentan muchas fuentes que inducen potenciales falsos: corrientes telúricas, polarizaciones instantáneas, e inducción en los conductores. Estos potenciales falsos o “ruido” pueden ser tratados a través de medios estadísticos por medio de tomar muchos valores de ΔV e I, calcular los valores erróneos por sus desviaciones. En condiciones de mayor dificultad se puede obtener el peso de todos los valores erróneos, este peso es determinado por la desviación estándar de cada valor erróneo. Haciendo esto el error aleatorio puede ser en el menor caso un promedio dado.

Otro tipo de efecto que afecta la forma de la curva de resistividad aparente es la no homogeneidad del terreno en el lugar donde se coloca el arreglo de electrodos. Esto causa desplazamientos en la curva de resistividad aparente para los diferentes valores de P. La manera de tratar estos desplazamientos es el de dejar fijo el segmento que contenga el valor de P más grande, y corregir los demás segmentos por un factor tal que emparejen con el segmento del valor de P más grande. Esto se puede hacer por la suposición de que el segmento que contiene el valor de P más grande es el menor influenciado por los efectos.

Otra manera de compensar este efecto de no homogeneidad en la resistividad aparente es el de la interpretación bidimensional la cual utiliza este método de sondeo y otro como por ejemplo el método *head-on*. Un ejemplo de esto es la figura 15:

Figura 15. Gráfica de resistividad aparente que presenta el efecto de no homogeneidad en la resistividad



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 39**

En resumen, los sondeos Schlumberger: medición e interpretación pueden ser divididos dentro de:

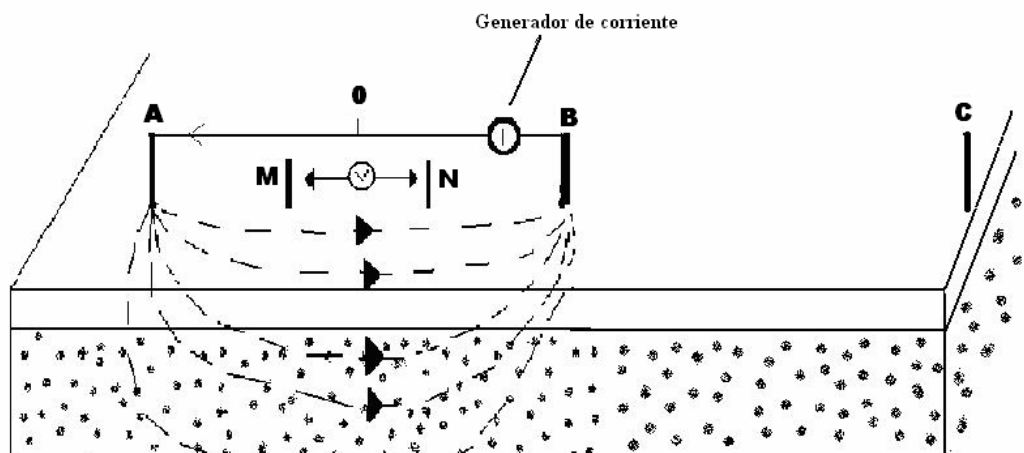
1. Mediciones de la corriente transmitida I , y la diferencia de potencial observado ΔV para incrementos de S y P .
2. Calculo de ρ_a como una función de S y P , para luego ser ploteada.

3. Interpretación unidimensional, comparación con otros sondeos y otros resultados.
4. Interpretación bidimensional tomando en cuenta la topografía del lugar y comparar con otros resultados.

3.2.3 Método *head-on*

El método de sondeo Schlumberger no puede detectar estructuras verticales de resistividad. Los fluidos geotérmicos están frecuentemente asociados con estos tipos de estructuras. En cambio el método *head-on* se ha utilizado eficientemente para localizar estas estructuras. El arreglo de electrodos que utiliza este método es similar al arreglo Schlumberger pero tiene un electrodo de corriente extra, C, localizado a una gran distancia de los electrodos A y B. Como se muestra en la figura 16:

Figura 16. Arreglo de electrodos en el método *head-on*



Una corriente I es inyectada dentro de la tierra en tres diferentes casos, cerrando los circuitos AC, BC y AB. Y el resultado de la diferencia de potencial ΔV entre M y N es medido a cada cierta cantidad de tiempo. Tres valores de resistividad son calculados:

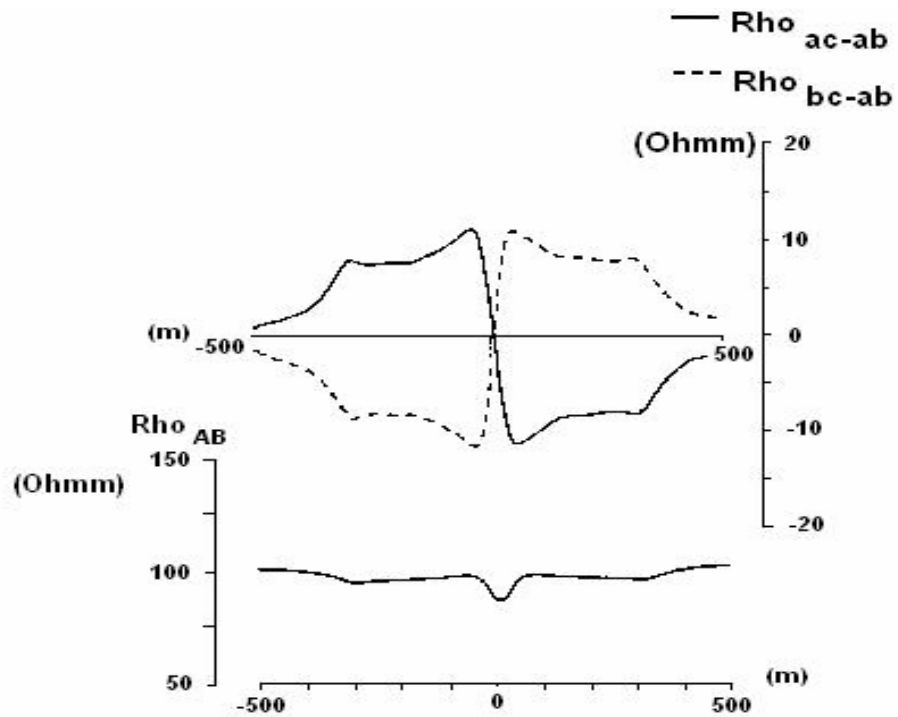
$$\rho_{ac} = \frac{\Delta V_{ac}}{I} \pi \frac{S^2 - P^2}{P}$$

$$\rho_{bc} = \frac{\Delta V_{bc}}{I} \pi \frac{S^2 - P^2}{P}$$

$$\rho_{ab} = \frac{\Delta V_{ab}}{I} \frac{\pi}{2} \frac{S^2 - P^2}{P}$$

Los cuatro electrodos AMNB son movidos cierta distancia en línea recta que es perpendicular a la estructura resistiva vertical que yace bajo ella y allí una nueva medida es hecha calculando las tres diferentes resistividades ρ_{ac} , ρ_{bc} y ρ_{ab} . Después de plotear las gráficas el procedimiento es el de extraer las resistividades aparentes medidas en AB, proveniente de las mediciones en AC y BC. Los valores $\rho_{ac} - \rho_{ab} = \rho(ac - ab)$ y $\rho_{bc} - \rho_{ab} = \rho(bc - ab)$ son calculados y ploteados junto con la curva ρ_{ab} como una función del punto central del arreglo de electrodos. Ver figura 17.

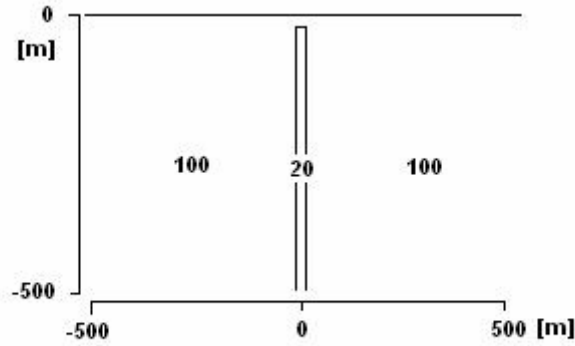
Figura 17. Gráfica de resistividades aparentes en el método *head-on*



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 45**

Si los electrodos de potencial y el electrodo de corriente A están en el mismo lugar donde existe una estructura conductiva, la resistividad $\rho(ac - ab)$ será siempre positiva, y si los electrodos de potencial y el electrodo de corriente A están en lugares opuestos donde exista una estructura conductiva, la resistividad $\rho(ac - ab)$ será siempre negativa. Ver la figura 18:

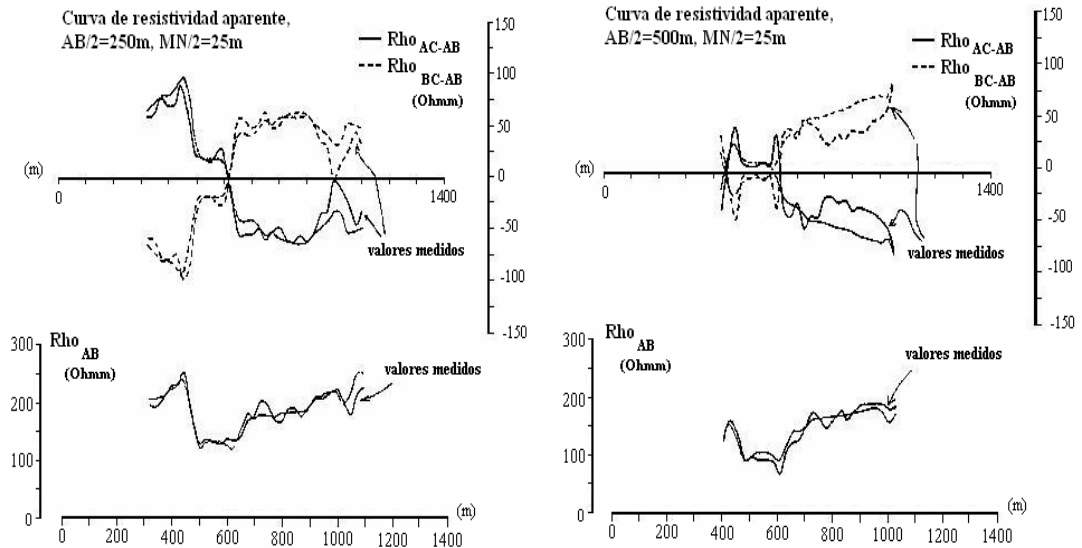
Figura 18. Método *head-on* sobre una estructura conductiva



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 45**

Como el arreglo completo es movido a lo largo de la línea recta a través de la estructura conductiva, la situación se revierte, y las curvas $\rho(ac-ab)$ y $\rho(bc-ab)$ estarán ubicadas una donde va la otra. Este cruce está por encima de la estructura vertical conductiva. Un ejemplo de la aplicación para un área de temperatura geotermal baja en Nauteyri, New-Iceland esta dada por la figura:

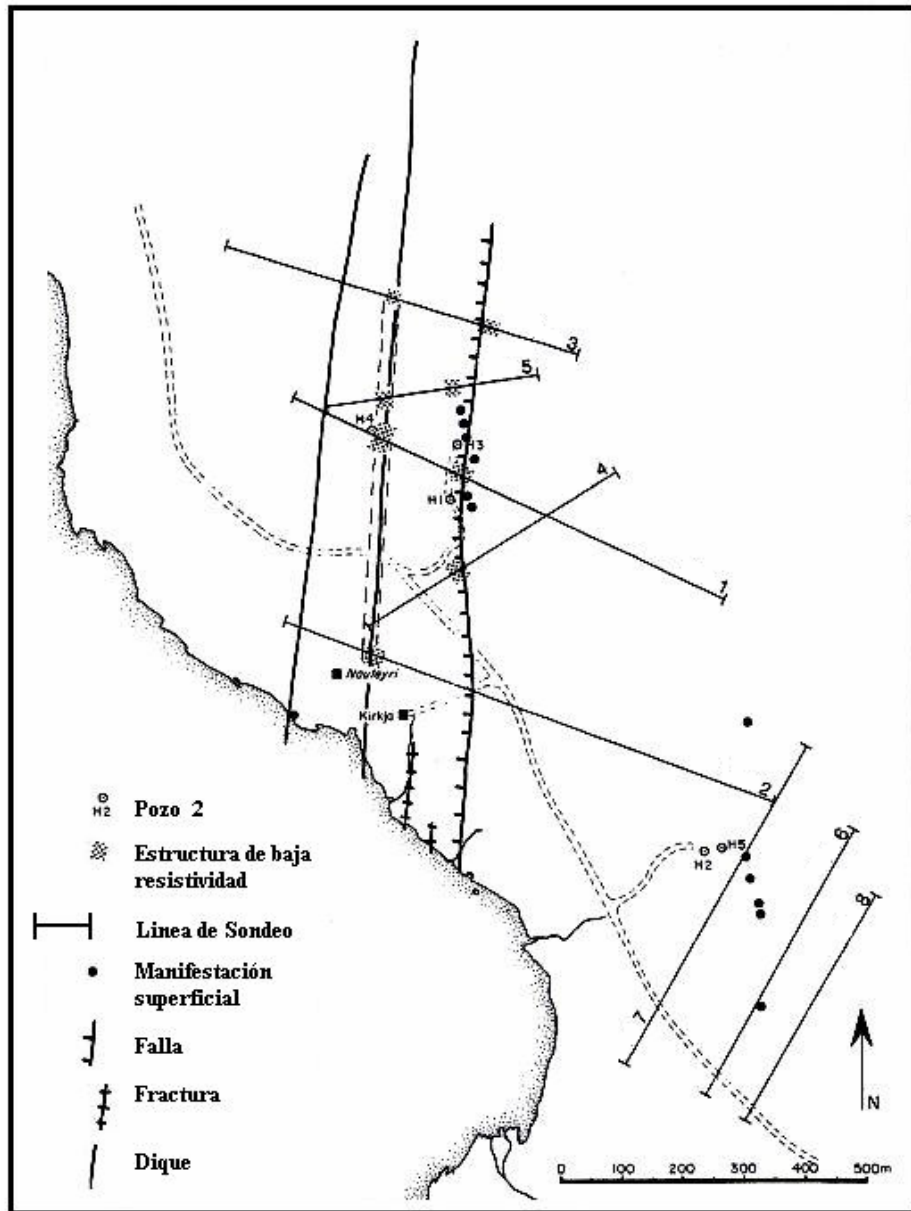
Figura 19. Curvas de resistividades aparentes en un area geotermal



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 46**

Para la interpretación de los sondeos *head-on* podemos citar los sondeos hechos en Nauteyri donde la figura 20 muestra las estructuras de baja resistividad que son reveladas (tomado de Hjartarson, 1988):

Figura 20. Interpretación gráfica de los sondeos *head-on* en nauteyri



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 48**

3.3 Métodos electro-magnéticos

3.3.1 Introducción:

Los métodos electro-magnéticos hacen uso de una corriente alterna inducida en la tierra. Esta corriente alterna puede ser inducida artificialmente, como lo es el caso TEM, o puede ser natural como lo es el método MT. Este último método no ha sido muy utilizado en exploración geotérmica. Las dos categorías de métodos electro-magnéticos tratados aquí dependen del tipo de fuente que proporciona la corriente alterna:

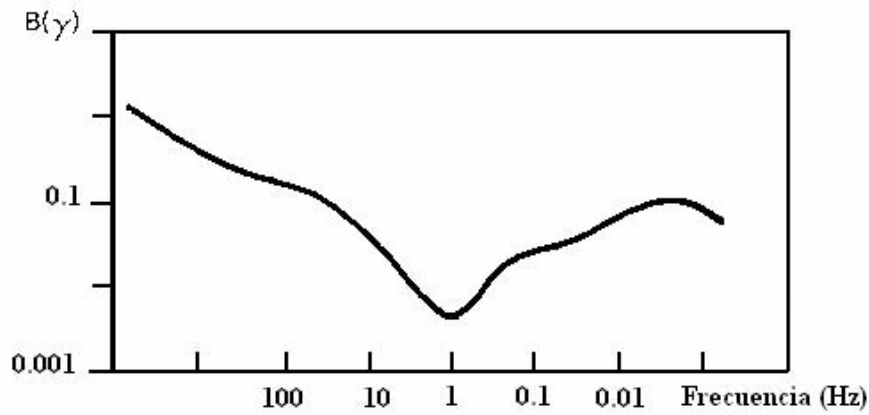
- Fuentes electromagnéticas naturales:
 - MT
 - AMT
- Fuentes artificiales controladas:
 - TEM

3.3.2 Método magneto-telúrico: MT y AMT

Se le llama método magneto-telúrico a los métodos electro-magnéticos de fuentes naturales. En el método magneto-telúrico se utiliza el campo electro-magnético natural de la tierra como fuente de energía para determinar la resistividad eléctrica de la tierra misma.

El campo electro-magnético natural de la tierra tiene un amplio espectro de frecuencias (ver figura 21):

Figura 21. Espectro de frecuencias del campo electro-magnético de la tierra



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 49**

Las bajas frecuencias en el rango de 0.0001 – 10 Hz son usadas en sondeos que van desde los 10 a los 100 Kilómetros de profundidad actualmente conocido como método magneto-telúrico (MT). Las frecuencias altas en el rango de 10 a 1,000 Hz son usadas para sondeos superficiales, actualmente conocido como método audio-magneto-telúrico (AMT).

Las bajas frecuencias son generadas por corrientes en la ionosfera causadas por interferencia del sol afectando el campo magnético natural de la tierra. Esta interferencia causa variaciones en el tiempo del campo magnético natural de la tierra llamadas micro pulsaciones. Estas micropulsaciones inducen corrientes en la tierra, llamadas corrientes telúricas, la densidad y distribución de estas corrientes depende de la estructura conductiva de la tierra.

Entonces la estructura de resistividad de la tierra puede ser estudiada por la medición simultánea de las variaciones del campo magnético, $\mathbf{B} [\gamma]$ en la superficie de la tierra y las variaciones del campo eléctrico $\mathbf{E} [V/m]$ dentro de la tierra en un cierto rango de frecuencias $w [Hz]$.

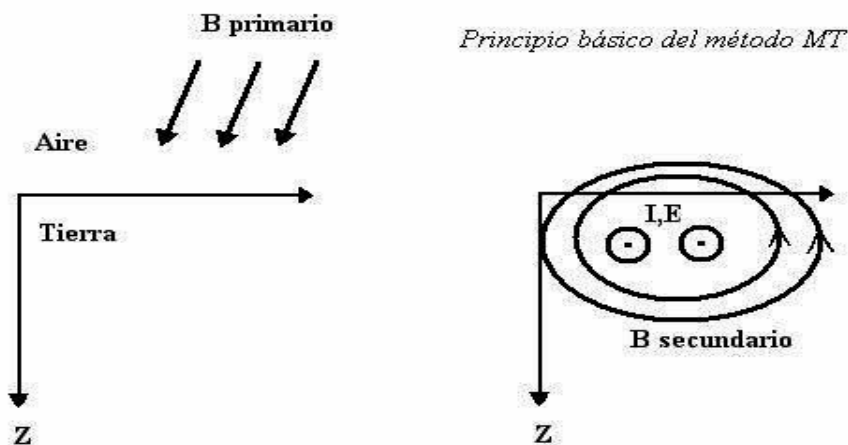
A causa del efecto piel, las bajas frecuencias penetran profundamente dentro de la tierra, y por lo tanto las altas frecuencias se quedan en la superficie. Es por ello que las bajas frecuencias en el método MT son las que proporcionan estudio de la estructura resistiva de la tierra para altas profundidades y el método AMT que utiliza las altas frecuencias quede relegado para el estudio resistivo de la superficie de la tierra.

$$B, E, \omega \rightarrow \rho(x, y, z)$$

Si este método es comparado con el método DC, entonces B corresponde a la corriente I, E corresponde a la diferencia de potencial medida, y w corresponde al factor geométrico K.

Un campo magnético primario B_p que proviene de la ionosfera crea un campo eléctrico E y una corriente I en la tierra. Esta corriente depende del campo magnético primario y de la resistividad eléctrica de la tierra. La corriente I en la tierra induce un campo magnético secundario B_s dando origen a un campo magnético resultante: $B = B_p + B_s$ y E es medido en la superficie de la tierra y entrega una resistividad aparente como una función de la frecuencia ω (ver figura 22).

Figura 22. Principio básico del método MT



El campo magnético B resultante es medido en la tierra por magnetómetros. El campo eléctrico E asociado es medido con un voltímetro como una diferencia de potencial entre dos electrodos separados una distancia L en la superficie de la tierra. Esto puede ser escrito como:

$$E(w) = Z(w) \bullet B(w)$$

Donde z es un vector complejo que depende de la estructura resistiva en la tierra y w es la frecuencia angular. En general para una onda plana que desciende en tierra no homogénea la ecuación vectorial se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix}$$

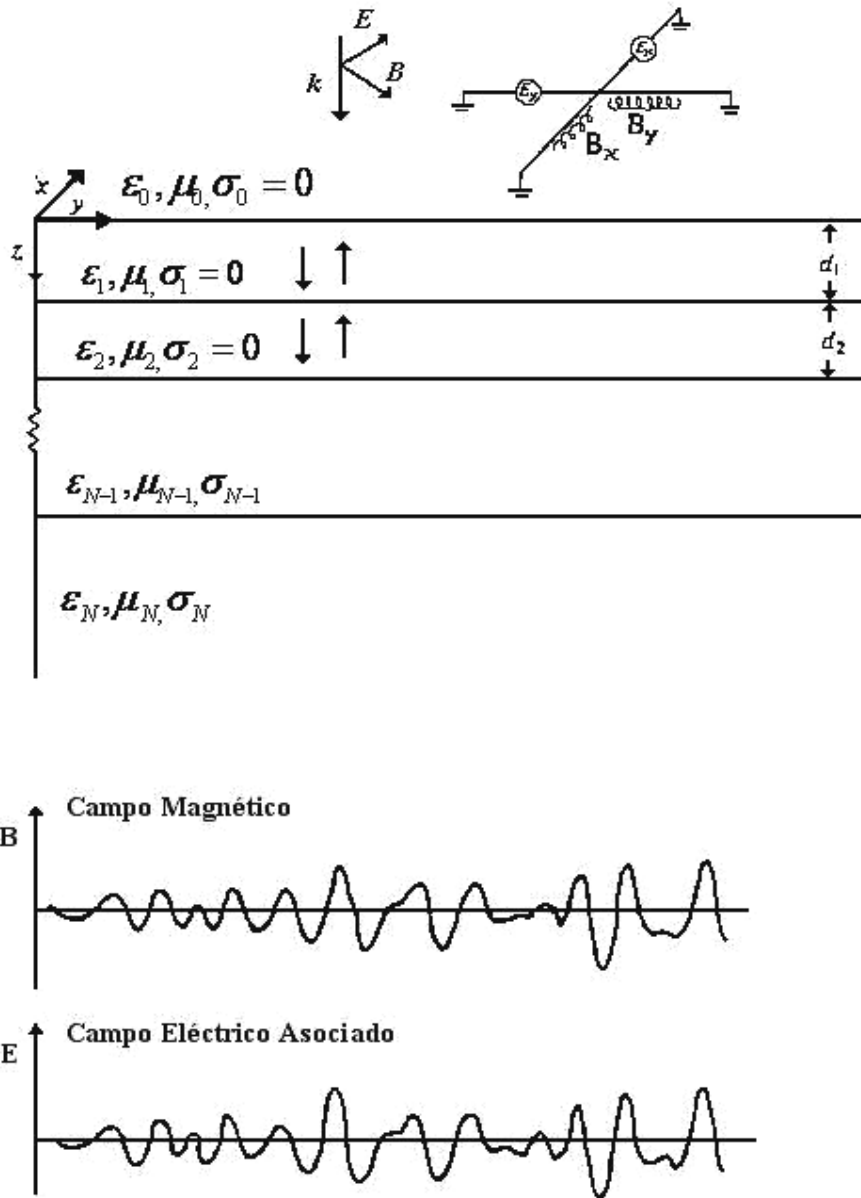
Suponiendo un caso de estructura unidimensional y si la tierra es homogénea, entonces la resistividad es la misma en todas las direcciones. En este caso tendríamos que $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ y $Z_{xy} = -Z_{yx}$.

Si la estructura resistiva es bidimensional, decimos que la resistividad es diferente dependiendo de la dirección, entonces Z_{xy} no es igual a Z_{yx} . La profundidad de penetración, d, dentro de la tierra para una onda electro-magnética es una función de la resistividad ρ , y del periodo $T = 2\pi / w$ del campo magnético incidente y esta dada por:

$$d = 500 \sqrt{T \rho}$$

Donde d esta dado en metros, T en segundos y ρ en Ωm (ver figura 23).

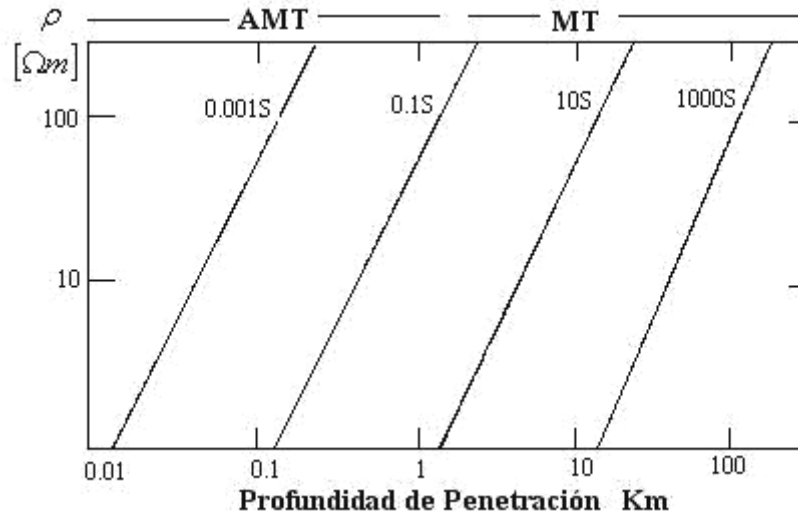
Figura 23. Arreglo de magnetómetros y electrodos de potencial en las mediciones MT



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 51**

La dependencia de la profundidad de penetración al periodo y a la resistividad se puede explicar en la figura 24:

Figura 24. Profundidad de penetración en los métodos AMT y MT



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 52**

Si la tierra es homogénea es fácil calcular la resistividad a partir de los componentes vectoriales: Z_{xy} y Z_{yx} . Si la tierra no es homogénea, podemos definir una resistividad aparente como la resistividad calculada como si la tierra fuera homogénea. La formula para la resistividad aparente es:

$$\rho_{a_{xy}} = \frac{1}{w} \frac{|Ex|^2}{|By|^2} = 0.2T|Z|^2 \quad [\Omega m]$$

Y es análogamente para calcular $\rho_{a_{yx}}$. En el caso unidimensional las dos resistividades son la misma.

El procedimiento para los métodos MT y AMT pueden ser resumido en:

1. Medir las componentes horizontales del campo magnético, B_x y B_y , el campo eléctrico inducido E_y y E_x , ambos como una función del tiempo medidos en un intervalo de varias horas: una hora para el método AMT, y un día para el MT.
2. Calcular la transformada de fourier y calcular las dos resistividades aparentes, $\rho_{a_{xy}}$ y $\rho_{a_{yx}}$ como una función de la frecuencia.
3. Interpretación unidimensional: Calculando un modelo unidimensional que concuerde con las mediciones obtenidas. Comparación con otros resultados.
4. Interpretación bidimensional.

3.3.3 Método de trascientes electro-magnéticas

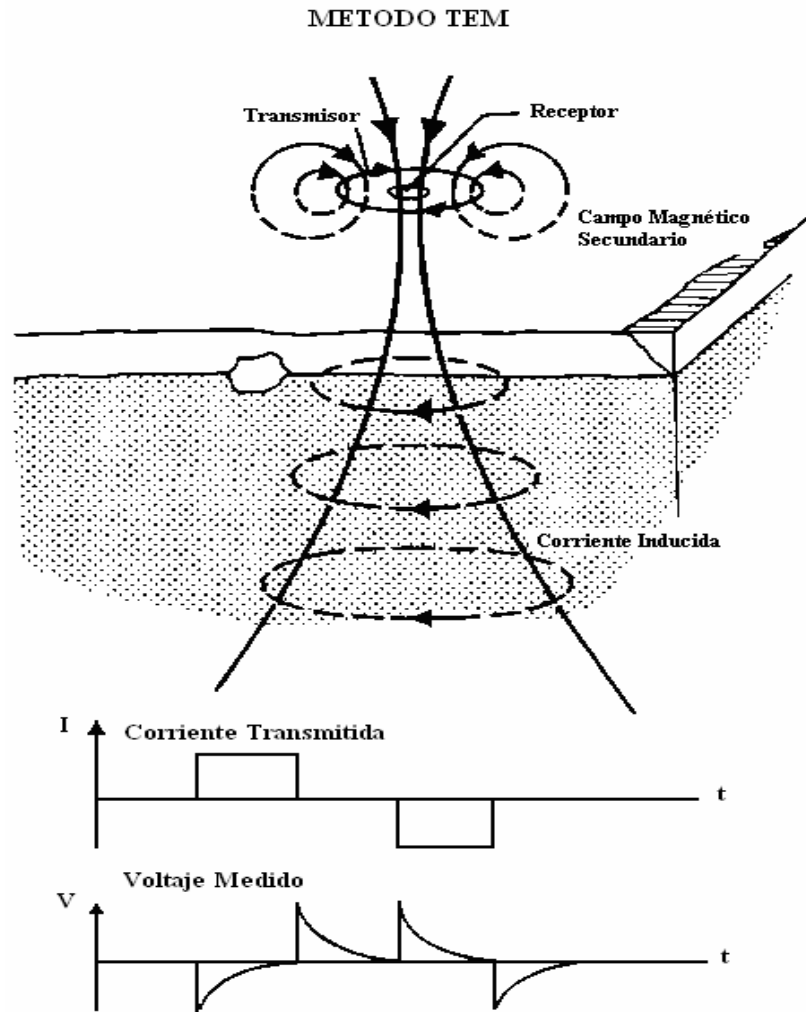
Los métodos electro-magnéticos dependiendo de la técnica a utilizar en la medición se dividen en dos diferentes categorías:

- Método en el dominio de la frecuencia: En este tipo de método las mediciones son echas para diferentes frecuencias discretas. Las bajas frecuencias penetran más dentro de la tierra que las altas frecuencias.
- Método en el dominio del tiempo: En este tipo de método un pulso de corriente es transmitido hacia la tierra y este induce un campo magnético decadente que es medido como una función del tiempo.

Esta información da el ancho de banda de frecuencias dentro de la tierra, y por medio de esto determinar el rango de profundidad que se puede medir.

En el método de trascientes electro-magnéticas la corriente en la tierra es generada por variaciones de magnitud controlada de campo magnético. El campo magnético es generado por un transmisor que consta en un alambre conductor en forma de círculo que se coloca en la tierra, en el cual circula una corriente controlada que genera dicho campo magnético, ver figura 25. La corriente que circula por el alambre conductor es una onda cuadrada como la de la figura 25. Entonces en el momento en que la corriente decae abruptamente a cero se induce un campo magnético decadente en la tierra que a su vez induce corrientes eléctricas en la tierra. La distribución de estas corrientes en la tierra inducen un segundo campo magnético decadente también, el cual es monitoreado y medido, por motivo de que tanto como la distribución de corriente y la velocidad con que decae el campo magnético secundario dependen de la estructura resistiva de la tierra. Este segundo campo magnético es medido por medio del voltaje que induce él mismo en el receptor, que se compone también de alambre conductor en forma circular colocado en el centro del alambre conductor principal, teniendo en cuenta que el receptor es de una circunferencia más pequeña que la del emisor. Entonces el voltaje inducido en el receptor debido a la corriente transmitida queda como en la siguiente figura:

Figura 25. Método TEM



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 54**

La resistividad aparente esta dada por la siguiente ecuación:

$$\rho_a(r, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{2\mu_0 A_r N_r A_s N_s}{5t^{5/2} V(r, t)} \right]^{2/3}$$

Donde:

t: tiempo transcurrido, después de que la corriente en el transmisor decae a cero.

Ar: Área que abarca el receptor m^2 .

Nr: Número de aspiras en el receptor.

μ_0 : Permeabilidad magnética en el vacío.

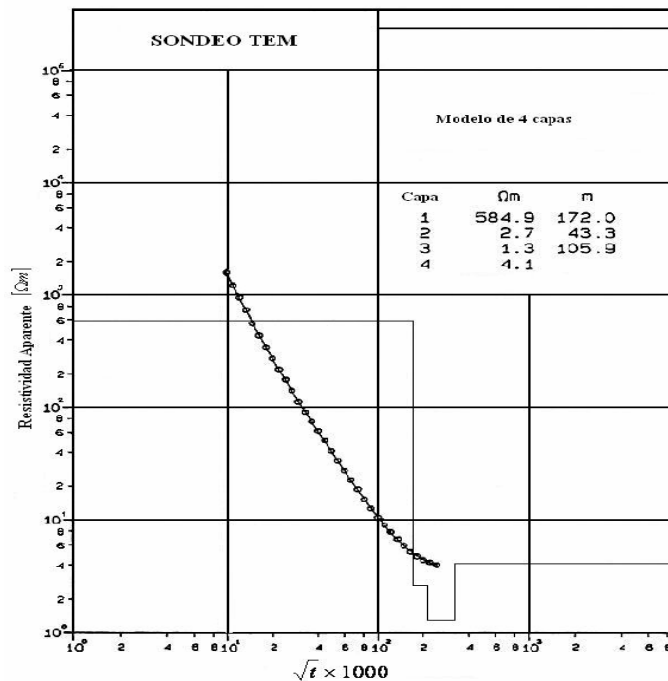
As: Área que abarca el transmisor m^2 .

Ns: Número de aspiras en el transmisor.

V: Voltaje medido en el receptor.

Después de graficada la curva de resistividad aparente, ésta puede ser interpretada en una sola dimensión, como ejemplo podemos ver la figura 26 de un sondeo TEM hecho en África (tomado de Arnason, 1988).

Figura 26. Resistividad aparente de sondeo TEM en África



Fuente: Universidad de las Naciones Unidas. **Tutorial de entrenamiento geotérmico. Pág. 55**

El método de trascientes electro-magnéticas tiene varias ventajas sobre el método DC y Schlumberger:

1. El transmisor no inyecta corriente en la tierra, si no que la induce. Esto ayuda en lugares donde las superficies son áridas como en un desierto.
2. La señal monitoreada es un campo magnético decadente y no un campo eléctrico en la superficie. Esto hace que los resultados en las mediciones sean mucho menos dependientes de las condiciones locales donde se encuentra el receptor. Las distorsiones se producen cuando la superficie donde se encuentra el receptor presenta no homogeneidad.
3. En el método DC la señal monitoreada es baja si la resistividad de la tierra es baja, en cambio en el método de trascientes electro-magnéticas la situación es al contrario, para una baja resistividad de terreno habrá una gran señal.

3.4 Métodos naturales

3.4.1 Método del potencial natural

Si dos electrodos son enterrados dentro de la tierra y conectados a un medidor de milivoltios, un potencial eléctrico puede ser observado entre los dos electrodos. Este potencial eléctrico esta compuesto de componentes espectrales de diferentes amplitudes y de una componente DC. La componente de DC es llamada potencial natural que es nuestro estudio de interés. Esto puede ser causado por fluidos en rocas dentro de la tierra, reacciones electroquímicas, diferencias de temperatura o actividad química. El potencial natural varía de un lugar a otro, y su valor esta frecuentemente en el rango de unas pocas decenas de milivoltios hasta 1-2 V/Km.

Interpretación: El significado de las anomalías del potencial natural es que están relacionadas con muchas áreas geotérmicas es decir, las causas que originan las anomalías en el potencial natural son diversas y ellas pueden o no estar relacionadas directamente con actividad geotérmica. Los mecanismos que generan estas anomalías aun no son del todo comprendidas, pero podemos listarlas en un orden probabilístico:

1. Diferencias de temperatura creada por potenciales termo-eléctricos.
2. Flujo de fluidos de agua caliente o agua fría.
3. Depósitos de minerales conductivos como grafito, pirita o sulfito.
4. Variaciones químicas en la composición de los fluidos contenidos en los poros de rocas.

Es difícil hacer una interpretación cuantitativa de datos que proceden de una medición de potencial natural debido a las diferentes causas que pueden originar anomalías en el potencial natural, sin embargo es uno de los métodos usado más extensamente en exploración geotérmica, debido a que proporciona valuable información con respecto a los resultados de otros métodos. Las aplicaciones más importantes son:

- Estudio de reconocimiento
- Mapeo de campos geotérmicos de alta temperatura

CONCLUSIONES

1. Los métodos eléctricos para exploración geotérmica, son el medio que utiliza la geotermia para descubrir recursos geotérmicos de una manera rentablemente económica.
2. Los métodos eléctricos para exploración geotérmica, se basan en dar a conocer la resistividad del subsuelo.
3. Los métodos eléctricos para exploración geotérmica denominados métodos dc, inyectan una corriente eléctrica que no varía con el tiempo en el subsuelo, miden la diferencia de potencial entre dos electrodos enterrados en el subsuelo y con base en estos datos determinan la resistividad del subsuelo.
4. Los métodos eléctricos para exploración geotérmica denominados métodos electro-magnéticos, inyectan una corriente eléctrica que varía con el tiempo en el subsuelo, miden su comportamiento en la estructura resistiva de la tierra y en base a estos datos determinan la resistividad del subsuelo.
5. Los métodos eléctricos para exploración geotérmica denominados métodos naturales, miden la diferencia de potencial natural de la tierra entre dos electrodos enterrados en el subsuelo y con base en estos datos determinan la resistividad del subsuelo.
6. La interpretación de los datos obtenidos en los sondeos pueden ser interpretados de dos formas: en una sola dimensión o en dos dimensiones.

7. La interpretación en una sola dimensión corresponde a la resistividad del subsuelo planteada como una función de la profundidad de la tierra.
8. La interpretación en dos dimensiones corresponde a localizar estructuras resistivas en un área delimitada.

RECOMENDACIONES

1. Cada método eléctrico para exploración geotérmica posee una configuración diferente, unos más compleja que otros. Esta complejidad repercute en la riqueza de información que éste pueda proporcionarnos, pero a su vez, la complejidad representa más inversión económica. Ha de tenerse en cuenta cuánta información se necesita para seleccionar el método más adecuado para el proyecto que se esté llevando a cabo.
2. Los métodos eléctricos para exploración geotérmica nos indican dónde puede haber un posible recurso geotérmico, no obstante, la confirmación de dicho recurso se llevará a cabo por medio de perforación de pozos exploratorios.

BIBLIOGRAFÍA

1. <http://www.epen.gov.ar/archivos/educativo/geotermia.pdf>.
2. <http://www.cflhd.gov/agm/geoapplications/surfacemethods/93electricalmethods.htm>.
3. Bona. Paolo, Exploración de Recursos Geotérmicos, 2007 presentación en power point para Enel Guatemala.
4. Universidad de las Naciones Unidas. Tutorial de entrenamiento geotérmico.