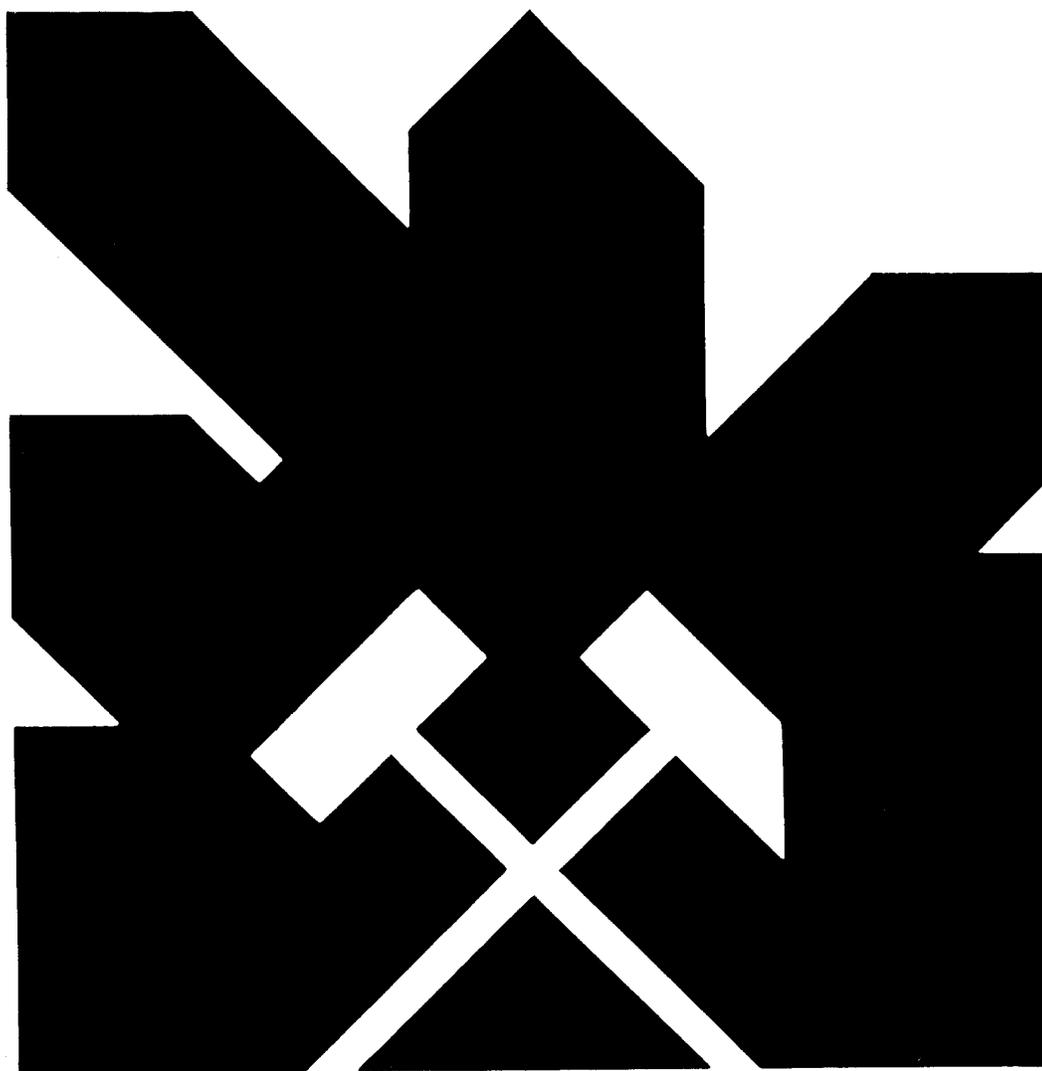


MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA  
SECRETARIA DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

CONVENIO CON ENADIMSA PARA EL DESARROLLO DE  
TRABAJOS DE INVESTIGACION GEOTERMICA DENTRO  
DEL PROGRAMA 234 OTRAS FUENTES DE ENERGIA. AÑO  
1984

"INVESTIGACION CAMPOS ROCAS CALIENTES SECAS"

- INFORME FINAL -



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

00885

## I N D I C E

	<u>Págs.</u>
1.- PRESENTACION .....	1
1.1.- INTRODUCCION .....	2
1.2.- OBJETIVOS .....	3
1.3.- REALIZACION .....	3
2.- ALMACENES DE ROCA CALIENTE SECA. GENERALIDADES .....	5
2.1.- DEFINICION .....	6
2.2.- TIPOS DE ALMACENES .....	7
2.3.- POTENCIAL ENERGETICO .....	8
3.- INVESTIGACION .....	9
3.1.- PLAN GENERAL DE INVESTIGACION .....	10
3.2.- TECNICAS GEOLOGICAS .....	11
3.3.- TECNICAS GEOQUIMICAS .....	13
3.4.- TECNICAS GEOFISICAS .....	13
3.5.- SONDEOS DE INVESTIGACION .....	15
3.5.1.- Diagrafias .....	15
3.5.2.- Otras medidas .....	17
4.- EXPLOTACION .....	23
4.1.- ESQUEMAS DE EXPLOTACION .....	24

	<u>Págs.</u>
4.2.- PERFORACION DE SONDEOS .....	33
4.2.1.- Triconos .....	34
4.2.2.- Cementaciones .....	35
4.2.3.- Fluidos de perforación .....	36
4.2.4.- Packers .....	36
4.2.5.- Tuberías .....	37
4.2.6.- Perforación dirigida .....	38
4.2.7.- Acabado de pozos .....	40
4.2.8.- Estimulación .....	42
4.3.- FRACTURACION .....	43
4.3.1.- Fracturación hidráulica .....	43
4.3.2.- Fracturación con explosivos .....	45
4.3.3.- Fracturación mixta (Explosivos e Hí dráulica) .....	46
4.3.4.- Localización de fracturas de explota ción .....	47
4.3.5.- Productividad y vida de las fracturas.	50
4.4.- PARAMETROS DE EVALUACION .....	52
4.4.1.- Superficie de intercambio calorífico .	52
4.4.2.- Pérdidas de fluido de inyección (Agua)	53
4.4.3.- Impedancia de flujo .....	54
4.5.- TIPO DE PLANTAS PARA PRODUCCION DE ELECTRICIDAD	55
4.6.- PROBLEMAS LIGADOS A LA EXPLOTACION DE ROCA CA LIENTE SECA .....	57
4.6.1.- Seismos .....	57
4.6.2.- Disolución de elementos .....	57
4.6.3.- Medio Ambiente .....	59
5.- PROYECTOS DE INVESTIGACION DE ROCA CALIENTE SECA DE SARROLLADOS EN EL MUNDO .....	61

	<u>Págs.</u>
5.1.- THE AQUARIUS MOUNTAINS, ARIZONA .....	62
5.2.- WESTERN SNAKE RIVER PLAIN, IDAHO .....	64
5.3.- PENINSULA DE DELMARVA .....	67
5.4.- MARYSVILLE, MONTAÑA .....	68
5.5.- AREA DE COSO .....	73
5.6.- FENTON HILL .....	77
5.7.- FALKENBERG, ALEMANIA OCCIDENTAL .....	91
5.8.- CORNWALL, INGLATERRA .....	92
5.9.- ENERGEROC, FRANCIA .....	101
5.10.- NEUSEHIR, TURQUIA .....	104
5.11.- LANZAROTE .....	105
5.12.- LA PALMA .....	108
6.- CASOS ESPECIALES .....	110
6.1.- EXPLOTACION DE LA ENERGIA DE UN MAGMA .....	111
6.2.- DIAPIROS .....	114
7.- ASPECTOS ECONOMICOS .....	118
7.1.- COSTOS DE OPERACION Y MANTENIMIENTO .....	119
7.2.- COSTOS DEBIDOS A LA INVERSION DE CAPITAL .....	120
8.- CONCLUSIONES .....	123
9.- BIBLIOGRAFIA .....	127

1.- PRESENTACION

### 1.1.- INTRODUCCION

El Instituto Geológico y Minero de España, viene realizando la investigación de las posibilidades de existencia de energía geotérmica en las Islas Canarias. Dentro de esta investigación se ha llegado a definir la posible existencia en las islas de La Palma y Lanzarote, de dos áreas con muy elevada temperatura en superficie (300-400°C), en las que sin embargo no se aprecia la existencia de fluidos geotérmicos. Las conclusiones a las que se ha llegado por ahora apuntan a la posibilidad de existencia de una masa de roca caliente, en principio importante, pero de dimensiones reales aún desconocidas.

La explotación de la roca caliente seca, viene siendo una idea contemplada por los investigadores desde principio de la década de los setenta. Aunque hoy día solo se contempla esta explotación en zonas anómalas térmicamente, la idea que subyace al concepto de roca caliente seca es que con tecnologías de perforación, fracturación e intercambio de calor suficientemente dominadas a profundidades de 5-6 km, se tendrá en el interior de la Tierra una fuente energética de extraordinaria importancia.

Esta es la razón por la cual se desarrollan en el mundo toda una serie de proyectos: Estados Unidos (6 proyectos), Alemania Occidental, Inglaterra, Francia, Suecia, Turquía, etc.

Ante la posibilidad ya comentada de que en las islas Canarias pueda existir este tipo de energía geotérmica, el Instituto Geológico y Minero de España, decidió la realización de un informe de síntesis documental, en el que se recogiera el estado actual de la tecnología y las principales ideas que se están desarrollando en el mundo.

### 1.2.- OBJETIVOS

Como queda dicho, el objetivo fundamental del informe era la realización de un análisis del estado en que se encuentran los proyectos de investigación de roca caliente seca en el mundo, al tiempo que establecer las líneas básicas en las que se encuadra el concepto de roca caliente seca, su investigación y explotación, para finalmente exponer someramente el caso de las islas Canarias y su posible futuro.

### 1.3.- REALIZACION

Este informe ha sido realizado dentro del "CONVENIO ENTRE EL INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA Y LA EMPRESA NACIONAL ADARO PARA EL DESARROLLO DE TRABAJOS DE INVESTIGACION GEOTERMICA DENTRO DEL PROGRAMA 234, OTRAS FUENTES DE ENERGIA AÑO 1984".

Se han llevado a cabo los siguientes trabajos:

- Definición de lo que se entiende por almacén de roca caliente seca y parámetros que lo definen.
- Revisión de las técnicas actuales para la investigación y explotación de roca caliente seca.
- Descripción de los proyectos más importantes que se llevan a cabo en el mundo.

- Análisis de los puntos de interés en España.

El trabajo ha sido desarrollado por el siguiente equipo:

- Javier Sigüenza Amichis: Ingeniero de Minas del Departamento de Geotermia de la Empresa Nacional Adaro. Recopilación y estudio de la información. Visita a las instalaciones de Fenton Hill (E.E.U.U.). Responsable de la elaboración del informe de síntesis.
- José Sánchez Guzmán: Ingeniero de Minas. Responsable del Departamento de Geotermia de la Empresa Nacional Adaro. Supervisión y redacción del informe final.
- Celestino García de la Noceda Márquez. Ingeniero de Minas. Responsable del Departamento de Geotermia del Instituto Geológico y Minero de España. Dirección del Proyecto.

2.- ALMACENES DE ROCA CALIENTE SECA. GENERALIDADES

## 2.1.- DEFINICION

Es de todos conocido que la temperatura de la corteza terrestre aumenta con la profundidad. Este hecho es lo que se conoce como gradiente geotérmico. El gradiente geotérmico es por regla general bastante uniforme y constante a lo largo de la Tierra,  $2,5-3,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , existiendo anomalías negativas sobretodo en las áreas más antiguas de la superficie terrestre (escudos precámbricos) donde el gradiente es del orden de  $1-1,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  y anomalías positivas en las zonas de inestabilidad geológica, límites de placas, en donde el gradiente puede elevarse hasta 10-15 veces el gradiente medio normal.

Por otra parte es también aceptado hasta la fecha, que la porosidad de las rocas disminuye con la profundidad, de tal manera que es muy baja a profundidades superiores a 6 km. A esta profundidad, en áreas de gradiente normal la temperatura supera ya los  $180-200^{\circ}\text{C}$ .

Así pues se tiene que existen grandes áreas de la corteza terrestre en que siendo prácticamente nula la porosidad, la temperatura es superior a  $180^{\circ}\text{C}$ . Este es el concepto de roca caliente seca.

Se puede definir por lo tanto, un almacén de roca caliente seca, como una extensa masa de roca con muy baja permeabilidad que se encuentra a muy elevada temperatura. La po

sibilidad de extracción del calor de este tipo de almacén, tan abundante en la tierra para profundidades mayores de 5-6 km, es lo que ha movido a los investigadores a la búsqueda de tecnologías que permitan localizar dichos almacenes y que permitan aprovechar en términos económicos la energía contenida en ellos.

## 2.2.- TIPOS DE ALMACENES

Básicamente, existen dos tipos de almacenes, según sea la fuente energética.

- Sistemas ígneos, en los que el calor se piensa que procede de cuerpos o cámaras magmáticas existentes en profundidad.
- Sistemas en los que el calor es transmitido por conducción desde grandes profundidades, siendo su origen reacciones químicas exotérmicas y radioactivas.

En los primeros la cámara magmática puede ser extrusiva con la consiguiente producción de volcanes, o simplemente plutónica. La mayor parte de los sistemas de roca caliente a poca profundidad son sistemas ígneos.

Dado que la factibilidad de explotación de roca caliente seca será tanto más posible, cuanto menos profunda esté la masa caliente, los proyectos de investigación actuales se dirigen a sistemas ígneos, en los que la profundidad de "almacén" se encuentra entre 2,5 y 3,5 km. Los criterios fundamentales para la selección de áreas de este tipo son:

- Evidencia de volcanismo joven, que pueda indicar la presencia de grandes cámaras magmáticas.

- Localización de flujo de calor anormalmente elevado.
- Existencia de basamentos de poca permeabilidad.

### 2.3.- POTENCIAL ENERGETICO

La gran cantidad de calor almacenado en la corteza terrestre en estos tipos de sistemas, podría suministrar energía para cubrir gran parte de las necesidades de todos los países ya que esta fuente energética se encuentra, como se ha visto, en todos los lugares, a más o menos profundidad.

Algunos cálculos pueden ser ilustrativos acerca de la importancia de esta fuente energética.

Un volumen de roca de  $1 \text{ km}^3$ , con una capacidad calorífica media que podemos estimar en  $0,55 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{°C}$ , contiene una cantidad de energía de  $5,5 \times 10^{14} \text{ cal/°C}$  o lo que es lo mismo  $6,4 \times 10^8 \text{ KW.h/°C}$ . Si se enfría esta masa de roca  $20\text{°C}$ , se tendrá una disposición de energía de  $1,28 \times 10^{10} \text{ KW.h}$ , que pueden ser utilizados en aplicaciones directas del calor, con rendimientos del 90% por lo que la energía útil disponible será de  $9,9 \times 10^{12} \text{ Kcal}$  ó  $9,9 \times 10^9 \text{ termias}$ , o bien en producción de electricidad, lo que supone con un rendimiento del 15% en la transformación una energía de  $1,92 \times 10^6 \text{ MW.h}$ , que si se producen en 25 años con una explotación de 6.500 horas al año, suponen una potencia instalada de 11,8 MW.

Cálculos realizados en Estados Unidos, indican que la energía potencialmente utilizable, almacenada en roca caliente seca, a profundidades menores de 10 km y temperaturas superiores a  $150\text{°C}$ , es estimada en  $13 \times 10^6 \text{ quad}$  ( $1 \text{ quad} = 10^{15} \text{ B.t.u.}$ ). Si se piensa que el consumo anual de energía de E.E. U.U. es de 75 quad, se puede apreciar la importancia del dato anterior.

3.- INVESTIGACION

### 3.1.- PLAN GENERAL DE INVESTIGACION

La investigación de un almacén de roca caliente seca, tiene como objetivo, el delimitar en planta y profundidad la situación de la masa explotable, así como definir en lo posible sus características esenciales: tipo de roca, porosidad, fracturación propia y temperatura, terminando con una evaluación del potencial disponible y los métodos de explotación apropiados.

Con estos datos se podrá acometer el estudio económico de viabilidad que será el que indique la conveniencia o no de iniciar la explotación.

A grandes rasgos, el desarrollo de un plan de investigación requiere las siguientes fases o actividades:

- Recopilación de datos existentes, mapas geofísicos, existencias de fumarolas, volcanes, fuentes termales, datos de temperatura y gradiente térmico de sondeos antiguos.
- Modelo geológico general.
- Determinación de almacenes con posibilidades en función de los gradientes y de la geología.

- Uso de métodos geofísicos para determinar la estructura geológica, anomalías en la densidad de roca e indicadores de alta temperatura:
  - . Sísmica de reflexión y refracción
  - . Gravimetría
  - . Ensayos magnéticos
  - . Ensayos eléctricos
  - . Ensayos magnetotelúricos
  
- Modelo geológico de área reducida
  
- Sondeos poco profundos para determinar el flujo de calor en zonas de interés, así se pueden realizar algunos sondeos de 300 mts entubados. También mediciones en sondeos existentes, (mineros, hidrogeológicos, etc).
  
- Sondeos profundos para confirmar el gradiente, flujo calorífico y existencia de una roca impermeable. En caso de haber sondeos profundos abandonados puede ser interesante abrirlos para realizar medidas en ellos.

### 3.2.- TECNICAS GEOLOGICAS

Las técnicas geológicas aplicadas en la investigación de roca caliente seca han de ir encaminadas a la definición del tipo de roca que constituye el almacén así como a la explicación de la existencia de una anomalía calorífica.

Las características geológicas empleadas para definir un posible sistema de roca caliente seca son:

- Volcanismo reciente
- Actividad hidrotermal
- Gran flujo calorífico
- Fenómenos tectónicos como terremotos, levantamientos y fallas recientes

Así pues, las técnicas geológicas han de tener como objetivo el definir estas características.

Normalmente son las rocas que forman el basamento, las que por su baja permeabilidad y contenido en agua son más adecuadas como almacén de roca caliente seca. A estos efectos se puede establecer una clasificación de rocas que forman basamento de cuencas actuales:

- Basamento granítico o plutónico:  $10^{-6}$  -  $10^{-8}$  darcies
- Precámbrico y Paleozóico metamórfico:  $10^{-2}$  -  $10^{-4}$  darcies
- Mesozóico metamórfico:  $10^{-1}$  -  $10^{-3}$  darcies
- Sedimentos Paleozóicos y Mesozóicos:  $10^{-1}$  -  $10^{-3}$  darcies
- Volcanes Cenozóicos:  $10^3$  - 1 darcy

Las técnicas geológicas empleadas en la definición del modelo geológico general de una región son:

- Volcanología
- Tectónica
- Estratigrafía
- Petrografía
- Síntesis cartográfica
- Geocronología

Mediante estas técnicas se puede elaborar el citado modelo que será posteriormente investigado con técnicas geoquímicas y geofísicas.

### 3.3.- TECNICAS GEOQUIMICAS

En general las técnicas geoquímicas no se emplean demasiado en la investigación de roca caliente seca.

El objetivo de estas técnicas es la detección de fluidos termales que puedan a su vez indicar la existencia de flujos caloríficos anómalos en el subsuelo de una zona.

Las técnicas empleadas más comunmente son:

- Hidroquímica, para la detección y separación de familias de agua en el subsuelo.
- Geotermometría, para el cálculo de las temperaturas en almacén.
- Isótopos para estudio de circulación de fluidos y temperatura de almacén.
- Geoquímica de gases y otros volátiles, para la localización de anomalías térmicas.

### 3.4.- TECNICAS GEOFISICAS

Estas son las técnicas indirectas más empleadas y se fundamentan en que la existencia de zonas calientes afecta a las propiedades físicas de los materiales del subsuelo. Estos cambios son detectados mediante técnicas geofísicas.

Así las altas temperaturas dan lugar a bajas resistividades de los terrenos, atenuación en las ondas elásticas de

alta frecuencia, cambios en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, etc.

Para la interpretación de los datos geofísicos hay que realizar frecuentemente extrapolaciones de datos, debido a la ausencia de medidas in situ en sondeos.

En conexión directa con el gradiente geotérmico y flujo calorífico está la realización de medidas en sondeos de pequeño diámetro. En estos casos hay que tener especial cuidado con la existencia de acuíferos superficiales.

La existencia de plutones o cámaras magmáticas a poca profundidad afecta a los valores de la gravedad en puntos de la superficie. Este efecto se utiliza para la aplicación de la técnica gravimétrica.

El reflejo de la presencia de un foco de calor profundo y de una anomalía térmica, en la temperatura superficial es utilizado como base de aplicación de métodos de infrarrojo térmico.

Resumiendo se puede dar la siguiente relación de técnicas geofísicas empleadas en la investigación de roca caliente seca:

- Geodesia
- Sismología
- Gravimetría
- Sísmica de reflexión
- Sísmica de refracción
- Eléctricos y electromagnéticos
- Magnetotelúricos

- Medidas de flujo

### 3.5.- SONDEOS DE INVESTIGACION

Tienen como objetivo el reconocimiento de los materiales presentes en el subsuelo y sus características. Con ellos se han de confirmar el modelo elaborado en base a anteriores investigaciones.

Estos sondeos que son en general de pequeño diámetro permiten la obtención de testigos sobre los que se pueden hacer determinaciones de densidad, microestructura, porosidad, características térmicas, compresibilidad, fracturación, elasticidad, etc., etc., todas las cuales se utilizarán para una mejor interpretación de campañas geofísicas.

Otros datos petrológicos, mineralógicos y químicos, pueden utilizarse para la interpretación de los datos geoquímicos y la reelaboración del modelo geológico. Además de estas medidas sobre los testigos y reconocimiento de terrenos, en estos sondeos se realizan diagrfías y otras medidas que aumentarán los datos disponibles para posterior interpretación.

#### 3.5.1.- Diagrafías

En los campos geotérmicos de alta temperatura, la realización e interpretación de diagrfías, presentan muchos problemas, esto es debido al desarrollo de las herramientas solamente para los campos petrolíferos, en los cuales no existen valores tan elevados de temperatura. La forma de realizar los registros, es enfriar el pozo después de hacer un registro de temperatura y antes de hacer las restantes.

En la actualidad, se están desarrollando las mismas herramientas para temperaturas superiores a 260°C, por las sociedades Schlumberger y Dresser Atlas.

A continuación se mencionan las respuestas de las diaggrafías para los campos geotérmicos de roca caliente seca.

- Potencial espontáneo: No tiene buena resolución en rocas ígneas o metamórficas, en el caso de haberse creado el almacén en roca caliente seca, podría detectar las fracturas.
- Resistivos: Pueden ser útiles en la definición de la impermeabilidad de la masa caliente seca, y después poder definir las zonas fracturadas.
- Acústicos: Funcionan bien excepto en casos de sondeos de gran diámetro, son útiles para correlación y localización de fracturas.
- Densidad y neutrón: Son muy útiles para la determinación de litología.
- Rayos Gamma: Indicados para correlación e identificación litológica.
- Buzometría: Muy útiles en el caso de HDR para la localización, de las fracturas creadas artificialmente.
- Calibre: Definen cualitativamente las fracturas creadas, existen muchos problemas para la creación de una herramienta de cuatro brazos debido a las altas temperaturas. Esta herramienta es esencial para definir el lugar en donde poder asentar packer en la operación de fracturación.

- Cementación: Definen la calidad de las cementaciones, las cuales deben ser de buena calidad para evitar pérdidas del fluido de inyección.
  
- Temperatura: Es una medida fundamental a la hora de poder desarrollar un sistema geotérmico de roca caliente seca. El problema mayor para las medidas, estriba, en la calidad del cable para soportar bien las altas temperaturas. Se ha desarrollado herramientas con cable de siete conductores que soporte altas temperaturas.
  
- Desviación: En los campos de explotación, los pozos deben ser direccionales, por ejemplo, el caso de Los Alamos con pozos de 35º de inclinación sobre la vertical. Para Los Alamos han sido utilizados giroscopios con cables especiales, la cámara de multidisparos permite tomar fotos posicionales cada 20 segundos. Debido a las limitaciones de temperatura que presenta la película del giroscopio, se debe enfriar el pozo antes y además es necesario hacer el registro lo más rápidamente posible.

### 3.5.2.- Otras medidas

#### TEMPERATURA

Distintos tipos de aparatos son utilizados para las medidas de temperatura, mecánicos como el Kuster, termistores con sensores compuestos de cristal o sensores de platino. Estos aparatos resisten bien las altas temperaturas con algún problema en el cable de conexión.

Los termistores dan buena temperatura incluso por encima de 300°C, la respuesta resistencia-temperatura no es lineal y varía de un transmisor a otro. Figura nº 1.

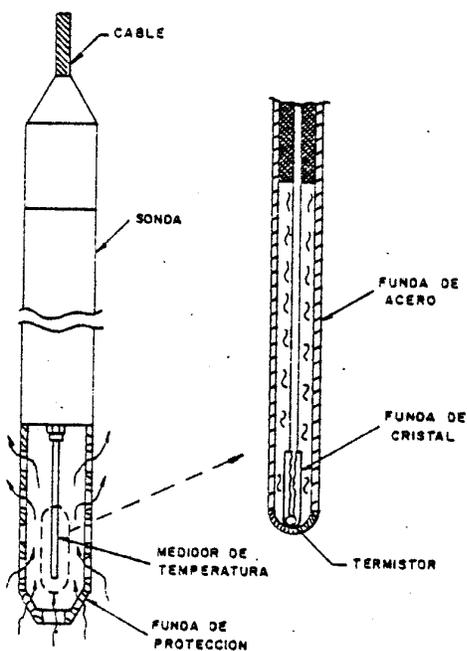


Figura nº 1

### FRACTURACION

En los almacenes de roca caliente seca es necesario que no existan fracturas o que las existentes estén selladas.

Para la identificación de las fracturas existentes además de las diagrfias mencionadas se pueden emplear los siguientes métodos:

- Televisión en sondeos: Esta nos muestra las paredes del sondeo pudiendo ver las discontinuidades.
- Mapa de microseismos: Este método experimental da información desde superficie de la clase de fracturas, forma y orientación. Se pueden localizar a distancias mayores de 5.000 m.

### PRODUCCION

Las principales herramientas utilizadas en un doblete de explotación de roca caliente seca, son:

- Flowmeter: Se usa para determinar la producción parcial de cada una de las fracturas creadas en el almacén, en los pozos de inyección analiza la admisión de fluidos según las fracturas. Puede medir grandes flujos tales como 400 m /hora dependiendo del diámetro del pozo. Figura nº 2.



Figura nº 2

- Trazador radiactivo: Se usa para el registro en el pozo de inyección y de producción. Analiza mediante rayos gamma las

zonas por donde es inyectado el fluido y las que producen. Este registro también se utiliza para definir el volumen de roca caliente que ha sido fracturada y que se pone en comunicación entre los dos sondeos del doblete. Figura nº 3.

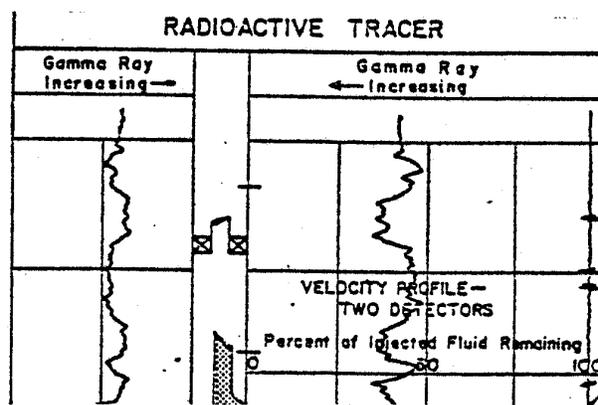


Figura nº 3

Como ejemplo de plan de investigación de roca caliente seca, se adjunta el cuadro siguiente de lo llevado a cabo en Fenton Hill (Los Alamos, Nuevo Méjico, USA), en el que se analizan las fases técnicas, datos, interpretación, etc., realizadas.

ACTIVIDAD	TECNICA	DATOS Y OBSERVACIONES	IDENTIFICACION SISTEMA GEOTERMICO		ALMACENES ROCA CALIENTE SECA		FENTON HILL
			PROPIEDADES	INTERPRETACION	PROPIEDADES	INTERPRETACION	
GEOLOGIA Y GEOQUIMICA	Regional	Mapas, Petrología y geoquímica.	Volcanismo, Edad, Tipo	Reciente, mejor ácido, poca profundidad.	Cámara magmática poco profunda con calor residual.	Almacenes de baja permeabilidad.	
		Mapas estructurales.	Fallas.	Altamente fracturado hidrotermalismo. Sin fracturas roca caliente seca.	Evaluación de permeabilidad.	Ausencia de fallas.	Baja permeabilidad. Mínimo riesgo de seísmos.
	Local	Geoquímica.	Ausencia o presencia de manantiales calientes temperatura química.	Agua caliente. Alto contenido en Si y alcalinos.	Fuente de alta temperatura en profundidad.		
GEOFISICA	Regional	Seísmos.	Frecuencia ruido.		Existencia de cámara magmática en profundidad.	Escaso número. Bajo nivel de ruido.	Pocas reaperturas de fracturas y escasa permeabilidad. Escaso riesgo de seísmos.
		Aeromagnético.	Intensidad del campo magnético.	Bajo magnetismo.	Somero punto de curie indicando roca caliente a poca profundidad.	Baja o alta, muy útil dependiendo de la geología.	
		Gravimetría.	Intensidad del campo gravimétrico.	Baja gravedad.	Existencia de posible cámara magmática.	Tendencia a gravedad baja.	Emplazamiento de rocas silíceas en profundidad.
	Local	Magnetotelúrico.	Respuesta a las perturbaciones del campo de la tierra.			Baja resistividad en grandes profundidades	Estructura eléctricamente conductiva debido a la variación de temperatura.
		Electromagnético.	Respuesta del campo natural al campo inducido.			Alta resistividad a poca profundidad. Baja resistividad a mucha profundidad.	Roca seca, ausencia de sistema hidrotermal.
		Resistividad eléctrica.	Resistividad con profundidad.			Alta resistividad.	Ausencia de sistema hidrotermal.
							Roca sin grandes fracturas de bloques.

ACTIVIDAD	TECNICA	DATOS Y OBSERVACIONES	IDENTIFICACION SISTEMA GEOTERMICO		ALMACENES ROCA CALIENTE SECA		FENTON HILL
			PROPIEDADES	INTERPRETACION	PROPIEDADES	INTERPRETACION	
SONDEOS TERMOMETRICOS POCO PROFUNDOS	Flujo calorífico.	Temperatura con la profundidad.	Alto gradiente térmico.	Fuente calorífica en profundidad.	Gradiente térmico lineal alto pero flujo de calor < 6 HFU;	Fuente calorífica en profundidad. Transferencia de calor por conducción.	≈ 5 en superficie. ≈ 3,7 en profundidad.
SONDEOS	Testigos.	Mineralogía, petrología, geoquímica y propiedades físicas.			Fracturas selladas. Baja solubilidad de los minerales.	Baja permeabilidad. Baja concentración de sólidos disueltos en fluidos.	Fracturas selladas. Minerales de baja solubilidad.
	Temperatura.	Medidas de temperatura y conductividad.			Temperatura alta.	Alta temperatura indica fuente calorífica en profundidad.	200° C a 3 km.
	Litología.	Cuttings, logs.					Rocas graníticas.
	Inyección de fluido.	Presión y permeabilidad.					≈ 1.400 pSi por hidrofracturación.

4.- EXPLORACION

#### 4.1.- ESQUEMAS DE EXPLOTACION

El esquema de explotación de un sistema de roca caliente seca, se basa principalmente en el intercambio de calor de la roca a un fluido, a lo largo de superficies de intercambio calorífico creadas artificialmente.

Desde una profundidad dada, en donde existe roca caliente, el calor es transportado hasta los usuarios, principalmente por sondeos.

El esquema comprende principalmente las siguientes partes:

- Almacén
- Superficies de intercambio calorífico
- Conductos de transporte calorífico (pozos de inyección y producción)
- Transporte calorífico
- Almacenamiento energético
- Consumo calorífico

En la figura nº 4, se representan esquemáticamente las partes involucradas de una explotación.

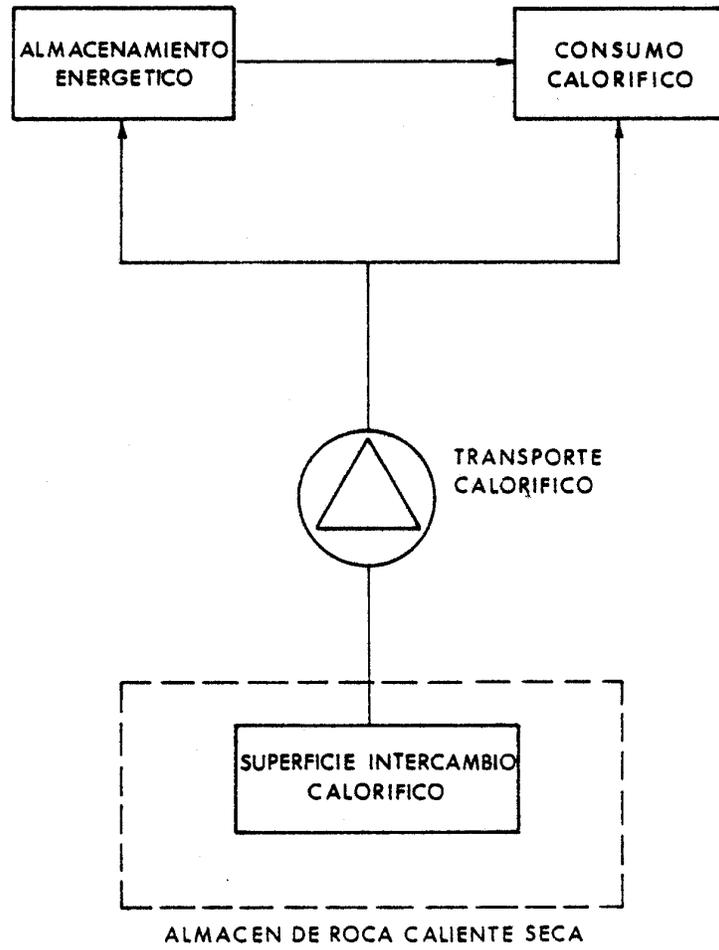


Figura nº 4

Cada una de las partes anteriores, queda caracterizada, por los siguientes parámetros:

ALMACEN DE ROCA CALIENTE SECA

Temperatura de las rocas: Temperatura  
Profundidad  
Gradiente

Fuente calorífica: Propiedades termofísicas de las rocas  
Temperatura de las rocas  
Volumen del almacén  
Vida del almacén

Características geológicas: Permeabilidad  
Fracturas  
Composición química

SUPERFICIE DE INTERCAMBIO CALORIFICO

Cantidad de calor extraído: Area de intercambio  
Propiedades termofísicas de las rocas  
Temperatura de la roca  
Propiedades termofísicas de los fluidos de intercambio  
Temperatura del fluido de inyección  
Caudal del fluido

Evolución de la presión del fluido: Permeabilidad de la superficie de intercambio  
Propiedades físicas del fluido  
Caudal del fluido.

CONDUCTOS DE TRANSPORTE CALORIFICO (POZOS DE INYECCION Y PRODUCCION)

Cantidad de calor transportado: Caudal del fluido  
 Propiedades termofísicas de fluido  
 Diferencia de temperatura (entrada y salida).

Caidas de presión: Configuración de los conductos  
 Propiedades físicas de los fluidos  
 Caudal

TRANSPORTE CALORIFICO

Cantidad de calor transferido: Caudal  
 Propiedades termofísicas del fluido  
 Diferencia de temperatura

Suministro de energía adicional: Caidas de presión totales en la circulación.  
 Diferencia de presión hidrostática  
 Caudal  
 Propiedades físicas del fluido.  
 Eficiencia.

CONSUMO CALORIFICO

Temperatura de producción: Consumo punta.

Diferencia efectiva de temperatura: Flujo

Propiedades termofísicas del fluido  
Consumo de calor.

En la actualidad, el esquema de explotación que está -  
siendo analizado y que parece ser el de mayores posibilidades,  
es el de la figura nº 5.

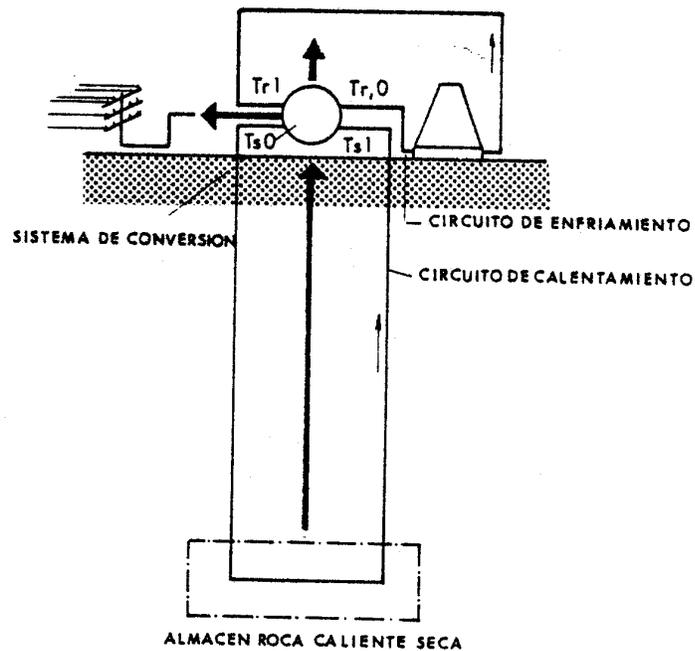


Figura nº 5

Se han realizado investigaciones para la explotación energética, bombeando agua por solamente un pozo, el costo de la operación se verá muy reducida puesto que el capítulo de sondeos es el más importante y se reduciría a la mitad. En la figura nº 6 se puede ver el diseño realizado en Suecia para la explotación del calor de los granitos en la región de Skana.

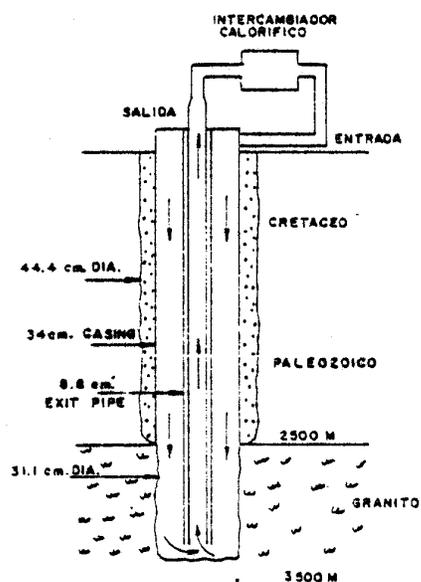


Figura nº 6

Este concepto de extracción con solo un pozo, varía grandemente del utilizado en Estados Unidos e Inglaterra en donde emplean dos sondeos comunicados. Este sistema no se ha llevado a la práctica y su experiencia se reduce a la simulación en laboratorio. En los campos de roca caliente seca de Lanzarote, La Palma, podría ser el sistema empleado de explotación, con una entubación auxiliar. Se están realizando inves

tigaciones en la construcción de generadores que irán en el interior de los sondeos, los cuales podrían producir vapor a partir del agua inyectada a zonas con altas temperaturas. En Estados Unidos se ha construido un generador (VOILER), este aparato puede bajarse dentro de una tubería de pequeño diámetro, por ejemplo 4".

Otra forma de extraer el calor de la roca caliente podría ser el mostrado en la figura nº 7.

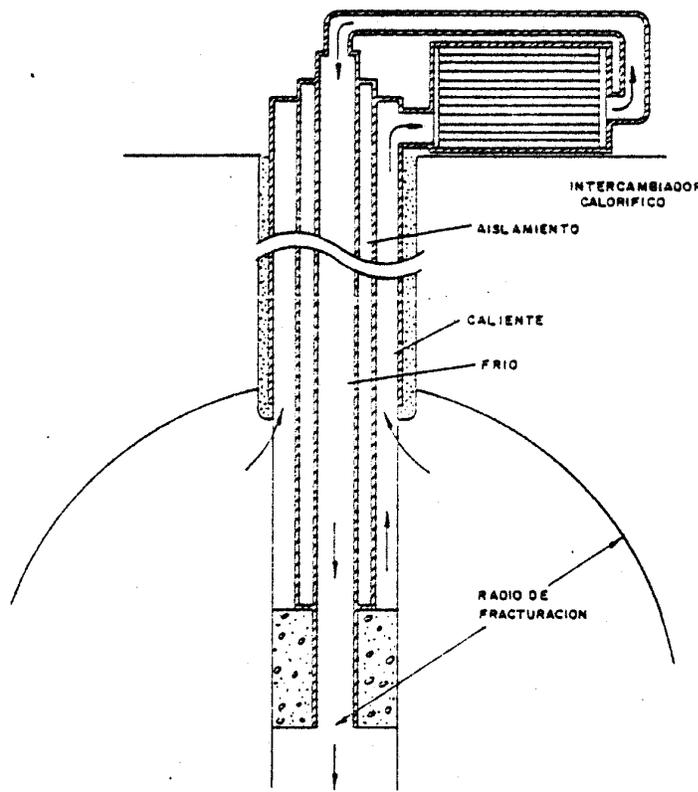


Figura nº 7

En este caso se instalan tuberías concéntricas y la circulación del agua, se hace desde superficie por la tubería central hasta el fondo del pozo, en el fondo de pozo existe una zona previamente fracturada por la que circula el agua hasta el anular superior por donde se extrae el agua caliente

Existen otros métodos aún sin experimentar, que podrían ser adecuados a la explotación de rocas calientes secas; en la figura número 8 se ve un sistema útil a base de sondeos radiales partiendo de un pozo central, este sistema podría utilizarse para rocas a poca profundidad.

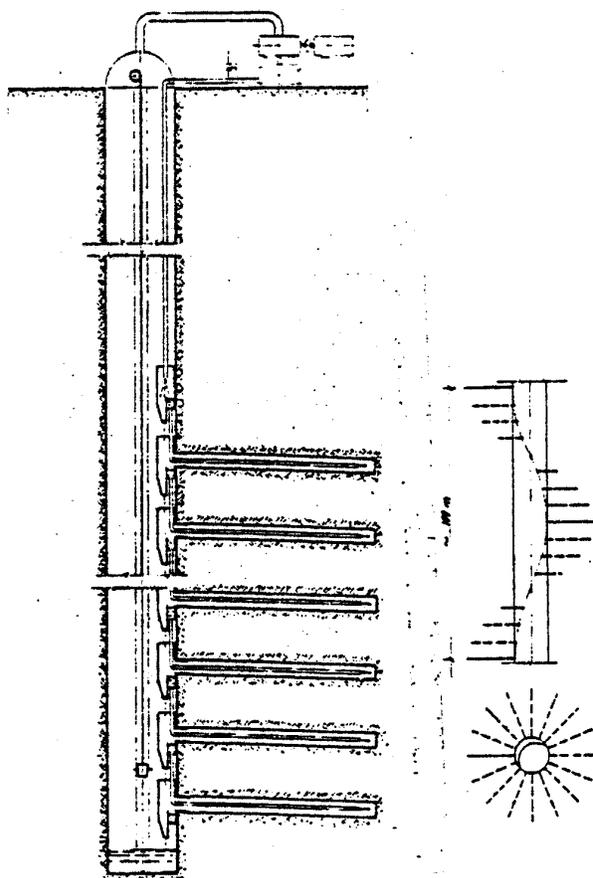


Figura nº 8

En la actualidad, el esquema más avanzado en explotación está esquematizado en la figura nº 9.

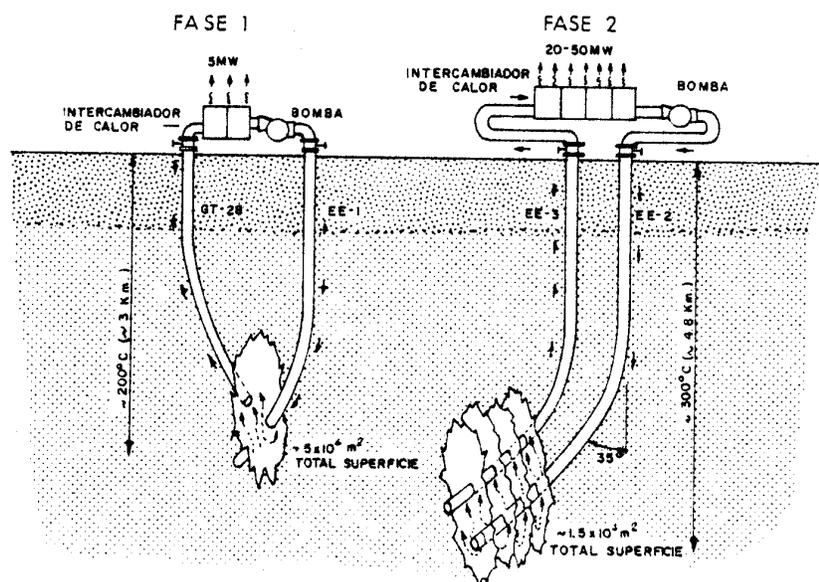


Figura nº 9

#### 4.2.- PERFORACION DE SONDEOS

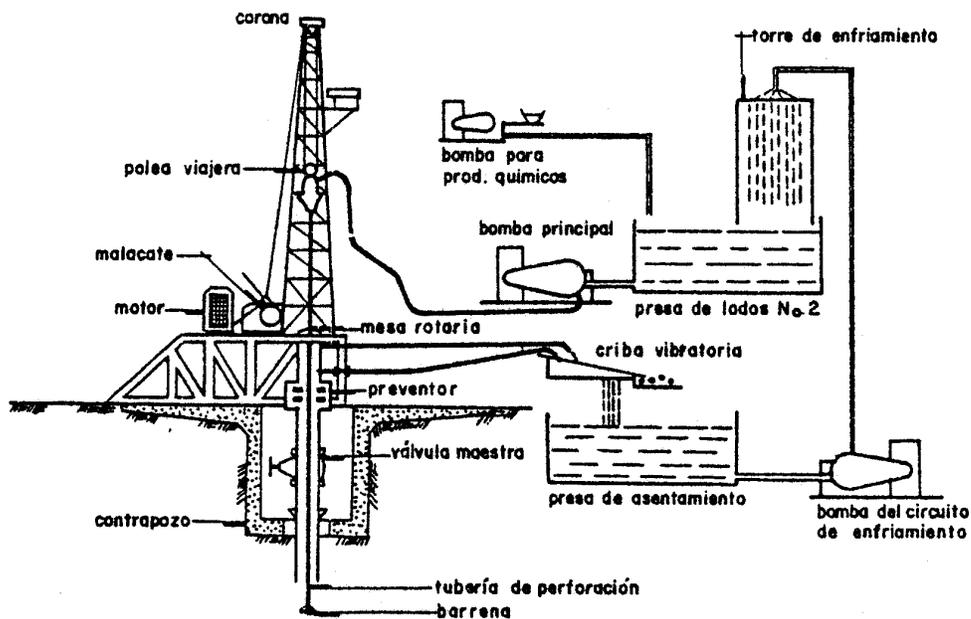
El alto costo de perforación y acabado de pozos geotérmicos de roca caliente seca es en la actualidad el obstáculo mayor para el desarrollo de los campos geotérmicos de roca caliente seca, siempre que se encuentren a grandes profundidades.

Los avances tecnológicos alcanzados en el proyecto de roca caliente de Fenton Hill, así como los de explotación de campos de vapor, ejemplo Larderello, The Geysir, han reducido el costo de las perforaciones en más de un treinta por ciento en los últimos años y se espera siga disminuyendo.

La perforación en rocas ígneas, en parte es más fácil que en rocas sedimentarias puesto que los requerimientos del fluido de perforación son menores, pero por el contrario la velocidad de perforación es mucho menor, durando más tiempo y siendo más caro. También se suelen perforar con diámetro mayor ya que el caudal del fluido inyectado (agua), para la explotación de un almacén de roca caliente seca es mayor que el contenido de campos de petróleo o gas.

El equipo de perforación es el mismo que se emplea en la investigación petrolífera, figura nº 10, con alguna variación como puede ser la torre de refrigeración.

Las perforaciones con elevadas temperaturas presentan muchos problemas en los triconos, cementaciones, packers, flujos de perforación, equipo de diagráfias, etc.



*Diagrama del equipo rotatorio de perforación.*

Figura nº 10

#### 4.2.1.- Triconos

En la mayor parte de las perforaciones geotérmicas, se emplean triconos de inserción con dientes de acero o carburo de tungsteno. Las altas temperaturas crean problemas con la inserción a causa del coeficiente de dilatación de los distintos materiales, el acero posee un coeficiente mayor que el carburo de tungsteno.

Las coronas de diamantes soportan temperaturas que superan los 550°C, pero la velocidad de penetración con estas coronas es mucho menor.

Los tipos de triconos empleados para roca caliente del basamento, normalmente son de tipo 637, 737, 837 según la clasificación internacional y se emplen de botones insertados de carburo.

#### 4.2.2.- Cementaciones

El objetivo de las cementaciones para los campos geotérmicos de roca caliente seca, es el llenado de anular existente entre el casing y las paredes de la formación con cemento, para poder evitar la contaminación e invasión de otros fluidos de formación, además deben proteger el casing contra la corrosión que produce el fluido de circulación para la explotación de la roca caliente.

Los cementos puzolánicos para altas temperaturas, han presentado gran número de problemas. En el caso de instalar tapones de cemento para variar la inclinación del sondeo, se necesitan cementos de gran consistencia debido a que normalmente los pozos de roca seca perforan formaciones muy duras, tipo granito, y si el cemento no tiene gran consistencia es muy difícil la desviación, puesto que las barrenas tenderán a perforar antes los tapones que las paredes del sondeo.

En Los Alamos los tapones de cemento han sido en su mayor parte compuestos de cemento tipo H con veinte por ciento de harina de sílice y veinte por ciento de arena de sílice de 100 mesh, además se añadieron retardadores para evitar que el cemento fraguase antes de haberse desplazado el mismo hasta

la profundidad requerida.

También se emplean tapones de cemento para las operaciones de fracturación hidráulica, en otros casos se usan packers.

En la mayor parte de los pozos geotérmicos de alta temperatura, se utilizan cementos de tipo G con un cuarenta por ciento de harina de sílice que permiten temperaturas de 300°C, a los cuales se le añaden elementos retardadores de fraguado.

#### 4.2.3.- Fluidos de perforación

En el caso de sondeos geotérmicos de roca caliente seca puede ser necesario el uso de fluidos distintos según las zonas que se estén perforando.

Normalmente antes de llegar a la roca seca, se atraviesan algunos acuíferos en donde se suelen producir pérdidas de fluido o ganancia de agua en el pozo, dependiendo de las presiones de formación y de la columna de fluido. Para atravesar los acuíferos, la perforación con aire es muy difícil y debe ser cambiada a perforación con lodo de tipo convencional.

En las zonas de roca caliente seca, la perforación normalmente se realiza con agua o con aire.

#### 4.2.4.- Packers

Los packers u obturadores utilizados en la industria del petróleo, no son muy válidos para las fracturaciones de las formaciones en los pozos de roca caliente. Para el proyecto de Los Alamos varias compañías han desarrollado algunos que resisten temperaturas de 200°C y presiones de 2000 psi. En lu-

gar de packers de gomas se ha desarrollado un packer de asbestos que resiste altas temperaturas.

#### 4.2.5.- Tuberías

En los pozos geotérmicos de roca caliente seca, la zona de producción no queda entubada al ser formaciones consolidadas de tipo granítico principalmente.

Los diámetros más utilizados para las tuberías son -  $17\frac{1}{2}$ " ,  $13\frac{3}{8}$ " y  $9\frac{5}{8}$ " .

La mayor parte de los problemas que se producen en las tuberías, son debidos a no haber realizado una buena cementación de los espacios anulares, entre tuberías y entre tuberías y formaciones.

Los factores principales que influyen en el dañado de la tubería son la corrosión y la fatiga térmica.

La corrosión puede ser por el exterior de la tubería, - causada por las salmueras de las formaciones superiores a la roca seca. La corrosión es acelerada por fallos en la cementación, produciéndose una circulación de aguas por el anulus entre distintas zonas permeables.

La fatiga térmica en las tuberías, es un problema que no puede ser evitado y se produce por las diferentes deformaciones que se dan en la tubería, al ser calentada y enfriada - en los periodos de producción y paro.

Las tuberías que se usan normalmente son del tipo J-55, K-55 y N-80.

#### 4.2.6.- Perforación dirigida

Los pozos geotérmicos que explotan el calor de rocas calientes secas, necesitan hacerse dirigidos y controlados de forma tal, que mediante un doblete puedan explotarse las fracturas creadas artificialmente.

En el caso de Los Alamos (Fenton Hill), los pozos fueron desviados 180° en azimut y 35° de la vertical.

En el caso de que en un sondeo se cerrasen las fracturas por deposición de materiales, incrustaciones, etc, podría ponerse de nuevo en producción desviando la última parte del pozo y cortando de nuevo las fracturas.

En la figura nº 11, se puede ver el equipo para las desviaciones en los pozos.

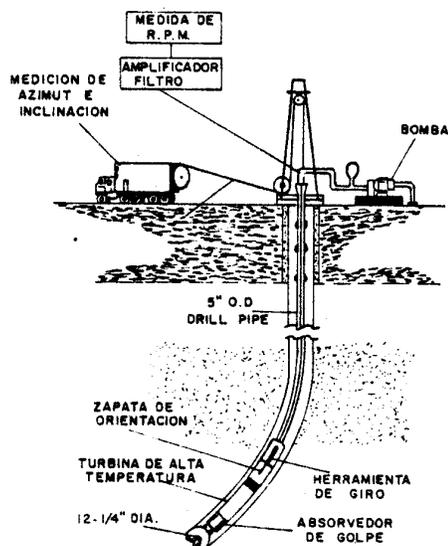


Figura nº 11

Las partes principales del equipo son:

**Motor de fondo:** Suministra fuente de perforación sin rotación del varillaje, de esta manera el azimut puede ser preseleccionado y registrado, se deben utilizar triconos de pocas revoluciones por minuto. Se han desarrollado nuevos tipos de motores debido a las limitaciones de temperatura, que presentan los elastomeros de estas unidades.

**Subcurvo:** Es una sección pequeña angular necesaria para hacer direccional la sarta.

**Collar antimagnético:** Se utiliza para poder medir con el magnetómetro, el cual no puede utilizarse dentro del varillaje.

**Sub de orientación:** Es una pequeña pieza que sirve para establecer en la perforación el ángulo requerido.

**Herramienta de dirección:** Es un instrumento que se baja con cable y que define el ángulo azimutal y la inclinación.

**Indicador de revoluciones:** Necesario para determinar la velocidad de rotación de la turbina.

En Los Alamos se han probado distintos motores de perforación y herramientas de registro de dirección, entre ellos:

## MOTORES

<u>Compañía</u>	<u>Temperatura</u>	<u>Diámetro</u>
Baker	175°C	6 3/4
Dyna Drill Smith	155°C	7 3/4
Maurer Eng	275°C	7 3/4

## INSTRUMENTOS DE REGISTRO

<u>Compañía</u>	<u>Temperatura</u>	<u>Tipo de sensor</u>
Eastman-Whipstock	275°C	Magnetómetro con inclinómetro
Sperry-Sun	316°C	Magnetómetro con inclinómetro
Scientific Drilling Controls	200°C	Magnetómetro con inclinómetro

El cambio controlado en azimut del sondeo, es la operación más difícil y requiere un registro casi continuo de la orientación.

En la figura nº 12, se pueden ver las orientaciones de los dos últimos pozos.

4.2.7.- Acabado de pozos

Dependiendo del tipo de formación que constituye la roca caliente seca se terminará el pozo.

La mayor parte de los almacenes de roca caliente seca,

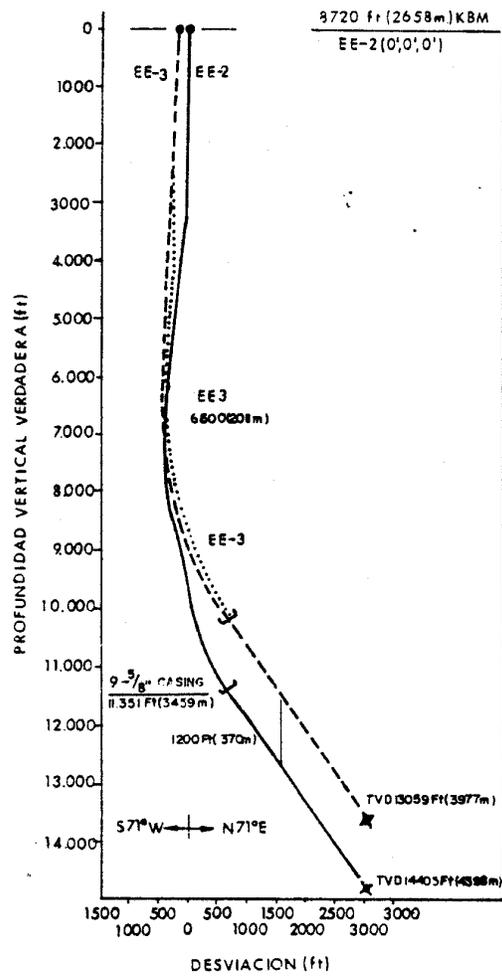


Figura nº 12

son creados en granitos que son muy consolidados, en este caso, puede dejarse el pozo sin entubar la última fase.

Un programa tipo, es perforar en 8½" el almacén y dejar el casing de 9 5/8" superior como tubería de producción, este casing debe quedar cementado desde el fondo, pero no en toda su longitud.

#### 4.2.8.- Estimulación

Estudios realizados por el Instituto francés del Petróleo han demostrado que soluciones de hidróxido sódico, incrementan la permeabilidad en las proximidades de las fracturas de rocas cristalinas.

Se han observado que a altas temperaturas, la sílice es disuelta cuando se añade etanol a la solución de hidróxido sódico.

En experimentos realizados en laboratorio sobre gneises granodioritas y granitos a 100°C y 100 bars, durante 144 horas se han obtenido los siguientes resultados:

- Gneises con NaOH, pérdida de peso 5% incremento permeabilidad de  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$ .
- Granodioritas con Na OH, pérdida de peso 4% incremento de permeabilidad de  $10^{-6}$  a  $10^{-3}$ .
- Granitos con Na OH, pérdida de peso 16% incremento de permeabilidad de  $10^{-7}$  a  $10^{-3}$ .

#### 4.3.- FRACTURACION

El calor almacenado en las rocas calientes secas, puede ser extraído mediante la circulación de un fluido a través de fracturas, creadas artificialmente en la roca.

Existen diferentes métodos de crear las fracturas:

- Fracturación hidráulica.
- Fracturación con explosivos
  - Explosivos convencionales
  - Explosivos nucleares
- Fracturación con explosivos e hidráulica.

##### 4.3.1.- Fracturación hidráulica

Se realiza bombeando agua en el pozo a gran presión sobre una zona que ha sido aislada, bien con packers o bien con tapones de cemento. Una vez que se supera la presión de ruptura de la formación se empiezan a crear más fracturas.

La presión necesaria para ampliar las fracturas iniciales es menor que la de ruptura.

El bombeo se continua hasta que las fracturas se han extendido lo deseado.

En el caso de explotación de roca seca mediante un doble te, se pueden realizar las fracturas de las siguientes formas:

- Fracturación desde el primer sondeo con anterioridad a la ejecución del segundo sondeo, y así dirigir el segundo sondeo a la zona de fracturas, figura nº 13.
- Fracturación desde el primer sondeo una vez ejecutado el segundo, así se puede observar en el segundo sondeo si la fracturación llega a él.
- Fracturación desde ambos sondeos, hasta que se establezca circulación entre los dos.
- Fracturación desde un sondeo y circulación concéntrica del fluido en el mismo sondeo, figura nº 14.

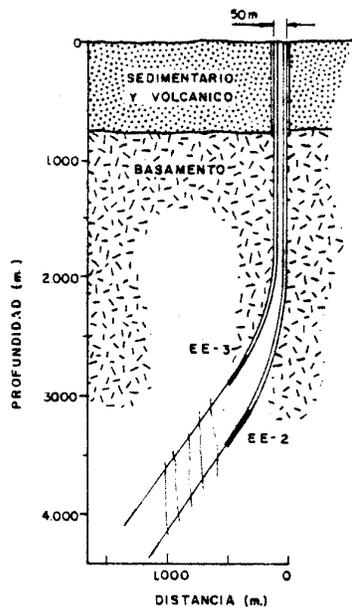


Figura nº 13

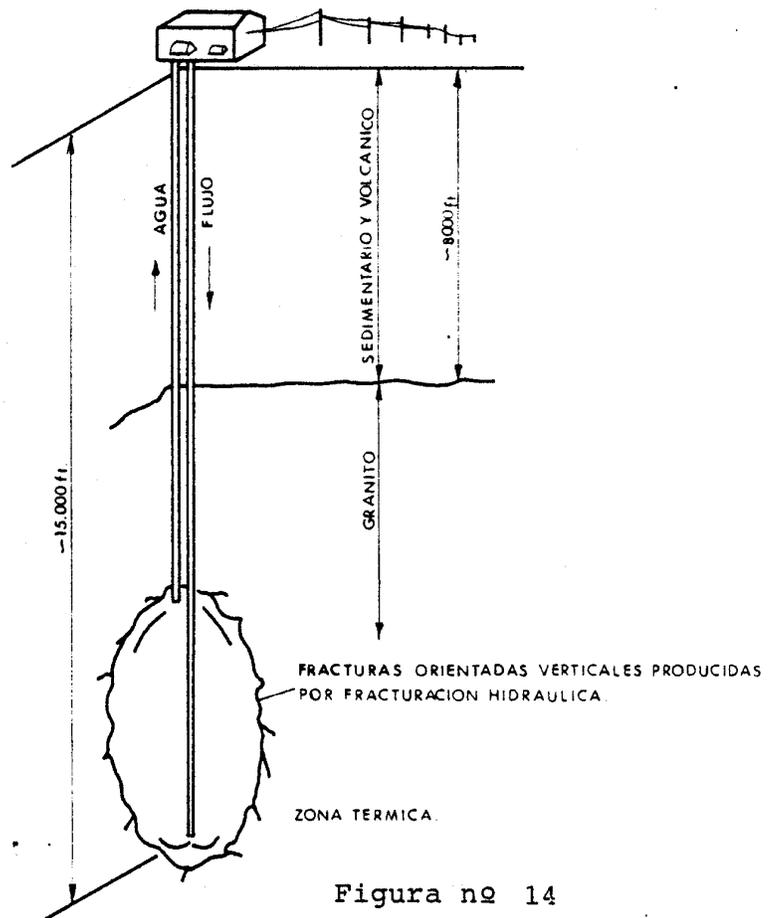


Figura nº 14

Una vez que se han creado las fracturas, estas se irán agrandando puesto que la formación se fractura por enfriamiento, la disminución de viscosidad con la temperatura induce la circulación del fluido (agua) por nuevas zonas de fracturas.

También ocurre que el agua de circulación para extracción del calor, disuelve algunos elementos por ejemplo sílice, y puede causar problemas de corrosión, incrustación, etc, en los elementos de superficie, puede darse el caso de que los elementos disueltos lo fueran en tal concentración que pudieran explotarse económicamente.

#### 4.3.2.- Fracturación con explosivos

Una explosión causa una onda de choque desde la zona de carga. Si la presión de la onda de choque excede la fuerza dinámica de la roca, puede causar la fracturación.

El papel de la carga de explosivo, es producir una zona de fracturas cercanas al pozo por las cuales puede circular un fluido.

Este proceso destruye las tensiones en el pozo. Es necesario evitar que la explosión sea de tal magnitud que haga que la roca se deforme plásticamente.

Es de gran importancia la selección de un explosivo que resista altas temperaturas. En Cornwall (Inglaterra) se han realizado fracturaciones con explosivos y varias veces han fallado debido al efecto térmico, el explosivo utilizado ha sido una mezcla de triaminotrinitrobenzeno (TATB) y una sustancia inerte, estas sustancias aguantan 250°C pero se desconoce su efecto a mayor temperatura.

#### 4.3.3.- Fracturación mixta (Explosivos e Hidráulica)

Este es el sistema empleado en Cornwall, se realiza una fracturación primera con explosivos seguida de una fracturación hidráulica con inyección de agua, figura nº 15.

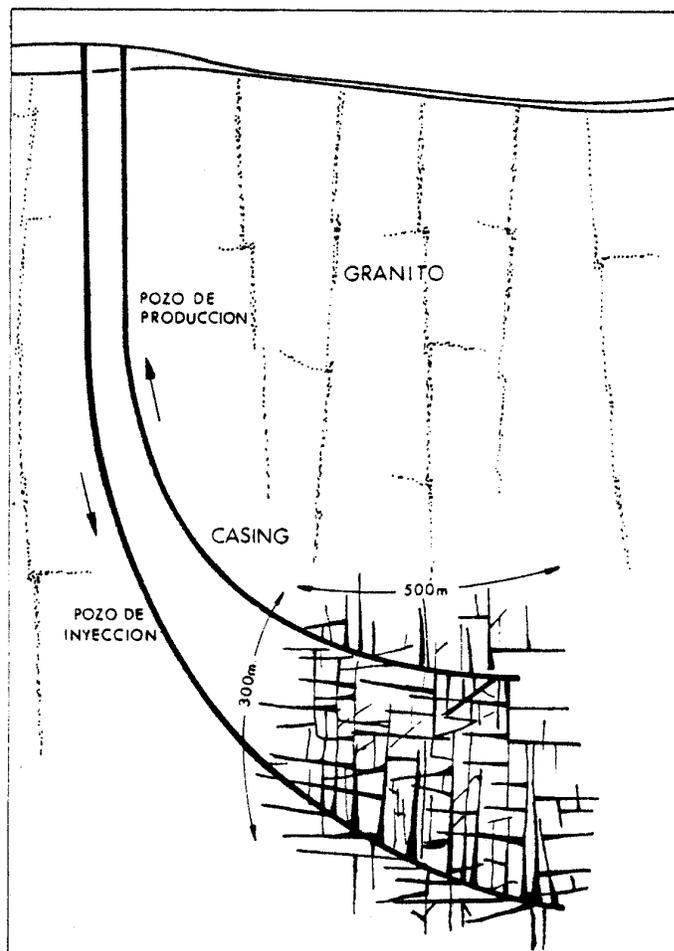


Figura nº 15

En la figura nº 16, se puede ver el efecto de la proximidad de las fracturas y la forma de evolución de las temperaturas de explotación con el número de días.

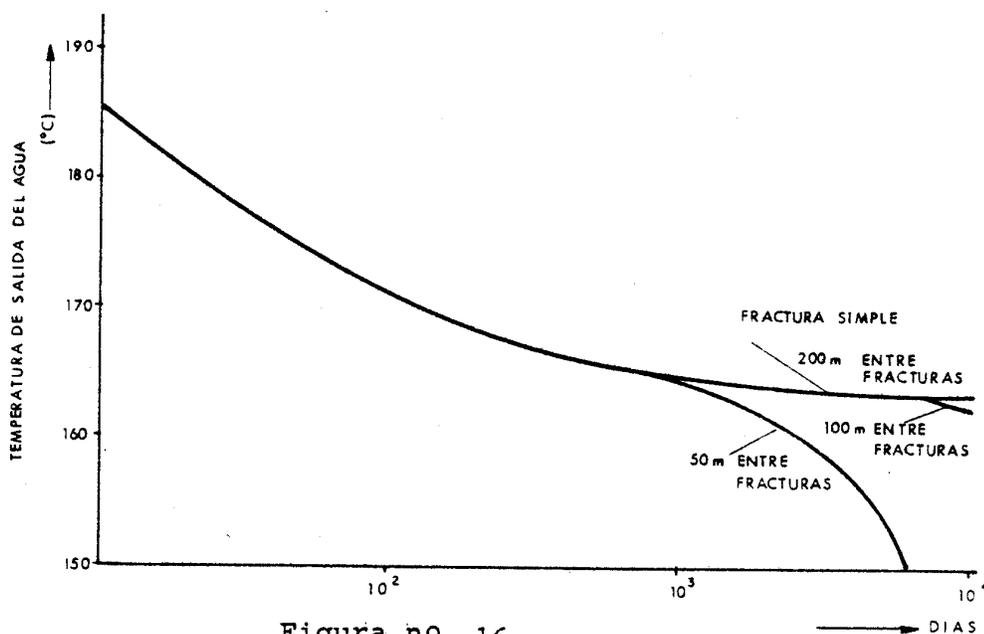


Figura nº 16

Parece que fracturas separadas más de 100 m no presentan interacción en treinta años de explotación.

#### 4.3.4.- Localización de fracturas de explotación

Existen varios métodos para la determinación de fracturas que en parte se complementan y que por sí solos difícilmente son resolutivos. Una correlación entre los distintos registros puede definir los parámetros de las fracturas, clase de fracturas, longitud, espesor, crecimiento durante la inyección de fluido.

Los métodos de localización podemos dividirlos según la distancia entre las fracturas y los instrumentos de medida.

- Medidas in situ

En pozo abierto.

Métodos de seismos, acústicos y métodos basados en la medida -  
del campo electromagnético:

- Televisión en pozo
- Diagrafía sónica
- Diagrafía de microondas
- Interferómetro laser
- Radar

Métodos magnéticos y eléctricos:

- Diagrafía de inducción
- Laterolog
- Diagrafía de resistividad normal
- Microlog-Microcaliper
- Potencial espontaneo
- Diagrafía de buzamiento
- Diagrafía de potencial inducido
- Medidas de piezoelectricidad

Métodos de Trazadores:

- Diagrafía de densidad
- Diagrafía de rayos gamma
- Diagrafía neutrónica
- Diagrafía de trazadores radiactivos

Métodos mecánicos:

- Diagrafías caliper
- Packer de impresión
- Tiltmeter

Sondas auxiliares:

- Medidas de tensión en el pozo
- Flowmeter
- Diagrafías de temperatura

En pozo entubado.

Métodos acústicos, seismos y de medidas de campo electromagnético:

- Diagrafía sónica
- Interferómetro laser

Métodos de trazadores:

- Diagrafía de rayos gamma
- Diagrafías neutrónicas
- Diagrafías de trazadores radiactivos

Sondas auxiliares:

- Flowmeter
- Diagrafías de temperatura

- Medidas a distancia

En el interior del pozo.

Métodos acústicos, seismos y de medida del campo electromagnético:

- Mapa de microseismos (sismicidad pasiva)
- Métodos acústicos (sismicidad activa)
- Medidas de alta frecuencia

Métodos magnéticos:

- Anomalías magnéticas inducidas

Métodos mecánicos:

- Tiltmeter

En superficie.

Microsismicidad (mapas de sismicidad pasiva).

Medidas del efecto skin.

4.3.5.- Productividad y vida de las fracturas

La cantidad de calor extraído de los almacenes de roca caliente seca, depende de la superficie de fracturación y de sus interconexiones.

Durante el proceso de explotación a medida que las fracturas se van enfriando por el fluido inyectado, se va produciendo

do una fracturación secundaria por efecto térmico, de tal manera que la superficie de intercambio calorífico aumenta.

De las explotaciones existentes se ha visto que el fenómeno de fracturación secundaria no incrementa en más de un 20% la energía extraída de la roca caliente seca.

#### 4.4.- PARAMETROS DE EVALUACION

Los parámetros principales que afectan a la evaluación, de almacenes de roca caliente seca, son:

- Superficie de intercambio calorífico.
- Pérdidas de fluido de inyección (agua).
- Impedancia de flujo.

##### 4.4.1.- Superficie de intercambio calorífico

La geometría de la superficie de intercambio, puede deducirse por los métodos anteriormente vistos. Los más comunes utilizados son: trazadores, flowmeter, diagrañas de temperatura y ensayos de extracción de calor. Estos experimentos son básicos para obtener un modelo del yacimiento.

En la figura nº 17 se representa un modelo de almacenes con dos sondeos, que atraviesan tres fracturas verticales.

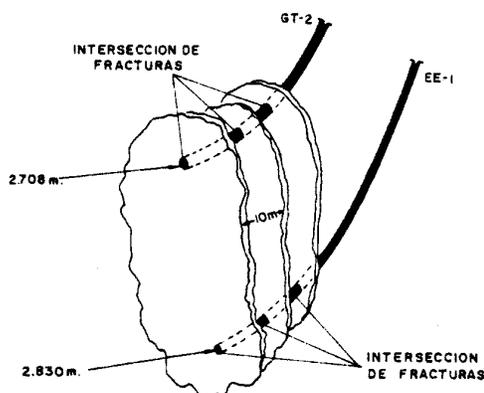


Figura nº 17

#### 4.4.2.- Pérdidas de fluido de inyección (Agua)

El fluido utilizado para la extracción de calor, es el agua por los siguientes motivos:

- Fluido más económico
- Estabilidad térmica
- Estabilidad química
- Elevada capacidad calorífica
- Abundancia
- Seguridad

La diferencia de densidad entre el agua de inyección (fría) y el agua de producción (caliente), puede causar una circulación normal en el circuito, pero por regla general, es necesario un bombeo suplementario para poder alcanzar grandes caudales. Como la temperatura del agua a la salida disminuye con el tiempo, sería necesario un aumento de la presión de bombeo para mantener el caudal, este fenómeno puede contrarrestarse por el aumento en la fracturación con la disminución de temperatura.

Las pérdidas de agua son de gran importancia desde el punto de vista económico, esta pérdida es función de la presión del sistema y del caudal de inyección. La determinación de pérdidas es laboriosa, pues se requiere muchos días de circulación de agua para definir la cantidad. En la figura nº 18, se puede ver las pérdidas de agua en función del tiempo en los primeros pozos de Los Alamos.

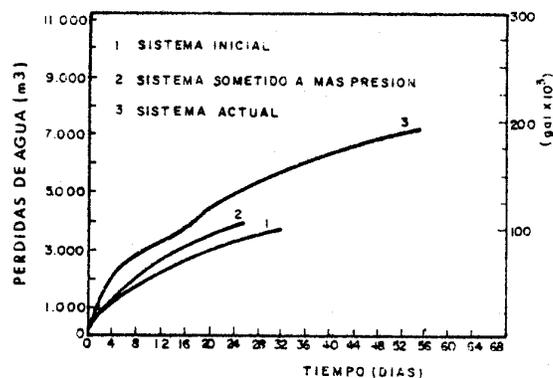


Figura nº 18

#### 4.4.3.- Impedancia de flujo

La impedancia de flujo, se define como la diferencia entre las presiones de entrada y salida dividida por el flujo de salida. Es un parámetro muy importante, utilizado en la determinación de las características del bombeo.

En la figura nº 19, se ven las medidas de impedancia - realizada en los primeros pozos de Los Alamos.

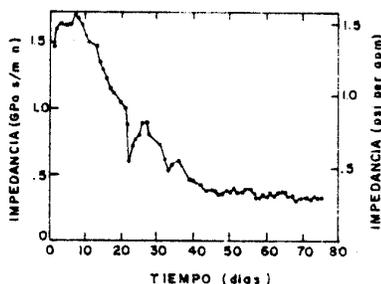


Figura nº 19

#### 4.5.- TIPO DE PLANTAS PARA PRODUCCION DE ELECTRICIDAD

La producción de energía en los yacimientos de roca caliente seca, se basa en la circulación de un fluido (agua), a través de una superficie de intercambio calorífico creada artificialmente (fracturas).

La extracción en superficie del calor del agua de circulación se realiza en un intercambiador, en las figuras nos 20 y 21. puede ver el esquema de funcionamiento de una planta de roca caliente seca.

CONVERTIDOR ENERGETICO SUBTERRANEO

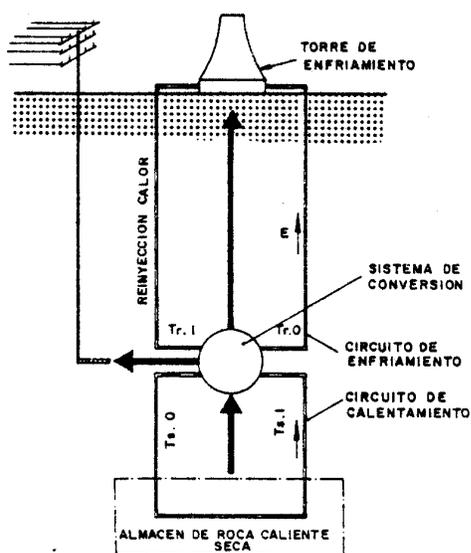


Figura nº 20

CONVERTIDOR ENERGETICO SUPERFICIAL

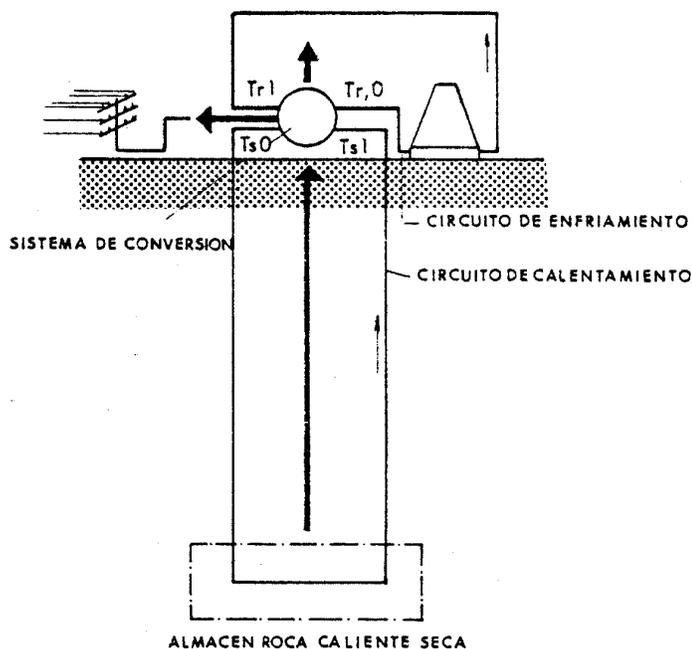


Figura nº 21

Un problema importante en los sistemas geotérmicos basados en la circulación de agua a presión como fuente energética es que hace falta una fuerte caída de temperatura para vaporizar una cantidad importante del fluido del ciclo superficial.

Las ventajas de emplear fluidos de bajo punto de vaporización son importantes, sobre todo si la temperatura de salida del agua en el pozo de extracción es inferior a  $180^{\circ}\text{C}$ .

El empleo de ciclos binarios, figura nº 22, puede ser de gran interés para la utilización de esta energía.

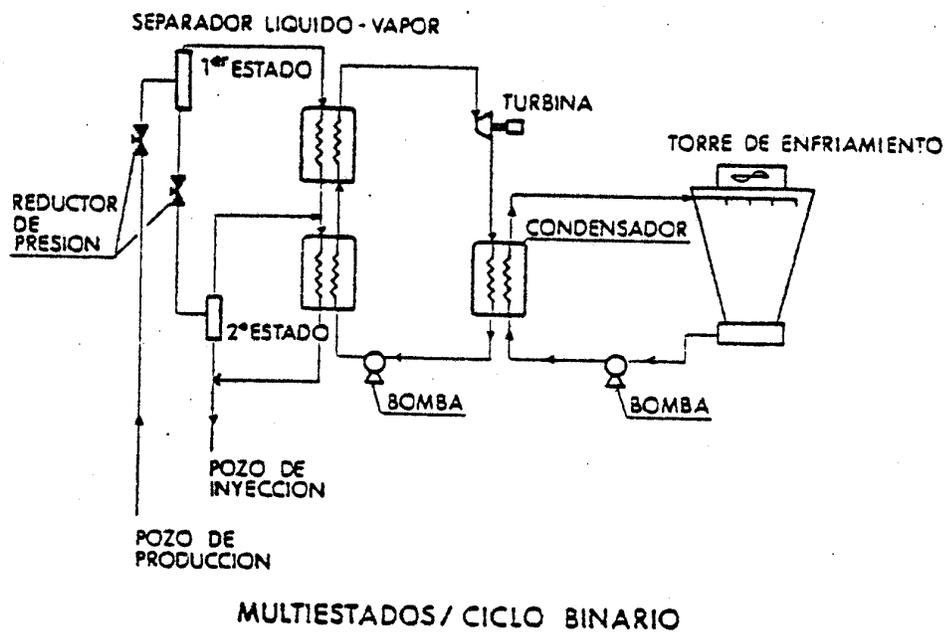


Figura nº 22

#### 4.6.- PROBLEMAS LIGADOS A LA EXPLOTACION DE ROCA CALIENTE SECA

##### 4.6.1.- Seismos

Pequeños terremotos casi inapreciables, de magnitudes comprendidas entre -6 y -2 han sido registrados en los Alamos, durante tres sucesivas inyecciones de agua a presión para ampliar el área en profundidad de intercambio calorífico, la distancia alcanzada por estos terremotos ha sido de 800 m desde el pozo de inyección. Por tanto el efecto que produce la generación de superficies de intercambio calorífico es inapreciable, solamente con ciertos aparatos es posible registrar los pequeñísimos terremotos.

Una vez creadas las superficies de intercambio (fracturas), la circulación de agua para extraer energía no presenta efectos apreciables.

Es interesante que con anterioridad a la realización de una investigación de roca caliente seca en una zona, sea instalada una estación sísmica que permita conocer la sismicidad natural.

##### 4.6.2.- Disolución de elementos

El agua inyectada para la extracción de calor, disuelve varios elementos en las zonas de intercambio calorífico (fracturas), y durante la ascensión y en superficie puede causar

problemas de deposición, corrosión, y adquisición de productos contaminantes.

La forma de evitar algunos de estos problemas es reducir la turbulencia en la tubería de extracción, adición de sustancias que impiden la adherencia de las sustancias precipitadas, adición de inhibidores de corrosión y mantenimiento de la presión en el circuito.

En la figura nº 23, se puede ver la solubilidad de la sílice con la temperatura.

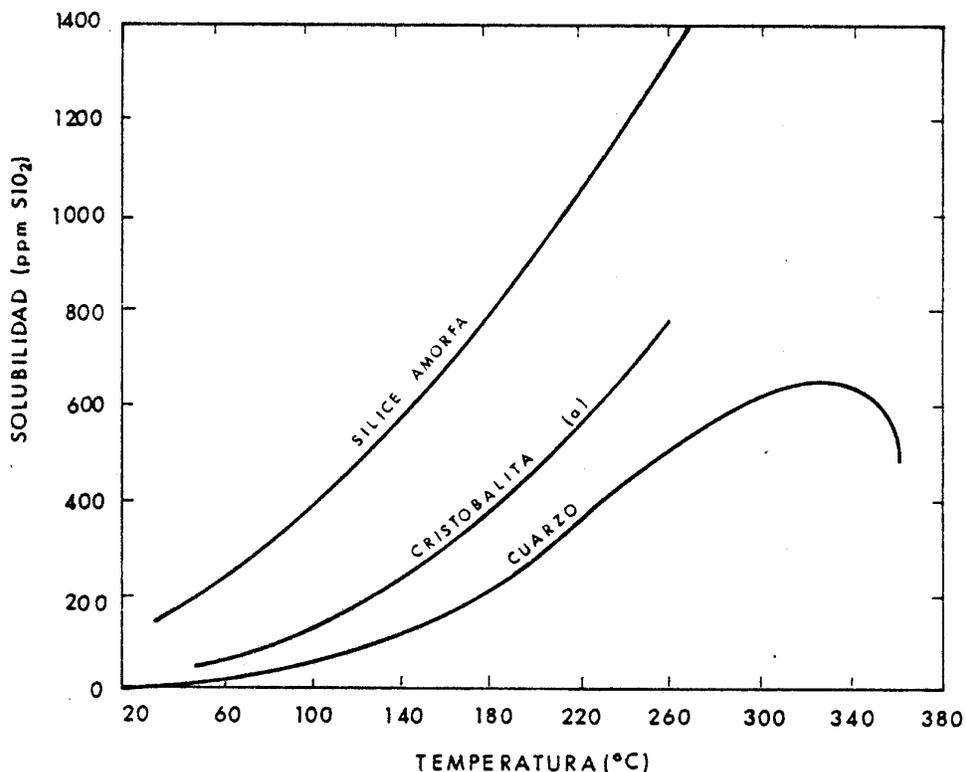
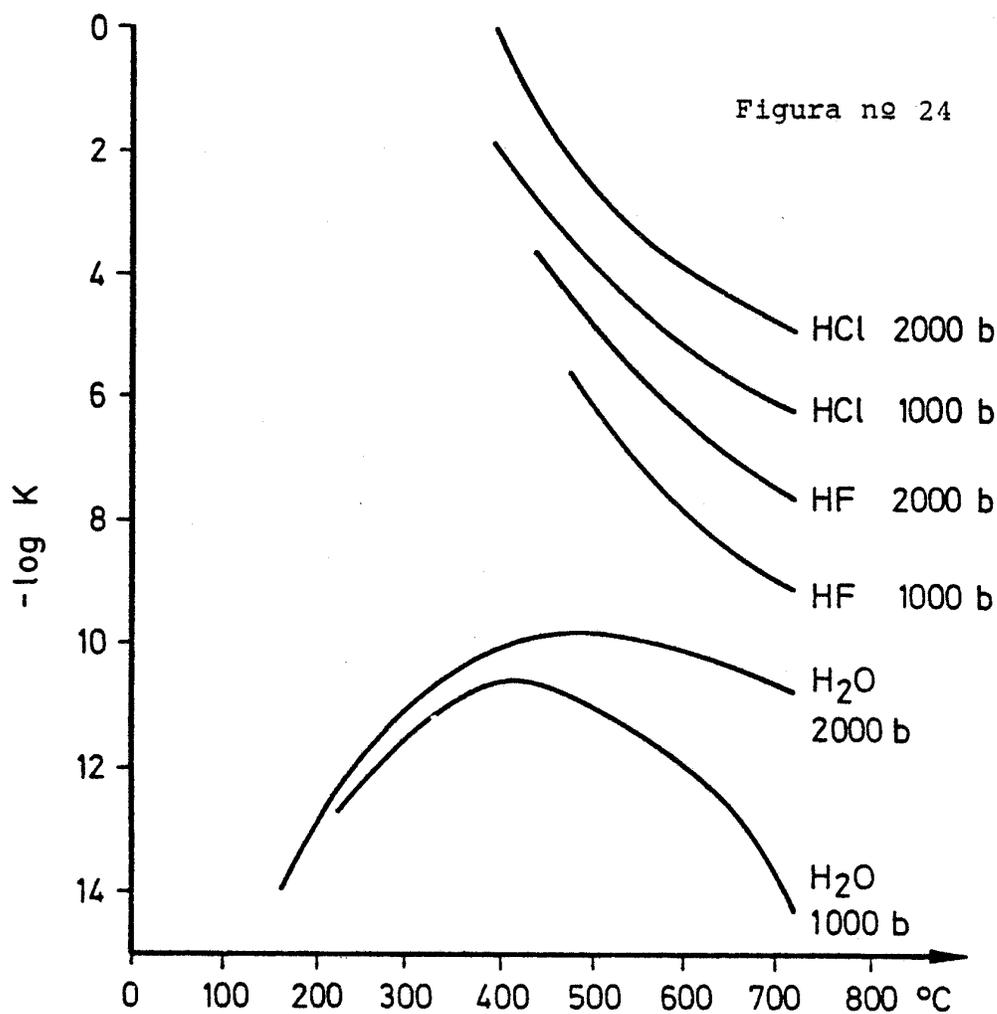


Figura nº 23

Normalmente la solubilidad de los sólidos aumenta con la temperatura y densidad. La precipitación depende fuertemente de la temperatura y presión. Figura nº 24.



En el caso de los Alamos los elementos disueltos suponían 2.000 ppm y se mantuvieron constantes durante todos los bombeos.

#### 4.6.3.- Medio Ambiente

Los proyectos de explotación de roca caliente seca pueden afectar al medio ambiente de diferentes formas:

##### - Efectos químicos:

- . polución de agua por sustancias químicas
- . polución del aire por sustancias químicas
- . dañado de edificios

- Efectos mecánicos terremotos
  - . dañado de edificios
- Cambios de temperatura

Sin embargo, el empleo de intercambiadores caloríficos en superficie para extraer el calor, elimina los efectos químicos puesto que funcionan en circuito cerrado.

Los terremotos, como se ha visto en el capítulo anterior son de escasa importancia y solamente el efecto térmico - que puede producirse de la disipación de calor a la atmósfera en la torre de enfriamiento, es posible que produzca cambios en el ecosistema.

5.- PROYECTOS DE INVESTIGACION DE ROCA CALIENTE  
SECA DESARROLLADOS EN EL MUNDO

En éste capítulo, se describen algunas de las investigaciones someras realizadas en zonas que no se han desarrollado y más en detalle las dos explotaciones que existen en la actualidad. Los casos estudiados son:

- The Aquarius Mountains Arizona.
- Water Snake River Plain, Idaho.
- Delmava Península, Virginia.
- Marysville, Montana.
- The Coso Area, California.
- Fenton Hill, Nuevo Méjico (Los Alamos).
- Cornwall, Inglaterra.
- Felkenberg, Alemania.
- Nevshehir, Turkia.
- Gothenburg, Suecia.
- Energeroc, Francia.
- Lanzarote, España.
- La Palma, España.

#### 5.1.- THE AQUARIUS MOUNTAINS, ARIZONA

Esta investigación, fue realizada por el laboratorio de Los Alamos para localizar sistemas análogos a los de Fenton - Hill. La recopilación de datos geofísicos sugería que una anomalía positiva regional térmica existía en la zona.

No existía volcanismo cuaternario, siendo los últimos episodios de volcanismo en la zona del Mioceno. Un estudio de las fuentes termales reveló la no existencia de un sistema geotérmico convencional. El gradiente geotérmico indica la existencia de temperaturas mínimas de 170°C a profundidades de 4 Km en el basamento precámbrico.

El mapa gravimétrico, indicaba un mínimo de gravedad regional desde 20 a 50 mgal. Coincidiendo con el mínimo gravimétrico existían zonas de baja sismicidad y atenuaciones de las ondas P sísmicas. Interpretaciones de datos aeromagnéticos, sugerían que la profundidad al punto de Curie debía ser relativamente poco profunda.

Mínimos de gravedad en coincidencia con zonas de atenuación de las ondas P sísmicas, normalmente se atribuyen a almacenes magmáticos silíceos.

Resultados del modelo tridimensional de observaciones magnetotélúricas, mostraban una zona de alta conductividad a aproximadamente la misma profundidad y posición horizontal, como el mínimo de densidad determinado por gravimetría.

Los análisis isotópicos de las aguas termales de la región, indicaban que están compuestos solamente por aguas meteoricas. La temperatura estimada por los análisis geoquímicos daban valores  $\leq 115^{\circ}\text{C}$ .

En la figura nº 25, se muestra un corte geológico de la zona, aunque el almacén de roca caliente seca, es similar al de Fenton Hill, difiere en otros factores geológicos, Fenton Hill se encuentra adyacente a una gran caldera cuaternaria con temperaturas superiores a 260°C.

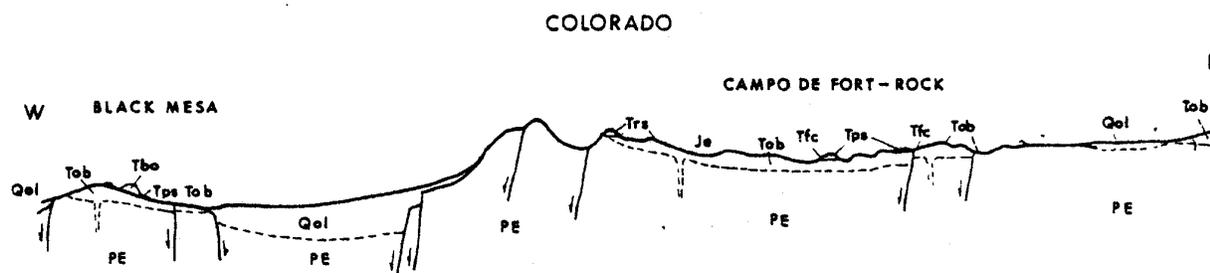


Figura nº 25

### 5.2.- WESTERN SNAKE RIVER PLAIN, IDAHO

El batolito granítico de Idaho, parece constituir un almacén de roca caliente seca. En un sondeo de 2949 m de profundidad se encontraron 192°C y un gradiente de 64°C/Km fue medido en un sondeo de 400 metros.

Investigaciones geológicas, geoquímicas e hidrogeológicas, fueron realizadas para definir el potencial en roca caliente seca de la zona y localizar un sondeo profundo, definiendo:

- La estructura del área, especialmente la localización, desplazamiento de fallas y profundidad del basamento.
- La existencia o no de permeabilidad del batolito granítico - en profundidad.
- El régimen térmico con la hidrogeología y química del agua.

En las figuras nº 26 y nº 27, se puede ver la localización de fracturas, un corte geológico y la anomalía de Bouguer.

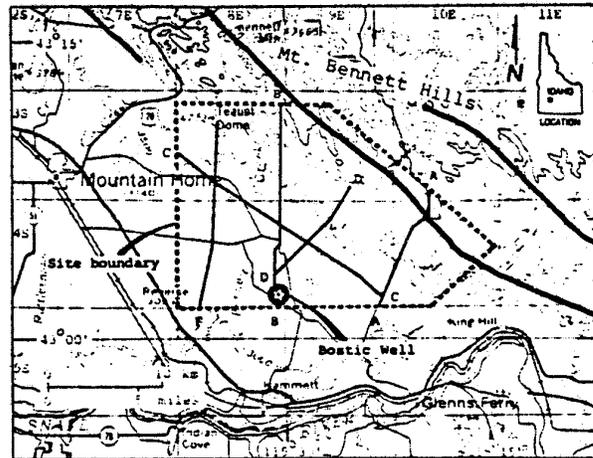


Figura nº 26

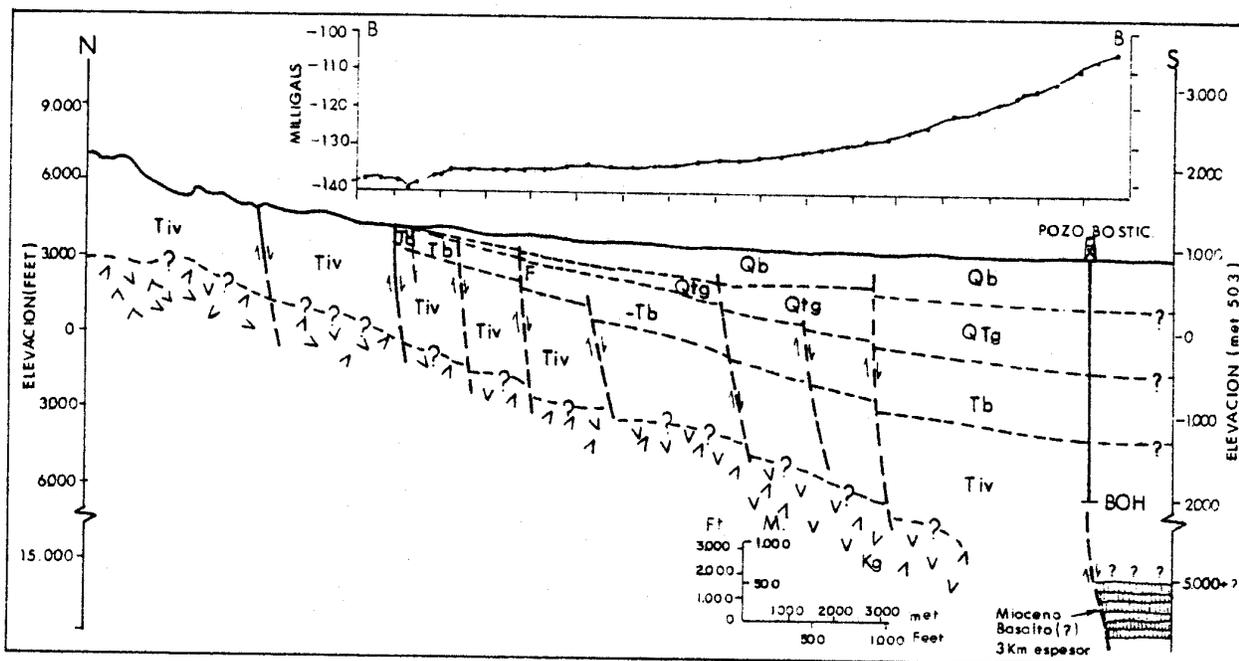


Figura no 27

La gravimetría, muestra una pequeña anomalía que está a asociada con la anomalía magnética, la cual disminuye de Sur a Norte. Ha sido interpretado como una falla normal con un desplazamiento de más de 3000 m.

El perfil telúrico muestra una estructura en profundidad, decreciendo la resistividad rápidamente en el Norte, esta disminución coincide con un mínimo gravimétrico. Estos datos pueden indicar alta porosidad en profundidad o una sección ancha con fallas.

La geoquímica de las aguas analizadas, indica temperatuu

ras de unos 80°C. El oxígeno y deuterio definen como casi en su totalidad las aguas tienen origen en las precipitaciones de las zonas altas de la región.

El gradiente medio de temperatura es aproximadamente 62°C/Km, aunque con algunos valores de 88°C/Km.

Las medidas de flujo calorífico no son representativas del flujo de calor en profundidad, esto es debido a la gran importancia de las aguas subterráneas en la zona, se han calculado valores de 400 mwm<sup>-2</sup> a profundidades de ½Km.

En conclusión este batolito granítico parece de gran interés para explotación de roca caliente seca, evitando la parte Norte por posible alta permeabilidad.

### 5.3.- PENINSULA DE DELMARVA

Está situada entre Maryland y Virginia, ofrece condiciones favorables para la extracción de calor de roca seca.

El flujo calorífico es uniforme en toda la zona, con valores de 1.6 y 1.8 HFU que son más altas que en la mayor parte de la Costa Atlántica de los Estados Unidos, aunque no hay aumento aparente de flujo en los granitos profundos.

La no existencia de sismicidad y las temperaturas medidas de 100°C en el basamento granítico, indican la posibilidad de existencia de HDR.

Varias técnicas fueron empleadas para el estudio de las condiciones de las rocas de basamento y potencial de HDR, aero

magnetismo y gravimetría, han sido de las más resolutivas, sísmica de reflexión fue esencial para definir la geología.

Técnicas eléctricas y electromagnéticas no han sido muy útiles por los contrastes de resistividad.

Campañas de sondeos de 300 m de profundidad, han sido de gran utilidad para medidas de gradiente y flujo calorífico.

La zona no ha sido aún perforada con algún sondeo profundo.

#### 5.4.- MARYSVILLE, MONTANA

Esta zona fue seleccionada para el estudio de HDR, por la creencia de que rocas fundidas existían a pocos kilómetros de profundidad.

Los datos de partida fueron tomados de varios sondeos de flujo calorífico, en estos existían flujos anómalos de 3.1, a 19,5 HFU.

Durante el siguiente estado de investigación, campañas geológicas y geofísicas fueron realizadas para desarrollar un modelo geológico. A continuación se rehizo un sondeo de 2070 m con sus pruebas, en el que se ve que existía una temperatura de 93°C a 610m, pero que la misma no aumentaba de 610 a 2070 m con lo cual se abandonó temporalmente el estudio de roca seca.

En ésta zona las medidas de flujo existentes mostraban, valores 10 veces superiores a la media regional. Esto en parte indujo al planteamiento del estudio de HDR, además en la zona no existían manifestaciones superficiales tales como volcanis-

mo joven, fuentes termales, etc.

Una interpretación del flujo calorífico fue que existía un plutón granítico, de varios kilómetros a 2,5 Km de la superficie y con temperaturas próximas a 500°C. Medidas iniciales de resistividad mostraban que había poco agua cerca de la superficie. En 1975 se planteó el programa de trabajo para el desarrollo del posible almacén de roca caliente seca.

Dentro de las técnicas geológicas utilizadas, están los mapas geológicos, análisis geoquímicos, mapas de minerales metamórficos y análisis estructurales.

Como técnicas geofísicas, se realizaron dos clases diferentes de medidas de resistividad (dipolo y magnetotelúrico-audiomagnetotelúrico), gravimetría, vuelo de infrarrojos, aeromagnetismo, perforación para determinaciones de flujo, microterremotos y ruido sísmico.

La petrología de las rocas metamórficas fue importante para la interpretación de los datos geofísicos.

La existencia de una zona de diopsido, contacto de rocas metamórficas implica la existencia de un gran volumen de masa ígnea, debajo de la zona metamórfica.

En la figura nº 28 se puede ver un resumen de los resultados de exploración geológica.

Los datos geofísicos, no se correlacionan en esta zona tan bien como los datos geológicos, se aprecia que en el Sureste existe alto sonido de microterremotos.

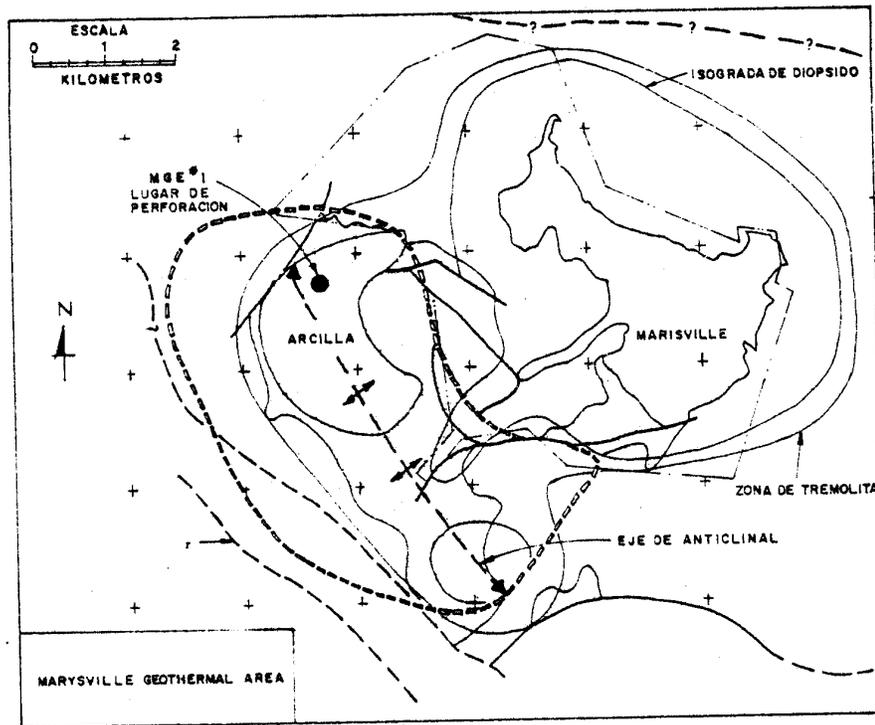


Figura nº 28

Un mínimo de gravedad residual, aparentemente se encuentra asociado con la anomalía de flujo.

Aunque parece que valores bajos de resistividad normalmente están asociados con recursos hidrotermales, existen zonas en donde ocurre lo contrario.

En la figura nº 29 se refleja las respuestas de la geofísica en la zona.

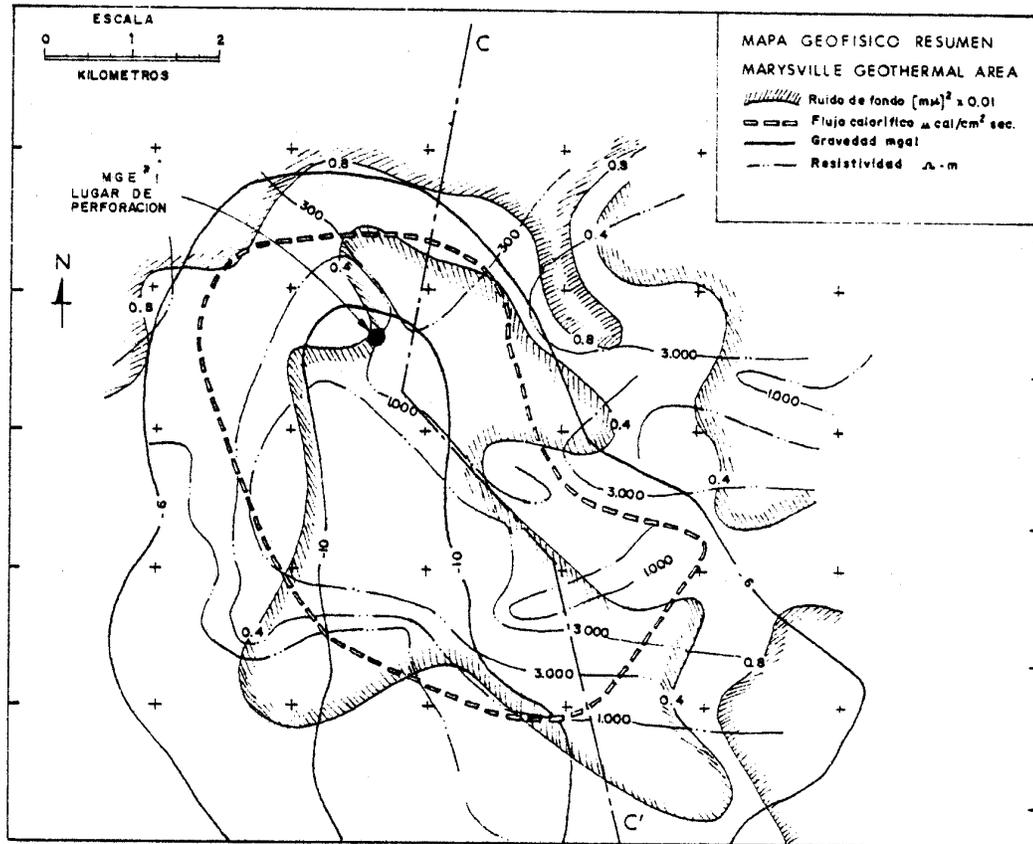


Figura nº 29

Resultados del audiomagnetotelérfico, suponen que no existen variaciones importantes de resistividad, hasta profundidades de muchos cientos de metros.

Los menores valores de ruido de fondo han sido encontrados en el área de anomalía geotérmica.

La detección por infrarrojos desde avión en ésta zona

ha dado buenos resultados a falta de fumarolas, manantiales -  
 termales y zonas calientes, además el nivel de ruido por la  
 elevación, microclima y vegetación es elevado y afecta en gran  
 medida el resultado de la investigación por infrarrojos.

Se realizaron modelos para simular el flujo de calor y  
 definir la existencia de una cámara magmática en profundidad.

En 1974 se comenzó un sondeo de 2070m de profundidad, -  
 empleando como fluido de circulación agua para la mayor parte  
 del sondeo.

Durante la perforación se encontraron grandes cantida-  
 des de agua hasta 1032 m de profundidad, lo cual fue una sor-  
 presa puesto que los registros geofísicos realizados en super-  
 ficie, incluyendo resistividad eléctrica y magnetotelúricos no  
 lo habían puesto en evidencia.

El sondeo fue perforado y entubado según el siguiente -  
 programa:

	<u>PERFORACION</u>	<u>ENTUBACION</u>
0 - 35 m	Ø 66 cm	Ø 50 cm
35-404 m	Ø 44 cm	Ø 31 cm
404-1300 m	Ø 31 cm	Ø 24 cm
1300-2070 m	Ø 20 cm	

El sondeo fue abandonado para geotermia pero se dejó  
 abierto para estudios hidrogeológicos.

Durante la perforación se realizaron diagrfías de tipo  
 densidad-neutrón resistividad, cementación, radioactividad na-  
 tural, fracturación, desviación del sondeo, temperatura y flu-  
 jo de agua.

Las medidas de temperatura fueron realizadas de cuatro formas distintas:

- Termómetro de resistencia Blackwells limitado a profundidades máximas de 800 m y máximas temperaturas de 100°C.
- Termómetro de resistencia de platino.
- Kuster.
- Temperaturas de máxima de mercurio.

Las mayores medidas de temperatura fueron de 93 a 96°C. En la figura nº 30 se puede ver el corte estructural una vez realizado el sondeo.

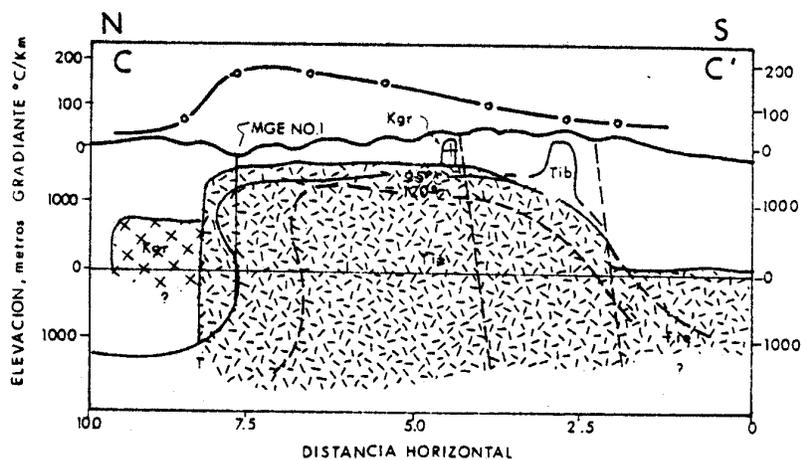


Figura nº 30

#### 5.5.- AREA DE COSO

Esta zona de California, ya era conocida como de interés geotérmico por las manifestaciones en superficie de tipo fumarolas, manantiales termales y rocas alteradas. Existen rocas -

volcánicas cenozoicas con 37 domos de riolita, indicativas de recientes intrusiones del magma en la zona.

Hasta el año 1964, no se habían realizado estudios científicos sobre la zona, comenzándose con reconocimientos geológicos, fotogeológicos, petrología, medidas magnetométricas, medidas gravimétricas e investigaciones mineralógicas que culminaron en la perforación del sondeo, Coso n<sup>o</sup> 1 en 1967 en una zona de falla en donde existen fumarolas, se alcanzó 114 m de profundidad con temperaturas de 142°C.

Posteriormente se delimitó una zona por infrarrojos y - los mapas de resistividad eléctrica encontraron zonas conductoras cerca de las fumarolas.

Se detectó un alto nivel de ruido sísmico y anomalías gravimétricas negativas, interpretadas como el resultado de intrusiones magmáticas.

A finales del 1974 se realizaron estudios intensivos sobre la zona, incluyendo mapas geológicos, geoquímica de las rocas volcánicas cenozoicas, geocronología de las rocas volcánicas cenozoicas, geoquímica de fluidos geotérmicos, gravimetría aeromagnetismo, sondeos someros de determinación de flujo calorífico, investigaciones de actividad activa y pasiva sísmica.

En la figura n<sup>o</sup> 31 se puede ver el mapa residual de los registros.

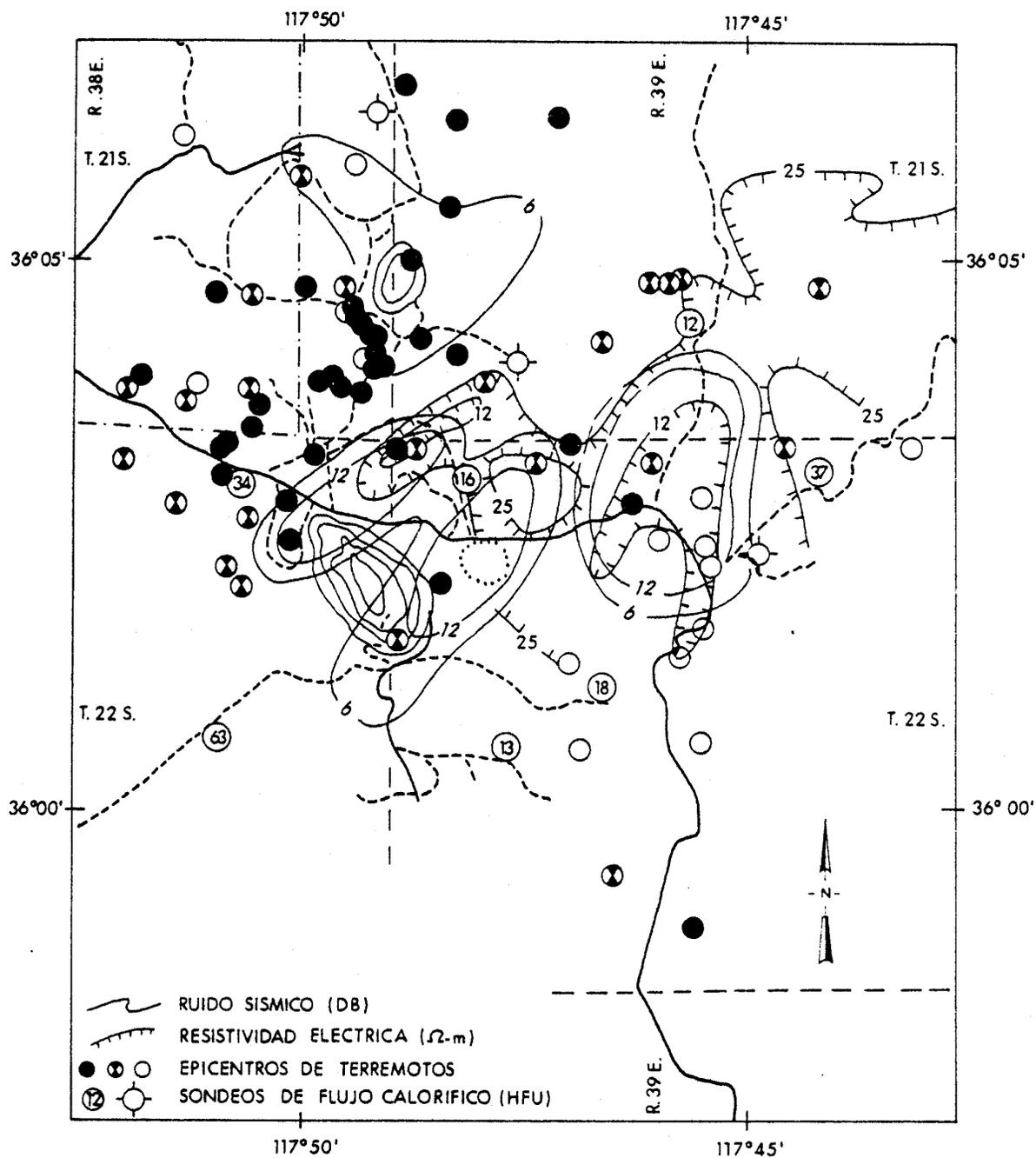


Figura nº 31

Con anterioridad a una perforación profunda, se realizó el modelo geológico de la zona. En la figura nº 32 se puede ver el modelo geológico.

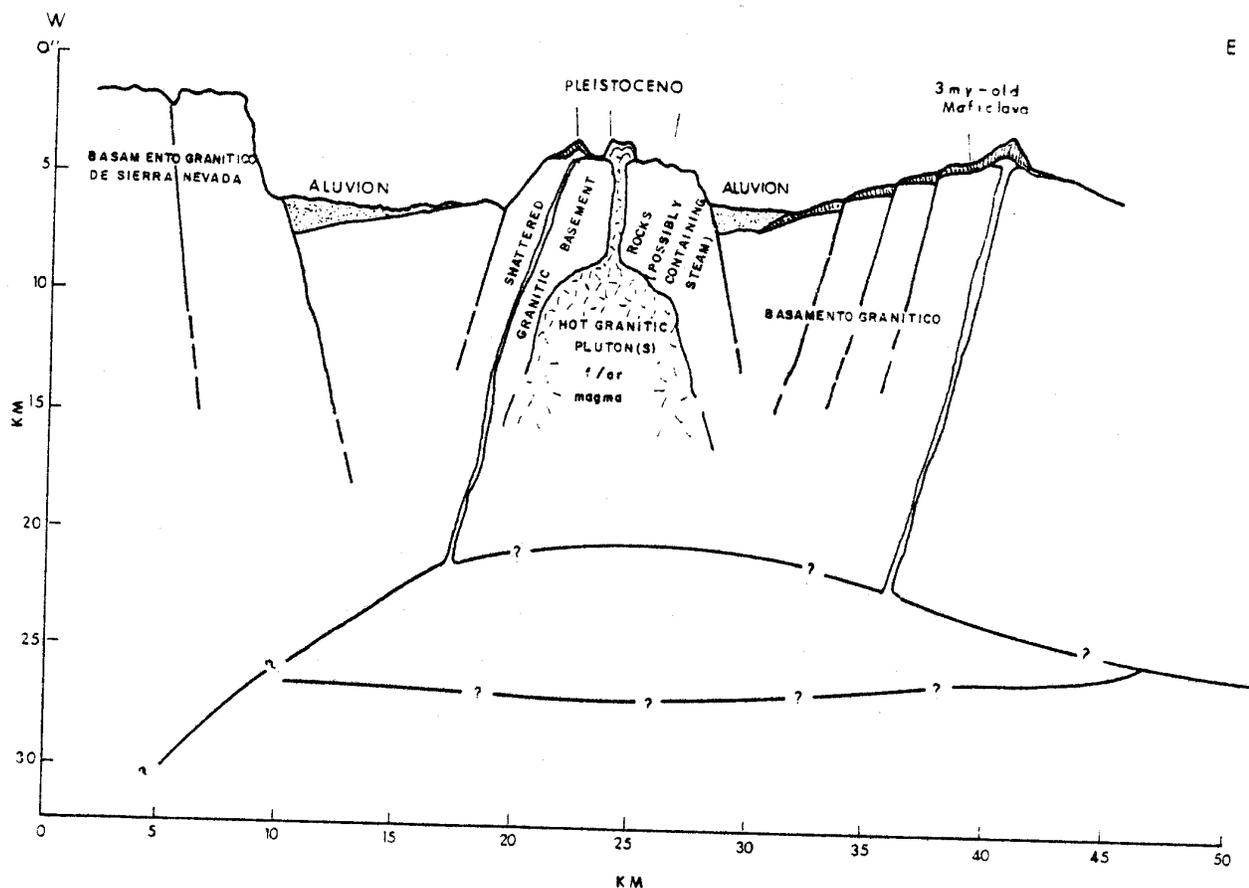


Figura nº 32

La fuente calorífica se suponía era debida a una cámara magmática a profundidades de 5 a 8 Km. Las rocas calientes secas pueden existir en muchas partes del sistema, pero principalmente en la zona de domo.

El área presenta zonas de vapor incluso a escasa profundidad, se han cortado fracturas a 20 m de profundidad con vapor. En la actualidad, este área se supone que puede constituir yacimientos geotérmicos de vapor y de roca caliente seca.

### 5.6.- FENTON HILL

El concepto de explotación de roca caliente seca empezó a tomar auge en 1971. En Estados Unidos se seleccionaron tres zonas de las cuales solamente Fenton Hill está en explotación.

Las primeras interpretaciones geológicas indicaban la existencia de una cámara magmática en profundidad, el corte geológico se puede ver en la figura nº 33.

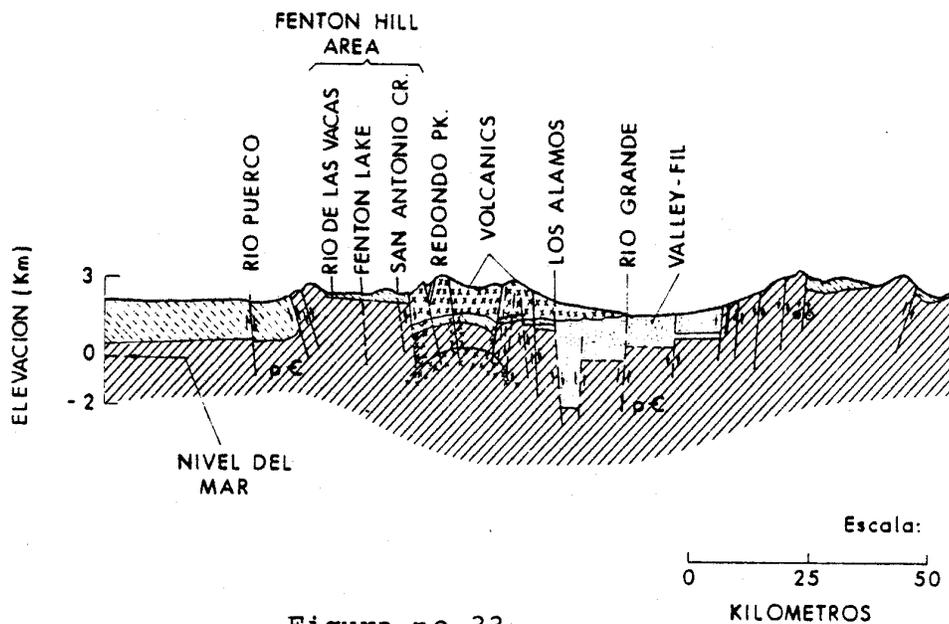


Figura nº 33

La actividad volcánica que produjo la caldera, ocurrió en dos episodios de hace 1,4 a 1,1 millones de años, y el más moderno de menos de 43.000 años.

Existen numerosas fuentes termales en relación y adya

centes a la caldera.

La conclusión que se extrajo de la primera fase de investigación en la zona, fue que adecuada temperatura y rocas im permeables podrían encontrarse asociadas en la Caldera Valles, principalmente en la parte Oeste.

La siguiente fase de investigación, consistió principalmente en la recogida de nuevos flujos caloríficos mediante sondeos cerca de la caldera. Inicialmente se perforaron sondeos someros en la periferia de la caldera, éstos tenían profundidades de 30 m, en ellos se observó un flujo mayor en la parte Oeste.

A causa de la necesidad de encontrar zonas con rocas im permeables, se puso especial atención a estudios tectónicos de la caldera.

En 1973 se perforó el primer sondeo en el área seleccionada (GT-1) con una profundidad total de 785 m, penetrando 143 m en el basamento granítico, la temperatura medida en fondo fue de 100° C, con gradientes de 129° C/km en las rocas paleozoicas y 45° C/km en la parte alta del Precambriano, los cambios de gradiente se debieron a la circulación de aguas subterráneas. En este sondeo se realizaron pruebas de permeabilidad y fracturación, los testigos tomados del sondeo mostraban que las fracturas estaban selladas por calcita.

Durante los años 1974 y 1975, un segundo pozo de exploración (GT-2) fue perforado a unos 2,5 km del GT-1, en un lugar más favorable desde el punto de vista de medio ambiente para crear la explotación. Este sondeo alcanzó los 2.928 m y se observaron temperaturas de 197° C, se realizaron ensayos de

fracturación en el mismo, viendo que era posible la misma con presiones moderadas.

Entre 1975 y 1976 se realizó un segundo sondeo (EE-1) en la zona del GT-2, con perforación dirigida para interceptar las fracturas iniciadas en el sondeo GT-2, la profundidad del mismo fue de 3.064 m y la temperatura medida de 205°C. En éste no se llegó a interceptar las fracturas y entonces se realizó una fracturación desde el sondeo EE-1, que logró comunicar las nuevas fracturas con las del GT-2.

Los gradientes medidos en el sondeo GT-2 fueron de 54°C/km en las rocas precambrianas, encontrándose valores de 60°C/km en el intervalo de 2.100 a 2.900 m.

Las medidas de K-Ar, indicaron edades de  $1,31 \times 10^9$  años para las rocas precambrianas.

En la figura nº 34 se puede ver el gradiente térmico medido en el sondeo GT-2.

La fracturación creada en el sondeo GT-2, alcanzó un radio de 122 m con presiones de 1.750 pSi.

La impedancia de flujo de agua del sistema, era muy alta para la creación de una planta de 10 MW, se pensó que se podría reducir por la reperforación direccional de la parte más profunda del sondeo GT-2, interceptando una fractura grande que se había producido en el segundo sondeo EE-1. Como resultado de la reperforación, se pudo observar una disminución en la impedancia desde 110 bar s/l a 40 bar s/l.

El sistema formado por los sondeos GT-2 y EE-1 es lo que

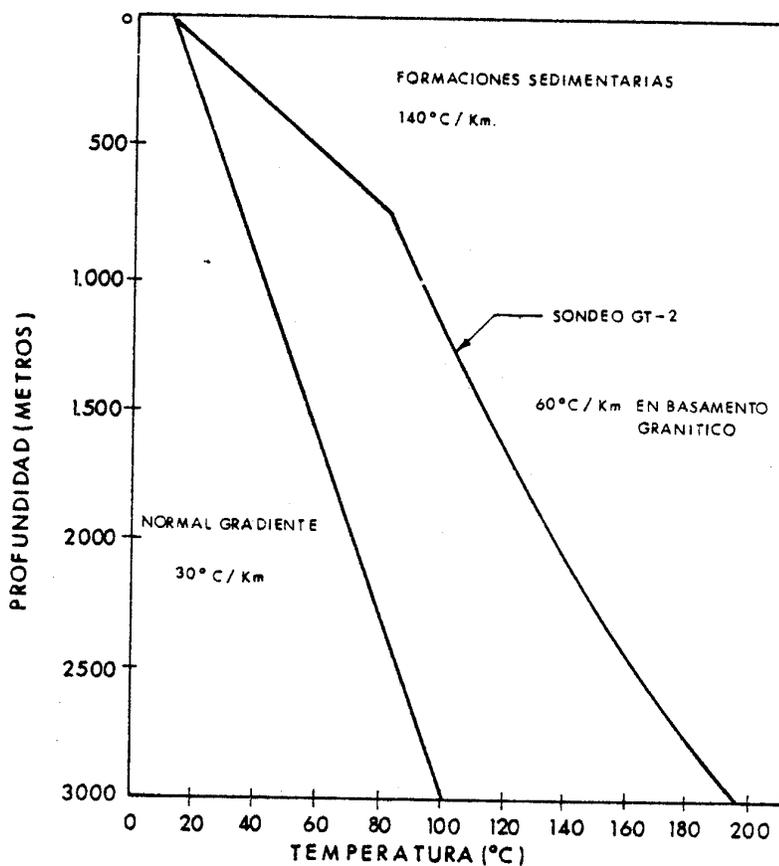


Figura nº 34

se conoce como fase primera de Fenton Hill. Figura nº 35.

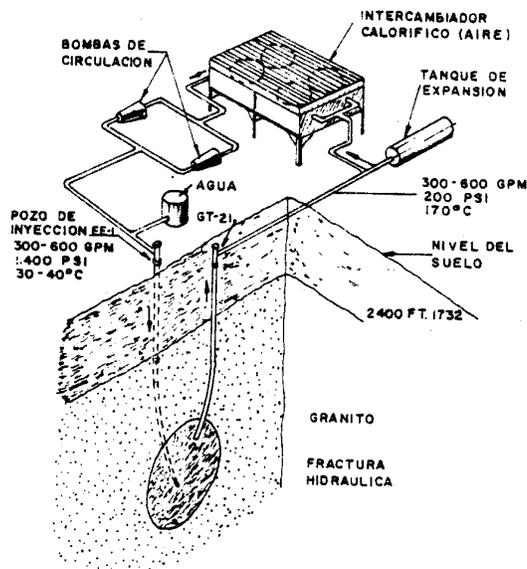


Figura nº 35

Durante los años siguientes, 1978-1979, se realizaron distintas pruebas experimentales en los sondeos, entre ellos un ensayo de bombeo de 75 días de duración.

En los bombeos se observó un aumento de flujo a impedancia constante, que era suficiente para compensar la disminución de temperatura, así que se podía extraer constantemente 5 MW.

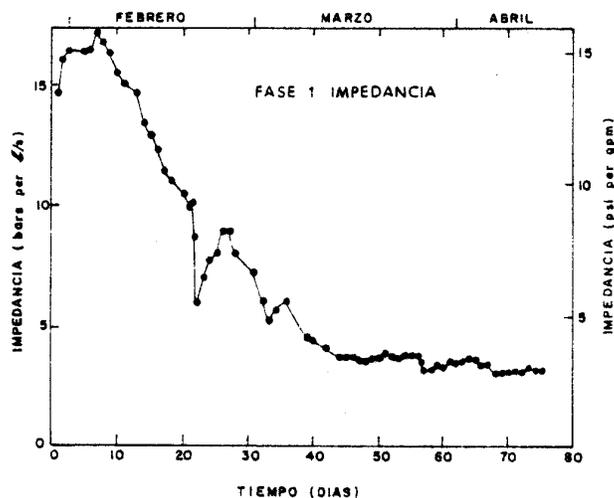
Los estudios teóricos realizados mostraban un área de intercambio calorífico de  $16.000 \text{ m}^2$ .

La pequeña cantidad de energía producida durante la prueba de 75 días, no justificaba económicamente la conversión energética, de forma que el calor era disipado en la atmósfera en un intercambiador de calor de superficie.

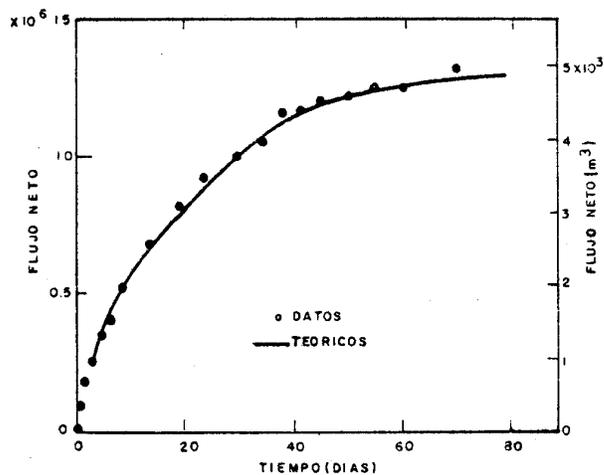
Para definir la cantidad de calor extraída del sistema, medidas de temperatura en superficie y en el pozo de inyección eran registradas continuamente.

Los principales resultados obtenidos en la prueba son citados a continuación:

- Impedancia de flujo, representa la caída de presión en el sistema de fracturas dividido por el caudal de agua extraída. En este ensayo se observó una disminución continua (figura nº 36), esta causada por el aumento de fracturación que se va produciendo por enfriamiento y presurización. En algún caso se ha observado que la calcita que sellaba algunas fracturas ha ido desapareciendo.
- Pérdidas de agua, de los  $68.000 \text{ m}^3$  de agua circulada  $4.900 \text{ m}^3$  se perdieron, en la figura nº 37 se puede ver la pérdida con

Figura n<sup>o</sup> 36

el tiempo, en ella se aprecia que disminuye a menos del 1%.

Figura n<sup>o</sup> 37

- Geoquímica y medio ambiente. De las aguas extraídas fueron analizados los siguientes elementos: Al, Ca, K, Li, Mg, Na, Rn, Si, Cl, F, HCO<sub>3</sub>/CO<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y SiO<sub>2</sub>, los análisis se realiza

ban diariamente. La disolución de minerales de las rocas con tinuó durante todo el experimento, y la concentración en ele mentos aumentó hasta alcanzar un equilibrio. Al final del ensayo se tenían menos de 2.000 ppm, con un pH de 7,1 y sien do los cloruros, bicarbonatos, sodio, potasio y sílice las especies más disueltas. No se vio deposición o corrosión en los circuitos, aunque se observó que donde se reducía la pre sión (2000 pSi) se depositaba algo de calcita. No se obser vó producción de terremotos.

- Variación de temperaturas. En la figura nº 38 se puede ver la disminución de temperatura del fluido extraído con el tiempo, fue medida a 2.600 m de profundidad.

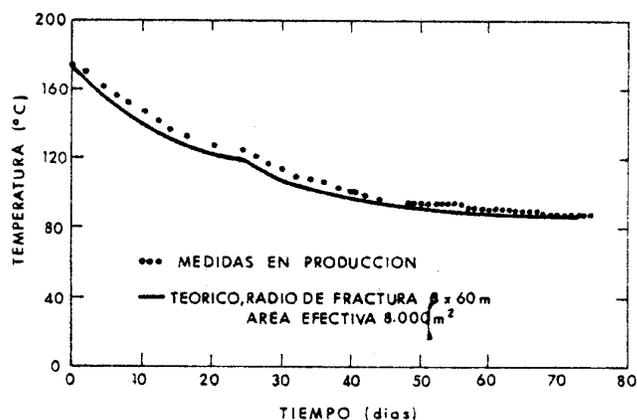


Figura nº 38

Es posible que la duración de la prueba no realizara su fi ciente enfriamiento para producir grandes fracturaciones.

La cantidad de energía extraída queda reflejada en la fi gura nº 39.

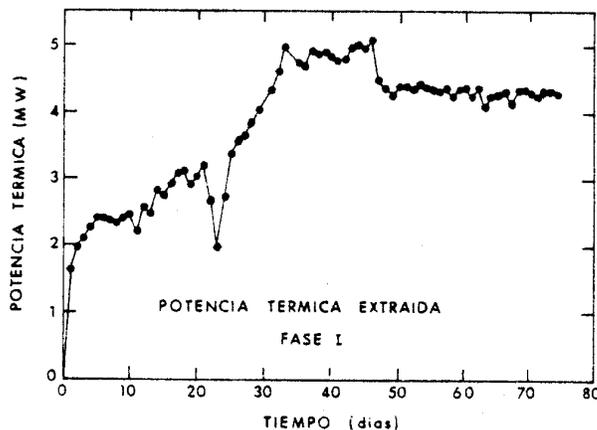


Figura nº 39

Hasta aquí abarcó la fase nº 1 del proyecto de Fenton Hill, de la cual se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1) La resistencia al flujo fue lo suficientemente baja, de forma que la potencia requerida para el bombeo del agua por las fracturas y pozos era solamente una pequeña fracción de la potencia térmica extraída de la roca.
- 2) Las pérdidas de agua en las fracturas fue aproximadamente 10% del total.
- 3) Las características de la extracción de calor fue suficiente para producir de 3 a 5 MW (t) de calor durante 9 meses , con una disminución de temperatura de 80°C.
- 4) La calidad del agua circulada por el almacén fue buena, con un pH de  $6,5 \pm 0,5$  y una cantidad de 3.000 ppm de sólidos disueltos.

5) La actividad sísmica fue pequeña, microterremotos asociados a la extracción de calor con valores menores de -1 en la escala de Richter.

Durante 1979 y 1980 se realizó en la zona un nuevo sondeo (EE-2) de explotación, perteneciente a la fase nº 2 de explotación del campo geotérmico, este sondeo fue desviado 180º en azimut y la parte del fondo fue explotada con un ángulo de 35º respecto a la vertical. La profundidad alcanzada en este sondeo fue de 4.660 m.

El sondeo EE-2 fue perforado y entubado con los siguientes diámetros:

- Perforación en 17½" hasta 790 m de profundidad y entubado con 13¾".
- Perforación en 12¼" hasta 3.530 m de profundidad y entubado con 9⅝".
- Perforación en 8¾" hasta 4.660 m de profundidad, dejando esta parte sin entubar.

En la figura nº 40 se representa el esquema técnico del sondeo.

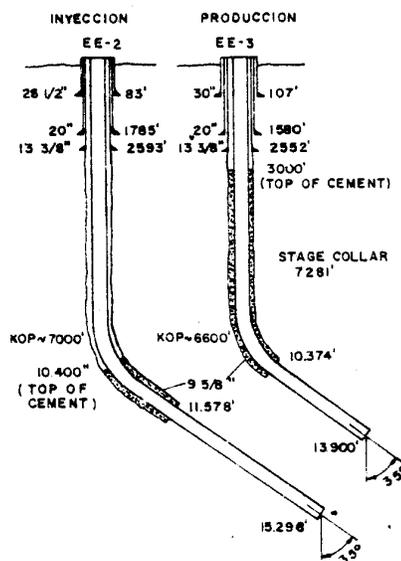


Figura nº 40

La temperatura de fondo encontrada en el sondeo EE-2 fue de 320° C, y la desviación del pozo había sido programada y fue totalmente controlada, el motivo de la desviación fue el de tener mejores superficies de fracturación.

En la figura nº 41, se puede ver las mediciones de temperatura registradas en el sondeo.

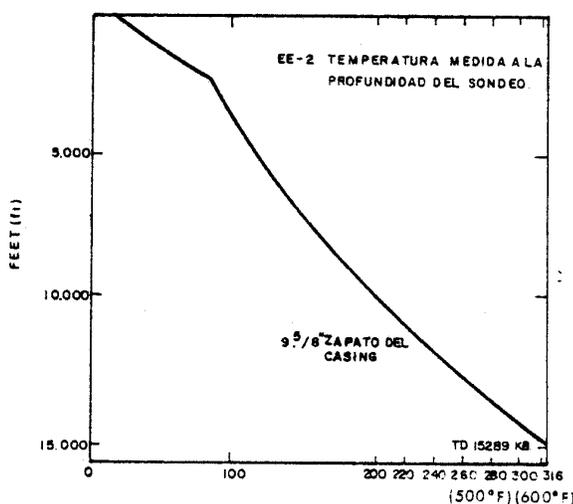


Figura nº 41

El fluido empleado para la perforación fue a base de bentonita en las formaciones superiores sedimentarias, lugar donde se produjeron grandes pérdidas de fluido. Para la perforación del complejo ígneo y metamórfico del basamento precambriano se utilizó agua. Se realizaron continuamente controles de corrosión y se añadió gran cantidad de bisulfito amónico, evitándose que se produjera oxidación por el oxígeno, que entra en el circuito en la zona de enfriamiento del agua.

Desde Mayo de 1980 a Agosto de 1981, fue realizado el sondeo de producción EE-3, el cual conjuntamente con el EE-2 formaba el sistema de explotación de roca caliente seca.

En la figura n<sup>o</sup> 42 se puede ver la columna técnica del sondeo EE-3.

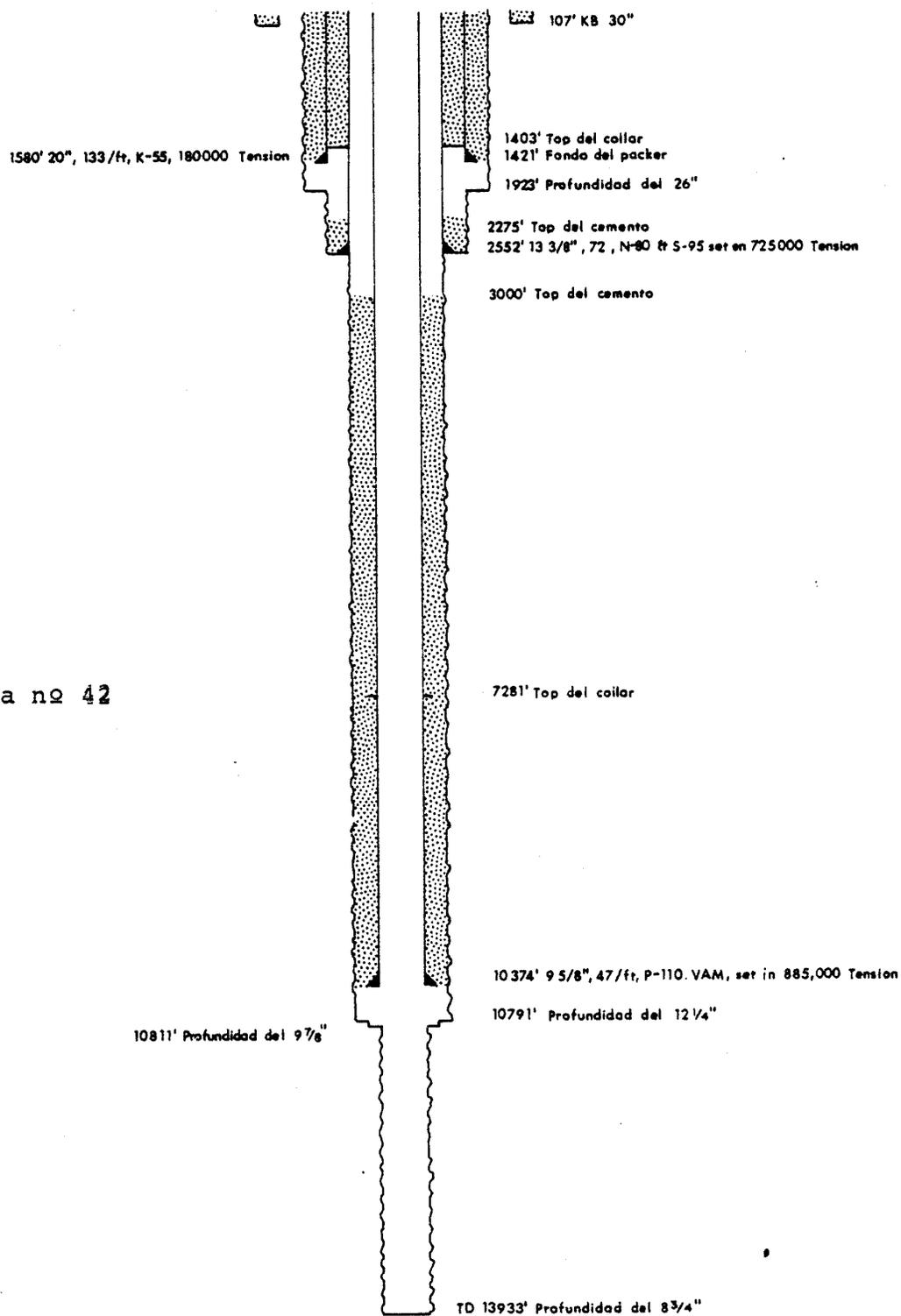


Figura n<sup>o</sup> 42

Las operaciones de desviación y pesca realizadas en este sondeo, casi supusieron el 50% del tiempo. El empleo de tapones de cemento para realizar la desviación fue muy problemática, esto fue debido a la gran influencia que tienen las elevadas temperaturas sobre los mismos, y por la deficiencia de dureza entre las paredes del granito y del cemento.

Las cementaciones se realizaron con cemento de clase H , y con 20% de harina de sílice.

A causa de que el esfuerzo horizontal en profundidad es menor que el vertical, los planos de fractura son verticales, - por tanto para poder realizar 15 fracturas fue necesario la realización de pozos desviados de la vertical.

Para evitar la disminución de temperatura a causa de la interferencia térmica entre fracturas, estas deben ser separadas horizontalmente aproximadamente dos veces la distancia de - difusión térmica  $\sqrt{kt}$ , donde k es la difusividad térmica y t el tiempo.

Para 10 años es necesaria una separación de 35 metros, - por tanto para 15 fracturas se requiere un total de 500 metros de distancia horizontal.

La distancia entre los pozos EE-2 y EE-3 fue de 360 metros, figura nº 43.

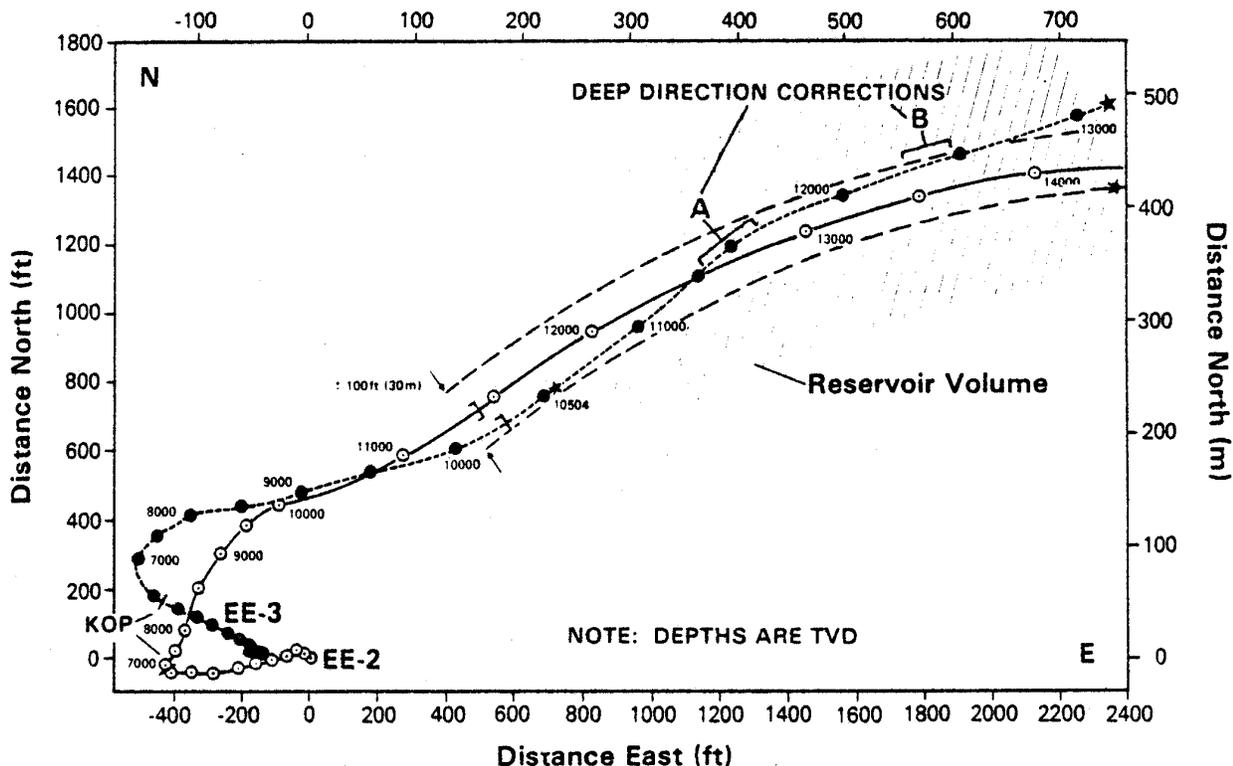


Figura nº 43

Las producciones caloríficas de Fenton Hill, han sido de más de 5 MW (t) durante un año en los pozos de la primera fase, con una disminución en la temperatura de unos 10°C. Una unidad pequeña de ciclo binario de 60 KW (e) generadora de electricidad estuvo operando (agua caliente y fluido orgánico de bajo punto de ebullición, R-114).

En la fase 2ª se está desarrollando el almacén creado que es capaz de suministrar 35 MW (t) durante 10 años como mínimo. Este almacén es una primera demostración de la viabilidad comercial de los almacenes de roca caliente seca.

En la figura nº 44, se observa que para un número de fracturas determinado, se puede producir más energía por ejemplo reduciendo la vida de la explotación.

La eficiencia de la conversión de energía térmica en potencia eléctrica es baja y consecuentemente la fase nº 2 del proyecto genera solamente 6,5 MW (e). La creación de 12 almas

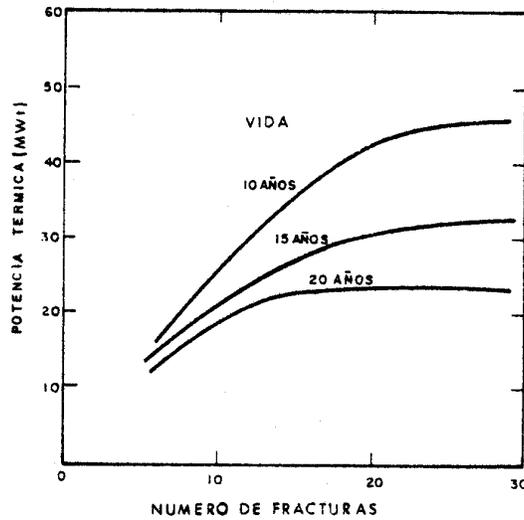


Figura nº 44

cenas análogos al de la fase nº 2 con un total de 192 fracturas, generará una potencia de 75 MW (e). En la figura nº 45 se ve la disposición de los 12 almacenes que podrían ser creados perforando nueve sondeos.

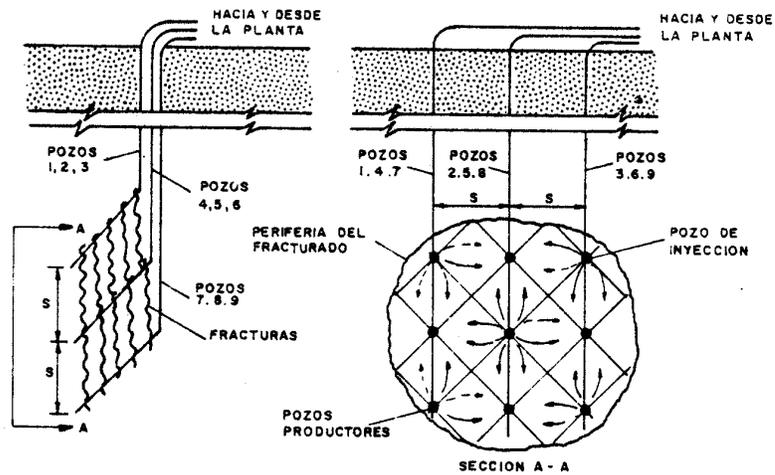


Figura nº 45

### 5.7.- FALKENBERG, ALEMANIA OCCIDENTAL

Algunos experimentos de HDR han sido desarrollados en Falkenberg al Noroeste de Baviera, mediante sondeos sísmicos de detección situados en las esquinas de un triángulo, con 100 metros de lado y otro sondeo situado en el centro del triángulo, cada uno con 300 m de profundidad y entubados solamente los primeros 30 m.

En los sondeos se han desarrollado las siguientes investigaciones:

- Análisis estructural y petrográfico de los testigos.
- Inspección con televisión de los sondeos para la identificación de la orientación de las fracturas.
- Diagrafías de resistividad, SP, rayos gamma, temperatura, ca libre y buzamientos, correlacionando las fracturas en los distintos sondeos.
- Medidas del esfuerzo para fracturación de las formaciones.
- Permeabilidades in situ.
- Velocidades sísmicas y otras propiedades de las rocas.

En el sondeo central, se hicieron fracturaciones hidráulicas a distintas profundidades, las cuales fueron ampliadas durante tres intervalos de bombeo a caudal constante de 3,2 l/s de agua. Hay relaciones lineales entre el volumen fracturado y la presión de fluido, entre la presión de extensión de fractura y la presión hidrostática. Durante los experimentos de fracturación cuatro estaciones sísmicas fueron instaladas en los pozos de observación, aproximadamente a la misma profundidad de las fracturas.

Experimentos de circulación fueron realizados desde las

fracturas artificiales del pozo central, hasta los pozos de observación. La impedancia de flujo es baja, disminuyendo desde 8 bar s/l a 0,4 bar s/l. Las pérdidas de agua fueron menores al 20%.

El intercambio calorífico entre las rocas y el agua de circulación, fue calculado y comparado con el de modelos teóricos.

Este ensayo de Falkenberg ha servido para el desarrollo de las investigaciones en fracturación de roca seca, tanto en su creación como en su localización, además de análisis de intercambio calorífico.

#### 5.8.- CORNWALL, INGLATERRA

En Gran Bretaña la investigación de energía geotérmica está patrocinada por el departamento de energía. El trabajo de explotación de roca caliente seca está siendo desarrollado por la escuela de minas de Camborne desde 1974.

Ha sido seleccionada como zona potencial para roca caliente seca la parte Suroeste de Inglaterra y en particular el condado de Cornwall.

La zona de Cornwall está constituida por un granito hercínico de más de 15 km de profundidad.

La filosofía de esta explotación de HDR es que una inyección hidráulica masiva abriría las fracturas existentes fuera del pozo, mientras que el caso de Fenton Hill se basa en la creación de nuevas fracturas.

La fase nº 1 ha consistido en:

- Creación de un almacén de roca caliente seca en un granito fracturado impermeable, perteneciente al batolito de Cornish (Figura nº 46).
- Estudio de las propiedades de las rocas, intercambio calorífico e interacciones agua-roca asociadas con las estimulaciones de las rocas.

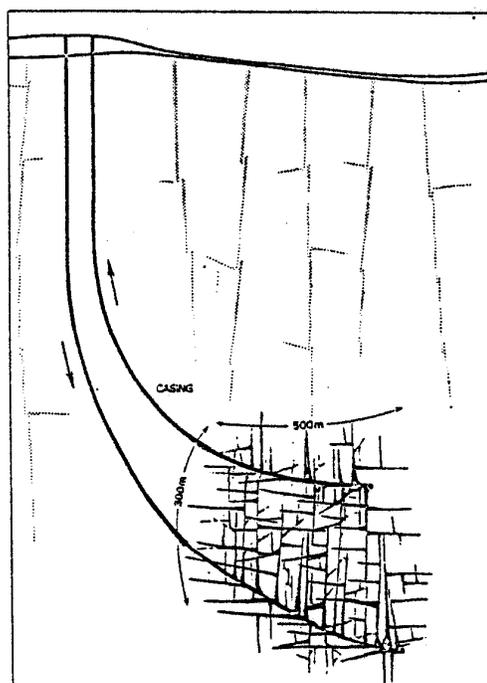


Figura nº 46

Fue elegida una profundidad de 2.000 m como representativa de las tensiones normales, evitando las excesivas interacciones que se producen a altas temperaturas y se ha reactivado el sistema de fracturas existentes, creando múltiples conexiones

entre los sondeos y así poder tener una superficie de intercambio con impedancia menor de 1 bar l/s, y área 5 km<sup>3</sup> para asegurar una producción de 50 MWT durante 20 años.

El proceso de estimulación combina la fracturación con explosivos y la fracturación hidráulica. Una fracturación con pocos explosivos desarrolla un sistema de fracturas radiales. Estas fracturas son sometidas a sucesivas presurizaciones, - creándose las superficies de intercambio calorífico. En la figura nº 47, se puede ver el esquema de desarrollo seguido con dos pozos de poca profundidad.

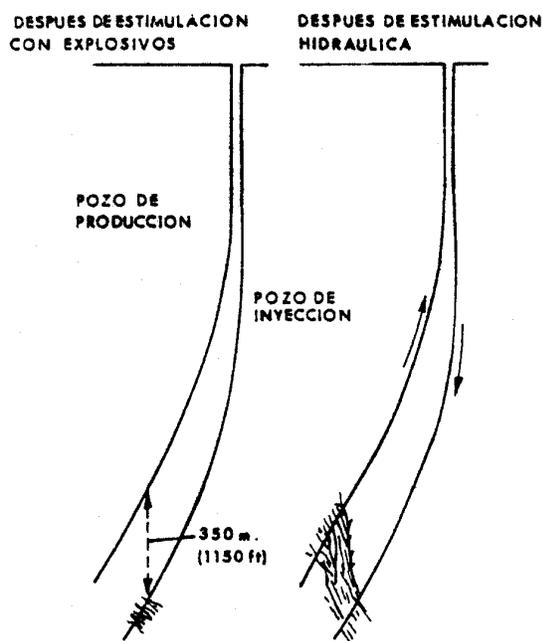


Figura nº 47

Este proyecto debería ser considerado más un proyecto de mecánica de rocas que una planta de extracción calorífica, aunque su experiencia sirve para las posibles plantas de roca caliente seca.

Los trabajos realizados en esta zona han sido:

- Perforación de dos pozos desviados; TD 2.200 m; desviación 30°; distancia en el fondo 350 m.
- Medidas in situ de resistencias mecánicas por fracturación hidráulica.
- Medidas de temperatura y flujos caloríficos.
- Diagrafías, identificación de fracturas.
- Propiedades hidromecánicas de las rocas en estado original.
- Estimulación con explosivos.
- Fracturación masiva hidráulica.
- Desarrollo del almacén, bombeo con alta presión.
- Registro de microseismos.
- Prueba con trazadores (fluoresceína, tierras raras).
- Estimulación del pozo de producción, gelfracturación.
- Modelos, evaluación del almacén.

Los resultados principales obtenidos han sido:

- Perforación; se han realizado con equipos petroleros en tres meses. Solamente se ha tenido que efectuar una operación de pesca.
- Esfuerzos in situ; las medidas fueron realizadas en pozos utilizando packers diferenciales, bombas de alta presión y varillaje, en la figura nº 48, se ven las dos direcciones preferenciales de la fracturación

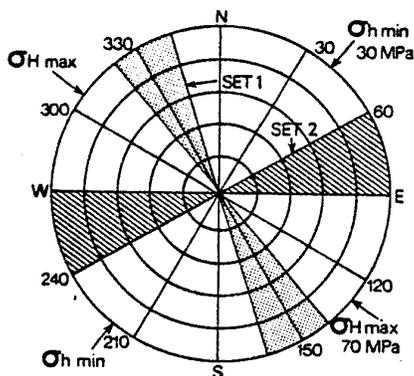


Figura nº 48

- Termometría; la temperatura de fondo ha sido de 79º C, con un gradiente en aumento de 31 a 35º C/km.
- Condiciones iniciales de las rocas; de las pruebas de inyección, se han obtenido valores de permeabilidad de 1 a 2 microdarcies y porosidad de 0,1%.
- Preestimulación con explosivos; ha sido utilizado el Triaminotrinito benzeno como carga que puede manejarse a temperaturas de 250º C, fue disparado en el pozo RM-12 de inyección. Posteriormente se realizaron algunas diagrañas (temperatura y flowmeter), las cuales pusieron en evidencia que se habían reactivado algunas de las fracturas existentes en la zona de disparo. Por tanto es lógico asumir que el pretratamiento con explosivos favorece la penetración de fracturas desde el pozo, creándose un efecto skin negativo y aumentando el caudal de inyección.
- Estimulación hidráulica; fueron realizados seis bombeos con unidades de alta presión de la compañía Dowell Schlumberger, con una capacidad de 80 l/s a una presión de 130 bares y un volumen bombeado de 12.000 m<sup>3</sup>, esta operación duró 48 horas. En la figura nº 49 se puede ver el desarrollo de la inyección.
- Registro acústico y de microseismos; se hicieron registros con un hidrófono, situado en el pozo RH-11 y con sensores situados a 1 km del pozo en sondeos de 200 m de profundidad. El motivo fue el de registrar terremotos inducidos. Se registraron miles de casos, algunos de ellos mostrando magnitudes locales de 0,5. Se estableció un mapa de casos, figura nº 50, observándose una alineación con la dirección de máximo esfuerzo.

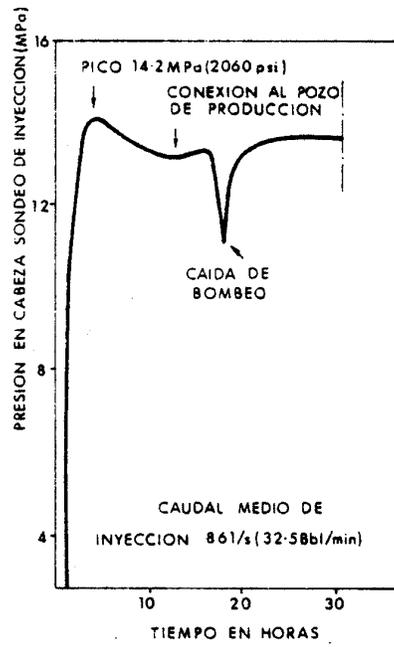


Figura n° 49

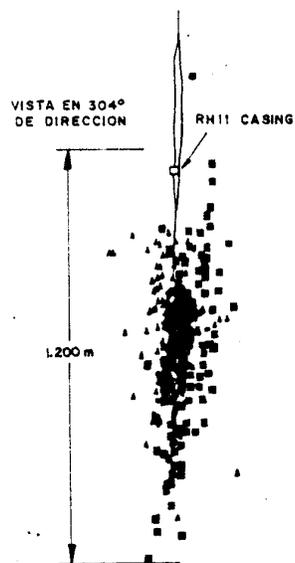


Figura n° 50

- Pruebas de circulación a alta presión. Las pruebas de circulación realizadas muestran grandes pérdidas de agua cuando se circula a grandes caudales y alta presión. El pozo de producción RH-11 reacciona instantáneamente a la inyección, en el pozo RH-12 es necesario cuatro horas para observar una disminución del caudal de inyección y de la presión, esto es debido a la existencia de dos estructuras solapadas con aperturas dependientes de los esfuerzos, por ejemplo el aumento de presión en una inmediatamente reduce la apertura de la otra hasta que el flujo llega con presiones mayores. Realizando circulaciones de fluido de forma inversa se observan los mismos efectos.
- Modelos del sistema. Es necesario realizar relaciones entre las fracturas de las rocas y las tensiones hidráulicas para crear el modelo del sistema, el eje del pozo coincide más o menos con el mínimo de tensiones principales, las teorías convencionales indican que si el mínimo gradiente de esfuerzos es superior al hidrostático, la fracturación crecerá hacia arriba. Los resultados de la simulación del almacén se refleja en la figura nº 51.

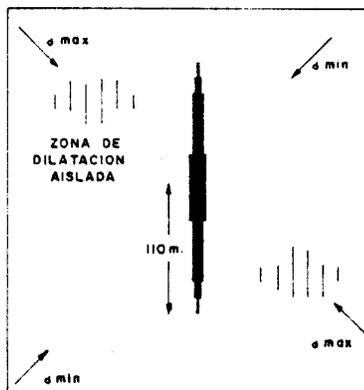


Figura nº 51

- Gelfracturación. Para evitar el efecto de las fracturaciones producidas desde el pozo RH-12, se realizó una estimulación, especial en el pozo RH-11, la cual consistió en utilizar un componente de alta viscosidad para generar fracturas artificiales, haciéndose un control lento de su propagación con las mínimas pérdidas de fluido en una orientación determinada.
  
- Evaluación del almacén. No existe ningún método especial que puede definir por sí solo las características del almacén, geometría de los conductos, apertura de las fracturas, área de contacto fluido roca y durabilidad del sistema. Los métodos de localización sísmica, pruebas hidráulicas, pruebas térmicas, geoquímica activa (inyección de trazadores) y pasiva (registros químicos, gases raros) y subsecuentes modelizaciones son importantes para caracterización del proceso.

La localización de microseismos define un volumen de roca de  $0,36 \text{ Km}^3$  (1,5 Km altura, 0,8 Km ancho y 0,3 Km de espesor). Áreas de circulación comprendidas entre  $90.000 \text{ m}^2$  para un flujo simple de 6 l/s a  $300.000 \text{ m}^2$  para flujos de 20 l/s.

Cálculos basados en la respuesta de las presiones a cambios de caudales de inyección/producción, indican un área de almacén de aproximadamente 2 millones de  $\text{m}^2$ .

Las respuestas de los trazadores de fluoresceína, indican la presencia de al menos cinco canales de almacenamiento y un área total de aproximadamente tres millones de  $\text{m}^2$ .

### Conclusiones

Las conclusiones y hechos principales que se han obtenido de los proyectos de Cornwall hasta estos momentos han sido:

- Recuperación de  $60.000 \text{ m}^3$ , sobre un total de  $250.000 \text{ m}^3$  de agua inyectada en el sistema.
- 5 a 6 MPa de presiones en cabeza son suficientes para mantener el sistema a un caudal de 5 l/s.
- Altas presiones de aproximadamente 10 MPa pueden mantener caudales elevados en el pozo de extracción, a expensas de grandes pérdidas (30 l/s) en la formación y una elevada sismicidad. Las últimas pruebas realizadas en la zona presentan una recuperación del 35%.
- Existe un gran volumen ( $0,5 \text{ km}^3$  mínimo) de baja permeabilidad mostrando áreas de contacto de al menos  $1 \text{ km}^2$ .
- Aunque los registros de presión tienden a indicar una natural reactivación de las fracturas existentes en lugar de iniciación de nuevas, el almacén ha crecido normal al mínimo esfuerzo horizontal, esto a pesar del pretratamiento con explosivos en el pozo de inyección y de fracturación hidráulica.
- La dilatación de las fracturas, esfuerzos inducidos y cizallamientos, han causado reducciones de presión en el pozo de extracción.
- Gran resistencia hidráulica entre los dos pozos y bajos valores de recuperación.

- La preestimulación con explosivos, ha sido positiva según se ha podido ver en las pruebas de producción, teniendo efecto skin negativo.
- El control del aumento de fracturación y las pérdidas de agua son los problemas principales de este almacén.
- El presente sistema con caudales de 10 l/s no es viable, habría que pensar en la realización de un tercer sondeo que intercepte el almacén creado.
- Ha suministrado el proyecto gran información para la explotación de sistemas de HDR, y ha sido financiado en gran parte, por la Comunidad Económica Europea.

#### 5.9.- ENERGEROC. FRANCIA

Este proyecto está siendo realizado por el Gobierno Francés y en la actualidad es un proyecto teórico que aún no ha sido llevado a la práctica.

La idea básica es la recuperación del calor de la tierra mediante la perforación de los sondeos profundos, en zonas con temperaturas superiores a 150°C y creación de una fracturación hidráulica, que produzca una conexión entre los dos sondeos.

La primera fase del proyecto, consiste en la realización de un intercambiador de calor subterráneo.

El proyecto está realizado por la Compañía Francesa de Petróleo, el Instituto Nacional de Astronomía y Geofísica y Electricidad de Francia.

La concepción de las fracturas en este caso difiere del realizado en Los Alamos, iniciando dos fracturas desde cada sondeo según se ve en la figura nº 52.

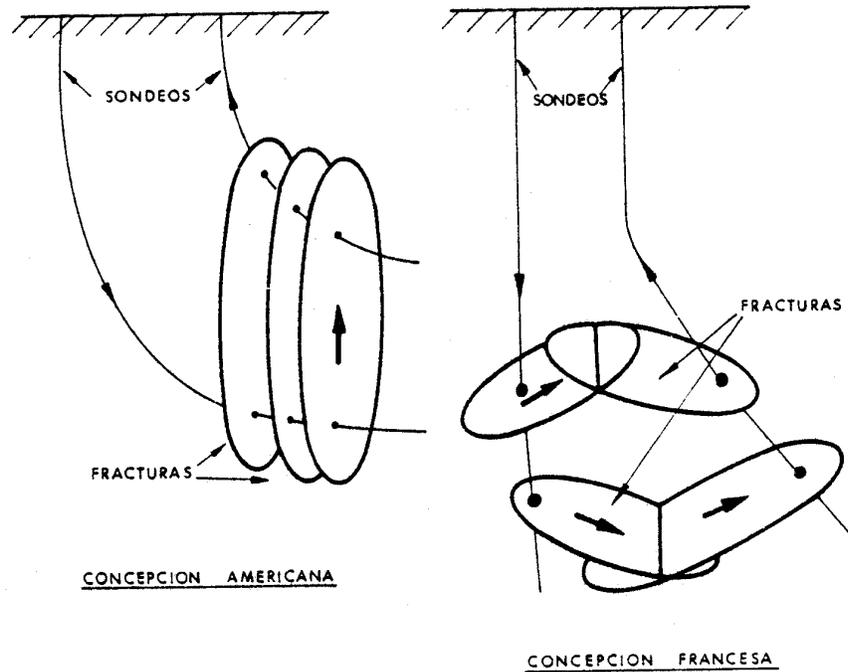


Figura nº 52

La explotación en superficie podrá considerarse según dos ciclos:

- Ciclo directo: en éste caso el fluido de trabajo, es el agua geotérmica que es evaporada y utilizada en una turbina, después se condensa y es inyectada en el pozo, figura nº 53.

La ventaja de éste sistema es que es más simple y menos costoso. Los inconvenientes principales son, problemas de corrosión producidos por el agua, precipitaciones en la turbina y que -

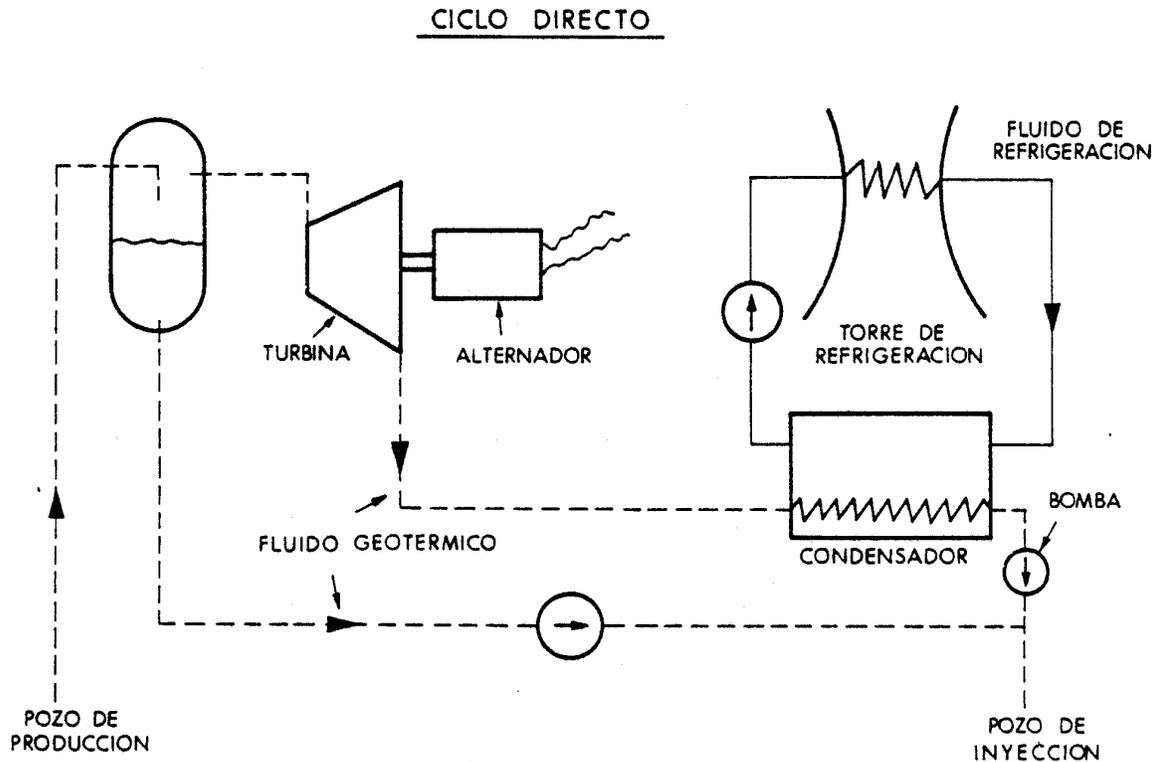


Figura nº 53

el agua con estas temperaturas no es un buen fluido de trabajo.

- Ciclo con fluido auxiliar, en este caso el agua geotérmica cede su calor a un fluido auxiliar que se vaporiza. Las ventajas de éste sistema son la no existencia de problemas de corrosión y las temperaturas de vaporización mucho menores. Los inconvenientes mayores son el precio más elevado y la tecnología más compleja, figura nº 54.

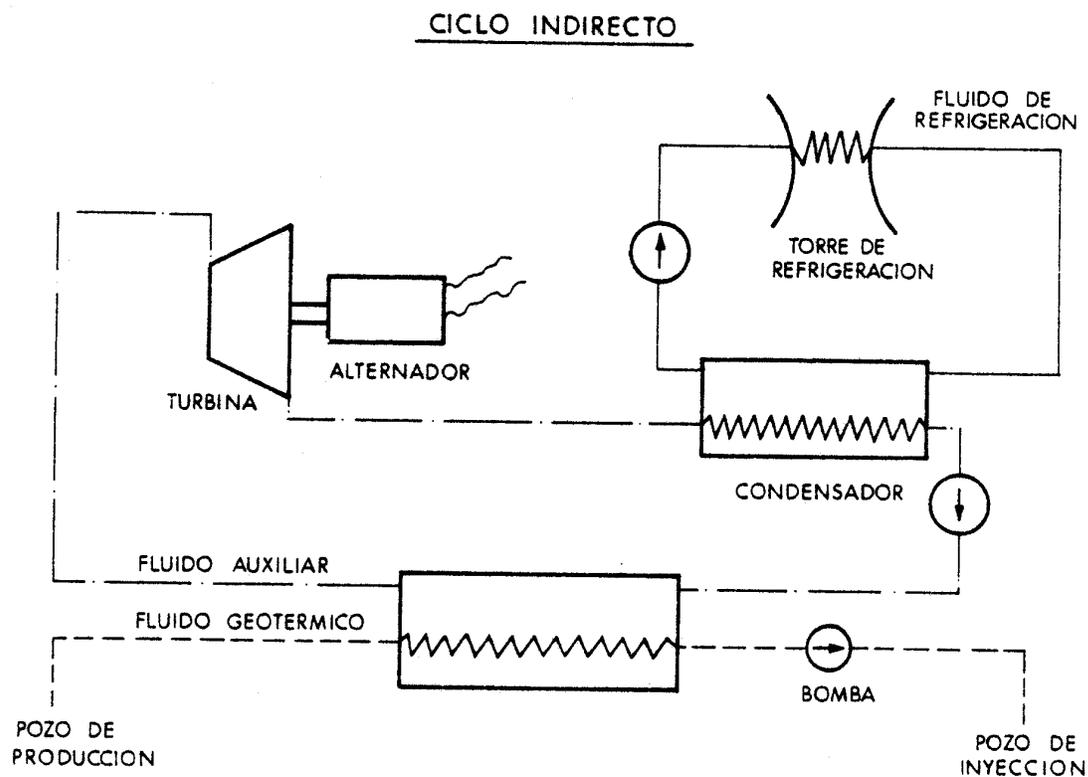


Figura nº 54

## 5.10.- NEUSEHIR, TURQUIA

En éste caso solamente se han realizado estudios geológicos y geofísicos para el reconocimiento de la caldera de Acigol que presenta lavas del Mioceno, sobre un basamento cristalino - granítico con elevado flujo calorífico y baja permeabilidad.

De las investigaciones geológicas, geomorfológicas y geofísicas (gravimetría, resistividad y magnetometría), se ha determinado una profundidad para el basamento de unos 1000 m.

Aún no han sido realizados sondeos en la zona.

#### 5.11.- LANZAROTE

En la década de 1970, se centran gran número de investigaciones geotérmicas en ésta isla volcánica con vistas, a la posible explotación de un campo de vapor, entre ellas se citan:

- Estudios volcanológicos
- Geoquímica de gases
- Geofísica gravimétrica
  - Eléctrica
  - Magnetotelúrico
  - Ruido Sísmico
  - Perfiles sísmicos
  - Termometría
- Sondeo mecánico de 2702 m de profundidad.

De los estudios de gases se ha visto que solamente contienen de 2 a 3% de vapor, trazas de dióxido de carbono en cantidad menor de 0,1% y gran porcentaje de nitrógeno. Los análisis, de superficie han demostrado que es aire. En función de este estudio se desestimó la existencia de un campo geotérmico importante de vapor y se ha centrado la investigación en la búsqueda de un campo de roca caliente seca, con valores de temperatura superiores a 300°C, extendiéndose a considerable profundidad en dirección NNE-SSW, desde el Islote Hilario hacia la Montaña de Fuego y en dirección a la ciudad de Yaiza.

El área de la Montaña de Fuego y más específicamente el área de alta temperatura, está caracterizado por un mínimo gravimétrico de 132 mgls sobre 175 mgls en otras zonas.

Las bajadas de resistividad encontradas, reflejan posiblemente sólo las anomalías térmicas superficiales.

Los registros de ruido sísmico, muestran una anomalía , particularmente en la frecuencia de 8 Hz, cubriendo el área de anomalía térmica superficial.

De las termometrías, se han deducido que las superficies con altas temperaturas son debidas a la circulación de gases por fracturas o fallas y no por fenómenos de conducción.

Esta isla y en particular el área de la Montaña de Fuego parecen ser de las más interesantes en el mundo para la investigación y desarrollo de proyectos de explotación de roca caliente seca a poca profundidad.

También cabría la posibilidad de existencia de algún almacén de vapor cercano a la roca caliente seca, debajo de la Montaña de Fuego.

El caso de Lanzarote es totalmente diferente a los analizados anteriormente en otros países, esto es debido a que son encontradas temperaturas próximas a 400°C a 10 metros de profundidad y los materiales volcánicos que presentan estas temperaturas son permeables. Este hecho excluye la posibilidad de explotación del calor por inyección de agua en la formación a cierta profundidad y la recuperación del fluido recalentado en otro - sondeo, ya sea en forma de vapor o mezcla vapor-agua, según el esquema tradicional.

En la Montaña de Fuego podría pensarse en recuperar el - calor, mediante intercambiadores introducidos en pozos de gran diámetro en poca profundidad, o mediante intercambiadores superficiales con pozos de 200 a 300 m de profundidad, figura nº 55.

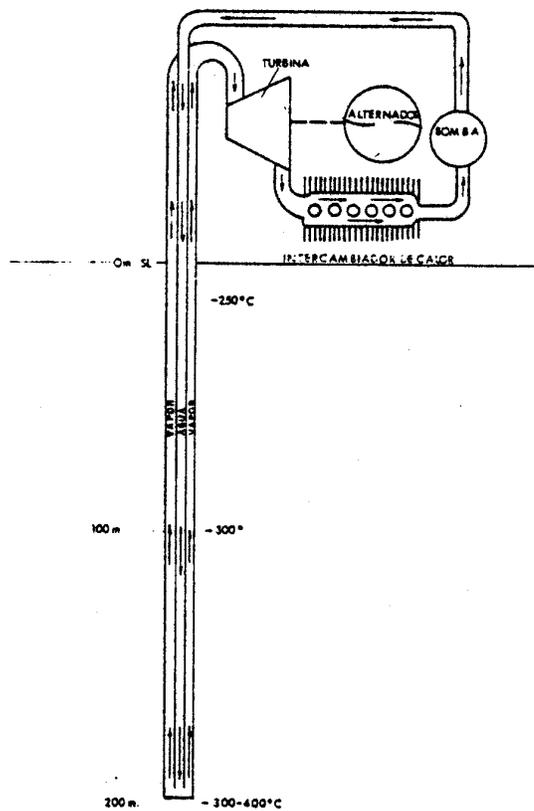


Figura nº 55

Los resultados de las investigaciones previas, justifican las investigaciones futuras en el área, entre éstas:

- Sondeos poco profundos de 10-20 con profundidades comprendidas entre 50 y 100 metros.
- Sondeos intermedios de 200 a 300 metros en número de 3 a 5.
- Sondeo intermedio de gran diámetro, para poder realizar una experiencia piloto con intercambiador calorífico.
- Sondeo profundo, este en el caso de encontrarse en los sondeos anteriores, fluidos que posibiliten la existencia de un yacimiento de vapor.



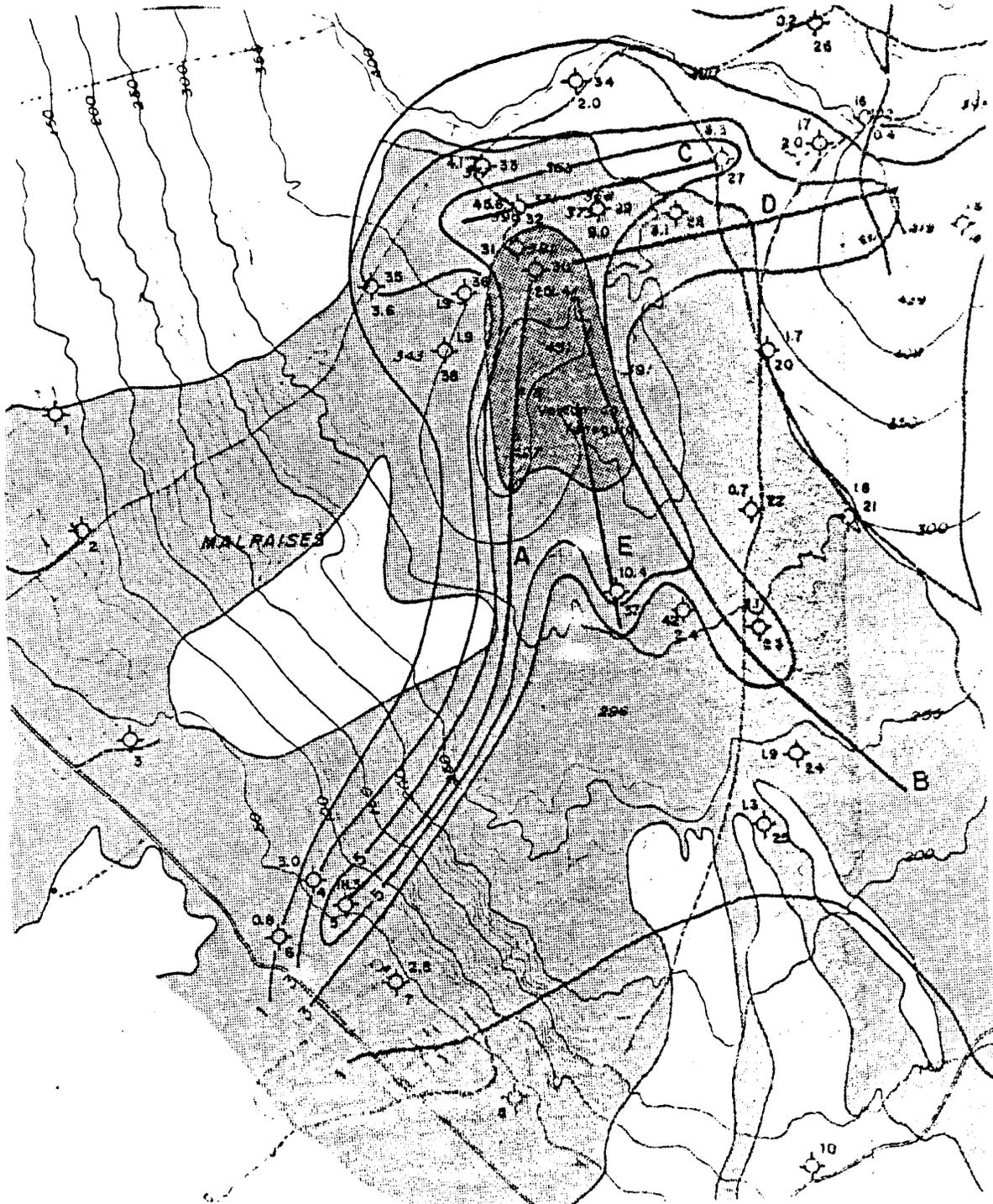


Figura nº 56

6.- CASOS ESPECIALES

#### 6.1.- EXPLOTACION DE LA ENERGIA DE UN MAGMA

Las zonas donde las cámaras magmáticas están lo suficientemente cerca de la superficie para poder ser perforadas, constituyen una buena fuente energética. Las temperaturas de las cámaras (700 a 1600°C) las hacen interesantes para la explotación.

Generalmente las cámaras magmáticas no están cerca de la superficie y lo que hacen es calentar las rocas que existen por encima. Si las rocas son impermeables, constituirán un almacén de roca caliente seca HDR, que para ser explotado se deberá ser fracturada una zona que servirá de intercambio calorífico.

La evidencia de existencia de un magma se basa en los siguientes criterios:

- Geológicos, erupciones volcánicas, flujos de lava, calderas colapsadas y magmas fosilizados que normalmente están asociados con depósitos minerales.
- Geofísicos, anomalías en las ondas sísmicas P. y vibraciones.

Estudios realizados por el departamento de energía de los Estados Unidos, han demostrado que es factible la utilización de la energía del magma.

Algunos sondeos en Hawai han sido capaces de perforar va

rias decenas de metros en las rocas fundidas (1100°C lava), utilizando coronas de diamantes. Experiencias análogas han sido - realizadas en Islandia, viendo que era posible perforar el magma y mantener estable el pozo sin entubar.

Han sido utilizados intercambiadores de calor, que se han introducido en sondeos que perforan el magma, obteniéndose buenos resultados, extrayéndose de 10 a 50 Kw/m<sup>2</sup> con estos intercambiadores.

En la figura nº 57 se puede ver el esquema de explotación.

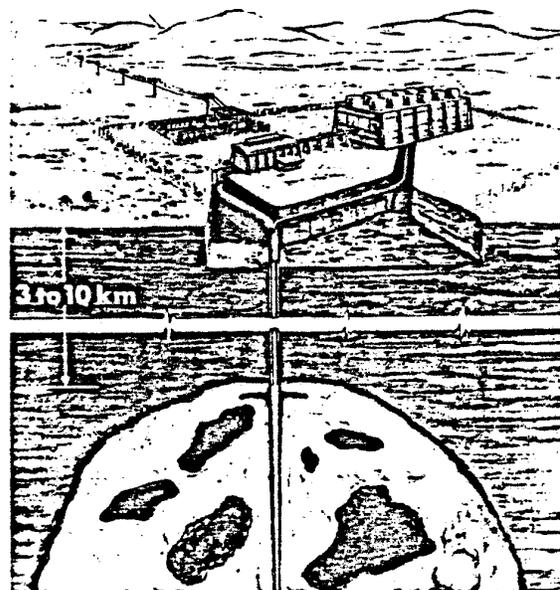


Figura nº 57

La utilización de un sondeo abierto en el que se inyecta agua, ha dado muy buenos resultados, tiene la ventaja del efecto natural que se produce al variarse la temperatura de la roca, creándose una zona permeable que aumenta la producción calorífica.

Energía puede ser también extraída de rocas próximas al magma de forma análoga, pero con menor producción calorífica.

En Estados Unidos en los laboratorios de Sandia se han realizado experimentos con el aparato de la figura nº 58, que asemejan las condiciones de un magma fundido. El propósito de este aparato fue el medir la cantidad de energía térmica que podía ser extraída y ver los efectos de corrosión que produciría sobre las instalaciones. De los resultados se ha deducido que se puede extraer de 100 a 300 Kw/m<sup>2</sup> de un magma fundido y también se ha visto que no existen grandes problemas de corrosión.

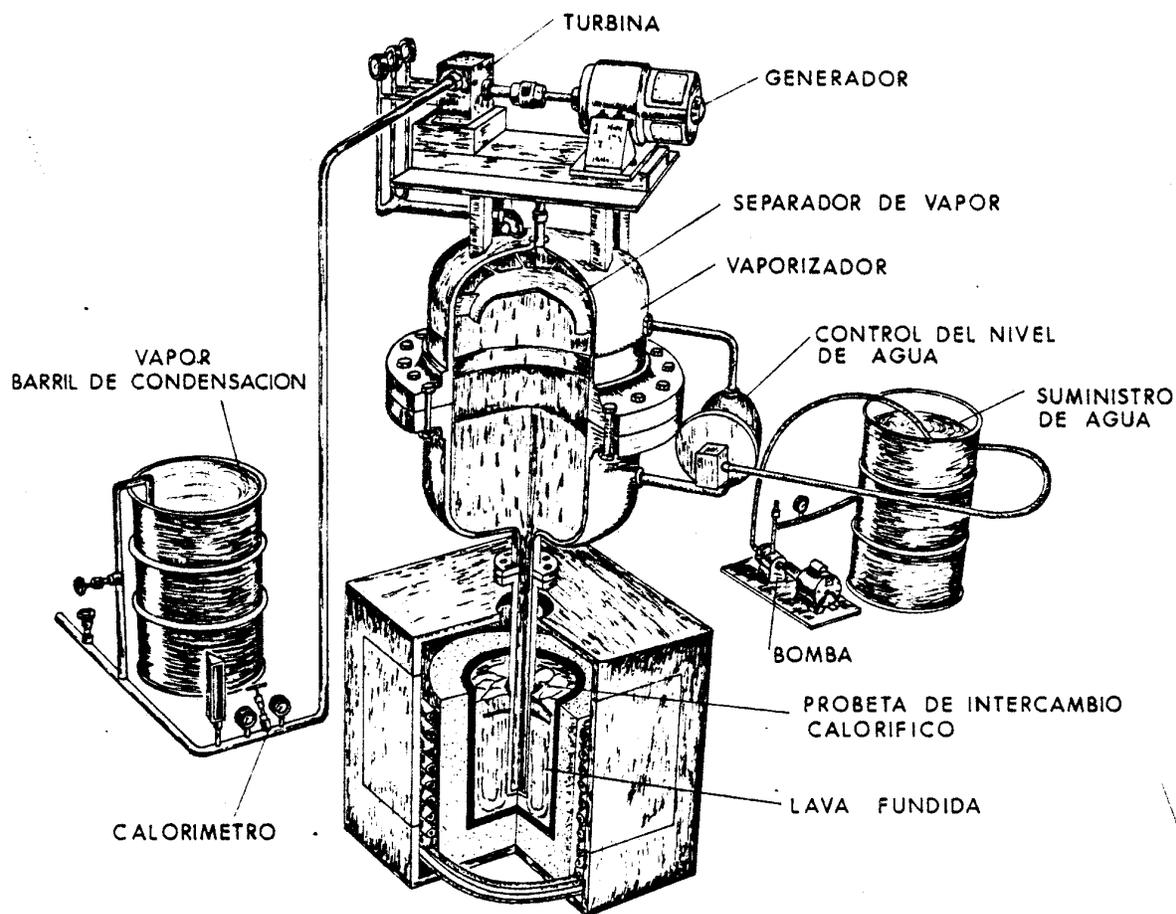


Figura nº 58

## 6.2.- DIAPIROS

España es un país con abundancia de diapiros salinos, zona Norte, Levante y Sur de la península.

La sal es una de las rocas con más alta conductividad térmica y ésta cambia con la temperatura. A alta temperatura y presión las rocas salinas cambian de estado elástico a viscoelástico, después a viscoplástico y finalmente a plástico, este cambio de estado físico genera el cambio de la conductividad térmica.

Diapiros salinos principalmente y otras masas salinas pueden formar conductos térmicos, que conducirían la energía desde grandes profundidades hasta la superficie de la tierra.

La conductividad térmica de la sal varía desde 12,75 a  $17,20 \times 10^{-3}$  cal/cm sec  $^{\circ}\text{C}$  y es por tanto más de tres veces mayor que la conductividad de otros materiales.

En la figura nº 59 se puede ver la sección típica de una zona de diapiros.

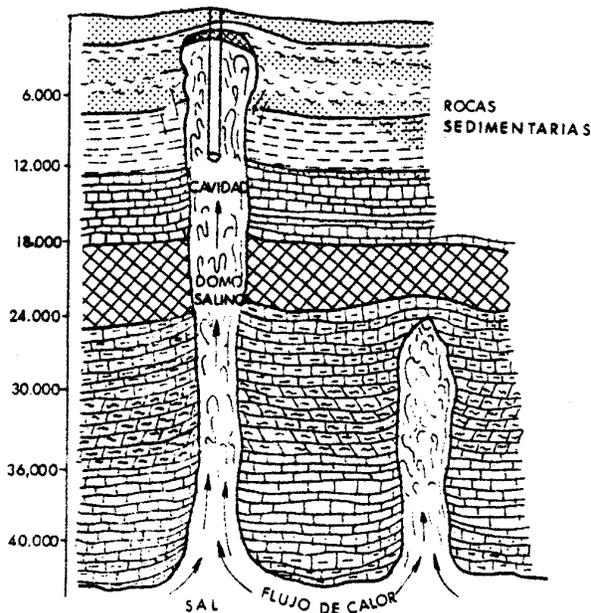


Figura nº 59

Debido a la gran solubilidad de la sal, es evidente pensar en crear una zona de intercambio calorífico mediante la formación de una cavidad o mina en la sal. La clase de cavidad depende del valor de calor requerido y del valor recuperable.

La creación de cavidades mediante un solo sondeo se refleja en la figura nº 60, en este caso el agua es inyectada por el anulus exterior, recogiendo la salmuera por la tubería central. Puede mantenerse la tubería central caliente para impedir la cristalización de la salmuera en su recorrido hasta la superficie. Debe de inyectarse algo de hidrocarburo en la cavidad salina para impedir el crecimiento por disolución de la parte superior de la misma.

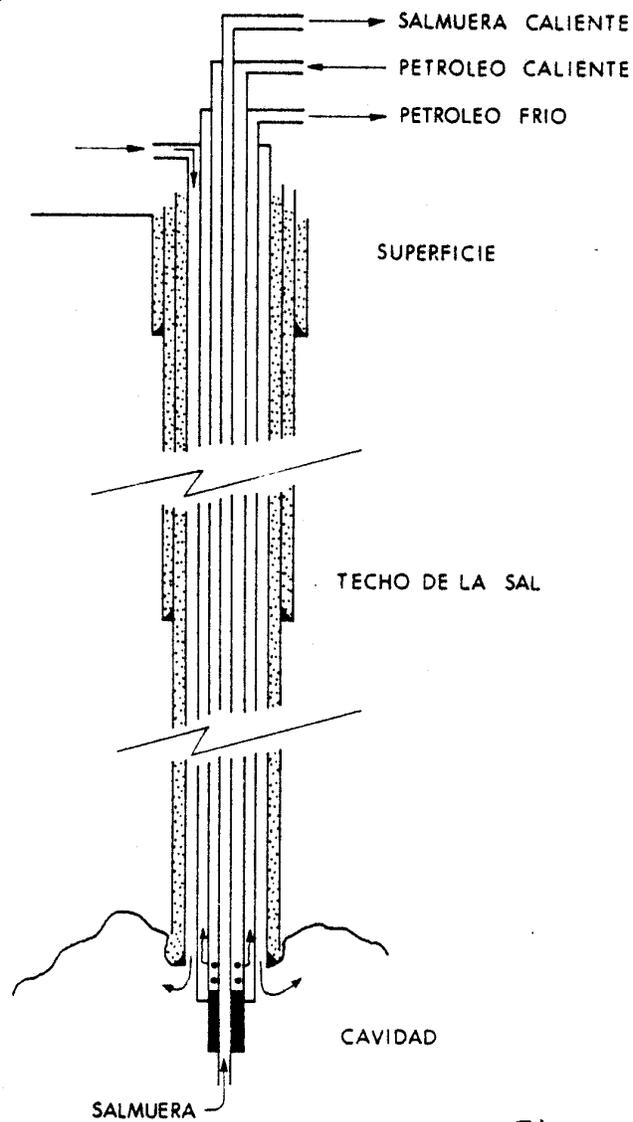


Figura nº 60

La creación de cavidades mediante dos o mas sondeos se puede ver en la figura nº 61, uno de ellos se perfora direccionalmente en su parte inferior para poder aproximarse al segundo y crear la cavidad. Con dos sondeos, se inyecta el agua por uno de ellos y por el otro se extrae la salmuera.

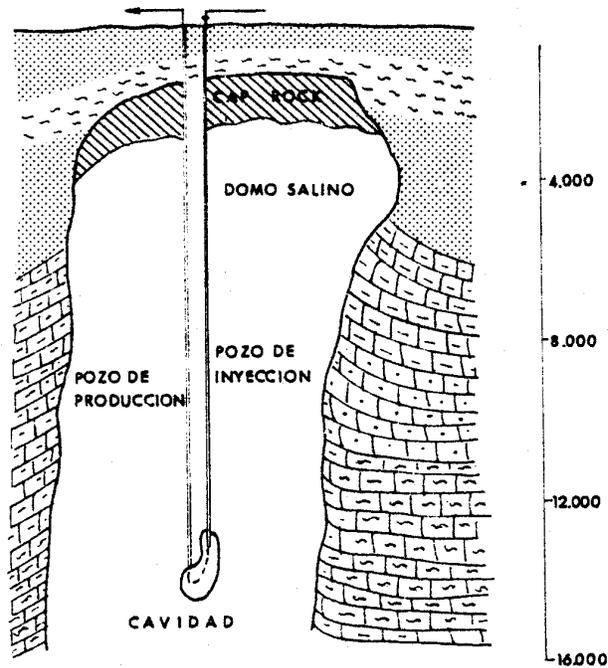


Figura nº 61

Cuando ha sido creada la cavidad en la masa salina, se puede cambiar el fluido agua-salmuera por otro intercambiador inerte en relación a la sal de las paredes de la cavidad.

De tiempo en tiempo, será necesario disolver más sal debido a que por su plasticidad se cierra la cavidad, esto es posible incorporando al fluido intercambiador cantidades de agua.

7.- ASPECTOS ECONOMICOS

El costo de generación de electricidad mediante energía geotérmica con roca caliente seca se divide en dos partes:

- 1 - Costos de operación y mantenimiento
- 2 - Costos debidos a la inversión de capital

#### 7.1.- COSTOS DE OPERACION Y MANTENIMIENTO

Contemplan los costos de consumo de agua, mantenimiento de pozos y tuberías, fracturación del almacén, potencia auxiliar requerida para bombas y refrigeradores, impuestos, seguros y salarios del personal. Un costo importante puede ser debido al consumo de agua, principalmente al comienzo de la explotación que es cuando se producen mayores pérdidas de fluido. La media de pérdidas de agua para crear un almacén de 75 MW (e) - puede ser de 800.000 m<sup>3</sup> por año.

Como se necesita realizar gran número de fracturaciones en el almacén geotérmico, es más barata la compra de un equipo fracturación que el alquiler del mismo a alguna de las grandes compañías petroleras.

La fracturación de un almacén geotérmico para producir 75 MW (e), puede durar del orden de 4 años de trabajos.

En la explotación de los Alamos (U.S.A.), el costo del agua por Kwh producido era de 0,165 pts y el costo del combustible para las unidades de superficie de 0,115 pts por Kwh producido.

#### 7.2.- COSTOS DEBIDOS A LA INVERSION DE CAPITAL

Estos costos son los debidos a las exploraciones geológicas y geofísicas, planta de superficie, perforación, acabado de sondeos y equipo de fracturación. La planta de superficie, perforación y equipo de fracturación suponen los mayores costes.

El costo de la planta de superficie calculado según la experiencia americana es de 150.000 pts por Kw (e), incluyendo todas las instalaciones de superficie.

Los costos de perforación y acabado de pozos aumentan de forma casi exponencial con la profundidad, en la figura nº 62, se puede ver el coste estimado aproximado dependiendo de la profundidad del sondeo

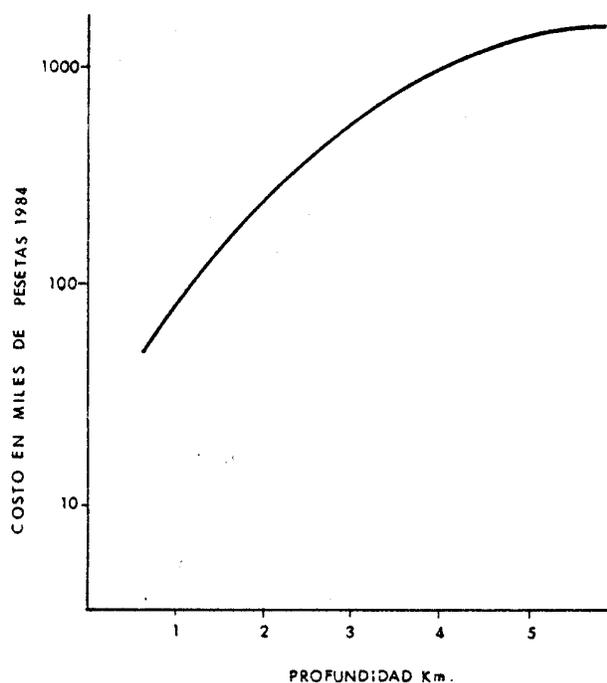


Figura nº 62

Los pozos geotérmicos en un futuro tendrán menores costos, debido al desarrollo tecnológico en este tipo de investigaciones y en parte deben ser más baratos que los sondeos de investigación petrolífera, principalmente por el bajo costo que tienen los lodos en los sondeos geotérmicos.

Los costos de los sondeos EE-2 y EE-3 de los Alamos han sido:

- Sondeo EE-2: 7,3 millones de dólares con 4,66 km de profundidad.
- Sondeo EE-3: 11,5 millones de dólares con 4,25 km de profundidad.

Estos costos no son muy representativos debido a ser pozos totalmente experimentales.

El costo de las bombas de fracturación necesarias para una primera explotación de 75 MW (e) es de aproximadamente 9 millones de dólares.

A continuación se dan las cifras de costos para una estación de 75 MW (e), según la experiencia de la explotación de los Alamos.

	<u>Costo total</u> <u>(millones de dólares)</u>	<u>Costo por KW(e)</u> <u>dólares</u>
Exploraciones geofísicas ...	4,4	58
Adquisición y desarrollo del terreno .....	0,5	7
Refrigeradores .....	7,5	100
Otras plantas superficiales.	62,0	825
Perforación y acabado .....	111	1.480
Equipo de fracturación .....	9	120
TOTAL .....	<u>194,4</u>	<u>2.590</u>

En la siguiente tabla puede verse la comparación en Estados Unidos de distintos tipos de generación de electricidad a dólares constantes de 1983.

<u>Tipo de estación</u> <u>de generación</u>	<u>Costo capital</u> <u>\$/Kw de capacidad</u>	<u>Costo de</u> <u>combustible</u>	<u>Costo</u> <u>10<sup>-2</sup>g/kwh</u>
Geotermica de roca caliente seca .....	2.300	Ninguno	4,9* 4,2**
Vapor de quemar carbón .....	1.100	\$25/ton. \$40/ton.	3,4 4,1
Nuclear .....	1.500	\$25/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> \$75/lbU <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	3,6 4,2
Turbina gas .....	230	\$2,72/mcf \$5,00/mcf	4,3 7,3
Diesel	340	\$30/BBL \$50/BBL	7,6 12,0

(\*) Con 6,6% de interés

(\*\*) Con 4,5% de interés

8.- CONCLUSIONES

El presente informe constituye una recopilación sintetizada del estado actual de investigación y explotación de almacenes de roca caliente seca en el mundo.

Las investigaciones realizadas en especial en Estados Unidos, han permitido que hoy exista ya una pequeña central piloto funcionando en Fenton Hill (Nuevo Méjico).

El potencial energético de la corteza terrestre, caso de dominarse adecuadamente la técnica, es extraordinario, pudiendo suministrar cantidades muy importantes de energía, en todos los países del mundo. Se calcula que de 1 km<sup>3</sup> de roca caliente seca se puede extraer del orden de 10 termias o bien instalar una central 12 MW que funcionará durante 25 años, 6.500 horas al año. Todo ello con un enfriamiento de 200C a la masa de roca.

En la investigación de almacenes de roca caliente seca, se utilizan técnicas totalmente conocidas y utilizadas en otras investigaciones geológico-mineras o en yacimientos geotérmicos hidrotermales.

Los problemas que se pueden plantear en la explotación son de orden tecnológico y son debidos más bien a:

- Perforación, a grandes profundidades, de rocas muy duras.

- Fracturación controlada de grandes masas de roca.
- Elevadas presiones en los sondeos para lograr la fracturación, con los consiguientes problemas de
  - . cementaciones
  - . packers
  - . tuberías, etc.
- Control de los flujos de agua que se inyectan.
- Ejecución y control de sondeos dirigidos.

La experiencia de Fenton Hill ha servido para avanzar de una forma extraordinaria en la solución de estos problemas técnicos.

Aunque extríctamente diferente del concepto de roca caliente seca, hoy día se investiga también el aprovechamiento energético de magmas fundidos y diapiros salinos.

En España se cuenta con dos posibles campos de roca caliente seca: "Montañas del Fuego" en la isla de Lanzarote y "Teneguía" en la isla de La Palma. Estos posibles campos son completamente diferentes a la concepción clásica de Fenton Hill y otros, asemejándose algo a la extracción de calor de magmas.

La investigación ha de dirigirse hacia el estudio de extracción de calor mediante sondeo con tuberías concéntricas que actúe de intercambiador o bien hacia la situación de intercambiadores en fondo de pozos.

Los estudios económicos teóricos realizados en Estados Unidos, indican que el costo del Kw/hora producido en centrales de roca caliente seca es hoy día más bajo que el producido en centrales diesel pero más alto que el de centrales de carbón, nuclear y gas.

9.- BIBLIOGRAFIA

- AAMODT, R.L.; POTTER, R.M., 1978: Anomalous fracture extension pressure in granitic rocks, Proc 19 th VS Symp. on Rock Mech, Lake Tahoe Nevada.
- AIKEN, C.L.; GUTMANN, J. 1980: Preliminary geological and geophysical evaluation of the castle dome HDR geothermal project, Southwester Arizona. Geothermal resources council transactions. Vol 4.
- ANDER, M.E., 1980: Magnetotelluric, audiomagnetotelluric study of the zuni hot dry rock geothermal prospect, New Mexico, Geothermal resources council transactions, Vol. 4.
- ARCHULETA, J.R.; FINK, C.F., 1978: Equipment development report borehole fluid sampling tool, Los Alamos scientific laboratory report, LA-7152-MS.
- ARNEY, B.H., 1980: Hot dry rock geothermal site evaluation western snake river plain, Idaho, Geothermal resources council transactions, Vol 4.
- BRITTENHAM, T.L., 1980: Directional drilling operations hot dry rocks well FE-2, Geothermal resources council transactions, Vol 4.
- BROWN, M.C.; DUFFIELD, R.B.; SICILIANO, C.L.B., 1978: Hot dry rock geothermal energy development program, annual report Los Alamos.

CAMBORNE SCHOOL OF MINES, 1981, 1982, 1983, 1984: Hot dry rock project, Cornwall u.k.

CARDEN, R.S., 1982: Precisión directional drilling of hot dry rock geothermal productions well EE-3, Geothermal resources council, Vol 6.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 1983: Hot dry rock research in Cornwall, Geothermal news.

DENNIS, B.R., 1978: Borehole temperature survey analysis hot dry rock geothermal reservoir, Geothermal resources council transaction, Vol 2.

DENNIS, B.R.; MURPHY, H.D., 1978: Borehole temperature survey analysis hot dry rock geothermal reservoir, Geothermal resources council transactions, Vol 2.

FREDRIKSSON, A. 1981: Hot granite rock will solve the energy problems of the future in Swedeb?, Geothermal energy, Vol 9.

FREESTON, D.M., 1984: The application and desing of downhole heat exchanger, Seminar on utilization of geothermal energy for electric power produccion and space heating Florence.

GERARD, A. 1984: Energeroc, Seminar on utilization of geothermal energy for electric power production and space heating, Florence.

GOFF, F; ALDRICH, J.; 1981: Hot dry rock geothermal prospects 1981, Geothermal resources council transactions, Vol 5.

- HALLIBURTON COMPANY, 1972: Fracplan a revolutionary development in formation fracturing.
- HEIKEN, G, 1980: Hot dry rock geothermal resources evaluation, hot dry rock geothermal conference, Santa Fe, New Méjico.
- HENDRON, R.H., 1978: Hot dry rock extraction operations, Geothermal resources council transactions, Vol 2.
- HOGSETT, V, 1980: On the road with hot dry rock, Geothermal energy, Vol 8.
- JONES, R.C., RAINSFORD, B.C., 1980: The commercialization of HDR energy hot dry rock geothermal conference, Santa Fe, New México.
- KERN, L.R., 1980: Use of weighted brines in recovery of geothermal energy from hot dry rock, Geothermal energy, Vol 8.
- MATHEWS, M.; PETTITT, R.A., 1981: High temperature logging for basic development of HDR reservoirs, Geothermal resources council transactions, Vol 5.
- MATHEWS, M. 1980: Calibration models for fractured igneous rock environments, Geothermal resources council transactions, Vol 4.
- MATHEWS, M.; PETTIT, R. 1981: High temperature logging for basic development of HDR reservoirs, Annual meeting Houston Texas.

- MAXWELL, J.C.; SIMMONS, G, 1980: Geothermal exploration in New England, hot dry rock geothermal conference, Santa Fe, New México.
- MURPHY, H. 1980: Research reservoir heat extraction results long term drawdown tests, Hot dry rock geothermal conference, Santa Fe, New México.
- MURPHY, D. 1979: Hot dry rock geothermal heat extraction experiments, Geothermal resources council transactions, Vol 3.
- MURPHY, D, 1982: Hot dry rock geothermal energy development program, Geothermal resources council bulletin.
- NICHOLSON, R.W., 1982: Production casings for hot dry rock well EE-2 and EE-3, Geothermal resources council transactions, Vol 6.
- NUCKOLS. E.; MILES, D., 1981: Drilling fluids and lost circulation in hot dry rock geothermal wells at Fenton Hill, Annual meeting Houston Texas.
- NUKOLS, E.B.; MILES, D. 1983: Drilling fluids and lost circulations in hot dry rock geothermal wells at Fenton Hill, Geothermal energy.
- NUNZ, J.G., 1980: HDR programs review, Hot dry rock geothermal conference, Santa Fe, New México.
- OLSON, D.M.; ROBINSON, H, 1980: Exploration model for possible geothermal reseravoir, coso hot springs kgra, Califor

- nia, Geothermal resources council transactions, Vol 4.
- PEARSON, C.; GOFF, F., 1981: A schlumberger resistivity study of the jemez springs region of northwestern New México, Annual meeting Houston Texas.
- PETTIT, R.A., 1982: Dounhole cement test in a very hot hole, Geothermal resources council transactions, Vol 6.
- PETTIT, R.A., 1981: Hor dry rock program in the easter U.S, Los Alamos, Scientific Laboratory.
- PETTIT, R.; CARDEN, R, 1981: Sidetracking experiencies in hot granitic wellbores, Annual meeting Houston Texas.
- ROWLEY, J.C.; CARDEN, R.S., 1982: Drilling of hot dry rock geothermal energy extraction well EE-3, Los Alamos national laboratory, LA 9512-HDR.
- SCHUBERT, C.E. 1980: The eastern hot dry rock target prospect. A case history, Geothermal resources council transactions, Vol 4.
- TESTER, J.W.; ALBRIGTH, J.N.,. 1979: Hot dry rock energy extraa tion field test, Los Alamos Sicentific Laboratory re port.
- WILLIAMS, R.E., 1978: Geothermal drilling in hot granitic rock Geothemal resources council transactions, Vol 2.
- WUNDER, R; MURPHY, H.D., 1978: Thermal drawdown and recovery of singli and meltipli fractured hot dry rock reservoir

Los Alamos Scientific Laboratory report, LA-7219-MS.

ZYVOLOSKI, G.; AARNODT. R.L., 1981, Some results of a longterm flow test of a hot dry rock reservoir, Annual meeting Houston Texas.