

34  
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ACTUALIZACION DE LOS INTERVALOS  
PERMEABLES EN EL CAMPO GEOTERMICO  
"LOS HUMEROS", PUEBLA**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**INGENIERO PETROLERO**  
**P R E S E N T A :**  
**RICARDO RODRIGUEZ OLIVER**



**MEXICO, D. F.**

**1997**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-072

**SR. RICARDO RODRIGUEZ OLIVER**

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Eduardo González Partida y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero :

**ACTUALIZACION DE LOS INTEVALOS PERMEABLES EN EL CAMPO  
GEOTERMICO "LOS HUMEROS", PUEBLA**

- I ANTECEDENTES**
- II HERRAMIENTA DE MEDICION DE PRESION Y  
TEMPERATURA "KUSTER"**
- III REGISTROS DE PRESION Y TEMPERATURA**
- IV DEFINICION DE INTERVALOS PERMEABLES**
- V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES  
BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Ciudad Universitaria, a 13 de octubre de 1997  
EL DIRECTOR



**ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS**

JMCS\*RR\*R\*stg

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ALUMNO:

RICARDO RODRIGUEZ OLIVER

No. DE CUENTA: 8618291-3

TESIS:

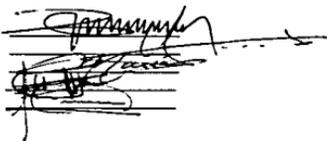
ACTUALIZACIÓN DE LOS INTERVALOS PERMEABLES EN EL CAMPO  
GEOTÉRMICO LOS HUMEROS, PUEBLA.

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EDUARDO GONZÁLEZ PARTIDA.

JURADO DE EXAMEN PROFESIONAL:

PRESIDENTE: ING. MANUEL VILLAMAR VIGUERAS  
VOCAL: DR. EDUARDO GONZÁLEZ PARTIDA  
SECRETARIO: ING. SALVADOR MACÍAS HERRERA  
1ER. SUPTE. M.I. MAXIMINO MEZA MEZA  
2DO. SUPTE. ING. NESTOR MARTINEZ ROMERO

The image shows several handwritten signatures and stamps over horizontal lines. The top signature is the most prominent, appearing to be 'Manuel Villamar Viguera'. Below it, there are other signatures and some illegible stamps, possibly indicating the official capacity of each member of the exam board.

12 DE NOVIEMBRE DE 1997

---

**ACTUALIZACIÓN DE LOS  
INTERVALOS PERMEABLES  
EN EL CAMPO GEOTÉRMICO  
LOS HUMEROS, PUEBLA**

<b>INDICE</b>	<b>Pag.</b>
<b>RESUMEN</b>	1
<b>INTRODUCCIÓN</b>	2
<b>1 ANTECEDENTES</b>	4
<b>1.1 CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS, PUEBLA</b>	5
<b>1.2 DEFINICIONES Y CONCEPTOS RELACIONADOS CON     GEOTERMIA</b>	8
Geotermia	8
Flujo geotérmico	8
Campo geotérmico	8
Sistemas hidrotermales	10
Yacimientos geotérmicos	13
Litología en campos geotérmicos	16
Porosidad y permeabilidad	17
Yacimientos fracturados	19
Pozo geotérmico	20
Registros de presión y temperatura	22
Intervalos permeables de producción	24
<b>2 HERRAMIENTA DE MEDICIÓN DE PRESIÓN Y TEMPERATURA "KUSTER"</b>	26
<b>2.1 EQUIPO</b>	27
Camión transportador	27
Cabina de control	27
Sistema de potencia	28
Sistema de izaje	28
Conexiones	28
Sistema eléctrico	29
Sonda registradora	30
<b>2.2 OPERACIÓN</b>	34
Principios de operación de los registradores de presión y temperatura	34
Programas de corridas de los registros de presión y temperatura	34

Operación de la unidad de registros de presión y temperatura	36
<b>2.3 CALIBRACIÓN</b>	<b>37</b>
<b>2.4 LECTURA DE LA CARTA REGISTRADORA</b>	<b>39</b>
<b>3 REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA</b>	<b>42</b>
<b>3.1 INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE PERFORACIÓN DE UN POZO GEOTÉRMICO</b>	<b>43</b>
Zonas permeables	43
Temperatura estabilizada de la formación	45
Capacidad del yacimiento	46
<b>3.2 INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE CALENTAMIENTO DE UN POZO GEOTÉRMICO</b>	<b>47</b>
Presión del yacimiento	47
Evolución térmica del pozo	48
Condiciones iniciales de presión y temperatura del yacimiento	49
<b>3.3 INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE INDUCCIÓN DE UN POZO GEOTÉRMICO</b>	<b>51</b>
Nivel estático	51
Condiciones termodinámicas	52
<b>3.4 INFORMACIÓN OBTENIDA POR LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE EVALUACIÓN DE UN POZO GEOTÉRMICO</b>	<b>52</b>
Condiciones termodinámicas y de fondo en pozos fluendo	53
<b>3.5 INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE PRODUCCIÓN DE UN POZO GEOTÉRMICO</b>	<b>54</b>
Distribución de los fluidos producidos dentro del pozo	54
Parámetros petrofísicos del yacimiento	54
Presión de fondo fluendo y características termodinámicas de los fluidos	56

---

<b>4 DEFINICIÓN DE INTERVALOS PERMEABLES</b>	<b>58</b>
<b>4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CAMPO     GEOTÉRMICO LOS HUMEROS, PUEBLA</b>	<b>59</b>
Geología	59
Producción	62
Geoquímica	63
Modelo conceptual del Campo Geotérmico	64
<b>4.2 REPARACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS</b>	<b>67</b>
<b>4.3 INTERVALOS PERMEABLES</b>	<b>68</b>
<b>5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>82</b>

## RESUMEN

Se presenta una revisión y actualización de los intervalos permeables de todos los pozos, a partir de su estado mecánico actual, del Campo Geotérmico Los Humeros, localizado en el estado de Puebla, dichos intervalos constituyen una base sólida para poder caracterizar y evaluar el yacimiento, alimentando de información a los simuladores de yacimientos y de pozos, así como para los diferentes trabajos tendientes a la evaluación del yacimiento.

Este trabajo se inicia con una breve descripción del Campo Geotérmico Los Humeros y una serie de conceptos básicos relacionados con los ambientes geotérmicos como: génesis de la energía geotérmica, sistemas hidrotermales, yacimientos geotérmicos, porosidades, permeabilidades, zonas permeables, etc., los cuales son fundamentales para entender los yacimientos geotérmicos.

También, se incluye una descripción de las herramientas de medición de presión y temperatura utilizadas para la toma de mediciones de dichos parámetros en los pozos geotérmicos.

Por otra parte, se presenta información que se obtiene de los registros de presión y temperatura, los cuales proporcionan información trascendente para evaluar tanto los pozos en particular como al yacimiento mismo.

El entendimiento de las características del campo geotérmico permite una mejor interpretación de la información, por lo que también se presentan las características generales, tanto geológicas, geoquímicas y de producción del Campo Geotérmico Los Humeros.

En esta tesis se hace una revisión y actualización de los intervalos permeables de todos los pozos: productores, no productores, inyectores, observadores y de los que se encuentran en etapa de evaluación. Cabe mencionar que 19 pozos han sido reparados de 1983 a la fecha, con reparaciones que van desde la conformación del liner de producción hasta la apertura de ventana con perforaciones desviadas. Esta tesis se realizó en base al análisis de los registros de temperatura corridos durante la etapa de perforación. Así mismo se ubican dichos intervalos auxiliándose con la columna litológica cortada por cada pozo.

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía eléctrica debida al desarrollo de nuestro país, así como el hecho de la necesidad de preservar los recursos no renovables, hizo necesario que Comisión Federal de Electricidad buscara formas alternas de generar la energía eléctrica, siendo una de éstas la energía geotérmica contenida en el subsuelo.

La capacidad geotermoeléctrica en México a fines de 1996, de 743 MW<sub>e</sub>, representó el 2.3% de la capacidad eléctrica total del país, pero los 5,737 GWh generados durante ese mismo año, representaron el 3.8% del total de la energía eléctrica producida.

Los tres campos geotérmicos en explotación produjeron 56.2 millones de toneladas de vapor mediante un promedio de 177 pozos productores, para un consumo específico medio de 10.1 toneladas de vapor por MWh generado, una producción media por pozo de 36 t/h de vapor, con 26 plantas geotermoeléctricas en operación en México.

La CFE tiene en programa varios proyectos geotermoeléctricos para incrementar la capacidad instalada en los campos en explotación y para iniciar el aprovechamiento en nuevos campos.

En el sector eléctrico se requiere aumentar constantemente la capacidad instalada para satisfacer la demanda creciente de energía. En México los pronósticos de crecimiento de la demanda varían entre 3.8 y 5.4% para los próximos 10 años.

Esta capacidad adicional deberá instalarse utilizando las tecnologías de generación más convenientes al desarrollo del país, tomando en cuenta los aspectos económicos, financieros, ecológicos y sociales.

El Campo Geotérmico Los Humeros, en el estado de Puebla, cuenta con 38 pozos perforados (con una profundidad promedio de 2300 m) para la extracción de vapor de agua, cuyo fin es el de generar y asegurar el suministro de energía eléctrica a nivel nacional, por medio de siete plantas de generación a contrapresión, con una capacidad geotermoeléctrica instalada actual de 35 MW<sub>e</sub>.

La evaluación del yacimiento geotérmico, es parte fundamental y básica para desarrollar y explotar de manera óptima el recurso geotérmico. Por lo que la actualización y la revisión de la información resulta esencial para poder llevar a cabo una correcta evaluación del potencial energético del yacimiento, basándose en el análisis de datos y en los modelos matemáticos de simulación, ya que a través de estos simuladores, se predice el comportamiento del yacimiento geotérmico bajo diferentes esquemas de explotación.

De esta manera resulta importante la revisión y actualización de los intervalos permeables de todos los pozos: productores, no productores, inyectores, observadores y de los que se encuentran en etapa de evaluación. Cabe mencionar que 19 pozos han

sido reparados de 1983 a la fecha, con reparaciones que van desde la conformación del liner de producción hasta la apertura de ventana con perforaciones desviadas.

Esta tesis se realizará con base en el análisis de los registros de temperatura, corridos durante la etapa de perforación. Asimismo se ubicarán dichos intervalos con el auxilio de la columna litológica cortada por cada pozo.

El aporte de este trabajo será una base sólida para poder evaluar el yacimiento, alimentando de información a los simuladores de yacimientos y de pozos, así como para los diferentes trabajos tendientes a la evaluación del yacimiento.

## 1 ANTECEDENTES

La definición de los intervalos permeables de producción de los yacimientos geotérmicos, implica el conocimiento y manejo de gran cantidad de conceptos, algunos de los cuales son comunes en varias áreas de la ingeniería petrolera.

El adecuado conocimiento y manejo de estos conceptos relacionados con la geotermia, permite una mejor interpretación de las zonas de los pozos en las cuales se tienen estratos con características de permeabilidad, así como los factores que se ven involucrados.

El objetivo de este capítulo es revisar una serie de conceptos considerados como fundamentales, tanto para aquellos que se dediquen a la interpretación de los registros de presión y temperatura de pozos geotérmicos, como para los especialistas en yacimientos, en general.

### 1.1 CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS PUEBLA

El Campo Geotérmico los Humeros se localiza en el extremo oriental del cinturón volcánico mexicano en el estado de Puebla, a 53 km. al noroeste de la ciudad de Jalapa, Ver., situándose entre las coordenadas  $19^{\circ} 35'$  y  $19^{\circ} 45'$  de latitud norte y los  $97^{\circ} 23'$  y  $97^{\circ} 30'$  de longitud oeste, a una altitud promedio de 2800 m.s.n.m.. Figura 1.1.



Figura 1.1. Ubicación del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.

El yacimiento geotérmico se aloja dentro de un paquete de lavas andesíticas; andesitas de augita y andesitas porfídicas de hornblenda con temperaturas promedio de  $290^{\circ}\text{C}$  y  $350^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, las cuales son separadas por una unidad de tobas vítreas. Las anteriores unidades sobreyacen en una secuencia sedimentaria calcárea, la cual constituye el basamento del sistema hidrotermal, en tanto que la capa sello es una unidad formada por un paquete de ignimbritas.

De 1981 a 1996 se han perforado un total de 37 pozos, con profundidades que varían de 1450 a 3280 m, de los cuales 21 pozos son productores y se encuentran integrados al sistema de generación, para suministrar 525 ton/h de vapor, 10 son no productores, 2 inyectores del agua residual de 146 ton/h, 1 de monitoreo y 3 se encuentran en etapa de evaluación. La localización de los pozos en el campo se presenta en la figura 1.2.

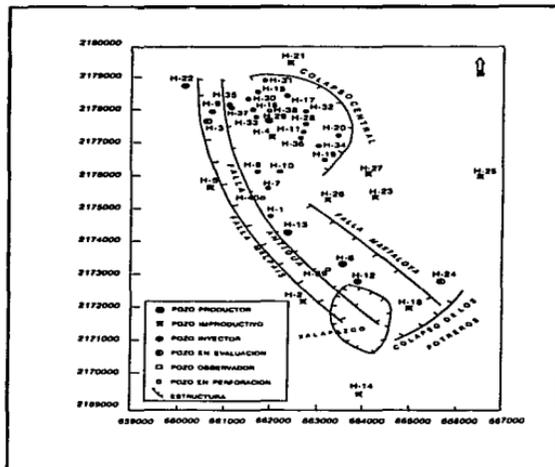


Figura 1.2. Localización de pozos del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.

Los pozos de este campo geotérmico se caracterizan por ser de vapor seco. La producción promedio de vapor de cada uno de los pozos es de 30 ton/h de vapor, figura 1.3, presión de cabezal de 10 a 25 kg/cm<sup>2</sup> y una entalpía específica del orden de 2200 a 2700 kJ/kg.

La explotación del campo inicia en 1990 y actualmente se encuentran instaladas 7 unidades de contrapresión de 5 MW<sub>e</sub> cada una. El consumo nominal de vapor de una unidad de 5 MW<sub>e</sub> es de 60 ton/h (12 ton/h/MW). En la actualidad se han realizado diversos estudios, sobre la eficiencia de las turbinas y debido a que se tiene excedente

de vapor disponible en todo el campo, las unidades están generando 20% más de su capacidad.

La producción de agua (salmuera y condensado) del campo es de 155 ton/h, la cual es enviada a los pozos inyectoros con el objeto de evitar la contaminación del medio ambiente y de recargar el yacimiento, llegando a tener con el tiempo una adecuada estrategia de explotación y de reinyección, lo cual implica que el yacimiento tenga más vida útil.

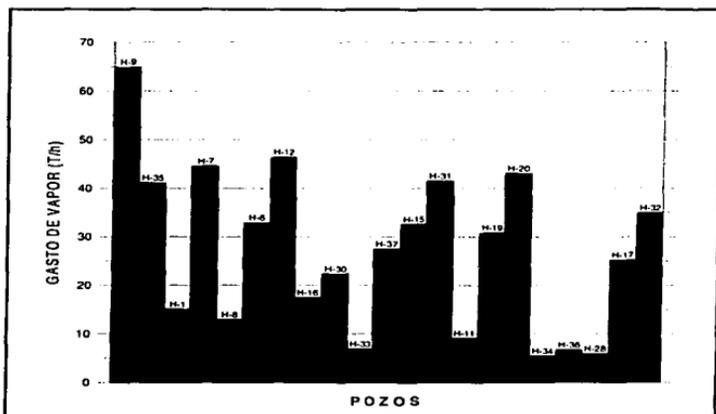


Figura 1.3. Producción de vapor de los pozos del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.

## 1.2 DEFINICIONES Y CONCEPTOS RELACIONADOS CON GEOTERMIA

### **Geotermia**

La energía geotérmica se puede definir como el calor natural contenido en el interior de la tierra, prescindiendo del modo, forma o intensidad con el que fluya hacia la superficie. Sin embargo, para fines prácticos, se interpreta como el aprovechamiento, directo o indirecto, de los fluidos termales contenidos en el subsuelo.

### **Flujo geotérmico**

La temperatura existente en el interior de la tierra es considerablemente más elevada que hacia el exterior, originándose un flujo térmico que emana de la energía calorífica contenida en el interior hacia la superficie de manera permanente. Sin embargo, considerando los valores normales de flujo y gradiente geotérmico a nivel mundial, estos resultan ser bajos para ser aprovechados económicamente.

Atendiendo al flujo geotérmico que presentan las áreas de la superficie de la tierra, se clasifican en tres grandes grupos:

- 1) Áreas no termales, con gradientes de temperatura que varían de 10 a 40 °C por kilómetro de profundidad.
- 2) Áreas semitermales, con gradientes de temperatura de hasta 70 u 80 °C por kilómetro de profundidad.
- 3) Áreas hipertemales, con gradientes de temperatura superiores a 80 °C por kilómetro de profundidad.

Estas áreas pueden ser el resultado de alguno de los siguientes mecanismos:

- a) Intrusión de rocas fundidas dentro de los niveles superiores de la corteza.
- b) Adelgazamiento de la corteza y
- c) Ascenso de aguas subterráneas que han circulado a profundidades mayores a 2 km.

La génesis de los recursos geotérmicos se fundamenta en el transporte de cantidades anómalas de calor hasta cerca de la superficie, originando que se tengan temperaturas más altas a profundidades someras, es decir, donde existen áreas cuyos valores de flujo y gradiente geotérmico, son anómalos.

### **Campo geotérmico**

Los campos geotérmicos son lugares privilegiados donde se han efectuado eventos favorables, repartidos en el tiempo y en el espacio, y que han dado como resultado

condiciones para la explotación de la energía geotérmica como son: una fuente de calor, un acuífero o zona permeable y una capa sello.

Existen regiones con actividad volcánica a lo largo de la superficie terrestre, las cuales se caracterizan por tener elevadas temperaturas aun a profundidades someras (menores a mil metros). Si en estas regiones se localizan mantos acuíferos, o zonas permeables que permiten la circulación de agua, el calor de la roca se transfiere a los fluidos, adquiriendo altas temperaturas pudiendo en ocasiones presentarse un cambio de fase, de líquido a vapor. El agua geopresurizada con alta temperatura almacena una gran cantidad de energía interna y de flujo, dando lugar a lo que se conoce como energía geotérmica.

La fuente de calor puede ser una intrusión magmática o una gran masa ígnea, la cual se deriva de un evento geológico, pudiendo en ocasiones crearse una serie de fallas y fracturas que actúan como conducto principal y como almacén de los fluidos, respectivamente.

Algunos campos geotérmicos tienen una capa superficial impermeable que sirve como sello, la cual evita que los fluidos calientes del yacimiento migren hacia la superficie, manifestándose en fugas a través de las fallas y dando origen a diferentes tipos de manifestaciones hidrotermales como fumarolas, volcanes de lodo, lagunas calientes entre otras.

De lo anterior se desprende que para el desarrollo de un campo geotérmico con fines de generación eléctrica, se requiere de la existencia de los siguientes elementos:

- a) Una fuente de calor a profundidad, de extensión e intensidad tal que garantice un adecuado flujo térmico por un periodo de tiempo largo;
- b) Un acuífero o zona permeable dentro del cual se almacene y conserve la energía geotérmica contenida en las rocas del subsuelo; la circulación hidráulica debe ser lenta para que la acumulación térmica se mantenga elevada, además de tener un espesor adecuado en rocas a alta temperatura y de situarse a una profundidad tal que haga económicamente rentable su explotación.
- c) Una cubierta impermeable sobre el acuífero o zona permeable que actúe como sello térmico del mismo, impidiendo la pérdida de calor por el escape de fluidos hacia la superficie;
- d) Un abastecimiento adecuado de agua hacia el acuífero o zona permeable a través de áreas de recarga.

## Sistemas hidrotermales

**Calor.**- El calor es una energía en tránsito y fluye como consecuencia de la diferencia de temperatura entre una región de alta temperatura y una de baja.

### Conducción y Convección

**Conducción.**- Es un tipo de flujo de calor que se da entre sólidos debido al contacto de excitación entre las moléculas del sólido. El calor es transferido entonces cuando los átomos de una molécula unida a otra, transfieren el movimiento de vibración en forma mecánica, desde una región caliente a otra región fría.

**Convección.**- Es un tipo de flujo de calor que se da en los fluidos ya sea líquidos o gases debido al intercambio de posición de las moléculas. El fenómeno de convección está regido por el hecho de que un fluido calentado se expande y asciende debido a que con la expansión disminuye su densidad y por lo mismo es más ligero que los materiales pesados y fríos que lo rodean; entonces, el fluido calentado es transportado hacia arriba en tanto que el fluido frío ocupa el lugar del fluido que ascendió y es a su vez calentado, ascendiendo entonces para formar un ciclo llamado corriente de convección.

Un sistema hidrotermal es el resultado del sistema hidrológico subterráneo asociado con un campo geotérmico, el cual incluye todos los elementos de la unidad de flujo, desde la fuente de agua y de calor, hasta las áreas de descarga o recarga dentro o cerca del campo

En base a los procesos naturales de transportación de calor y fluido, se clasifican los sistemas hidrotermales (geotérmicos) en *semitermales* (o de baja entalpía) e *hipertermales* (o de alta entalpía).

### *Modelo de un sistema semitermal (conductivo)*

En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de este tipo de sistema en el cual no existe una fuente de calor de origen magmático, sino que la temperatura que se presenta se debe únicamente al gradiente geotérmico de la zona, que es anómalo. Existe un basamento que es de carácter impermeable, sobre el cual sobreyace un estrato poroso y permeable con características tales que presenta un gradiente hidráulico, permitiendo la circulación lateral de los fluidos de la zona de recarga hasta la zona de descarga, con una zona de infiltración que va de 1 a 3 km. Al circular los fluidos a través de la zona anómala de calor, ésta les transmite dicha energía, logrando con ello mantener una circulación convectiva de los mismos, pudiéndose incrementar esto con una convección forzada por la presencia de una barrera o constricción.

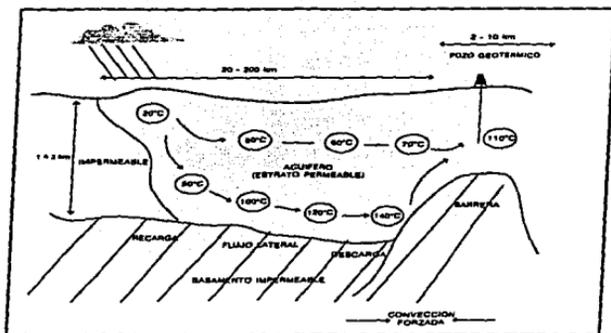


Figura 1.4. Esquema de un modelo semitermal

#### Características

- Presencia de flujo de calor anómalo.
- Basamento impermeable.
- Profundidad de la zona de infiltración de 1 a 3 km.
- Barrera (constricción).
- Flujo lateral de fluidos.
- zona permeable.
- zona de recarga.
- Zona de descarga.

#### Modelo de un sistema hipotermal (convectivo)

En la figura 1.5 se muestra un ejemplo de este tipo de sistema en el cual la fuente de calor la proporciona una intrusión magmática emplazada a profundidad. Existe un basamento que no tiene porosidad ni permeabilidad y al que el intrusivo transmite energía calorífica por conducción. Sobre el basamento sobreyace un estrato poroso y permeable -acuifero- en el que los fluidos contenidos en él adquieren temperatura debido al flujo de calor por convección que se presenta. La permeabilidad del acuífero se explica probablemente por la incidencia de esfuerzos mecánicos y térmicos frecuentes e intensos que han sido inducidos en tiempos de actividad volcánica, y que han dado como resultado la formación fracturas y fallas en la roca. La forma de mantener la energía geotérmica de los fluidos es mediante una capa sello impermeable que impide que se escapen hacia la superficie; esta capa de roca impermeable puede

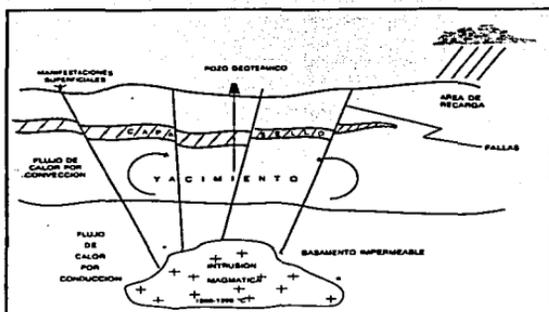


Figura 1.5. Esquema de un modelo hipotermal

haberse depositado en el curso de la evolución geológica, o bien haberse presentado un proceso de autosellamiento, que terminó bloqueando las fisuras y haciendo impermeables las capas superiores de la roca, formando así una capa sello que evitara el escape ulterior de calor y fluidos. Tal acción autosellante pudo haber sido causada por dos procesos químicos: primero, la depositación de minerales (principalmente sílice) a partir de soluciones, y segundo, la alteración hidrotermal de la roca superior que ocasionó una caolinización.

El sistema puede ser abierto, en el cual las rocas que lo constituyen sean continuas y el echado de las rocas, la permeabilidad y la distancia entre el yacimiento y el sitio de afloramiento o de otra fuente de aprovisionamiento sean superficiales, para que a través de ello se pueda recargar el yacimiento y a su vez sea posible mantener en algún grado la presión del propio yacimiento.

#### Características

- Fuente de calor (intrusión magmática).
- Basamento impermeable y conductor de calor.
- Zona permeable.
- Presencia de corrientes de convección.
- Zona de recarga.
- Capa sello.
- Descarga (manifestaciones termales).

La integración de los estudios efectuados al Campo Geotérmico Los Humeros, permite la idealización de un modelo conceptual del mismo, el cual se considera, por sus características, como un sistema hidrotermal de alta entalpía (hipertermal).

### **Yacimientos geotérmicos**

Un yacimiento es la sección del campo geotérmico en el cual se lleva a cabo la extracción de fluidos de alta presión y temperatura; de tal forma que tienen la capacidad de fluir a la superficie y llegar a la planta de generación con una presión mínima de operación de la misma.

Los yacimientos están constituidos por un cuerpo de roca o rocas porosas y permeables existentes en el subsuelo, que es capaz de acumular fluidos, a altas presiones y temperaturas, o permitir el paso de ellos.

Una clasificación de los principales tipos de yacimientos geotérmicos, en base a los procesos naturales de transportación de calor y de fluidos, se presenta a continuación:

- 1) Yacimientos de líquido dominante.
- 2) Yacimientos de vapor dominante.
- 3) Yacimientos de acumulaciones geopresurizadas.
- 4) Yacimientos de roca seca caliente.

Los dos primeros tipos de yacimientos corresponden a los sistemas convectivos, los cuales tienen alta temperatura y presentan manifestaciones superficiales, además el flujo de fluidos a través del sistema lo determina la temperatura y el esquema de distribución de los mismos. Dentro de los sistemas de baja temperatura, los fluidos del yacimiento son siempre de agua líquida. Cuando se tienen altas temperaturas, podemos tener vapor presente. Así los yacimientos pueden ser clasificados en dos clases: líquido dominante y vapor dominante. Los yacimientos de líquido dominante tienen una distribución de presión que es parecida a la hidrostática; y en los yacimientos de vapor dominante la distribución de presión es parecida al de vapor estático. En ambos casos la fase dominante controla la distribución de presión, aún teniendo otra fase presente.

Los dos tipos de yacimientos restantes corresponden a los sistemas conductivos.

#### *Yacimientos de líquido dominante*

En estos yacimientos el agua es la fase continua, y controla la presión del yacimiento. Estos pueden contener algo de vapor, el cual se encuentra como burbujas distribuidas en las zonas poco profundas de baja presión.

El agua meteórica se infiltra hacia el fondo a través de fallas y fracturas o bien de las estructuras de rocas permeables a profundidades considerables. El agua a profundidad es calentada por el contacto cercano con cuerpos magmáticos, esto da la alta temperatura encontrada en yacimientos asociados con tal sistema. El empuje desequilibrado entre las columnas de agua fría y caliente conducen al efecto de convección de los mismos a través de los canales permeables.

Estos yacimientos, los cuales requieren de un calor adicional (usualmente a través de estos cuerpos magmáticos) son generalmente encontrados en regiones con relativo vulcanismo reciente. Los trayectoria de flujo para el agua puede ser en dirección de las fracturas, digamos en una caldera, como el caso del Campo Geotérmico Los Humeros, o en un graben.

Se asume que la circulación de los fluidos a profundidad está limitada por las zonas de fallas. Otra alternativa es que en las calderas o en los grabens no tienen únicamente preferencia los fluidos hacia las fracturas, sino también hacia las capas de brecha y materiales volcánicos fracturados, esto a gran escala puede parecer a un inmenso lecho de material permeable.

Los fluidos calientes se elevan hacia la superficie, y la presión gradualmente se reduce, eventualmente alcanzan las condiciones de saturación, y entonces el flujo ascendente continúa hacia la superficie como una mezcla de agua y vapor.

#### *Yacimientos de vapor dominante*

Estos yacimientos se presentan en la naturaleza con poca frecuencia y son de los mas deseables, debido a que permite obtener recursos energéticos con menores problemas de producción; ya que al producir sólo vapor los arreglos superficiales, tanto para separar la fases como para el manejo de las aguas residuales, son mínimos.

En estos yacimientos el estado inicial es la presencia de una columna de vapor solamente, y llegando a ocurrir en la superficie vapor saturado, seco o hasta sobrecalentado, a causa de las pérdidas de presión a lo largo de la columna.

En la base del yacimiento existe una capa convectiva de salmuera hirviendo, calentada por un cuerpo magmático. El vapor viene ascendiendo desde la salmuera a través del yacimiento. Así este flujo de masa ascendente es detenida en la capa sello del yacimiento, la cual está constituida de roca impermeable, regresando de esta manera a la salmuera como condensado, al fondo del yacimiento.

### *Yacimientos de acumulaciones geopresurizadas*

Los yacimientos geopresurizados están compuestos de rocas que contienen fluidos a presiones superiores a las normales (hidrostática). Precisamente, la permeabilidad de la formación es muy baja, tal que evita la migración de los fluidos hacia el exterior, en consecuencia, causa que los fluidos saturantes soporten parcialmente una sobrecarga de almacenamiento. esto da como resultado un incremento de la presión del fluido. Estos yacimientos tienen generalmente profundidades superiores a los dos kilómetros y temperaturas mayores a los 100 °C.

Los sedimentos geopresurizados tienen una baja conductividad térmica y una alta capacidad calorífica, causando una alta temperatura del sistema.

Los fluidos contenidos en un yacimiento geopresurizado normalmente contienen metano. La cantidad de metano asociado con el agua que satura el sistema puede ser importante. Esto puede significar un beneficio adicional que se obtiene a partir de la explotación de estas acumulaciones.

### *Yacimientos de roca seca caliente*

Los yacimientos de roca seca caliente son aquellos en los cuales no existe un acuífero asociado, ni circulación natural de agua a través de él.

La presencia de este tipo de yacimientos puede llegar a ser más grande que los sitios geotérmicos saturados de fluidos.

Estos yacimientos pueden ser una importante fuente de energía, teniendo los recursos técnicos y económicos para extraer y transformar tal calor en energía eléctrica. La forma más sencilla, económica y práctica para recuperar el calor de estos yacimientos es inyectando agua a la formación, haciéndola circular de tal forma que se incremente su temperatura, y entonces recuperar el fluido ya sea bifásico (agua-vapor) o monofásico ( agua caliente). Frecuentemente las formaciones secas son de baja permeabilidad, y los problemas de recuperación del agua inyectada son solucionados mediante el fracturamiento inducido, tal que permita que el agua pueda fluir hacia los pozos productores continuamente, por largos periodos de tiempo.

Así, el sistema de aprovechamiento de calor consiste en un pozo inyector y uno o varios pozos productores, interconectados por una fractura hidráulica.

## Litología en campos geotérmicos

### *Tipos de rocas*

Las rocas de la tierra se dividen en tres grupos principales: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las rocas ígneas fueron en principio una masa fundida que al enfriarse se convierte en una roca dura y firme. Pudiendo ser este tipo de rocas intrusivas o extrusivas (volcánicas). Las rocas sedimentarias están constituidas (la mayor parte) de partículas derivadas de la desintegración de rocas preexistentes. Por lo común, estas partículas son transportadas por el agua, el viento o el hielo a los lugares donde se depositan según nuevos acoplamientos. Las rocas metamórficas se forman a partir de los cambios que sufren las rocas. La presión de la tierra, el calor y ciertos fluidos subterráneos, químicamente activos, pueden estar involucrados en esta transformación.

Los pozos perforados en el Campo Geotérmico Los Humeros han atravesado los tres tipos de rocas existentes a diferentes profundidades; en la base del yacimiento se tiene una secuencia sedimentaria calcárea representada indistintamente por calizas, las cuales fueron afectadas por intrusiones, produciendo zonas de metamorfismo de contacto en tanto que el yacimiento lo constituyen lavas andesíticas.

### *Minerales de alteración hidrotermal*

Al intentar reconocer los cambios térmicos que han ocurrido en un yacimiento geotérmico, se acostumbra graficar la ocurrencia más somera de los minerales sensibles a la temperatura, tanto en perfiles como en planta. Estos minerales indican las máximas temperaturas alcanzadas en los sitios en los que ocurren. No se sabe cuando se alcanzaron tales temperaturas, pero puesto que los minerales que se conservan cuando el yacimiento se enfría, se pueden comparar con las temperaturas medidas directamente en el pozo.

Las temperaturas de formación de los principales minerales de alteración hidrotermal que se presentan, son los siguientes :

Mineral	Temperatura de formación (°C)
caolinita	80
clorita	120 - 180
epidota	180 - 220

Valores tomados de las notas del curso "Ingeniería de Yacimientos Geotérmicos", CFE, 1996

## Porosidad y permeabilidad

### Porosidad

La porosidad es una de las características básicas que debe tener una roca para que pueda ser productora de fluidos geotérmicos.

La porosidad es una propiedad física de las rocas que representa el espacio disponible de éstas para almacenar algún fluido y se define como la relación existente entre el volumen total del espacio poroso y el volumen total de la roca, pudiéndose expresar de la siguiente forma:

$$\phi = \frac{\text{volumen de poros}}{\text{volumen de roca}}$$

La porosidad se divide en dos clases:

1. Porosidad absoluta, la cual es el porcentaje del volumen total de la roca que es ocupado por el espacio poroso, sin importar si los poros individuales estén o no interconectados.
2. Porosidad efectiva, la cual representa la fracción del espacio poroso intercomunicado con respecto al volumen total de la roca.

Desde el punto de vista geológico la porosidad se divide en:

**Porosidad primaria u original:** es aquella que se desarrolla inmediatamente después de la deposición de los sedimentos y es el resultado de los espacios vacíos que quedan entre los granos y fragmentos. En tanto que en las rocas ígneas, esta viene a ser la desarrollada durante la formación de las rocas mismas, dando como resultado; zonas de brechas entre coladas de lavas, vesiculamientos y diaclasamientos de enfriamiento.

**Porosidad secundaria o inducida:** Esta clase de porosidad es el resultado de la acción de agentes geológicos como la lixiviación o el fracturamiento, los cuales actúan posteriormente a la consolidación de la roca.

En la tabla siguiente se presenta una estimación, en cuanto a condiciones deseables, de la porosidad de rocas productoras en yacimientos petroleros y geotérmicos.

ESTIMACIÓN	$\phi$ (%)
Despreciable	0-5
Pobre	5-10
Regular	10-15
Buena	15-20
Muy buena	20-25

Tabla tomada de las notas de la materia: Geología de Yacimientos Petroleros, FI, UNAM

El análisis petrográfico de las muestras de núcleo y de canal obtenidas durante la perforación de los pozos del Campo Geotérmico Los Humeros, ha permitido estudiar con detalle la litología del subsuelo, dando como resultado que la porosidad que presenta el yacimiento es tanto primaria (zonas de brechas y diaclasas de enfriamiento) como secundaria (fracturas).

El valor promedio de porosidad para el campo es del orden del 10 %, valor obtenido a partir del análisis petrofísico a núcleos .

### Permeabilidad

La segunda propiedad más importante que debe presentar la roca productora, es la permeabilidad.

La permeabilidad es la propiedad que presentan algunas rocas para permitir el movimiento de los fluidos dentro de ellas, debido ya sea a la intercomunicación de los poros y/o a la presencia de fracturas y fallas.

Darcy realizó investigaciones de flujo de agua a través de empacamientos de arena y, basándose en sus observaciones, formuló la ley para flujo de fluidos en medios porosos, la cual lleva su nombre.

Ecuación general de la ley de Darcy:

$$V_s = -\frac{k}{\mu} \left( \frac{dP}{ds} - \frac{\rho g}{1.0133} \frac{dz}{ds} \right) 10^{-4}$$

- donde:  $V_s$ , Volumen fluyendo por unidad de área del medio poroso por unidad de tiempo. (cm/seg)  
 $k$ , Permeabilidad del medio (darcys  $1.0133 = \text{dinas}/(\text{cm}^2)(\text{atm})$ )  
 $\mu$ , Viscosidad del fluido (centipoises)  
 $s$ , distancia en la dirección de flujo (cm)  
 $dP/ds$ , Gradiente de presión a través de  $s$  en el punto en el cual  $V_s$  es referida (atm/cm)  
 $\rho$ , Densidad del fluido ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )  
 $g$ , Aceleración de la gravedad ( $980.665 \text{ cm}/\text{seg}^2$ ).  
 $z$ , Coordenada vertical (cm)

\* Contreras, E., Domínguez, B. y Ribera, O. "Mediciones Petrofísicas en Núcleos de Perforación del Campo Geotérmico Los Humeros". Geotermia, Rev. Mex. de Geoenergía, vol. 6 No. 1, 1990, pp (8-42).

La permeabilidad se mide en darcy, la cual es una unidad grande, por lo que comunmente se reporta en milidarcys.- Un medio tiene permeabilidad de un milidarcy cuando un líquido de viscosidad igual a un centipoise, se mueve un milímetro por segundo a través de una sección transversal de un centímetro cuadrado de roca, bajo un gradiente de presión de una atmósfera por centímetro.

En la tabla siguiente se presenta una estimación, en cuanto a condiciones deseables, de la permeabilidad de rocas productoras en yacimientos petroleros y geotérmicos<sup>1</sup>.

ESTIMACIÓN	k (md)
Regular	1-10
Buena	10-100
Muy buena	100-1000

Los yacimientos geotérmicos alojados en rocas volcánicas, generalmente poseen una permeabilidad original muy baja, la cual se incrementa en las zonas de fracturamiento, con lo que es suficiente para mejorar las condiciones de producción del yacimiento. Si las estructuras no están cerradas o selladas por depósitos minerales secundarios de alteración, éstas actúan como los conductos principales por donde se desplazan los fluidos geotérmicos, formando zonas favorables de producción.

En el Campo Geotérmico Los Humeros, la permeabilidad original de las rocas productoras (andesitas) se asocia a la presencia de diaclasas de enfriamiento y a zonas de brechas en los contactos entre coladas de lavas<sup>2</sup>. Así mismo la permeabilidad se ve incrementada debido al fracturamiento generado por esfuerzos tensionales posteriores a la formación de las rocas.

La permeabilidad en el Campo Los Humeros presenta valores dentro de un rango de 1 a 3.9 md, valores obtenidos a partir del análisis e interpretación de pruebas de presión, lo cual nos indica la baja permeabilidad del campo<sup>3</sup>.

### Yacimientos fracturados

Existen formaciones en las que se desarrolla una porosidad secundaria después del proceso de formación de la roca original. La porosidad secundaria desarrollada en estos yacimientos (llamados yacimientos fracturados o de doble porosidad), es el resultado de la respuesta de la formación a procesos tales como la lixiviación o el fracturamiento.

<sup>1</sup> Tabla tomada de las notas de la materia: Geología de Yacimientos Petroleros, FI, UNAM

<sup>2</sup> López, H. A. "Estudio Regional Volcánico y Estructural de la Zona Geotérmica de Los Humeros, Pue., México". Geoterma, Rev. Mex. de Geoenergía. Vol. 11, No 1, 1995, pp (17-36).

<sup>3</sup> C.F.E. "Características Termodinámicas del C. G. Los Humeros, Pue.". Informe RHU-02/96. Abril 1996.

Las características de los materiales y los esfuerzos mecánicos a los que está sometido un yacimiento, hacen que dichas formaciones respondan de manera diferente a tales circunstancias, desarrollando la porosidad secundaria, la cual incrementa generalmente la capacidad de almacenamiento del yacimiento. Aunado a esto, se presenta normalmente un aumento en la permeabilidad y por lo tanto en la capacidad de flujo de la formación.

Se pueden distinguir dos sistemas separados en un yacimiento fracturado: la matriz del yacimiento, distribuida en bloques, la cual contiene la porosidad primaria, que es generalmente de muy baja permeabilidad, y el sistema de fracturas, que constituyen la porosidad secundaria, con altas permeabilidades, por lo que en ellas predomina el flujo en el yacimiento.

### Pozo geotérmico

La forma de extraer del subsuelo los fluidos geotérmicos para fines de generación eléctrica es mediante la perforación de pozos, los cuales se realizan a profundidades que varían de 1500 a 3200 m -para el Campo Geotérmico Los Humeros-, dependiendo de la profundidad y localización de las zonas productoras, ver figura 1.6.

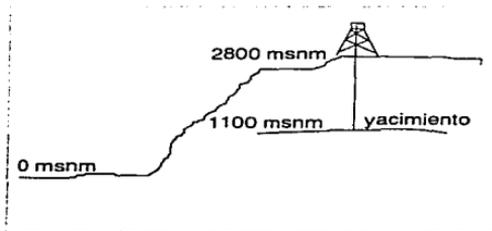


Figura 1.6. Referencia del Campo Geotérmico Los Humeros Puebla, con el Nivel de mar.

La descripción típica del estado mecánico de un pozo geotérmico se muestra en la figura 1.7. y la distribución de las tuberías de revestimiento quedan de la siguiente manera:

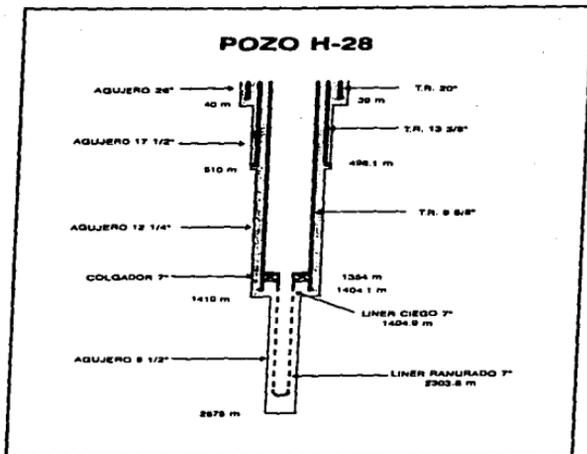


Figura 1.7. Estado mecánico típico de un pozo del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.

- a) Tubería conductora de 0.762 m (30 pg) de diámetro a una profundidad entre 6 y 12 metros. El agujero se perfora con un diámetro de 1.016 m (40 pg). El objetivo de colocar y cementar esta tubería es la de dar consistencia al contrapozo.
- b) Tubería de revestimiento superficial de 0.508 m (20 pg) de diámetro a una profundidad entre 40 y 60 metros en función de las características litológicas. El agujero se perfora inicialmente con barrena de 0.311 m (12 1/4 pg) de diámetro, luego se amplía a 0.508 m (20 pg) de diámetro, y por último se amplía a 0.660 m (26 pg) de diámetro. Esta tubería de revestimiento tiene la función de aislar las zonas deleznable, que pueden ocasionar el derrumbe del pozo mismo.
- c) Tubería de revestimiento intermedia de 0.339 m (13 3/8 pg) de diámetro a una profundidad entre 300 y 600 metros. El agujero se perfora con barrena de 0.311 m (12 1/4 pg) de diámetro y posteriormente se amplía a 0.4318 m (17 pg) de diámetro. En el diseño mecánico de los pozos, esta tubería tiene como objetivo aislar los

acuíferos someros y servir como soporte del cabezal donde se ancla la tubería de 0.244 m (9 5/8")

- d) Tubería de revestimiento productora de 0.244 m (9 5/8 pg) de diámetro a una profundidad entre 1000 y 1700 metros. El agujero se perfora con barrena de 0.311 m (12 1/4 pg) de diámetro. La función de esta tubería es la de aislar los acuíferos profundos y la de servir como conductor de los fluidos geotérmicos, además en la parte inferior de ésta se ancla la tubería corta de producción (líner).
- e) Tubería de revestimiento corta de 0.177 m (7 pg) de diámetro, anclada a la parte inferior de la tubería de revestimiento de 0.244 m (9 5/8 pg) de diámetro, tiene la característica de tener ranuras alternadas a lo largo de su sección longitudinal de 0.635 cm (¼ pg) de ancho por 7.62 cm (3 pg) de largo, para permitir el paso de los fluidos del yacimiento al pozo, para el caso de un pozo productor o viceversa en el caso de un pozo inyector. El agujero se perfora con barrena de 0.215 m (8 ½ pg) de diámetro.

### **Registros de presión y temperatura**

Con la finalidad de evaluar los recursos geotérmicos, a través de las diferentes etapas de un pozo geotérmico, es necesario realizar mediciones directas empleando registradores de presión y temperatura, así como indirectas como son los modelos matemáticos (simuladores de pozo) o bien las correlaciones entre pozos cercanos.

El equipo que se utiliza para correr registros de presión y temperatura en pozos geotérmicos consta de un conjunto de dispositivos mecánicos, por medio de los cuales se registran las variaciones de presión y temperatura que se presentan en el recorrido que hace la herramienta dentro del pozo.

Las diferentes parámetros que se pueden obtener de los registros de presión y temperatura que se efectúan dentro de los pozos geotérmicos en las diferentes etapas del mismo, son:

#### *Etapa de perforación*

Durante la etapa de perforación se determinan los intervalos permeables y la temperatura de la formación en base a los registros de temperatura. Son fundamentales estos registros, junto con otras herramientas de análisis, en la selección de los intervalos de producción; como lo es el seguimiento de los parámetros de perforación, geológicos y geoquímicos, de los cuales se van conociendo las condiciones de la formación atravesada por la barrena.

### *Etapa de calentamiento*

Cuando el pozo se deja en estado de reposo por un periodo de tiempo considerable presenta condiciones estáticas, con lo que se puede obtener la presión de fondo estática, una estimación de la presión del yacimiento, así como la temperatura de la formación, evaluando de esta forma, si los fluidos llegan a las condiciones de saturación.

### *Etapa de inducción*

Antes y durante la inducción de un pozo geotérmico se corren registros de presión y temperatura para conocer las condiciones termodinámicas de los fluidos dentro del pozo, y de alguna manera las condiciones iniciales del yacimiento, que sirven como nivel de referencia para las etapas posteriores de su explotación.

### *Etapa de evaluación*

En la etapa de evaluación se pueden cuantificar las condiciones termodinámicas de los fluidos, así como la presión de fondo fluyendo.

### *Etapa de producción*

En la etapa de producción se pueden determinar las condiciones termodinámicas, bajo el régimen de fondo fluyendo, así como identificar la profundidad a la cual los fluidos flashéan: profundidad a la que al abatirse la presión debido a las pérdidas presentes en la conducción de los fluidos dentro de la tubería se alcanzan las condiciones de saturación, por lo que hay un cambio de fase la cual es reflejada en la pendiente que presenta el perfil de presión.

De igual forma mediante las pruebas de presión se determinan las propiedades petrofísicas del sistema roca-fluidos, tales como:

- Capacidad del yacimiento (kh).
- Coeficiente de almacenamiento de la formación ( $\phi c_v h$ ).
- Daño a la formación ocasionada por los trabajos realizados durante los trabajos de perforación y/o reparación del pozo, así como durante la terminación del mismo (s).
- Coeficiente de almacenamiento del pozo (c).

### **Intervalos permeables de producción**

Un intervalo permeable es aquella porción del yacimiento en el que se presentan características de porosidad, permeabilidad y se encuentran, además, fluidos geotérmicos a alta temperatura y presión.

Para que un estrato pueda considerarse como productor, debe mostrar las características siguientes:

- 1) Porosidad; poseer espacios suficientes para almacenar un volumen considerable de fluidos geotérmicos, pudiendo ser esta porosidad, primaria y/o secundaria.
- 2) Permeabilidad; interconexión entre poros, de tal manera que cedan fácilmente los fluidos al ser alcanzados por un pozo y en el caso de rocas ígneas, en éstas deben de haber fracturas y fallas.
- 3) Homogeneidad, isotropía; mostrar cierta continuidad lateral y vertical.

Las características productoras de una roca pueden ser originales como la intergranular de las areniscas, brechamiento de las lavas, o secundaria resultante de cambios químicos como la disolución en las calizas o el fracturamiento y fallamiento de cualquier tipo de roca.

Durante la perforación de un pozo geotérmico se van presentando algunos parámetros indicativos de las características de la formación atravesada por la barrena los cuales se utilizan como una herramienta auxiliar en la terminación del pozo.

Dichos parámetros son:

- Temperatura de salida del fluido de perforación.
- Pérdidas de circulación del fluido de perforación.
- Características químicas del fluido de perforación.
- Presencia de minerales de alteración hidrotermal en los recortes producidos por la barrena.

Los dos factores más importantes para la identificación de un intervalo productor es su permeabilidad y temperatura de la formación. El primero se determina a partir de la corrida de registros de temperatura durante la etapa de perforación del pozo, apoyado en las pérdidas de circulación presentadas. La segunda se estima en primer instancia con la temperatura de salida de los fluidos de perforación y en segundo lugar con el cálculo de la temperatura estabilizada de la formación obtenida a una profundidad dada y con una serie de registros de temperatura con diferentes tiempos de reposo.

Las temperaturas obtenidas a partir de los registros en los pozos durante su etapa de perforación, han permitido identificar los intervalos permeables que presentan cada uno de ellos, los cuales se han obtenido a partir del criterio de cambio de pendiente

que muestran los perfiles de temperatura, ésto debido al fenómeno de conducción y convección de calor que se presenta en el interior de los pozos geotérmicos.

## **2 HERRAMIENTA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y PRESIÓN "KUSTER"**

El equipo que se utiliza generalmente para correr registros de presión y temperatura comprende un conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos y electrónicos, por medio de los cuales es posible obtener información de los pozos. Entre las características principales de estos equipos, se encuentra la facilidad de transportación de un lugar a otro, la rapidez para obtener la información a diferentes profundidades, así como el buen grado de precisión con que operan.

Los registradores de presión y temperatura que generalmente se utilizan en pozos geotérmicos de México, son de tipo mecánico (debido a que por las altas temperaturas no es posible correr con confiabilidad registros eléctricos) los cuales proveen una medida exacta y confiable de presión y temperatura que existe dentro de un pozo.

Aunque también existen herramientas electrónicas destinadas a tal fin, el inconveniente que presentan es que han sido desarrollados para la medición en pozos petroleros, por lo que el rango máximo de temperatura es limitado, del orden de 175 °C, en tanto que en pozos geotérmicos se tienen temperaturas que pueden llegar por encima de los 400 °C.

Actualmente están en desarrollo proyectos para la construcción de sondas electrónicas resistentes a las condiciones medias de un yacimiento geotérmico. Algunas de éstas ya están operando, tales, como las del IIE en México, CISE en Italia y NEDO en Japón, además de las de Nueva Zelanda y Filipinas.

En este capítulo se presenta una descripción del equipo de la unidad de registros de presión y temperatura, haciendo énfasis en la descripción, operación y calibración de los elementos de medición, así como en la forma en que se lee la carta registradora.

## 2.1 EQUIPO

La unidad de registros de presión y temperatura es de gran importancia en los campos geotérmicos, ya que de manera rápida se puede obtener información necesaria de las condiciones tanto del pozo (presiones estáticas o dinámicas,...), de la formación (potencial del yacimiento,...), así como de los fluidos (densidad, entalpía,...).

El diseño y material con que están construidas sus partes, además de la facilidad y rapidez de su maniobra de instalación y operación en el campo, la convierten en la unidad que más se aplica a la mayoría de los casos de los pozos geotérmicos, excepto para estudios especiales que requieran de una alta sensibilidad en los cambios de presión y temperatura, así como de intervalos grandes de tiempo (superiores a 360 horas) como lo es en pruebas de interferencia o el monitoreo continuo en pozos observadores.

La unidad de registros de presión y temperatura consta de los siguientes elementos:

- 1) Camión transportador.
- 2) Cabina de control.
- 3) Sistema de potencia.
- 4) Sistema de izaje.
- 5) Conexiones.
- 6) Sistema eléctrico.
- 7) Sonda registradora.

### **Camión transportador**

La facilidad y rapidez de movilidad de la unidad de registros de presión y temperatura es una de sus características principales.

En la plataforma de un camión de carga de tres ejes están montadas la unidad de potencia, la cabina de control, así como el sistema de izaje.

### **Cabina de control**

La cabina de control de la unidad de registros de presión y temperatura es aquella donde el operador controla las maniobras que se ejecutan en la corrida de los registros.

### **Sistema de potencia**

El sistema de potencia es el conjunto de dispositivos mecánicos e hidráulicos que tienen la función de suministrar la fuerza mecánica e hidráulica necesaria para hacer operar de una manera controlada y sistematizada el equipo registrador.

Un motor de combustión interna acciona una bomba hidráulica, para suministrar el fluido motriz al motor hidráulico, éste a su vez tiene la función de accionar la caja de transmisión y así poder introducir y extraer la sonda registradora del pozo.

### **Sistema de izaje**

Esta sección de la unidad tiene la función de introducir y extraer la sonda registradora del pozo durante la operación de una corrida de registros.

La unidad de registros está provista de dos carretes; uno para cable de 0.476 cm (3/16 pg) de diámetro y otro para alambre de 0.233 cm (0.092 pg) de diámetro capaz de alojar 7000 metros cada uno.

El motor hidráulico activa el juego de engranes que constituyen la caja de transmisión, así la tensión en el cable y la velocidad del mismo, depende de la transmisión seleccionada y de la velocidad de motor.

Cuando se opera el cable, es necesario guiarlo a lo largo del carrete, con el fin de evitar que se dañe por mal acomodamiento, esto se logra mediante una guía, la cual consta de un riel sobre el que desliza el soporte o base del contador.

El contador del cable es un elemento esencial en el funcionamiento de la unidad, puesto que en cualquier operación de corrida de registros, es necesario conocer la profundidad de los elementos en el pozo respecto de un nivel de referencia (cabezal del pozo, altura de la rotaria, etc.)

Este contador consta de dos poleas de diferentes diámetros, en donde una de ellas está conectada a un juego de engranes que permiten contabilizar la cantidad de metros que entran o salen del carrete, asimismo son leídos por el operador.

### **Conexiones**

Para poder conectar la unidad de registros en el pozo, es necesario contar con una serie de elementos que permitan llevar a cabo las operaciones con el máximo control, sin importar la etapa en la que se encuentre el pozo, por lo que, para tal efecto se cuenta con un dispositivo llamado lubricador, el cual consta del cuerpo del lubricador que permite alojar en su interior los elementos de medición, un preventor de estoperos que aísla el espacio anular entre el cable y el cuerpo del lubricador permitiendo un

control del pozo durante las operaciones, una válvula de purga para permitir el desfogue de presión que se pudiera acumular dentro del cuerpo del lubricador, y una polea principal que permite guiar el cable del carrete al interior del pozo.

### **Sistema eléctrico**

El sistema eléctrico consta de un generador, lámpara interior para iluminar la cabina de control, así como de reflectores, cuya finalidad es iluminar el área de trabajo de las operaciones necesarias para una corrida de registros.

### **Sonda registradora**

La sonda de registros ya sea de presión o temperatura se compone de tres partes principales:

- a) Elemento
- b) Registrador
- c) Reloj

#### **a) Elemento**

Es el dispositivo mecánico cuya función es la de percibir cualquier cambio de presión o temperatura que exista en el pozo, transformando dichos cambios en deflexiones.

#### **Elemento de temperatura**

El elemento de temperatura utilizado en los pozos geotérmicos es de tipo bi-metal, por su rango de aplicación a altas temperaturas. Está constituido por dos láminas bi-metálicas de diferente coeficiente de dilatación, los cuales al calentarse o enfriarse por efecto de la temperatura que les trasmite el medio se acortan o alargan proporcionalmente al cambio de temperatura. La forma de este elemento es helicoidal. La espira fija en su parte inferior, tiende a desenrollarse si la temperatura se incrementa y viceversa. Este tipo de elementos de temperatura bi-metal helicoidal son usados para temperaturas superiores a los 175 °C. Figura 2.1.

El elemento de temperatura al igual que el de presión Kuster tiene una precisión de  $\pm 2$  % del total de la escala, hay una gran variedad de rangos de operación, que va de -4 a 370 °C; la selección está en función de las condiciones particulares de cada pozo, teniendo que los rangos más usados en el Campo Geotérmico Los Humeros son: de 32 a 350 °C, sus dimensiones son de 3.175 cm (1 ¼ de pulgada) de diámetro externo por 1.69 metros de largo.

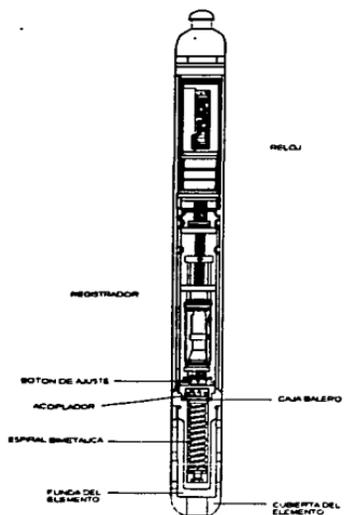


Figura 2.1 Elemento de temperatura

### Elemento de presión

El elemento de presión está constituido por un tubo de Bourdon enrollado helicoidalmente, armado en una sola pieza y constituido de una aleación de cromo-niquel. Figura 2.2.

En un fluido la presión que se ejerce en un punto es la misma en cualquier dirección, por lo que el elemento al estar sumergido en un fluido, éste ejerce una presión sobre él, provocando que se deforme el Bourdon.

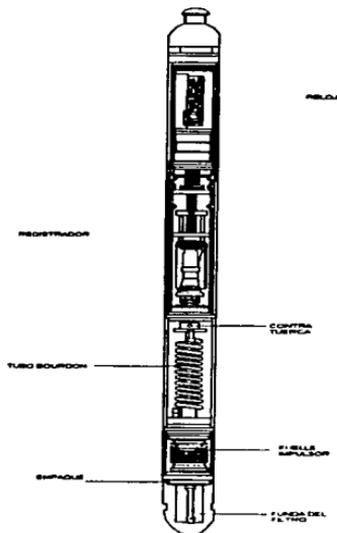


Figura 2.2 Elemento de Presión

Este elemento se aloja en una camisa protectora sellada y conectada en su extremo superior a la sección registradora de la sonda, y en su extremo inferior se acopla a una cámara o depósito con fluido, ya sea agua o aceite, en el cual un sensor de fluidos recibe la señal de presión que ejercen los fluidos sobre él y lo transmite al elemento de presión.

La cámara de fluidos actúa como una trampa que evita que los fluidos del pozo lleguen hasta el elemento protegiéndolo de los efectos de corrosión, incrustación y altas temperaturas que pudieran originarse por contacto directo.

El sensor de fluidos puede ser de fueles o un filtro; el primero tiene un recubrimiento de teflón que le permite resistir la acción de los ácidos y sustancias alcalinas de los fluidos geotérmicos; y el segundo se utiliza cuando los fluidos del pozo son limpios (pozo llenado con agua), permitiendo la comunicación directa de la cámara al Bourdon.

El elemento de presión Kuster tiene una precisión de  $\pm 2\%$  del total de la escala, hay una gran variedad de rangos de operación; la selección está en función de las condiciones particulares de cada pozo, teniendo rangos de cero a  $156 \text{ kg/cm}^2$  y de cero a  $2100 \text{ kg/cm}^2$ , operando a temperaturas hasta de  $427^\circ\text{C}$ , y sus dimensiones son de  $3.175 \text{ cm}$  ( $1 \frac{1}{4}$  de pulgada) de diámetro externo por  $1.86$  metros de largo. El rango más usado en el Campo Geotérmico Los Humeros es de cero a  $200 \text{ kg/cm}^2$ .

#### *b) Registrador*

Esta sección de la sonda tiene la función de registrar en una carta los cambios ya sea de presión o temperatura que el elemento respectivo percibe durante la corrida de registros en el interior del pozo. Figura 2.3.

El movimiento de rotación o efecto de giro que genera al cambiar las condiciones de presión o temperatura es transmitido a un estilete construido de osmio, zafiro o diamante mediante una flecha.

El conjunto del estilete opera dentro de un portacartas, el cual se desplaza una distancia de  $12.7 \text{ cm}$  (5 pulgadas) aproximadamente accionado por el conjunto del tornillo sinfín, imprimiendo el estilete una marca sobre la carta de  $(5.715 \times 7.62 \text{ cm})$  ( $2 \frac{1}{4} \times 3 \frac{5}{8} \text{ pg}$ ) con recubrimiento, de  $0.0254 \text{ mm}$  ( $0.001 \text{ pg}$ ) de ancho.

#### *c) Reloj*

El reloj tiene el propósito de regular el recorrido del portacartas a través del tornillo sinfín y está diseñado para resistir vibración, impactos ligeros y altas temperaturas que se presentan en los pozos geotérmicos. Figura 2.4.

Los relojes tienen una gran variedad de horas de trabajo; desde 2 hasta 360 horas continuas. La experiencia en los ambientes geotérmicos han demostrado que para temperaturas por encima de los 177 °C, los relojes de mas horas tienden a fallar, esto puede ser originado por el gran periodo al que están expuestos los componentes del reloj a las altas temperaturas.

Los componentes de la sonda registradora anteriormente descritos se acoplan y protegen con su funda correspondiente, la cual está construida de acero monel y acero templado en las partes externas de contacto de los fluidos geotérmicos del pozo.

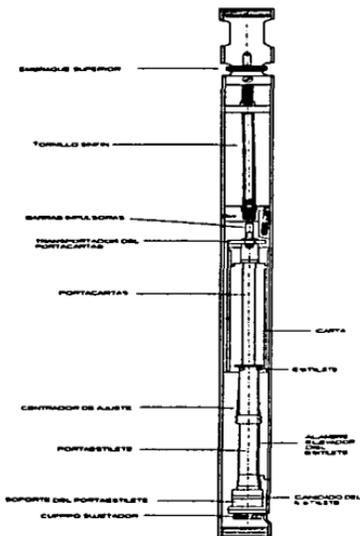


Figura 2.3 Registrador

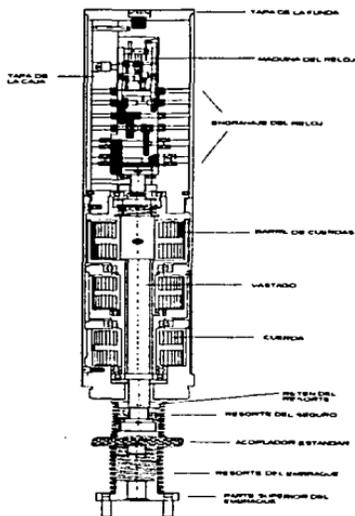


Figura 2.4. Reloj

## 2.2 OPERACIÓN

### Principios de operación de los registradores de presión y temperatura

Los registradores de temperatura constan de un termómetro bi-metálico el cual tiene forma helicoidal, de tal manera que al presentarse una variación de temperatura este se deflexiona causándole una rotación o efecto de giro, la cual es transmitida directamente al estilote a través de una flecha, el conjunto del estilote se encuentra en operación dentro del portacartas; el reloj y el conjunto del tornillo sinfín mueve al portacartas una distancia de 12.7 cm (cinco pulgadas), imprimiendo el estilote una marca sobre una carta con recubrimiento, la marca es de aproximadamente de 0.0254 mm (0.001 pulgadas) de ancho; que puede ser observada y medida con la ayuda de una lente de 5X, o bien mediante el uso de un lector de cartas de doble movimiento.

El principio de operación de los elementos de presión es similar al de temperatura, salvo que para registrar los cambios de presión se utiliza el tubo Bourdon (manómetro) enrollado helicoidalmente, que al ejercer los fluidos geotérmicos sobre él una presión, causan una rotación o efecto de giro, la cual es transmitida al estilote a través de la flecha.

### Programas de corridas de los registros de presión y temperatura

El programa de la corrida de registros de presión y temperatura en pozos geotérmicos dependerá de la finalidad de los registros, etapa en que se encuentre el pozo y de su estado mecánico.

Los programas de corridas de registros de presión y temperatura constan de: profundidad total del registro, profundidad de cada una de las estaciones que se van a realizar, y en función del objetivo de los registros y de las condiciones de presión y temperatura dentro de pozo se selecciona el reloj y su tiempo así como el rango de operación de los elementos a utilizar. Por otra parte se hacen observaciones de algunos detalles que tuvieran que considerarse durante la corrida, como profundidades en las que se reduce el diámetro interno, pudiendo ser el colgador de la tubería o una obstrucción por depositación de carbonatos, entre otras.

Lo mas usual en los programas de registros, es correr simultáneamente elementos de presión y temperatura, con el fin de contar con dos parámetros importantes para analizar termodinámicamente el comportamiento de los fluidos dentro del pozo.

### Pozo en perforación o terminación

Para pozos en perforación se necesita conocer la profundidad a la que se van a correr los registros, la temperatura de salida del fluido de perforación para así seleccionar el rango adecuado de los elementos, las condiciones en que se encuentra, pudiéndose

correr en agujero descubierto, dentro de la tubería de revestimiento o bien dentro de la tubería de perforación con pichancha.

Para el caso de las pruebas de terminación, como son las de inyección-recuperación, la selección del rango de los elementos y del tiempo del reloj está en función del programa mismo de la prueba.

#### **Pozo en calentamiento**

Para los pozos geotérmicos que se encuentran en etapa posterior a la perforación y terminación, es necesario conocer el estado mecánico de su terminación, así como el tiempo que ha estado en reposo y los valores máximos de presión y temperatura presentes en los últimos registros.

#### **Pozo en inducción**

En los pozos que no tienen la capacidad de fluir por sí mismos y se encuentran en esta etapa, se necesita conocer su estado mecánico y las condiciones de los últimos registros corridos.

#### **Pozo en evaluación**

Para la corrida de registros en pozos que se encuentren en la etapa de evaluación, es necesario conocer: la profundidad a la que se va a correr el registro, el estado mecánico que tiene el pozo, si está en agujero descubierto o se cuenta con tubería de producción y a qué profundidad se encuentra el colgador mecánico del que está anclada dicha tubería.

#### **Pozo en producción**

El programa de corrida de registros en pozos productores incluye primeramente la corrida de calibración de la tubería de producción, para conocer la profundidad libre a la que pueden llegar los elementos y así evitar posibles problemas como atrapamiento de los mismos. La calibración se logra mediante una barra de peso o bien un globo de calibración, el cual se corre de igual forma que los registros y su objetivo es detectar mediante la pérdida de tensión del cable con el que se baja, la profundidad a la cual se reduce el diámetro interno de la tubería. Así mismo es necesario conocer el estado mecánico del pozo y si se va a correr en condiciones estáticas (cerrado) o dinámicas (fluyendo).

### Operación de la unidad de registros de presión y temperatura

Previo a la corrida de registros de temperatura y/o de presión se requiere hacer una serie de maniobras que permitan hacer una operación adecuada de los mismos.

Con el fin de tener el control directo sobre el pozo durante la toma de registros, es necesario instalar el dispositivo llamado lubricador, el cual para pozos en perforación o reparación, se auxilia de una combinación que adapta al diámetro de la tubería de perforación con el del lubricador, en tanto que en pozos terminados se utiliza una brida adaptadora que proporciona una combinación del diámetro de la válvula superior y el diámetro del lubricador.

La preparación de la sonda para correr un registro consiste en instalar el reloj, insertar la carta registradora y marcar la línea base en la carta, esta última tiene la finalidad de comprobar que la punta del estilite parte de un punto inicial con deflexión cero a condiciones del medio ambiente.

Una vez preparada la sonda registradora se procede a sujetarla por medio del portacable al cable o alambre y se coloca dentro del lubricador, figura 2.5, para pozos terminados es necesario ir abriendo la válvula superior de manera paulatina, permitiendo que se comunique la presión al lubricador. La introducción de la sonda al pozo se puede hacer mediante caída libre o a condiciones controladas hidráulica o dinámicamente por el operador desde la cabina de control.

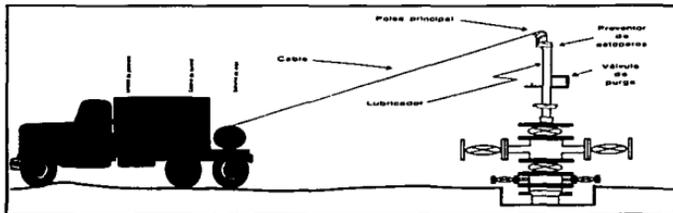


Figura 2.5. Esquema del arreglo de la unidad para la toma de registros de presión y temperatura.

Se coloca el contador en ceros y se comienza a introducir la sonda al pozo a una velocidad controlada, con ello principia a registrar los cambios de presión y temperatura de los fluidos dentro del pozo. Llegada la sonda a la primera estación - estas estaciones son profundidades puntuales en las que se detiene la sonda por un intervalo de tiempo y tienen el objeto de permitir que se establezcan las condiciones de presión y temperatura- se detiene por espacio de siete a diez minutos para que se establezcan las condiciones e inmediatamente después se prosigue introduciendo la

sonda hasta las siguientes estaciones, realizando en cada una de ellas el tiempo de espera mencionado. Alcanzada la profundidad total del registro se procede a extraer la sonda a la superficie y se retira la carta registradora de los elementos.

### 2.3 CALIBRACIÓN

La calibración de los elementos de presión y temperatura es de gran importancia para obtener datos confiables de las condiciones de presión y temperatura en los pozos geotérmicos. Por lo que para tal efecto se realizan las calibraciones correspondientes de los elementos en forma periódica. En el Campo Geotérmico Los Humeros, estas calibraciones se realizan cada 30 corridas o bien cada seis meses, dependiendo de lo que ocurra primero.

La calibración de los elementos de temperatura se realizan mediante un dispositivo (baño térmico) que permite incrementar la temperatura del elemento de medición, mediante un fluido, pudiendo ser aire o aceite, de tal manera que se tiene un control de la temperatura. En tanto que para la calibración de los elementos de presión se cuenta con un dispositivo adicional llamado báscula de peso muerto, la cual permite aplicar presión al elemento mediante un fluido. Los cambios de presión o temperatura que se simulan serán registrados en la carta.

El dispositivo para calibrar los elementos de presión y temperatura que se emplea en el Campo Geotérmico Los Humeros, es calibrador de la marca Kuster -baño térmico de aceite-, con un rango de 0 a 256 °C , diseñado para calibrar y probar los elementos en la superficie. El baño térmico es usado en conjunto con un probador de peso muerto, con rango de 0 a 400 kg/cm<sup>2</sup> , para el caso de los elementos de presión.

El baño térmico consta de un recipiente vertical, una bomba y un motor, un calentador y un indicador de control. Todos los controles están montados en un pánel. El calentador, la bomba y el motor son controlados desde el nivel del piso. La bomba centrífuga circula el fluido caliente a través de la cámara del calentador. El calentador es regulado por un termocople-indicador-controlador.

#### Calibración de los elementos de temperatura

La calibración de los elementos de temperatura se realiza mediante incrementos de temperatura, cubriendo el rango de operación de los mismos.

Se arma el elemento de temperatura, el registrador y un reloj y un tornillo de avance de doble paso o una cubierta exterior provista de un aditamento para efectuar el avance del portacartas en forma manual.

A continuación se introduce el elemento al baño térmico de calibración y se regula la temperatura de inicio de calibración, la cual debe corresponder al valor mínimo del rango de operación del elemento, permitiendo que se establezca dicha temperatura.

Una vez estabilizada la temperatura, se deja dos minutos a cada nivel de temperatura, avanzando el portacartas en cada operación. Los tiempos de cada operación y las temperaturas correspondientes se anotan.

#### **Calibración de los elementos de presión**

La calibración de los elementos de presión se realiza mediante incrementos de presión y a una temperatura fija.

Se procede de la misma forma que en el caso anterior, salvo que se conecta el elemento al calibrador de peso muerto.

Posteriormente se introduce el elemento al baño de calibración y se regula la temperatura a la cual se va a calibrar, permitiendo que se establezca dicha temperatura.

Una vez estabilizada la temperatura, se aplica presión con el calibrador de peso muerto, dejándolo de tres a cuatro minutos a cada nivel de presión y avanzando el portacartas en cada operación.

Cuando los elementos de presión operan a temperaturas superiores a los 93°C, como es el caso de los pozos geotérmicos, para mayor precisión de los mismos, es recomendable que el elemento sea calibrado a la máxima temperatura que se espera encontrar en el pozo. Esto debido a que el material del que está hecho el tubo Bourdon, está compensado a una temperatura de 93°C.

Posteriormente son leídas las deflexiones de la carta registradora para cada nivel de temperatura o de presión correspondiente que se ajustó y se comparan con las tablas que proporciona el fabricante para cada elemento, en las cuales a cada deflexión de la carta le corresponde un valor de temperatura o de presión, según sea el caso. Si no coinciden las deflexiones y la temperatura o la presión simuladas a las de la carta, se procede a realizar los ajustes necesarios por medio de un programa de software que de igual forma provee el fabricante y mediante el cual se construyen las tablas correspondientes a las nuevas condiciones de los elementos.

## 2.4 LECTURA DE LA CARTA REGISTRADORA

La etapa de lectura de la carta registradora es de suma importancia en el proceso de evaluación de las condiciones de presión y temperatura de los pozos geotérmicos.

Una vez que se ha efectuado algún registro y se ha recuperado la carta de la sonda, se procede a identificarla y leerla, obteniendo así la información que se ha impreso sobre ella. Lo anterior se puede lograr de varias formas. Una es usando una regla de acero graduada en centésimas de pulgadas, apoyado por una lente de 4 a 6X; el inconveniente de este método de lectura es la poca precisión de los datos leídos.

Así que para obtener mayor grado de precisión, es recomendable el uso de un lector de cartas de dos ejes, el cual es el que se utiliza en el Campo Geotérmico Los Humeros.

El lector de cartas consiste principalmente de un lente ocular enfocable de 5X o un microscopio de 56X montado sobre uno de dos tornillos sin fin perpendiculares entre sí, que actúan como ejes X-Y, los cuales se deslizan controlados por un mecanismo giratorio que opera manualmente. Cada uno de estos ejes cuenta con un contador de avance, el cual permite obtener las deflexiones marcadas en la carta en pulgadas (eje X), o el desplazamiento de la carta en el tiempo (eje Y); con una precisión hasta de una diezmilésima de pulgada.

Otra ventaja de este instrumento es que está equipado con un foco cuya función es iluminar la carta y proyectar sobre ella una cruz, con lo cual se eliminan los problemas de paralaje, durante la interpretación.

Para realizar una buena lectura e interpretación de la carta es necesario contar con información adicional de las condiciones en las que se tomó el registro, tales como: estado mecánico del pozo, cualquier incidente no previsto en el equipo, condiciones iniciales y finales de presión en la cabeza del pozo, etc.

Colocada la carta en el lector se sitúa el lente sobre la línea base y se procede a verificar y en su defecto a acomodar la carta de tal forma que la línea base de la carta coincida con el eje Y de la cruz del lente a lo largo de toda la línea. Una vez hecho lo anterior, se ubica la primera estación a leer por medio del lente y se regresa a la línea base para verificar que coincida con el eje Y. Se hacen los ajustes a ceros del contador de avance en X y se recorre nuevamente el lente sobre la estación. Identificada se coloca el seguro y se lee la deflexión que marca el contador de avance, repitiéndose el proceso para el resto de las estaciones.

El gráfico que presenta la carta de un registro de presión, tiene un trazo típico, figura 2.6, donde los fragmentos de línea horizontal continua corresponden a la presión a la profundidad de la estación, y la longitud de dichas líneas al tiempo de espera en la estación. Estas líneas tienen la característica de ser paralelas a la línea base.

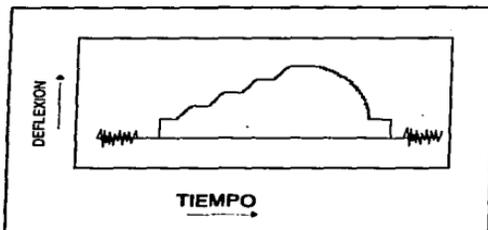


Figura 2.6. Carta típica de un registro de presión

Los incrementos de presión registrados durante el viaje de la sonda de una estación a otra se manifiestan en las pequeñas líneas marcadas en zigzag.

Una carta normal de presión presenta una tendencia escalonada hasta un punto máximo que corresponde con la mayor profundidad alcanzada por el registro, a partir de este punto se inicia la extracción del elemento a la superficie y el gradiente de presión decrece al ritmo de extracción, hasta llegar a las condiciones iniciales de partida, interceptando la línea base.

La carta de temperatura presenta un escalonamiento creciente similar a la carta de presión durante la etapa de entrada al pozo, a diferencia de la carta anterior, el comportamiento de la temperatura en las estaciones se presenta como una curva, lo que indica que el elemento de temperatura responde más lentamente a los cambios de la misma por cambio de profundidad. Figura 2.7.

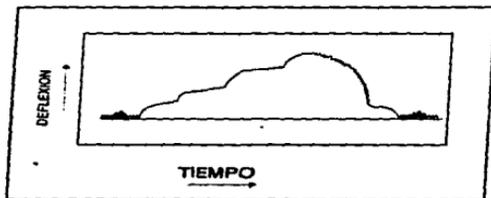


Figura 2.7. Carta típica de un registro de temperatura.

### 3 REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA

Como se mencionó anteriormente los pozos geotérmicos presentan un gradiente térmico anormal, esto puede ser debido a una comunicación directa de los fluidos calientes del yacimiento o bien por transferencia de calor de la roca.

El diseño de la sonda de registros de presión y temperatura permite obtener datos de presión y temperatura de cualquier intervalo de profundidad de los pozos, y en cualquier etapa de los mismos, ya sea en condiciones estáticas, fluyendo a través de tubería o en agujero descubierto, y tiene la versatilidad de poder correrse en diámetros grandes o pequeños.

En el capítulo anterior se describió el equipo utilizado en la toma de registros de presión y temperatura que se utiliza generalmente en los pozos geotérmicos de México, así como su operación, calibración y lectura de la carta registradora; en este capítulo se presenta información que se obtiene a partir de los registros de presión y temperatura para cada etapa de los pozos, en el Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.

### **3.1 INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE PERFORACIÓN DE UN POZO GEOTÉRMICO**

Durante la perforación de un pozo geotérmico, al atravesar una formación permeable, el fluido empleado para tal fin, penetra a la formación, produciendo un enfriamiento inmediato en ésta, que es proporcional a la permeabilidad. Casi simultáneamente ocurre un calentamiento inmediato, que es también proporcional a dicha permeabilidad; ambos fenómenos se manifiestan en los registros de temperatura, como inflexiones "negativas o positivas", respectivamente, e indican un régimen convectivo de la formación. La forma más adecuada de discriminar estos perfiles es mediante el uso de series de registros con diferentes tiempos de reposo. Los primeros registros habrán de denunciar la invasión del fluido de perforación en la formación, pero los últimos, representarán los incrementos de temperatura por aporte de fluido geotérmico hacia el pozo.

#### **Zonas permeables**

En la etapa de perforación de los pozos geotérmicos se determinan las zonas permeables en base a los registros de temperatura.

Durante la perforación de un pozo se van presentando algunos parámetros indicativos de las características de la formación atravesada por la barrena. Estos parámetros son: la litología a través de las muestras de canal, la temperatura de salida del fluido de perforación, las pérdidas de circulación, las características químicas del fluido de perforación, así como la presencia de minerales de alteración hidrotermal en los recortes producidos por la barrena. A todos ellos se les da un seguimiento durante la perforación, ya que constituyen los primeros conocimientos de la formación, así mismo son elementos auxiliares para poder terminar un pozo, éste es el caso particular en el Campo Geotérmico Los Humeros, cuando se ha penetrado al yacimiento inferior, el cual tiene características ácidas, éste se refleja en la acidez del fluido de perforación. Por lo que se puede terminar si continúa decreciendo el pH.

Para la identificación de un intervalo productor, los dos factores más importantes considerados, son: su permeabilidad y la temperatura de la formación.

El primero se determina a partir de la corrida de registros de temperatura durante la etapa de perforación del pozo (antes de correr la tubería de revestimiento correspondiente), apoyado en las pérdidas de circulación presentadas. La segunda se estima en primer instancia con la temperatura de salida de los fluidos de perforación y en segundo lugar con la temperatura estabilizada de la formación, obtenida a una profundidad dada y con una serie de registros de temperatura con diferentes tiempos de reposo.

Los registros de temperatura son corridos después de perforar el último metro de una etapa de perforación, regularmente en la etapa del agujero de 0.311 m (12 ¼ ") diámetro y en la de 0.2159 m (8 ½ ") diámetro (en el Campo Geotérmico Los Humeros). Se corre una serie de registros con un tiempo de reposo de 0,6,12,18 y hasta de 36 horas, ésto es que, inmediatamente a la suspensión de la perforación correspondiente, se corre el primer registro y subsecuentemente cada seis horas. La finalidad es identificar las zonas permeables, ver la evolución de la temperatura en dichas zonas y poder determinar la temperatura estabilizada de la formación.

Estos registros delatan aquellas zonas de la formación en la que el fluido de perforación ha penetrado a ella y por lo tanto ha enfriado dicha zona, manifestándose en el decremento de temperatura que presenta el fluido de perforación, figura 3.1, ya que fuera de ella la temperatura se incrementa al estar en contacto directo la formación impermeable y caliente con dicho fluido de perforación.

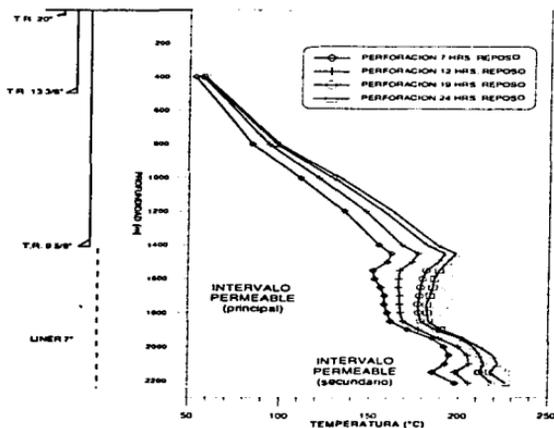


Figura 3.1. Intervalos permeables del pozo H-17, en el Campo Geotérmico Los Humeros, a partir de perfiles de temperatura (pozo original).

### Temperatura estabilizada de la formación

La segunda característica que debe tener un intervalo productor es la temperatura de la formación, la cual para el Campo Geotérmico Los Humeros, tiene que ser superior a los 200 °C.

Esta temperatura es calculada en base a una serie de registros de temperatura con diferentes tiempos de reposo que se corren inmediatamente después de perforar.

A partir de una profundidad de interés se obtienen las temperaturas correspondientes para cada registro, figura 3.2, y mediante el método de Horner, se calcula la temperatura de la formación que tendría sin estar afectada por la presencia de los fluidos de perforación. Figura 3.3.

Esta temperatura de la formación, además, es un parámetro auxiliar para la decisión en la instalación de la tubería, ya sea la de revestimiento o el liner de producción, según sea el caso; así como para el acondicionamiento de la lechada de cemento por efectos de temperatura.

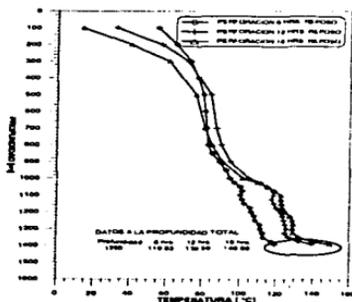


Figura 3.2. Serie de registros de temperatura para obtener la temperatura estabilizada de la formación. Pozo H-38, perforación, etapa de agujero de 12 ¼ "pulgada, Campo Geotérmico Los Humeros.

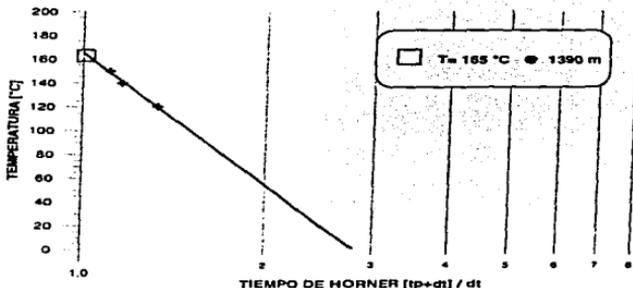


Figura 3.3. Temperatura estabilizada de la formación, en el pozo H-38, del Campo Geotérmico Los Humeros, a la profundidad de 1390 m, a partir de registros de temperatura.

### Capacidad del yacimiento

Después de la perforación de un pozo geotérmico, suele realizarse una prueba de inyección-recuperación para determinar la capacidad del yacimiento, la cual es definida por el producto de la permeabilidad y el espesor del yacimiento ( $kh$ ). Es una estimación inicial de la permeabilidad del recientemente pozo perforado.

Esta prueba consiste en bajar la sonda registradora de presión a la profundidad del máximo intervalo permeable e inyectar agua a un gasto constante durante un tiempo definido (2 a 3 horas), para posteriormente continuar monitoreando la presión durante la recuperación de la presión en el yacimiento, este tiempo, dependiendo de las características de la formación, puede llegar a ser mayor de 18 horas.

Los datos de presión son graficados con respecto al tiempo, tanto de inyección como de recuperación, y se analizan los resultados recurriendo a los métodos analíticos convencionales, como el MDH, curvas tipo, Horner, Función de la derivada, para determinar el producto de la permeabilidad y el espesor de la formación (capacidad del yacimiento). Figura 3.4.

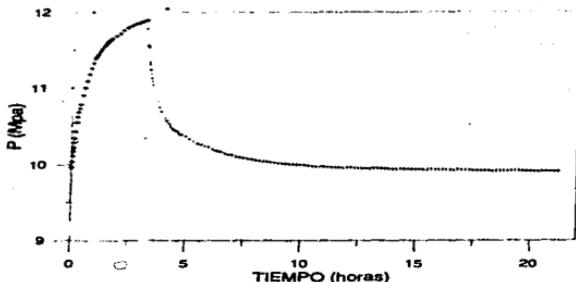


Figura 3.4. Gráfica de presión vs. tiempo, de la prueba de inyección-recuperación del pozo H-19. Campo Geotérmico Los Humeros.

### 3.2 INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE CALENTAMIENTO DE UN POZO GEOTÉRMICO

Terminadas las operaciones de la perforación de un pozo geotérmico y de su limpieza, se deja con agua fría y durante un periodo de tiempo en observación o calentamiento. Con esto, la formación tiende a recuperar sus condiciones iniciales de presión y temperatura, y en algunos casos cuando se tienen fluidos geotérmicos y una buena comunicación entre el yacimiento y el pozo, en este último el agua incrementa su temperatura y por lo tanto disminuye su densidad pudiendo incluso alcanzar las condiciones de saturación, aligerando la columna hidrostática y permitiendo el aporte de la formación al pozo.

Así cuando el pozo se deja en estado de reposo por un periodo de tiempo considerable, presenta condiciones estáticas o de yacimiento, por lo que se pueden obtener datos como:

#### Presión del yacimiento

Durante la etapa de calentamiento de un pozo geotérmico y cuando existe un flujo natural de la formación hacia él, la columna de agua dentro del pozo se va aligerando por verse incrementada su temperatura y por ende el comportamiento de la pendiente

del gradiente de presión aumenta, girando entorno de un punto llamado "punto pivote", cuyo valor es una estimación de la presión del yacimiento. Figura 3.5.

Los registros de presión corridos en esta etapa, a diferentes tiempos, permiten estimar la presión original del yacimiento, la cual es de mucha utilidad para la evaluación, tanto del pozo como del yacimiento mismo.

### Evolución térmica del pozo

Cuando el pozo se deja en reposo, las zonas en las que los fluidos de perforación invadieron la formación, tenderán a recuperar su temperatura original. Las zonas menos permeables recuperaran su temperatura en forma más rápida, que aquella zonas en las que el radio de invasión fue mayor.

Durante el tiempo en que se deja el pozo en calentamiento, son corridos periódicamente registros de temperatura para observar el comportamiento que tienen los fluidos en el pozo. Es posible también determinar los estratos que tienen mayor permeabilidad, así como los pequeños estratos semi-impermeables en todo lo largo del pozo. Figura 3.6.

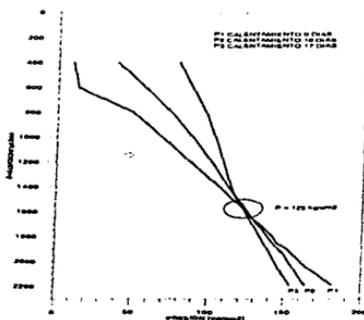


Figura 3.5. Estimación de la presión del yacimiento, en el pozo H-38, del Campo Geotérmico Los Humeros, a partir de registros de presión.

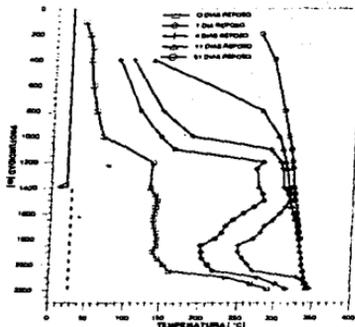


Figura 3.6. Evolución térmica de los fluidos en el pozo H-38 del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.

#### Condiciones iniciales de presión y temperatura de los fluidos

La determinación de las condiciones iniciales de presión y temperatura de los fluidos en los yacimientos geotérmicos, son de suma importancia para la evaluación del comportamiento del yacimiento a través del tiempo.

A partir de los registros temperatura en la etapa de calentamiento se determina la temperatura de los fluidos en las zonas de aporte y se comparan con las condiciones de saturación. Figura 3.7.

De la misma forma, por medio de los registros de presión se obtienen las condiciones iniciales de presión de los fluidos geotérmicos en las zonas principales de aporte. Figura 3.8.

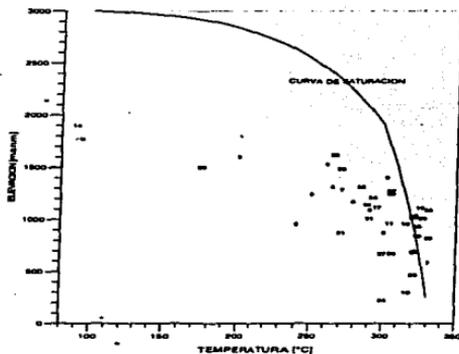


Figura 3.7. Perfil general de temperatura del Campo Geotérmico Los Humeros.

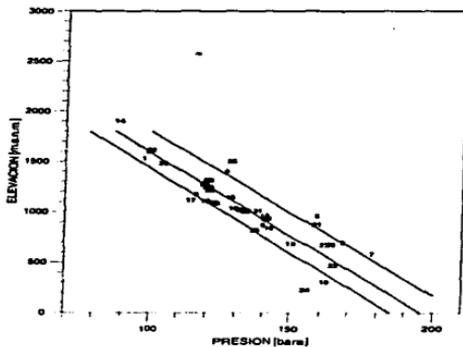


Figura 3.8. Perfil general de presión en el Campo Geotérmico Los Humeros.

### 3.3 INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE INDUCCIÓN DE UN POZO GEOTÉRMICO

Cuando un pozo geotérmico no tiene la capacidad de fluir por sí mismo, se lleva a cabo una inducción neumática, conocida como "inducción por burbujeo". Ésta consiste en ir introduciendo tubería de 6.03 cm (tubing 2 3/8 pg) de diámetro por debajo del nivel estático e inyectar aire con un compresor para aligerar la columna de agua, permitiendo así que el yacimiento se manifieste al abatirse la presión hidrostática dentro del pozo, al mismo tiempo que se va incrementando la temperatura del líquido hasta que una vez alcanzadas las condiciones de saturación, se arranca el pozo (fluye).

#### Nivel estático

Antes de inducir los pozos geotérmicos mediante el método de burbujeo, se corren registros de presión y temperatura para poder determinar el nivel estático del líquido dentro del pozo y así programar la profundidad a la que hay que introducir el tubing dentro del mismo para iniciar la inducción.

El elemento de presión comenzará a registrar la presión dentro del pozo, una vez que esté por debajo del nivel estático, como las estaciones programadas no coinciden con dicho nivel de líquido, es necesario entonces extrapolar en el perfil de presión, hasta que las condiciones de presión sean igual a cero. Figura 3.9.

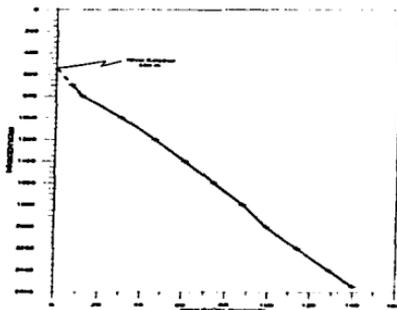


Figura 3.9. Nivel estático del fluido en el pozo H-24, previo a los trabajos de inducción. Campo Geotérmico Los Humeros.

### Condiciones termodinámicas

Así mismo, previo a la inducción de un pozo geotérmico, es necesario conocer las condiciones termodinámicas del fluido dentro del pozo, para saber de antemano la cercanía o lejanía que tienen de las condiciones de saturación y así poder realizar el programa adecuado de la inducción.

Lo anterior se obtiene a partir de los registros de presión y temperatura corridos previamente, graficando ambos valores (presión vs. temperatura) en un diagrama de Clapeyron, y comparándolo con la curva de saturación. Figura 3.10.

Además de los registros de presión y temperatura, corridos previos a la inducción de un pozo geotérmico, se llevan a cabo corridas durante la misma inducción para tener un seguimiento de las condiciones termodinámicas de los fluidos y del nivel estático.

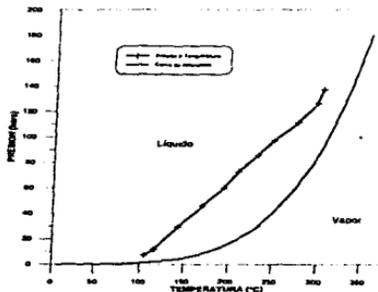


Figura 3.10. Diagrama de Clapeyron para el pozo H-24 previo a su inducción. Campo Geotérmico Los Humeros.

### 3.4 INFORMACIÓN OBTENIDA POR LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE EVALUACIÓN DE UN POZO GEOTÉRMICO

Una vez perforado un posible pozo productor, se procede a evaluarlo, haciendo que fluya a la superficie a un separador de fases permitiendo cuantificar así su producción de vapor y agua a condiciones atmosféricas, así como su entalpía. Y a partir de estos

datos y recurriendo a alguno de los métodos existentes, calcularlas a condiciones de separación distintas.

### Condiciones termodinámicas y de fondo en pozo fluyendo

Durante esta etapa de evaluación, los pozos geotérmicos se ponen a producir a través de varios diámetros de orificio, y se construye su curva de desarrollo (curva característica de producción), para así determinar las condiciones óptimas de producción. Así mismo, se corren registros de presión y temperatura para cuantificar las condiciones termodinámicas de los fluidos dentro del pozo, y la presión de fondo fluyendo que presenta para cada diámetro de orificio por el cual está fluyendo. Figura 3.11.

Esta información que obtiene a partir de los registros de presión y temperatura, son de gran utilidad, tanto para la simulación de los pozos, como para los trabajos tendientes a la evaluación de los mismos.

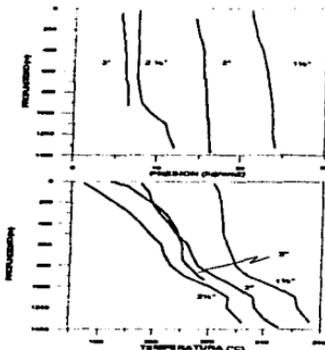


Figura 3.11. Perfiles de presión y temperatura para el desarrollo y evaluación del pozo H-36. Fluyendo con distintos diámetros de orificio. Campo Geotérmico Los Humeros.

### **3.5 INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS REGISTROS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DURANTE LA ETAPA DE PRODUCCIÓN DE UN POZO GEOTÉRMICO**

Durante la vida productiva de los pozos geotérmicos, sus características varían a medida que el tiempo transcurre, estas variaciones incluyen cambios en las condiciones termodinámicas de los fluidos dentro del pozo, así como también en los volúmenes de los fluidos producidos.

El monitoreo y estudio permanente de las variaciones antes mencionadas, es de suma importancia, ya que dichos cambios reflejan la evolución del yacimiento bajo las condiciones específicas de explotación que se tienen, o bien proporcionan indicios para detectar problemas mecánicos en la estructura de los pozos, tales como: problemas de incrustación o colapsos de la tubería de revestimiento.

Por lo que en esta etapa de producción de los pozos geotérmicos se corren registros de presión y temperatura para tener un seguimiento de sus condiciones termodinámicas de los fluidos dentro del pozo. Igualmente se realizan algunas pruebas de presión a los mismos durante el tiempo en que salen a mantenimiento las unidades de generación de electricidad.

#### **Distribución de los fluidos producidos dentro del pozo**

En ocasiones el agua puede fluir del yacimiento en fase líquida hasta el pozo, y ya dentro de este último presentarse las condiciones de saturación. Esto se observa en los registros de presión, en donde se pueden diferenciar dos pendientes en los gradientes de presión: uno, no muy pronunciado y que corresponde al flujo en fase líquida; y otro, pronunciado, correspondiente a fase vapor. A la intersección de ambas pendientes se le conoce como punto de flasheo, y le corresponde una profundidad. Figura 3.12. Esta distribución de los fluidos dentro del pozo se verifica a partir de los datos de presión y temperatura y se realizan cálculos termodinámicos, a fin de determinar la densidad de la mezcla.

#### **Parámetros petrofísicos del yacimiento**

Una prueba de presión consiste en ocasionar un disturbio en la presión al modificar las condiciones de producción y registrar las variaciones de presión en el fondo del pozo durante un tiempo determinado. Posteriormente se interpretan dichos datos a partir de un modelo matemático del sistema roca-fluidos, cuyos parámetros determinan las características del yacimiento.

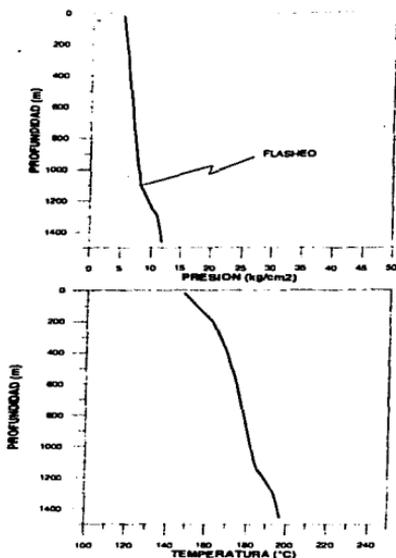


Figura 3.12. Perfiles de presión y temperatura para determinar la distribución de fluidos dentro del pozo H-15. Campo Geotérmico Los Humeros.

En el Campo Geotérmico Los Humeros, se realizan pruebas de incremento de presión a algunos pozos, cuando por razones mismas de mantenimiento, las unidades de generación salen de operación. Con ello un pozo puede ser cerrado para realizar dicha prueba.

Es importante hacer notar que cuando un pozo se cierra en la superficie, el fluido de la formación continúa fluyendo hacia él durante algún tiempo. Y en forma similar, cuando un pozo se abre en la superficie, el flujo inicial se debe a los fluidos almacenados en el agujero y posteriormente proviene de la formación. Este efecto es llamado de

almacenamiento o llenado y altera el comportamiento de la presión durante los tiempos cortos. Por lo que en las pruebas de incremento de presión se selecciona un reloj de al menos veinte horas, para monitorear y garantizar que se tendrán registros de presión cuando ya hayan cesado los efectos de almacenamiento.

Las propiedades petrofísicas del sistema roca-fluidos que se pueden determinar de las pruebas de presión, son:

- Capacidad del yacimiento,  $kh$
- Coeficiente de almacenamiento de la formación,  $\phi c_i h$
- Daño a la formación, ocasionada por los trabajos realizados durante los trabajos de perforación y/o reparación del pozo, así como durante la terminación del mismo,  $s$
- Coeficiente de almacenamiento del pozo,  $c$

En la figura 3.13. se presenta los datos de presión por el método de Homer, de una prueba de incremento de presión de un pozo geotérmico.

#### **Presión de fondo fluyendo y características termodinámicas de los fluidos.**

De los perfiles de presión construidos de los registros en condiciones dinámicas de los pozos y en base a la zona de aporte del mismo se obtiene la presión de fondo fluyendo, para cada uno de los pozos del Campo Geotérmico Los Humeros.

Por otra parte, de los datos de presión y temperatura obtenidos de los registros corridos en esta etapa de producción, se pueden determinar las condiciones termodinámicas de los fluidos dentro del pozo, como son: densidades, tanto de la mezcla, como de cada fase, entalpías, calidades del vapor, entre otras. Las variables anteriores se obtienen haciendo uso de las ecuaciones de estado y de las tablas de vapor. Estas variables son de utilidad para modelar los flujos dentro del pozo mediante los simuladores matemáticos de pozo y para algunos estudios en particular.

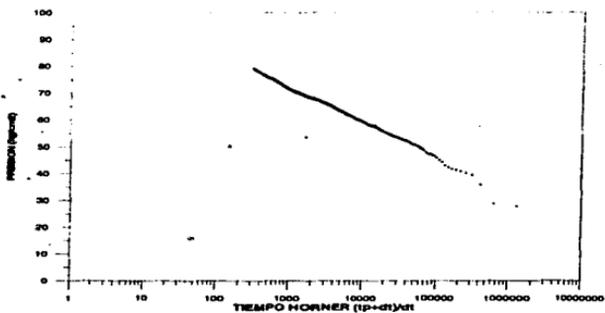


Figura 3.13. Análisis de datos de una prueba de incremento de presión, método de Homer, para el pozo H-30, Campo Geotérmico Los Humeros.

#### **4. INTERVALOS PERMEABLES**

La evaluación constante de un campo geotérmico es de vital importancia para poder explotar, de manera racional, el recurso geotérmico susceptible de aprovecharse comercialmente para la generación de energía eléctrica.

De lo anterior se desprende que de los campos en explotación, como lo es Los Humeros, la definición de los criterios generales de explotación deben ser sustentados a partir de bases sólidas, siendo fundamental el entendimiento apropiado de las características del campo y de la actualización y análisis de la información generada. Así de esta manera, se alimentan de información a los simuladores de yacimientos y de pozos, igualmente se utiliza para los diferentes trabajos tendientes a la evaluación del yacimiento.

En este capítulo se presentan algunas características generales del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla y se hace una revisión y actualización de los intervalos permeables y/o de producción de los pozos, a partir de los registros de temperatura y en base a las condiciones mecánicas que guardan los pozos.

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS, PUEBLA

##### Geología

Desde el punto de vista geológico regional, el Campo Geotérmico Los Humeros, queda ubicado en la intersección del Cinturón Volcánico Mexicano y la Sierra Madre Oriental, figura 4.1, dentro de una caldera volcánica de edad cuaternaria, la Caldera de los Potreros, la cual se aloja en otra importante caldera también cuaternaria conocida como Caldera de Los Humeros.

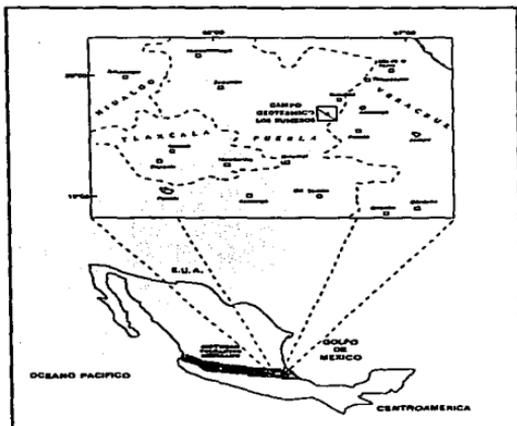


Figura 4.2 Ubicación geográfica del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.

Este Campo presenta una geología bastante compleja, ya que además de los eventos caldéricos incluye rasgos estructurales que reflejan una intensa actividad tectónica, así como un activo proceso hidrotermal.

\* C.F.E. "Justificación geológica y actualización del modelo geológico conceptual para apoyar la localización de pozos productores e inyectores en el Campo Geotérmico Los Humeros, Pue." Informe OGL-HU-002/96, Marzo 1996

El sistema hidrotermal Los Humeros, se localiza en la porción W de la caldera de Los Humeros. En comparación con otros campos geotérmicos, relacionados con actividad magmática, el último ciclo volcánico en esta zona, es más reciente y por lo mismo las temperaturas son más elevadas. El sistema queda ubicado en el sector donde existe un escalonamiento de fallas normales de dirección NW-SE, descendentes de oeste a este y sin expresión superficial.

#### Descripción de unidades litológicas

Las unidades litológicas presentes en el subsuelo del Campo Geotérmico Los Humeros, son agrupadas de acuerdo a los eventos volcánicos que las originaron y a su funcionamiento dentro del yacimiento geotérmico. Tabla 4.1

Tabla 4.1 Unidades litológicas del Campo Geotérmico Los Humeros<sup>1</sup>.

	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
1	Pómez, basaltos, andesitas, andesitas basálticas y rolitas	Estas unidades están constituidas principalmente por andesitas básicas y basaltos francos con texturas porfíricas y minerales de augita y en algunos casos de olivino. En menor proporción hay pumicitas, tobas, rolitas, materiales de explosión frías y decitas. Su espesor varía de 90 m como mínimo y 250 m como máximo.
2	Toba litica	
3	Ignimbritas liticas y vitreas	
4	Andesitas e ignimbritas	Esta unidad está formada por un paquete de ignimbritas, además contiene abundante pómez de composición rolítica, obaidiana y fragmentos de rolita. Incluye además, cantidades menores de andesitas. Por sus características de permeabilidad, esta unidad constituye la capa sello del yacimiento. Su espesor promedio es de 600 m.
5	Andesitas cuaternarias (de augita)	Esta unidad la constituyen andesitas de augita, su cima se identifica por la presencia de intercalaciones delgadas de andesitas e ignimbritas. La zona que se encuentra hacia la base de esta unidad es el yacimiento somero, cuyo espesor promedio es de 500 m.
6	Tobas vitreas	Esta unidad la constituyen tobas vitreas de coloración blanca. Como minerales primarios presenta vidrio y cuarzo principalmente, así como una mica blanca potásica como mineral secundario. Su espesor varía de dos a treinta metros.
7	Andesitas terciarias (de hornblenda)	Estas unidades se encuentran constituidas por derrames sucesivos de basaltos y andesitas porfíricas de fenocristales de plagioclasa y hornblenda, separados por zonas de brechas, su espesor promedio es de 370 m.
8	Basaltos terciarios	Las zonas de brecha de esta unidad se consideran como la roca donde se aloja el yacimiento profundo.
9	Calizas, hornofeas e intrusivos	Esta unidad constituye el basamento del campo geotérmico. Se trata de una secuencia sedimentaria calcárea representada indistintamente por calizas cristalinas con lentes de pedernil, calizas arcillosas de estratificación delgada, calizas con intercalación de lutita y bentonita. Su característica principal es que los pozos ubicados en la porción W y SW, la intervinieron alrededor de los 1000 m y los pozos ubicados hacia el este la intervinieron por debajo de 1500 m y hasta los 2300 m de profundidad. Esta unidad se encuentra afectada por intrusiones poscratónicas de composición granítica y granodiorítica que afectan localmente la secuencia sedimentaria produciendo zonas de metamorfismo de contacto formados por skarn, hornofeas y mármol.

<sup>1</sup> C.F.E. "El Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla". Documento inédito, Noviembre 1996

### Condiciones de permeabilidad

Las rocas volcánicas donde se aloja el yacimiento geotérmico, antes de verse afectadas por la actividad hidrotermal, presentaban permeabilidad moderada. Los afloramientos, muestran escasa apertura en las fracturas y poca comunicación en los contactos entre derrames. Los sectores de mayor permeabilidad se asocian a las zonas de influencia de las fallas principales y ésta disminuye al alejarse de las estructuras.

Desde el punto de vista regional, la permeabilidad de origen primario se asocia a la presencia de diaclasas de enfriamiento y a zonas de brecha en los contactos entre coladas. En tanto que la permeabilidad secundaria en las rocas andesíticas se asocia al fracturamiento generado por esfuerzos tensionales a nivel regional. Por lo que la permeabilidad primaria y el fracturamiento no son los principales factores en el control de la circulación de los fluidos en el yacimiento. La deformación local de origen magmático fue la que generó zonas permeables a través de las cuales éstos se desplazan.

El Colapso Central y el Corredor de fallas N-S, son las estructuras más importantes desde el punto de vista de la permeabilidad local. Figura 4.2

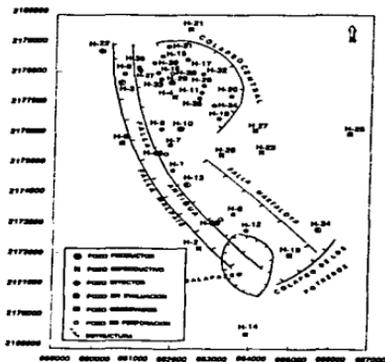


Figura 4.2 Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla.

## **Producción**

Los yacimientos geotérmicos localizados en rocas volcánicas presentan una baja permeabilidad, la cual se incrementa en las zonas de fractura generándose por consecuencia una permeabilidad producto de las mismas y que es suficiente para la producción de fluidos provenientes del yacimiento.

En el Campo Geotérmico Los Humeros, se considera que el mecanismo de producción es a través de fallas de un medio fracturado en roca volcánica.

La producción de vapor, considerando todos los pozos abiertos del Campo, es de 526 ton/h de vapor, mientras que el agua residual, incluyendo el condensado de las unidades en operación, es de 246 ton/h. El agua de desecho se inyecta en los pozos H-29 y H-22 hacia los estratos profundos del yacimiento.

### *Termodinámica de los fluidos*

A partir de las producciones originales a condiciones atmosféricas de los pozos, se tiene que la producción promedio fue de 30 a 40 ton/h de vapor, fluyendo por orificio de 2" de diámetro. Ahora bien, de los 21 pozos productores que suministran vapor para operar las unidades de generación, su producción corresponde a un flujo en dos fases, con calidades superiores al 90% (a excepción del pozo H-1, cuya calidad promedio es del 22%). La entalpía de producción es del orden de 2200 a 2700 kJ/kg con una presión de cabezal de 10 a 25 kg/cm<sup>2</sup>. Tabla 4.2.

De acuerdo a las condiciones de presión y temperatura de los fluidos geotérmicos en las zonas permeables del Campo Los Humeros, se concluye que el fluido que satura la rocas se encuentra como líquido comprimido. Las condiciones termodinámicas de dichos fluidos geotérmicos, se encuentra próximas a las de saturación, esto hace que una disminución de presión, ocasionada por las pérdidas de presión presentadas al desplazarse el fluido del yacimiento (de una permeabilidad muy baja) al pozo, originan que se produzca una evaporación del líquido dentro del yacimiento y una ganancia en calor latente de evaporación, por lo que al llegar al pozo se tiene una mezcla agua-vapor, predominando el vapor con una alta calidad.

### *Zonas productoras*

En el campo geotérmico se pueden distinguir dos zonas productoras. Una en el Colapso Central y otra en el corredor Humeros-Mastaloya. Cada una de estas zonas presentan dos niveles de aporte. Para el Colapso, el nivel superior registra temperaturas de 320 °C, mientras que en el inferior varía de 330 a 360 °C. Con respecto a la zona del corredor antes mencionado, el nivel superior e inferior registran temperaturas de 290 y 315 °C, respectivamente.

Tabla 4.2. Características de producción de pozos del Campo Geotérmico Los Humeros a 8 bara.

POZO	Presión cabezal (bar)	orificio (pg)	Q <sub>1</sub> (ton/h)	Q <sub>2</sub> (ton/h)	Entalpia (kJ/kg)
H-1	20.7	3.0	27.2	94.6	1178
H-6	18.70	3.0	35.0	5.8	2480
H-7	11.6	5.0	46.8	11.0	2391
H-8	11.3	3.0	13.1	8.3	1981
H-9	16.6	5.0	67.4	1.6	2737
H-11	14.7	2.0	5.5	1.0	2454
H-12	33.5	3.0	83.5	11.2	2472
H-15	16.5	3.0	31.6	4.0	2539
H-18	13.0	3.0	18.9	5.0	2341
H-17	22.1	2.0	21.0	2.0	2521
H-19	22.8	2.5	31.4	15.3	2098
H-20	41.3	2.0	37.8	3.0	2619
H-28	12.1	2.0	9.4	3.0	2274
H-30	13.0	3.0	23.0	5.0	2403
H-31	20.7	3.0	36.0	1.7	2677
H-32	23.8	2.5	33.4	6.0	2457
H-33	8.0	3.0	7.5	1.0	2528
H-34	18.6	1.5	7.0	1.5	2408
H-35	22.8	3.0	46.2	2.6	2663
H-36	15.9	1.75	12.8	0.7	2663
H-37	15.0	3.0	20.0	1.0	2672

Para el nivel productor más somero se tiene una producción de fluidos cuya composición es clorada-sódica y en algunos casos tiende a ser bicarbonatada-sódica. En tanto que en el nivel profundo de aporte se producen fluidos típicos de un ambiente geoquímico ácido.

### Geoquímica

Las características principales de la geoquímica de los fluidos geotérmicos del Campo Los Humeros son:

De los análisis de las composiciones del agua producida por los pozos del Campo Geotérmico Los Humeros, se clasifican en bicarbonatada-sódica (predominando), sulfatada-sódica y clorada-sódica.

El cambio de diámetro del orificio en la tubería superficial de producción, está en relación con que la formación productora aporte fluidos de diferentes profundidades, en función del tamaño del orificio. Esto es, que con una restricción pequeña la presión dentro del pozo es mayor, por lo que los fluidos de la formación en las partes profundas de la zona productora, son los que podrán entrar al pozo.

El carácter químico bicarbonatado-sódico se debe a que los pozos producen (principalmente) de la zona somera, algunos influenciados por el orificio por el que producen y otros por la naturaleza del pozo.

El tipo sulfatado-sódico, lo adquiere el agua por la interacción del sulfídrico de carácter magmático con el agua de la zona productora, la cual puede ser denominada como una zona de condensación, debido a las características que ésta presenta, con alto contenido de boro, arsénico, bicarbonatos y poca concentración de cloruros

El tipo clorurado-sódico es característico de aguas de origen geotérmico de circulación profunda que ha interactuado con la roca a alta temperatura.

El porcentaje promedio de gas total es encontrado en los pozos de la zona sur. Mientras que el contenido máximo promedio de sulfídrico y metano calculados en base seca corresponde a la zona norte del campo.

### **Modelo conceptual del Campo Geotérmico**

La integración de los estudios efectuados al Campo Los Humeros, Puebla, permiten la idealización conceptual del mismo. Para tal fin se han considerado las siguientes características:

#### **a) Fuente de calor**

Esta fuente de calor se relaciona con la cámara magmática que alimentó a los eventos volcánicos recientes. La cima se encuentra entre -1700 y -3200 msnm (4.5 y 6 kilómetros de profundidad). El cuerpo de elevada susceptibilidad que aparece al noreste de la zona de los pozos, puede ser un intrusivo frío que se relaciona con la parte externa de la cámara magmática. Los diques básicos corresponden a apófisis de la masa intrusiva principal.

#### **b) Capa sello**

Esta capa está constituida por un paquete principal de ignimbritas, asociado a la actividad volcánica de la caldera, además incluye cantidades menores de andesitas y basaltos. El espesor mínimo de esta capa es de 200 metros, mientras que el máximo es de 479 metros. Se encuentra su cima entre 2710 y 2550 msnm.

#### **c) Yacimiento**

El yacimiento presenta diferentes características, tanto geológicas, de fluidos y temperatura, que lo dividen en dos zonas (separadas por una unidad de tobas vítreas) las cuales son llamadas:

**Yacimiento somero:**

Se localiza en la parte inferior de la capa sello y está formado en su mayoría por andesitas, aunque también incluye cantidades menores de ignimbritas. La zona de interés se encuentra hacia la base de esta unidad, en donde se tienen temperaturas promedio de 290 °C. El espesor promedio es de 1000 m, pero se considera el espesor económicamente explotable como de 500 m de espesor aproximadamente. Ubicándose su cima entre los 2510 y 2070 msnm .

**Yacimiento profundo:**

Es el más profundo y se encuentra en un paquete de andesita de homblenda y basaltos. El espesor máximo del yacimiento es de 750 m y el mínimo de 20 m, tiene como espesor promedio 370 m aunque sólo se considera un espesor económicamente explotable de 80 m. Su cima se ubica entre los 2008 y los 1090 msnm.

**d) Zona de ascenso**

Los fluidos producidos por el yacimiento ascienden por la zona de mayor permeabilidad, la cual es producto de las fallas y fracturas interconectadas. Este fenómeno ocurre en dos sectores, uno al norte del campo y el segundo se sitúa al sureste.

**e) Recarga del yacimiento**

Esta recarga parece ser regional ya que el acuífero somero aporta una mínima cantidad, esto es producto de la presencia de una capa impermeable constituida por ignimbritas, que separa a ambos acuíferos impidiendo la descarga superficial y al mismo tiempo facilitando la recarga vertical.

**f) Descarga del yacimiento**

Posiblemente el yacimiento esté descargando hacia el sur, a través de "puntos de fuga" dentro del colapso caldérico de los potreros. Con la aplicación de la química se han encontrado norias al sur de los Humeros que contienen trazas de elementos de origen geotérmico, asimismo el gradiente electrostratigráfico presenta una tendencia del cuerpo resistivo profundo de norte a sur, lo que tiene como consecuencia que el movimiento de los fluidos también ocurra en esa dirección.

Con la información anterior es posible enmarcar al Campo Los Humeros en un modelo de campo hipertermal (convectivo). En la figura 4.3 se presenta una ilustración del modelo conceptual de Campo.

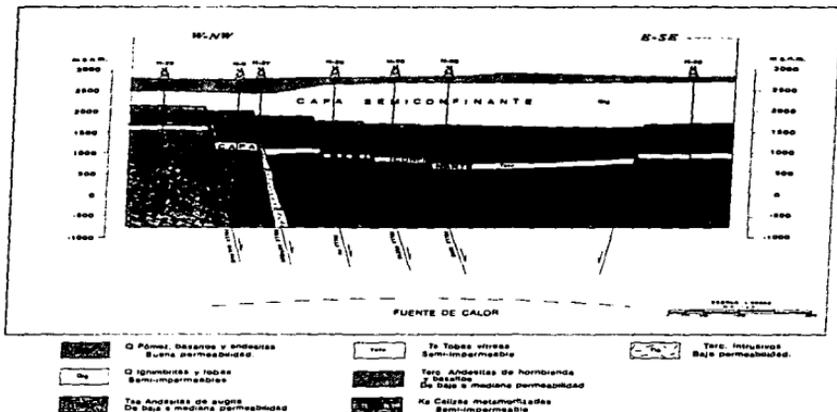


Figura 4.3. Modelo conceptual del Campo Geotérmico Los Humeros, Pue.

## 4.2 REPARACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS

Los principales problemas detectados en el Campo Geotérmico Los Humeros y que originan que un pozo sea reparado, son:

Daño mecánico del pozo:  
 corrosión  
 colapsos  
 desprendimientos

Incrustación de tuberías  
 en liner ranurado  
 en tubería de producción

A la fecha, se han reparado 19 pozos mediante operaciones diversas, que van desde la colocación del liner hasta la apertura de una ventana con perforación direccional. En la tabla 4.2 se presentan los pozos que han sido reparados, la fecha y el tipo de reparación efectuada.

Tabla 4.2. Relación de pozos reparados (1983-1997)

POZO	PROF (m)	AÑO	REPARACIÓN
H-01	1850 d	1995	Perforación lateral
H-02	2304	1985	Conformó Tubería de Revestimiento 9 5/8" y colocó tapón de cemento
H-03	1860 d	1995	Perforación lateral
H-04	1884	1984	Taponado
H-05	1905	1990	Tapón de cemento
H-09	2500	1986	Colocación liner 7"
H-11	1465 d	1992	Perforación lateral
H-11	1465 d	1993	Se conformó T.R. 7"
H-12	3104	1986	Sacar "pescados", intento fallido
H-13	2385 d	1995	Perforación lateral
H-15	1502 d	1992	Perforación lateral
H-16	2041	1989	Tapón de cemento
H-17	1700 d	1992	Perforación lateral
H-19	2292	1988	Limpieza
H-19	1850 d	1993	Perforación lateral
H-24	3280	1995	Se colocó liner de 7"
H-28	2575	1990	Conformó y lijó T.R. de 9 5/8"
H-29	2022 d	1995	Perforación lateral
H-30	1911	1989	Tapón de cemento
H-32	2200	1992	Tapón de cemento
H-33	1600	1992	Colocación de liner de 7"

d. metros desarrollados

### 4.3 INTERVALOS PERMEABLES

La actualización y revisión de los intervalos permeables consistió en verificar las zonas permeables de los pozos: productores, no productores, inyectoros, observadores y de los que se encuentran en etapa de evaluación, cuyo estado mecánico no ha cambiado, en base al análisis de los registros de temperatura en la etapa de perforación. Y a partir del estado actual de los pozos reparados, se actualizaron las zonas de aporte, por medio de los registros de temperatura, y para el caso de pozos con perforaciones direccionales se procedió a hacer los ajustes de profundidad desarrollada a la profundidad vertical, en base a los datos de perforación, y se anotó el rumbo que tiene cada pozo. Figura 4.3

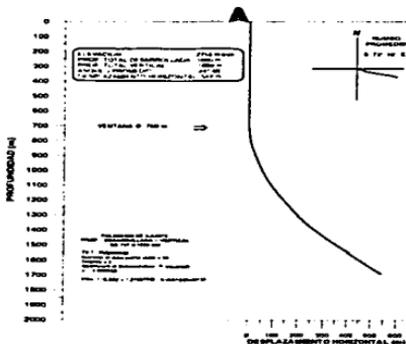
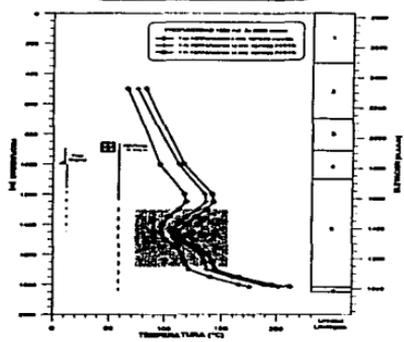


Figura 4.3 Pozo H-03 (Reparado): Vista de perfil y en planta de la perforación direccional. Campo Geotérmico Los Humeros, Pue..

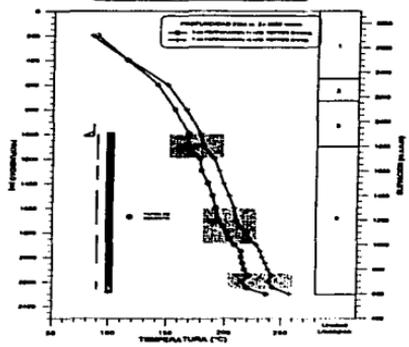
Así mismo se verificaron las zonas permeables identificadas en los registros, con las pérdidas de circulación presentadas durante la perforación de los pozos.

En los perfiles de temperatura se muestra de igual forma la litología presente para cada pozo del campo, tomando como base las unidades litológicas presentadas en el punto 4.1.

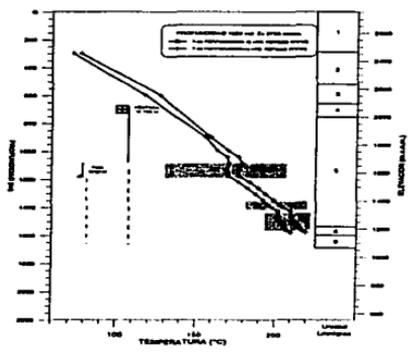
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
 PERFIL DE TEMPERATURA  
 POZO H-1 (Inclinado)



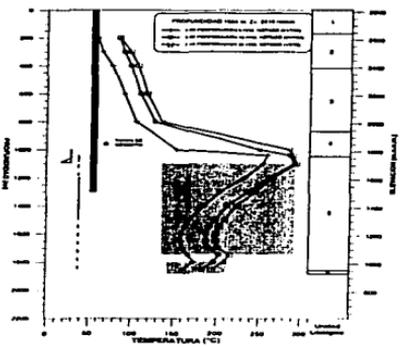
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
 PERFIL DE TEMPERATURA  
 POZO H-2 (Inclinado)



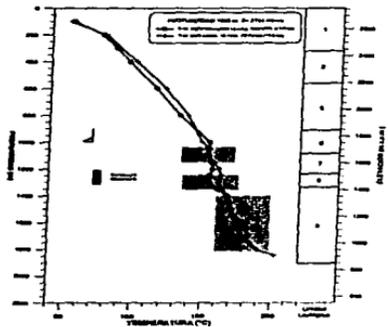
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
 PERFIL DE TEMPERATURA  
 POZO H-3 (Inclinado)



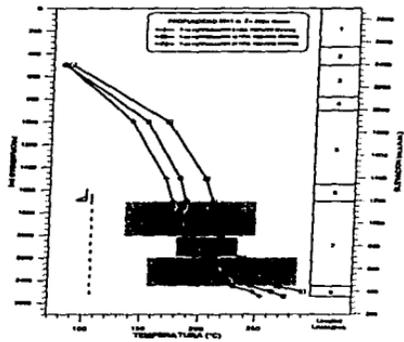
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
 PERFIL DE TEMPERATURA  
 POZO H-4 (Inclinado)



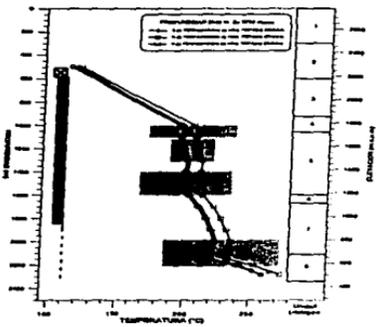
RESIDENCIA "LOS HÚMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO N.º 1 (Continuación)



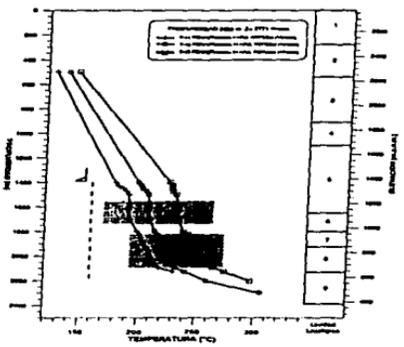
RESIDENCIA "LOS HÚMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO N.º 2



RESIDENCIA "LOS HÚMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO N.º 3

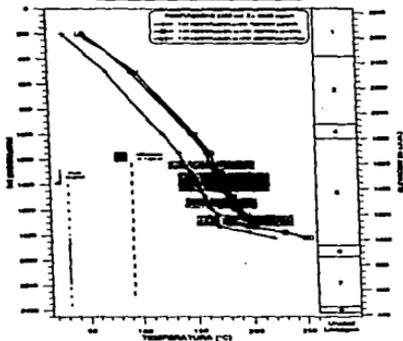


RESIDENCIA "LOS HÚMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO N.º 4

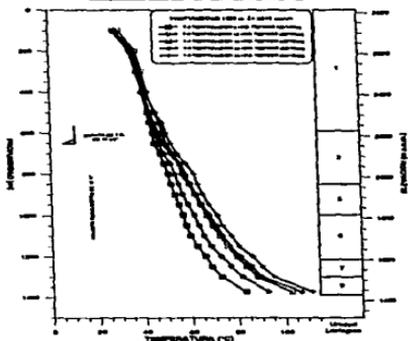




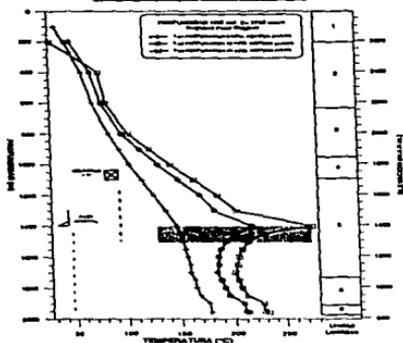
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-13 (copias 85)



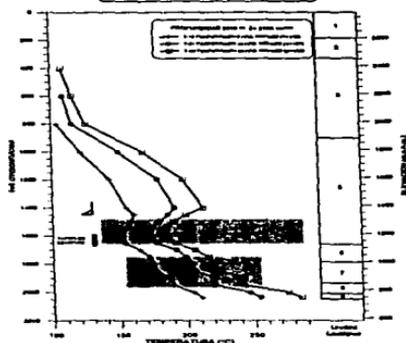
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-14

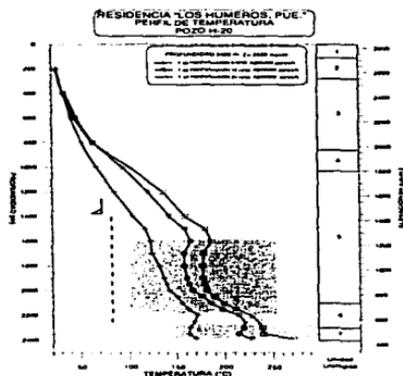
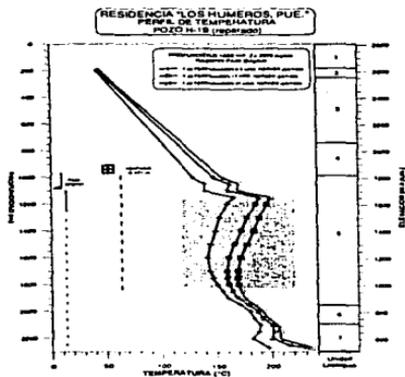
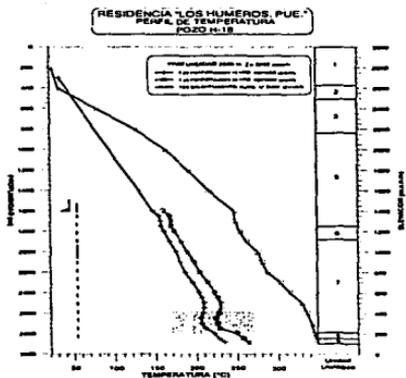
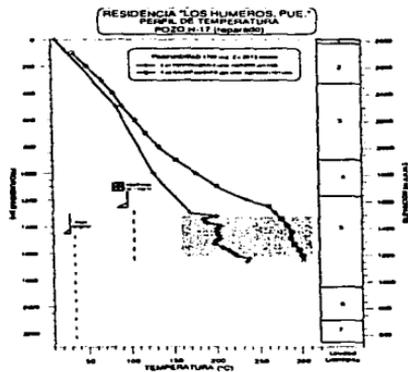


RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-15 (copias 85)

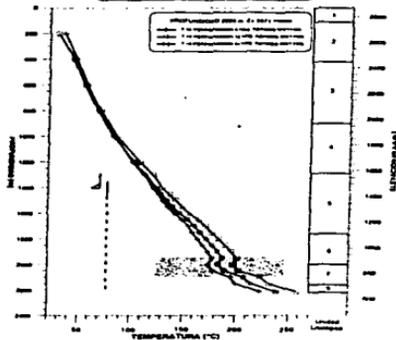


RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-18 (copias 85)

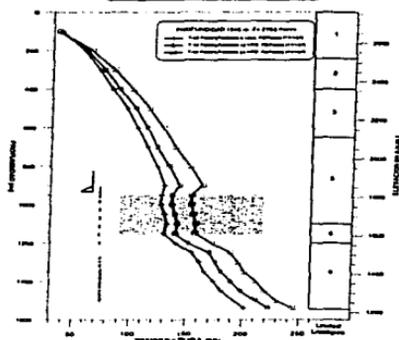




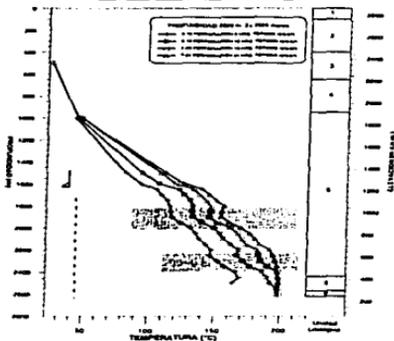
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-21



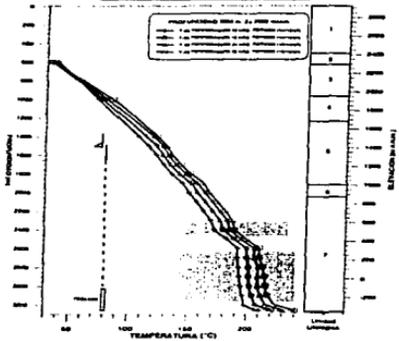
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-27



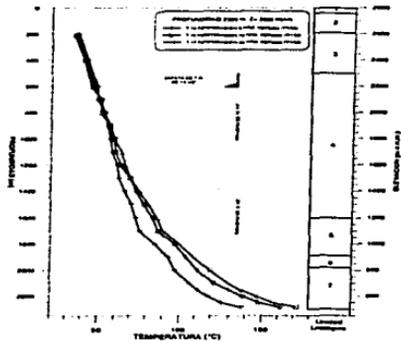
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-23



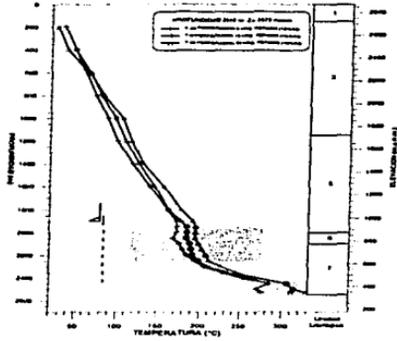
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-24 (reperado)



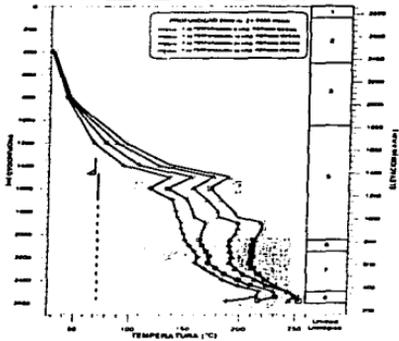
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO N-25



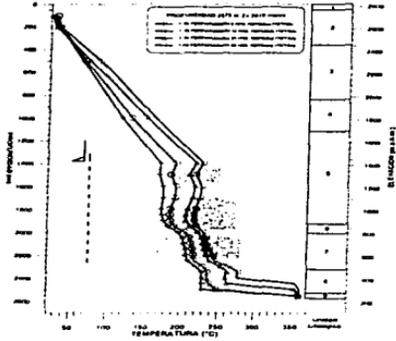
RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO N-26



RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO N-27

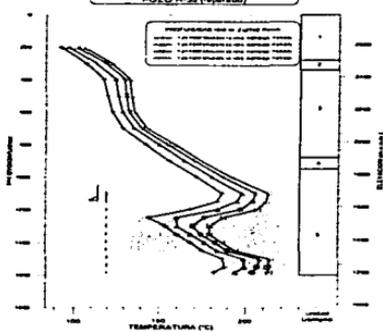


RESIDENCIA "LOS HUMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO N-28 (reperado)

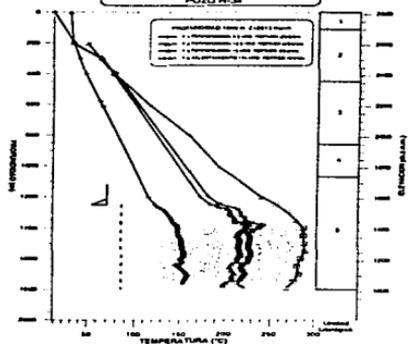




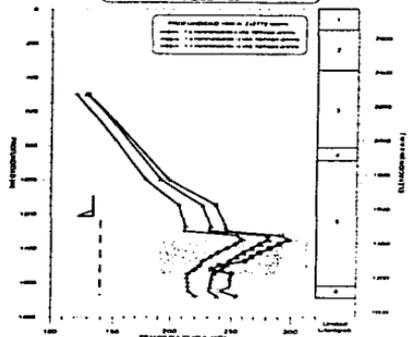
RESIDENCIA "LOS HÚMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-33 (reparado)



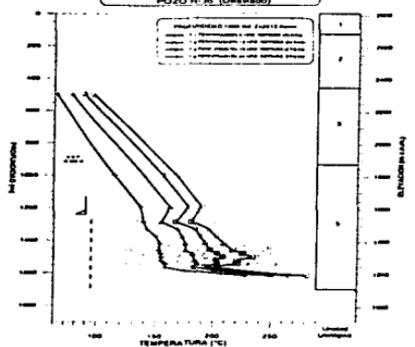
RESIDENCIA "LOS HÚMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-34

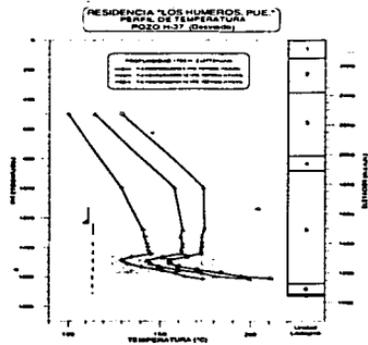


RESIDENCIA "LOS HÚMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-35



RESIDENCIA "LOS HÚMEROS, PUE."  
PERFIL DE TEMPERATURA  
POZO H-36 (Derramado)





## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- La definición de los intervalos permeables de un yacimiento geotérmico, implica el manejo de diversos conceptos, algunos de ellos son frecuentemente empleados en la ingeniería petrolera.

Entre los conceptos más frecuentemente manejados se encuentran la porosidad, la permeabilidad, zonas productoras, presión del yacimiento, temperatura del yacimiento, etc., mientras que la energía geotérmica, los sistemas hidrotermales, las entalpías de producción, son conceptos específicos de los ambientes geotérmicos.

Antes de poder definir los intervalos permeables del Campo Geotérmico Los Humeros, es indispensable una revisión de los conceptos fundamentales relacionados con la geotermia, así como una descripción del propio Campo.

- Las herramientas de medición de los parámetro de presión y temperatura, corridos a los pozos geotérmicos, deben ser operados en forma correcta para así obtener información confiable. Para ello se recomienda que el equipo empleado para calibrar los elementos de medición pueda reproducir las máximas temperaturas registradas en los pozos de este campo geotérmico, las cuales son superiores a los 350 °C.

Así mismo la frecuencia y constancia de la calibración de dichos elementos, aunado a la capacitación del personal encargado de las operaciones y de la lectura de las cartas de los registros, son de suma importancia para crear un círculo de calidad.

- De los registros de presión y temperatura que generalmente se corren en los pozos geotérmicos, es posible obtener una serie de información valiosa para el conocimiento de los pozos, así como para caracterizar el yacimiento. Lo anterior se obtiene a través de cada una de las etapas de los pozos: perforación, calentamiento, evaluación y producción.

Con el desarrollo de nuevas tecnologías, el uso de instrumentos electrónicos como el medidor de flujo, acoplado a los sensores de los parámetros de presión y temperatura, en forma continua es posible identificar las zonas de aporte de la formación. Esta es una herramienta que mejorará la información de los pozos y del yacimiento. Este tipo de herramienta está en etapa de prueba en los pozos geotérmicos en México, ya que la limitación que se tenía, eran las altas temperaturas registradas en los pozos geotérmicos.

- Durante la perforación de los pozos geotérmicos, en la zona de interés, los fluidos empleados eran de base agua, los cuales muchas veces enmascaraban la permeabilidad que pudiera encontrarse, ésto debido a que el enjarre del mismo obturaba los espacios porosos de la formación, por lo que al correr los registros, muchas veces no se manifestaban las zonas permeables y más aún se dañaba la

formación. Por lo que actualmente, los fluidos empleados para tal fin, durante la etapa de la zona de interés, son una mezcla de agua-aire (fluidos aireados) cuyo efecto es de no dañar a la formación, ya que la porosidad y la permeabilidad que se tiene en este campo geotérmico, son muy bajas, por lo que se recomienda continuar utilizando estos fluidos.

- Los registros de presión y temperatura, así como la realización de pruebas a los pozos durante la etapa de perforación, deberán ser programados en forma continua, debiendo considerarse como primordiales, sobre todo para aquellas zonas del campo en las que los parámetros termodinámicos y petrofísicos sean inciertos o poco estudiados.
- A partir de este trabajo de actualización de los intervalos permeables, y en particular donde se incluyen los cambios de las condiciones mecánicas de los pozos y las correcciones de las profundidades desarrolladas a la profundidad vertical, se tendrá que actualizar y corregir los valores de presión, temperatura, etc., referidos a profundidades en función de dichos cambios.
- Los registros son una herramienta útil e importante en la identificación de los intervalos permeables de los pozos geotérmicos, aunque también se recomienda recurrir a los simuladores matemáticos de pozos para verificar las zonas permeables de aporte.
- La caracterización del yacimiento geotérmico a partir de las diferentes disciplinas de la ingeniería y de la constante actualización y análisis de la información generada, permite sentar bases sólidas para una correcta evaluación y por ende, una adecuada explotación del recurso geotérmico.

De esta manera se alimenta de información a los simuladores de yacimientos y de pozos, así mismo se utiliza para los diferentes trabajos tendientes a la evaluación del yacimiento.

- La identificación de los intervalos permeables de un campo geotérmico en explotación, mediante el empleo de los perfiles construidos a partir de los registros de temperatura, corridos a los pozos geotérmicos, en la etapa de perforación de los mismos, y mediante el apoyo de los parámetros de la perforación, geológicos y geoquímicos, son fundamentales, tanto para la correcta terminación de los pozos, como para la caracterización del yacimiento mismo.
- En los intervalos permeables definidos en este trabajo, se observa que dichos zonas se ubican en las unidades litológicas de andesitas de augita, homblenda y en los basaltos terciarios. Aunque también se aprecian algunos intervalos permeables en los contactos de las unidades litológicas, lo cual confirma que las características de permeabilidad del campo están asociadas a su origen primario, como a eventos geológicos posteriores a la formación de las mismas, entre las cuales se mencionan

los contactos entre derrames de lava, las diaclasas de enfriamiento, así como las fallas y fracturas.

- En algunos pozos un mismo intervalo se puede prolongar a través de otras unidades litológicas, consideradas como semi-impermeables, ésto es debido a que se ubican en zonas altamente alteradas por estructuras.
- Aún dentro de una unidad litológica productora, se aprecian diferentes niveles de permeabilidad, lo cual no es sino el reflejo de la heterogeneidad del yacimiento geotérmico.
- La ubicación y cuantificación de los intervalos permeables son de suma importancia, en la explotación del campo geotérmico, para que a partir de ello y con el uso de los simuladores de yacimientos geotérmicos se pueda tener una base confiable de información para predecir el comportamiento del yacimiento bajo diferentes escenarios de producción.
- En este trabajo se revisaron y actualizaron los intervalos permeables de todos los pozos del Campo Geotérmico Los Humeros, a partir de los perfiles de temperatura, construidos de los registros corridos a los pozos, en la perforación de los mismos, mostrando para cada uno de ellos su columna litológica cortada. Para los pozos desviados (perforados y reparados) se les corrigió su profundidad desarrollada a profundidad vertical.

La información obtenida de este trabajo, será una base sólida para que a partir de ella, se actualicen los intervalos permeables que alimentan al simulador de yacimientos y de pozos, utilizado en el campo geotérmico. Así mismo servirá para que, de los valores de profundidad de los pozos desviados y reparados, corregidos a profundidad vertical, se refieran: el perfil general de presión y temperatura, referencias geológicas, correlaciones entre pozos, niveles estáticos, etc. De igual forma será útil para los trabajos tendientes a la evaluación del yacimiento.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Bixley, P. F. "Introduction to Geothermal Reservoir Engineering". New Zealand, 1982.
2. C.F.E. "Características Termodinámicas del C. G. Los Humeros, Pue.". Informe RHU-02/96. Abril 1996.
3. C.F.E. "El Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla". Documento inédito, Noviembre 1996.
4. C.F.E. "El Proyecto de Desarrollo Geotérmico Los Humeros, Puebla". Vol. 1, Octubre 1990.
5. C.F.E. "Estado Termodinámico del Campo Geotérmico de los Humeros". Informe No.-OIY-HU-020/96. Junio 1996.
6. C.F.E. "Justificación Geológica y Actualización del Modelo Geológico Conceptual para Apoyar la Localización de Pozos Productores e Inyectores en el Campo Geotérmico Los Humeros, Pue.". Informe OGL-HU-002/96, Marzo 1996.
7. C.F.E. "Modelo Geoquímico del Campo Geotérmico de Los Humeros, Pue.". Informe DIY-HU-018/96, Junio 1996.
8. C.F.E. "Registros de Presión y Temperatura en Pozos Geotérmicos". Documento Inédito, Enero 1996.
9. C.F.E. "Resumen de la Consultoría de Paul Bixley en el Campo Los Humeros". Agosto 1994.
10. Cedillo, R.F., Viggiano, G.J.C., y Gutiérrez, N.L.C.A. "Columnas Litológicas Microscópicas". Residencia Los Humeros, Puebla, 1993.

11. Contreras, E., Domínguez, B. y Ribera, O. "Mediciones Petrofísicas en Núcleos de Perforación del Campo Geotérmico Los Humeros". Geotermia, Rev. Mex. de Geoenergía. vol. 6 No. 1, 1990, pp (8-42).
12. Cruz, G.M. y Rodríguez O.R. "Información General de los Pozos del Campo Geotérmico Los Humeros, Pue.". Octubre 1996.
13. Dench, N.D. "Well Measurements". UNESCO 1973.
14. Energy G. "Geothermal Well Testing and Sampling Manual". Geothermal Energy, New Zealand Limited, 1982.
15. GENZEL. "Evaluación del Potencial Energético del Yacimiento en Los Humeros, Puebla". Noviembre 1993.
16. Grant, M.A. "Interpretation of Downhole Measurements in Geothermal Wells". Applied Mathematics Division, DSIR Report 88, 1979.
17. Grant, M.A., Donaldson I.G. and Bixley, P.F. "Geothermal Reservoir Engineering". Ed. Academic Press. USA. 1982.
18. Gutiérrez, N. L. "1994-1995: Resultados y Perspectivas de la Geotermia en México". Geotermia, Rev. Mex. de Geoenergía. Vol. 11, No 1, 1995, pp (3-15).
19. Gutiérrez, N.L. "Resultados de la Explotación Geotérmica en México en 1996". Geotermia, Rev. Mex. de Geoenergía Vol. 13, No 1, 1997, pp (3-13).
20. Kuster "Oil Calibration Bath". Kuster Subsurface Instruments.
21. Kuster. "Simplified Chart Reading: Instruction Manual". Kuster Subsurface Instruments.

22. Lopez, H. A. "Estudio Regional Volcánico y Estructural de la Zona Geotérmica de Los Humeros, Pue., México". Geotermia, Rev. Mex. de Geoenergía. Vol. 11, No 1, 1995, pp (17-36).
23. Tello, H.E. "Características Geoquímicas e Isotópicas de los Fluidos Producidos por los Pozos de Los Humeros, Puebla, México". Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Morelia Mich. México.
24. Tello, H.E. "Composición Química de la Fase Líquida a Descarga Total y a Condiciones de Reservorio de Pozos Geotérmicos de Los Humeros, Puebla, México". Geofísica Internacional (1992), Vol. 31, Num. 4, pp 383-390.
25. Truesdell, A.H. "Origins of Acid Fluids in Geothermal reservoirs". Geothermal Resources Coucil Transactions, Vol. 15, October 1991.