

Perforación de pozos bilaterales: análisis y selección de pozos en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue.

Magaly del Carmen Flores Armenta y Miguel Ramírez Montes

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas, Morelia, Mich., México. Correo: miguel.ramirez02@cfe.gob.mx

Resumen

La perforación de pozos bilaterales se ha venido realizando de manera exitosa en campos geotérmicos de Estados Unidos, Filipinas y Japón, entre otros. El objetivo de perforar una “segunda pierna” en un mismo pozo es incrementar su producción, ya que habrán más zonas de producción. En este reporte se presentan los criterios para la selección de pozos del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., candidatos para una “segunda pierna”, considerando el estado mecánico de los mismos, los objetivos geológicos, la distancia entre pozos, sus características de producción y sus condiciones termodinámicas. Para ello se revisaron los casos de los pozos H-3, H-8, H-11, H-16, H-33, H-34 y H-36, que presentan una producción baja. Posteriormente, aplicando los criterios de evaluación y con la información obtenida de cada pozo, se seleccionaron los pozos H-3, H-8 y H-34 como los que presentan mejores condiciones para la perforación bidireccional. Finalmente, se estableció un diseño para la construcción de una “segunda pierna” en el pozo H-8.

Palabras clave: Características de pozos, Los Humeros, perforación de pozos, pozos bilaterales.

Drilling of bilateral wells: analysis and selection of wells in the Los Humeros, Pue., geothermal field

Abstract

Drilling bilateral geothermal wells has been conducted successfully in fields in the U.S., the Philippines and Japan, among other places. The reason for drilling a “second leg” in a well is to increase production by penetrating additional production zones. In this report, criteria are presented for selecting wells in Los Humeros, Pue., geothermal field to be considered for a “second leg”, taking into account the mechanical condition of the wells, geological targets, distances between wells, production characteristics and thermodynamic conditions. The cases of wells H-3, H-8, H-11, H-16, H-33, H-34 and H-36—which have low production—were reviewed. Wells H-3, H-8 and H-34 were selected as the best subjects for bi-directional drilling. A design is proposed for constructing a “second leg” in well H-8.

Keywords: Well characteristics, Los Humeros, well drilling, bilateral (“legged”) wells.

1. Introducción

Un pozo bilateral se puede definir como aquel en el que a partir de un mismo agujero superficial, se tiene acceso con más de una pierna a uno o varios horizontes productivos. Los agujeros de pozos multilaterales planeados (ML) son parte de las prácticas modernas de terminación de pozos, y permiten una producción simultánea desde dos o más zonas sin el costo adicional del agujero superior y de las instalaciones superficiales. El segundo agujero y los subsiguientes se pueden perforar a un 30% del costo original (GeothermEx, 2006). Este método de perforación es aplicable sólo a yacimientos con buena estabilidad mecánica.

Se ha establecido una clasificación basada en el mecanismo de unión entre los agujeros del pozo (el principal y los laterales). La unión determina una clasificación de pozo ML. Un esquema común de clasificación contiene seis variantes, con una complejidad en aumento.

Los primeros pozos multilaterales se perforaron en la ex Unión Soviética en la década de los 50. En Estados Unidos se perforaron solamente siete pozos de este tipo entre 1986 y 1989, pero para 1990 se habían perforado alrededor de 85 pozos, principalmente en la industria petrolera. En la década de los 70 está documentado el primer pozo multilateral de tipo geotérmico, perforado en el campo geotérmico de Raft River, Idaho, pero los datos estadísticos o cuantitativos son insuficientes para determinar si la perforación multilateral produjo una mejora significativa en la productividad del pozo, debido a que el proyecto fue cerrado. Los siguientes casos documentados de pozos geotérmicos multilaterales son a partir de 1990 en Italia (Larderello) y The Geysers, Estados Unidos. En los últimos años ha habido un avance en la perforación de pozos bilaterales en la geotermia, aplicando tecnología usada en la industria del petróleo, lo que ha permitido examinar los métodos, costos y beneficios potenciales de este tipo de perforación (Maurer, 1978; Richard *et al.*, 1989; Macr, 1993; Henneberger *et al.*, 1995).

En la Comisión Federal de Electricidad (CFE), los primeros antecedentes para el diseño de un pozo multilateral datan de 2004, cuando se hacen los primeros estudios en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, con la asesoría de la compañía Baker Hughes, y se designa al Pozo M-73 como un candidato potencial, aunque al final no hubo consenso para ejecutar el trabajo.

Los estudios continuaron y en 2006 se definieron, de acuerdo a la literatura existente, tres condiciones para la selección de yacimientos en los que esta tecnología resultaba aplicable: yacimientos de vapor dominante, yacimientos no sobre-explotados y roca no deleznable. Bajo estas consideraciones se decidió continuar con los estudios para el diseño de un pozo bilateral en el campo geotérmico de Los Humeros, debido a que el yacimiento reúne las tres condiciones mencionadas. A finales del mismo año, la compañía GeothermEx, por encargo de la CFE, realizó un estudio para seleccionar pozos candidatos para la construcción de agujeros adicionales en ese campo.

Antecedentes

El campo geotérmico de Los Humeros se localiza en la parte noreste del estado de Puebla, colindando con el Estado de Veracruz, en la provincia del Eje Neovolcánico y a 20 km, aproximadamente, al noroeste de la ciudad de Perote, Ver. (Fig. 1.)

El campo se encuentra dentro de un complejo de calderas geológicas de edad cuaternaria, en la intersección de la Faja Volcánica Mexicana con la Sierra Madre Oriental. La primera caldera, conocida como Los Humeros, es una estructura volcánica que se originó hace unos 500 mil años, con la expulsión de 180 km³ de la Ignimbrita Xaltipan. Posteriormente, durante su desarrollo se extravasaron domos riolíticos y dacíticos, acompañados de nuevos eventos piroclásticos (Ignimbrita Zaragoza, 0.1 Ma), que dieron lugar a la formación de una segunda caldera, llamada Los Potreros, dentro de la que se ubica la zona productora del campo. La actividad volcánica culminó hace 20 mil años con la efusión de basaltos muy fluidos emitidos en el borde sur de la caldera. Este vulcanismo es la evidencia de una cámara magmática en el subsuelo, que constituye la fuente del calor para el sistema geotérmico.

La caldera está afectada por tres sistemas de fallas de dirección principal N-S, NW-SE y E-W. Los dos primeros (que incluyen a las fallas Malpaís, Antigua, Los Humeros y Maztaloya) son las más importantes, pues permiten el movimiento de fluidos geotérmicos. El sistema E-W incluye a las fallas Las Papas y Las Cruces.

Hasta la fecha la CFE ha perforado 40 pozos geotérmicos cuyas profundidades van de 1388 a 2300 metros, aunque hay dos pozos que rebasan los 3100 metros. De ellos, hay 20 pozos productores integrados actualmente al sistema de suministro de vapor, y cuatro inyectores. Debido a problemas de obturación y corrosión de pozos debido a la producción de fluidos ácidos ocurrida en el pasado, siete pozos fueron desviados y tres más cementados en su tubería profunda para recibir fluidos desde estratos más someros (CFE, 1998; Arellano *et al.*, 2006). Debido a la baja permeabilidad del yacimiento, los pozos producen con una alta entalpía. La producción de vapor promedio de los pozos del campo es de 28 t/h como promedio en los últimos diez años (Gutiérrez-Negrín, 2007).

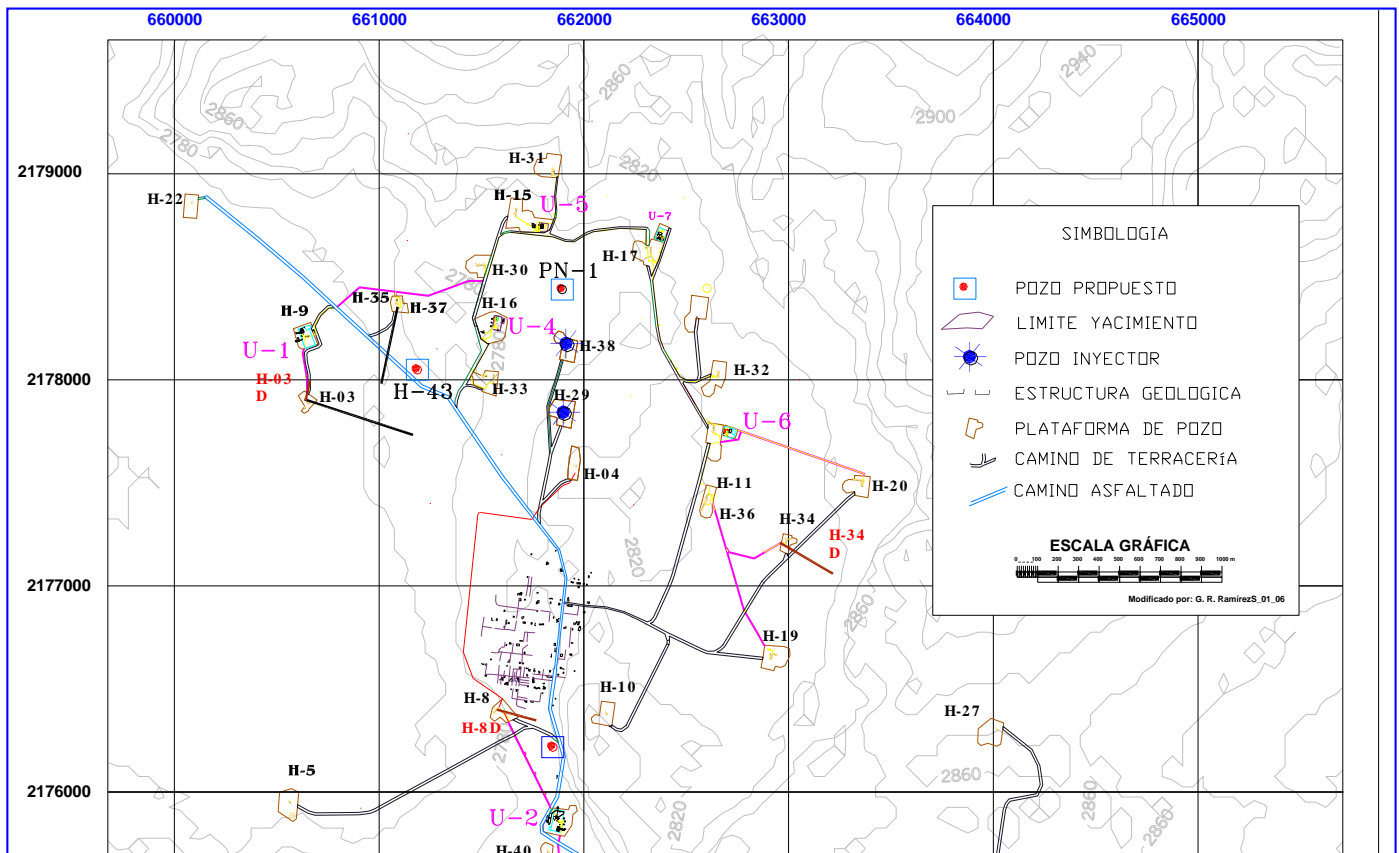


Figura 1.- Localización de pozos en el campo geotérmico Los Humeros, Pue.

La principal razón para considerar la construcción de pozos bilaterales es la oportunidad de incrementar la productividad de un pozo, a un costo menor al de perforar un pozo completo nuevo (Maurer, 1978). La expectativa de aumentar la productividad se debe a que múltiples “piernas” permiten penetrar un intervalo más grande de las zonas productoras en el yacimiento, elevando la posibilidad de interceptar una o más zonas productoras. Además, el área seccional efectiva del agujero aumenta como resultado de la presencia de piernas de producción múltiples, reduciéndose así el riesgo de una producción nula.

El incremento en la productividad del pozo es el factor más importante a considerar en la construcción de un pozo bilateral. En este trabajo, se ha calculado un aumento de productividad asumiendo valores conocidos de temperatura, permeabilidad, capacidad de almacenamiento, índice de productividad del pozo original y relación del índice de productividad. En la Figura 2 se grafica el incremento en la productividad calculado para cierta “altura de desviación”, observándose que el factor de incremento de productividad es mayor mientras más grande sea la distancia entre el punto de desviación del pozo y la zona productora, y mayor sea el ángulo de desviación del pozo (GeothermEx, 2006).

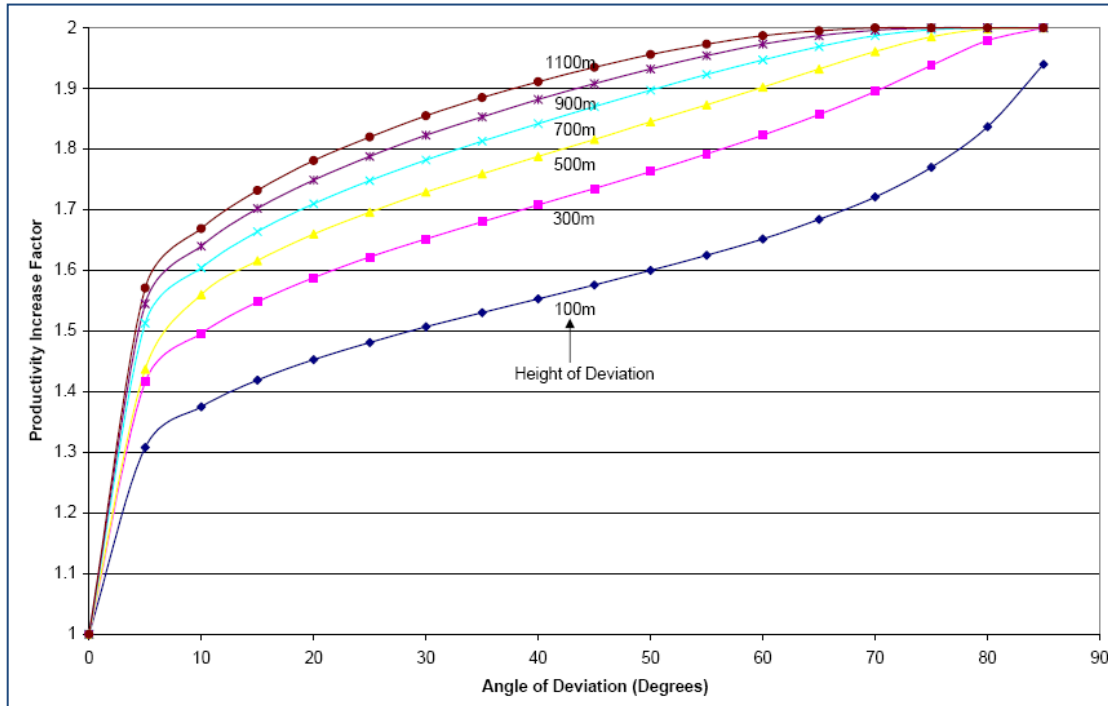


Figura 2. Factor de incremento de productividad en perforación direccional (tomado de GeothermEx, 2006).

Riesgos de la perforación bilateral

La operación durante la construcción de un pozo bilateral lleva ciertos riesgos que pueden incrementar el costo original del pozo u ocasionar la pérdida de productividad del pozo, pero son riesgos similares a los que se presentan durante la construcción de un pozo típico, con un solo agujero. Entre los riesgos más significativos pueden mencionarse los siguientes (GeothermEx, 2006).

- Las operaciones de perforación adicional (para añadir uno o más agujeros de producción) incrementan en general el tiempo de perforación con respecto a un pozo típico, aumentando también los riesgos acumulados de problemas como pegaduras y atrapamiento de la sarta de perforación. Además, la perforación por tiempos prolongados aumenta la posibilidad de desgaste en la tubería de producción causada por la rotación de la tubería de perforación. Para mitigar este efecto puede ser necesario el uso de protectores de tubería de perforación, la instalación de una tubería de producción más gruesa, o el uso de motores de fondo para la perforación.
- El uso y funcionamiento de herramientas especiales, como el empacador recuperable, cuyo empleo es más riesgoso que las herramientas típicas usadas en la perforación tradicional.
- La zona de bifurcación entre los dos agujeros puede ser menos estable que un agujero normal, incrementando el riesgo de problemas como el colapso de tuberías.
- La operación para re-entrar y limpiar el agujero después de perforar una pierna adicional puede ser particularmente difícil, y lleva el riesgo de atrapamiento de la herramienta de perforación en la zona de la bifurcación o la pérdida de una de las piernas perforadas.
- Si se requiere inyección química de un inhibidor de incrustación por debajo del punto de bifurcación, probablemente resulte impráctico inhibir la incrustación en ambas piernas, lo que aumenta el riesgo de pérdida de producción en la pierna que no se vaya a inhibir.

- El uso de equipo para perforación direccional puede ser mayor que cuando se construye un pozo tradicional.
- Si resulta imposible o excesivamente difícil y costoso volver a entrar en una de las piernas, ya sea en el momento de la construcción o después de que el pozo está en operación, puede haber varias consecuencias negativas, como la pérdida de producción (si es necesario limpiar el pozo), costos adicionales para la rehabilitación del pozo, e imposibilidad de correr registros.

Estos riesgos, así como el mayor costo de la operación, deben tomarse en cuenta al evaluar la relación costo-beneficio de los pozos bilaterales. Ante la falta de experiencia en la construcción de pozos de este tipo en México, puede ser difícil hacer una evaluación objetiva de los riesgos y de los costos y beneficios. Pero en general la relación costo-beneficio de un pozo bilateral será mayor en un pozo donde la producción original se haya reducido mucho. Los pozos perforados en medios donde no es necesaria la instalación de *liner* son menos arriesgados y costosos para construir agujeros adicionales, aunque las nuevas herramientas de perforación hacen que este factor no sea tan importante como en el pasado (Richard *et al.*, 1989; Henneberger *et al.*, 1995; GeothermEx, 2006).

Como se indicó antes, la construcción de pozos multilaterales es menos complicada y riesgosa en yacimientos de vapor seco que en los de dos fases o en los de agua caliente.

En pozos cuya zona de producción es profunda, por debajo de la zona seleccionada para la bifurcación, habrá efectos de interferencia mínimos y por consiguiente la producción se incrementará al máximo. En campos geotérmicos donde la distribución de la permeabilidad del yacimiento está bien definida, esta consideración puede utilizarse para optimizar la selección de pozos candidatos y el diseño de construcción de pozos multilaterales.

Selección de pozos candidatos en Los Humeros

Algunos de los pozos actuales de este campo son más adecuados que otros para la perforación multilateral. Para determinar los pozos candidatos para ser evaluados en este estudio, se utilizaron como criterios: (a) las condiciones mecánicas actuales de las tuberías de revestimiento del pozo, que en principio permitan la construcción de una nueva pierna y proporcionen una producción importante a largo plazo, (b) los objetivos estructurales que podrían atravesarse con una nueva “pierna”, (c) una distancia mínima entre las zonas productoras de las “piernas” del pozo que resulte suficiente para minimizar los efectos de interferencia, (d) una producción actual del pozo mínima o nula, para poner en riesgo la menor cantidad posible de vapor durante la perforación bilateral, (e) la factibilidad de la perforación direccional, y (f) otros factores, como la acidez que pudiera presentarse en la zona donde se localiza el pozo, o la necesidad de limpiar frecuentemente el pozo debido a incrustación en sus tuberías.

Con esas bases se decidió realizar un análisis multi-criterio, asignando un valor de 0 a la condición más favorable y un valor de 3 para la menos favorable en cada uno de los criterios analizados. Al final del análisis, el pozo con el valor más bajo sería en principio el seleccionado para hacer un diseño de construcción de un agujero bilateral.

Previamente a la aplicación del análisis multi-criterio, se analizó la información existente de todos los pozos del campo (CFE, 1998; Ramírez y Flores, 2006; CFE, 2007) y se fueron descartando los pozos que no cumplieran con los criterios mencionados, empezando por los pozos que presentan una baja producción. Así,

se escogieron como candidatos a los pozos H-3D, H-8, H-11D, H-16, H-33, H-34 y H-36. En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis multi-criterio en cada uno de esos pozos.

Criterio \ Pozo	H-03D	H-08	H-11D	H-16	H-33	H-34	H-36
Condición mecánica	2	1	Rechazado	2	3	1	2
Objetivos estructurales alcanzables	0	0	-	0	0	1	2
Producción actual	0	1	-	1	1	0	0
Posibilidad de perforación direccional	1	1	-	1	1	1	0
Riesgo de interferencia	1	0	-	1	1	1	1
Otros factores (Acidez)	0	0	-	2	1	0	2
Puntos totales	4	3	Rechazado	7	7	4	7

Tabla 1. Resultados del análisis multi-criterio (0 para la condición más favorable).

A partir de los datos mostrados en la Tabla 1, los pozos más atractivos para el diseño de la construcción de un pozo bilateral son el H-8, el H-3D y el H-34, con valores de 3, 4 y 4 respectivamente, siendo el primero el mejor. Los demás pozos considerados en el análisis presentan condiciones desfavorables en algunos criterios; por ejemplo, el H-11D fue rechazado de entrada debido a que tiene un daño mecánico a 77 m de profundidad, dentro de la tubería de 177.8 mm de diámetro, la cual está instalada desde la superficie y hasta la zona productora.

Características y diseño del pozo bilateral propuesto

Coordenadas	
Origen	Objetivo
X: 661582	661832
Y: 2176392	2176370
Z: 2780 msnm	530 msnm
Tipo de pozo: Desviado. KOP: 950 m de profundidad.	
Rumbo de la desviación: S 85° E	
Desplazamiento horizontal: 250 m.	
Profundidad total desarrollada: 2280 m.	
Profundidad total vertical (máxima): 2250 m.	
Objetivos:	
a) Interceptar a la Falla Los Humeros.	
b) Dirigirse a zona de anomalía termal (280° C) de 1300 msnm (<i>liner</i> ranurado).	
c) Cortar la secuencia calcárea a 2150-2250 m.	
Zona de interés: 1320-2250 m de profundidad.	

Para el campo de Los Humeros, independientemente del tipo de terminación que se elija para perforar el agujero adicional, el procedimiento deberá seguir los pasos similares debido a que la diferencia básica entre la perforación de una o más piernas es la decisión sobre si es necesario preservar el agujero o se taponan, abandona y se reemplaza por una nueva pierna con un rumbo diferente para alcanzar otra zona permeable del yacimiento.

Como se dijo, de los tres pozos que presentan condiciones idóneas para la construcción de un agujero adicional en Los Humeros de acuerdo con el análisis realizado, se seleccionó al pozo H-8 para elaborar un diseño bilateral.

Tabla 2. Características de la propuesta para perforación bilateral del pozo H-8.

Para realizar el diseño del agujero bilateral, se recopiló y analizó la información existente, entre ella: datos de perforación, intervalos permeables, localización y profundidad de la sismicidad, análisis multi-criterios,

concentración de mecanismos focales, rango de profundidad con la mayor densidad de eventos sísmicos, alteración hidrotermal, etc. (CFE, 2007).

El objetivo estructural para la perforación bilateral en el pozo H-8 es una falla de dirección N-S conocida como Falla Los Humeros. Se estimó que el pozo actual está a unos 250 m al poniente de la traza de esa falla, la cual tiene una inclinación de 82°. Con ello, el nuevo agujero la interceptaría a partir de los 1700 m de profundidad. En la Tabla 2 se presentan las características de la propuesta del bilateral del pozo H-8, tentativamente denominado como pozo H-8D, y en la Figura 3 sus objetivos estructurales y diseño general.

Dado que el objetivo elegido para el pozo está relativamente cerca del pozo original (250 metros), el punto de la desviación quedará dentro de la tubería de 244 mm de diámetro.

Generalmente se requieren tres condiciones ideales para el diseño mecánico del pozo:

- Conectividad del agujero principal con cada uno de los ramales o piernas.
- Posibilidad de reingresar a los ramales en forma selectiva.
- Sello hidráulico entre el pozo “padre” y los ramales.

En la medida en que alguna de estas condiciones no sea indispensable, el proyecto decrece en complejidad y costo. Es así que nacen los distintos grados de complejidad para los pozos multilaterales, a los que se divide en cinco tipos (GeothermEx, 2006):

- Pozo principal y laterales abiertos.
- Pozo principal entubado y laterales abiertos.
- Pozo principal entubado y cementado.
- Laterales entubados pero no cementados.
- Pozo principal y laterales entubados con sello hidráulico en las uniones a través de cementación.

Para el diseño mecánico del pozo bilateral, se deben considerar los siguientes eventos (Richard *et al.*, 1989; Macr, 1993; Henneberger *et al.*, 1995; GeothermEx, 2006):

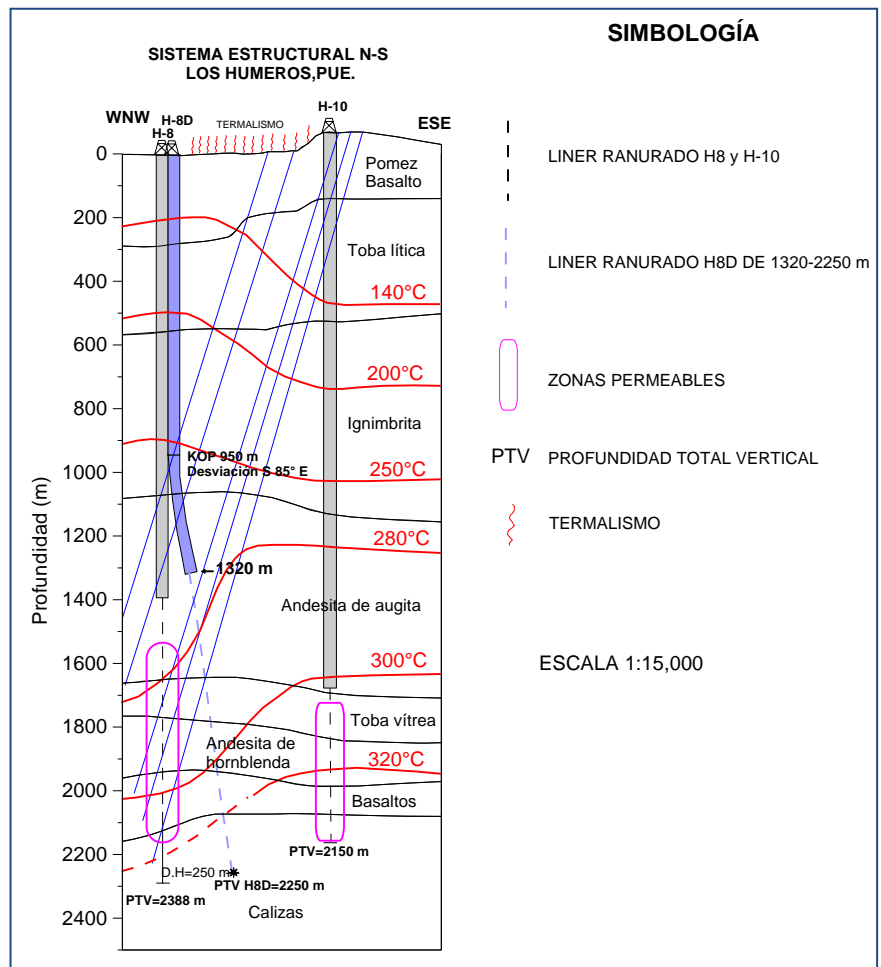


Figura 3. Objetivos estructurales del pozo propuesto H-8D.

- Fijar un empacador temporal perforable en el pozo original para aislar las zonas de producción del pozo.
- Poner un tapón de cemento por encima del empacador perforable.
- Instalar una cuchara desviadora recuperable donde empezará la perforación direccional del pozo.
- Abrir una ventana en el pozo original, utilizando los equipos de molienda.
- Iniciar la perforación direccional hasta alcanzar los objetivos originalmente planteados en la construcción del pozo.

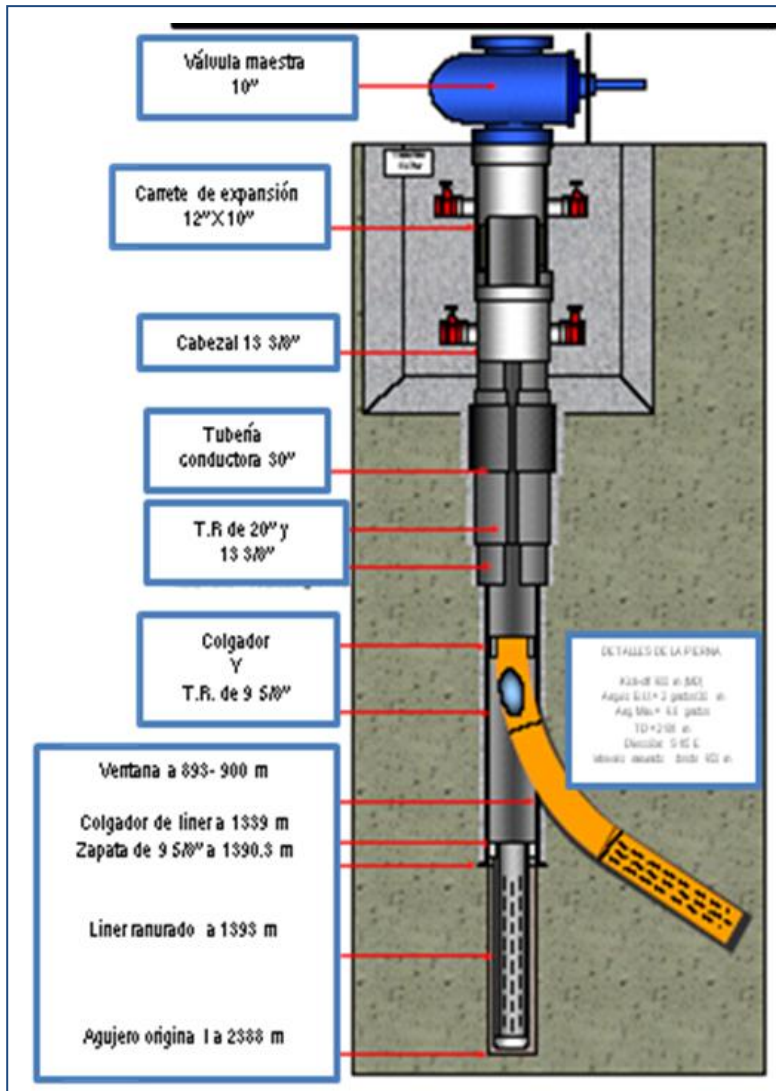


Figura 4. Propuesta de diseño mecánico del pozo bilateral H-8D.

los tres criterios requeridos para hacerlo, que son: yacimientos de vapor dominante, no sobre-explotados y con rocas no deleznales.

Dentro de ese campo, el pozo H-8 presenta las condiciones más favorables para la perforación de un agujero bilateral, de acuerdo al análisis multi-criterio realizado.

- Recuperar la cuchara desviadora.
- Instalar la combinación de *liner* y colgador dentro de la tubería de revestimiento del pozo original considerando que será necesario volver a entrar en agujero original con el fin de limpiar y rehabilitar la producción original del pozo.
- Remover el cemento y el empacador perforable.
- Evaluar la productividad del pozo.

En la Figura 4 se presenta una propuesta de diseño mecánico preliminar para el pozo bilateral H-8D, aunque el diseño final quedaría sujeto a las especificaciones del área responsable de la perforación.

Conclusiones

La perforación de pozos bilaterales aún no es común en los campos geotérmicos, pero se ha realizado en campos como The Geysers en Estados Unidos y Larderello, Italia.

El campo geotérmico de Los Humeros es idóneo para aplicar esta tecnología. De acuerdo a la literatura existente, cumple con

Se definieron los objetivos estructurales para un pozo bilateral a construir en el pozo H-8 y las características de la “pierna” adicional, la cual tendría un rumbo S 85° E, con el objetivo de interceptar a la falla Los Humeros en una anomalía resistiva de interés medio y con presencia de eventos sísmicos. La zona de interés se localiza en el intervalo de 1300 a 2200 m de profundidad.

Referencias

- Arellano, V.M., R.M. Barragán, A. Aragón, K.M. Aguilar y P. García, 2006. Respuesta del yacimiento de Los Humeros a la explotación. Informe del Instituto de Investigaciones Eléctricas No. IIE/11/13121 para la Comisión Federal de Electricidad. Inédito.
- CFE, 1998. Información general de los pozos del Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. CFE, Informe interno s/n. Inédito.
- CFE, 2007. Selección de sitios para la perforación de tres pozos productores e intervención de un pozo en el Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. CFE, informe interno No. DEX-HM-05-2007. Inédito.
- GeothermEx, 2006. Estudio para la determinación de zonas factibles para perforación de pozos bilaterales en el Campo Geotérmico de Los Humeros, Puebla. Informe preparado para la Comisión Federal de Electricidad. Inédito.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 2007. 1997-2006: A decade of geothermal power generation in Mexico. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 31, pp. 167-171.
- Henneberger, R.C., M.C. Gardner, and D. Chase, 1995. Advances in multiple-legged well completion methodology at the Geysers geothermal field, California. *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy, Vol. 2, pp. 1403-1408.
- Marc, W.S., 1993. Designing and drilling multiple leg completions in The Geysers. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 17, pp. 53-59.
- Maurer, W.C., 1978. Advanced turbodrills for geothermal wells. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 2, pp. 411-414.
- Ramírez, M., y M. Flores, 2006. Análisis de los pozos productores de la zona centro y sur del campo Geotérmico Los Humeros, Pue. CFE, informe interno No. DINYAC-017-2006, GPG, Departamento de Ingeniería de Yacimientos. Inédito.
- Richard, E.Y., P.E. Cavote, and D.G. Quinn, 1989. Forked wellbore completions improve development strategy. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 13, pp. 431-437.