

NOTICE CONCERNING COPYRIGHT RESTRICTIONS

This document may contain copyrighted materials. These materials have been made available for use in research, teaching, and private study, but may not be used for any commercial purpose. Users may not otherwise copy, reproduce, retransmit, distribute, publish, commercially exploit or otherwise transfer any material.

The copyright law of the United States (Title 17, United States Code) governs the making of photocopies or other reproductions of copyrighted material.

Under certain conditions specified in the law, libraries and archives are authorized to furnish a photocopy or other reproduction. One of these specific conditions is that the photocopy or reproduction is not to be "used for any purpose other than private study, scholarship, or research." If a user makes a request for, or later uses, a photocopy or reproduction for purposes in excess of "fair use," that user may be liable for copyright infringement.

This institution reserves the right to refuse to accept a copying order if, in its judgment, fulfillment of the order would involve violation of copyright law.

ANALISIS DE PRUEBAS EN POZOS: "INTERPRETACION DE UNA PRUEBA DE INCREMENTO DE PRESION EFECTUADA EN EL POZO A-17 DEL CAMPO GEOTERMICO DE LOS AZUFRES, MICH., MEXICO".

Pedro S. Upton* y Roland N. Horne**

* Comisión Federal de Electricidad

** Stanford University

RESUMEN

Se presenta la interpretación tanto de una prueba de presión como de una prueba de producción, ambas llevadas a cabo en el pozo A-17 del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich., México.

Dos diferentes técnicas se aplican en la interpretación de la prueba transitoria de presión, para determinar los parámetros de la formación, éstas son: técnica convencional y técnica computarizada.

El análisis convencional del transitorio de presión, muestra que la Falla de Puente de Cillas que es la fuente de alimentación del pozo A-17 se comporta como una Fractura Vertical de Conductividad Finita, teniendo a la Falla de Agua Ceniza como una de las dos fronteras impermeables características de este tipo de sistemas. La conductividad adimensional de la fractura ($k_{fv} \cdot w / D$) se encuentra entre los valores de 2π y 5π . La conductividad de la matriz rocosa (kh) y la presión media del yacimiento en la vecindad del pozo se estimaron en 1.2125 E-12 [m³] y 4.35 [MPa], respectivamente.

El análisis computacional usando el modelo de Fractura Vertical de Conductividad Infinita, aún cuando proporciona parámetros del mismo orden de magnitud, presenta problemas de no-unicidad. Este hecho obliga a que únicamente personal especializado se encargue de esta clase de análisis.

Utilizando los datos de la prueba de producción y un simulador de pozos se llega a determinar que los parámetros termodinámicos de estancamiento del fluido en la vecindad del pozo son como sigue: presión de estancamiento (Ps) = 4.66 [MPa]; y temperatura de estancamiento (Ts) = 536.2 [°K].

INTRODUCCION

Este trabajo tiene su origen en el convenio CFE-DOE que considera como parte distintiva entre otras, la interpretación de pruebas transitorias de presión, llevadas a cabo en pozos geotérmicos mexicanos.

Esta tarea conjunta se propuso para validar el empleo de técnicas

computacionales en la interpretación de pruebas transitorias de presión. La validación de este tipo de técnica se basaría en resultados obtenidos a partir del análisis convencional.

De manera específica, el DOE sugirió el uso del programa computarizado denominado WELLTEST para analizar los transitorios de presión. WELLTEST fue desarrollado en la Universidad de Stanford e incluye 4 modelos de flujo, éstos son:

1. Modelo Radial Infinito, para pruebas de corta duración.
2. Modelo Radial Infinito, para pruebas de larga duración.
3. Modelo Radial con Fronteras, para pruebas de corta duración.
4. Modelo de Fractura Vertical de Conductividad Infinita, para pruebas de corta duración.

Debido a insuficiente equipo computacional por parte de CFE, el estudio solamente comprende una prueba de incremento de presión efectuada en el pozo A-17 del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich., México.

ANTECEDENTES DEL POZO A-17

El pozo A-17 se localiza (Fig. 1) en la Zona Sur del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich., México, y fue terminado en febrero de 1980 a una profundidad de 627m. Las pérdidas de circulación durante el proceso de perforación se registraron entre los 613 y 627m, profundidad a la cual se presume la intersección con la Falla de Puente de Cillas. Otra importante estructura geológica próxima a este pozo es la Falla de Agua Ceniza, localizada en superficie a 140m E. Estas estructuras geológicas tienen inclinaciones con respecto a la superficie de 82 y 84°, respectivamente.

La temperatura estabilizada de la formación se estimó en 264 °C, durante la última etapa de la perforación.

Este pozo se terminó con tubería de revestimiento de 0.2245m de diámetro de 0 a 560m, y con liner de 0.1778m de diámetro de 450 a 622m. El liner ranurado va de

561 a 622m de profundidad.

En diciembre de 1980, el pozo producía un gasto máximo de vapor de 22 kg/s. En esa fecha, el vapor producido tenía poca humedad, sin embargo, gradualmente entró a la región de sobrecalentamiento. A la fecha, la entalpia específica media del fluido producido es del orden de los 2800 kJ/kg, a cualquier presión de cabezal.

Considerando sus características de producción, este pozo fue conectado a una unidad turbo-generadora con capacidad nominal de 5 MW, desde el segundo semestre de 1982. Algunos problemas de incrustación se detectaron en la turbina durante el período inicial de operación, sin embargo estos fueron corregidos. Actualmente, la unidad turbo-generadora opera normalmente.

ANTECEDENTES DE LAS PRUEBAS

El 22 de febrero de 1987, el pozo A-17 fue sacado del sistema de generación para darle mantenimiento a la Unidad Turbo-Generadora Número 2, la cual es sustentada por este pozo desde el segundo semestre de 1982.

En marzo del mismo año, dos pruebas fueron llevadas a cabo en este pozo, a saber: una prueba de producción para obtener su curva característica; y una prueba de incremento de presión para determinar los parámetros de la formación.

La curva característica de producción fue definida al instalar placas de orificio de diferentes diámetros entre la válvula lateral del cabezal y la tubería que conduce el fluido hasta un silenciador fijo de dos chimeneas. La información de esta prueba incluyendo gases es dada en la Tabla No. 1.

Un poco antes que la prueba de incremento fuera iniciada, se corrieron registros Kuster simultáneos de presión y temperatura, para conocer los estados termodinámicos del fluido a lo largo del pozo. Esta información se utilizó para determinar el grado de precisión con que funciona el simulador de pozos productores de vapor sobrecalentado desarrollado por S. Upton (1985). Profundidades, presiones y temperaturas registradas son reportadas en la Tabla No. 2.

La prueba de incremento de presión se llevó a cabo después de que el pozo se encontrara produciendo un gasto de 9.81 kg/s durante un período de 144 h. Esta condición fue lograda utilizando una placa de orificio con diámetro de 0.0508m. El tiempo de recuperación empleado fue de 23 h y el elemento Kuster de presión se localizó a 610m de profundidad. Toda la información de esta prueba se muestra en

la Tabla No. 3.

CRITERIOS USADOS EN LA INTERPRETACION

Diferentes disciplinas utilizadas en geotermia fueron empleadas en la interpretación total de las pruebas en esta parte del trabajo; solamente se presentan dos criterios; éstos son: uno desde el punto de vista de Ingeniería de Yacimientos; y el otro, desde el punto de vista de la Ingeniería de Producción.

Ingeniería de Yacimientos. Dos diferentes técnicas de análisis fueron aplicadas para determinar los parámetros del yacimiento, tales como presión media y conductividad de la formación, entre otras. Estas técnicas son: técnica convencional y técnica computacional.

El análisis convencional cubre dos principales tópicos, es decir: determinación de la geometría de flujo así como la determinación de parámetros de la formación (estos últimos solamente se obtienen en casos especiales); y el uso de curvas tipo.

En esta prueba transitoria de presión diferentes gráficos especializados se desarrollaron para las siguientes geometrías de flujo: radial, lineal, esférica, y bilineal. Lo anterior se realizó con el objeto de definir correctamente la geometría de flujo encontrada durante el período de recuperación de la prueba. Los gráficos especializados en cuestión son los siguientes:

$$P^2w_s \text{ vs } \left\{ \begin{array}{l} [\delta t / (t_p + \delta t)]; \\ [(\delta t)^{-1/2} - (t_p + \delta t)^{-1/2}]; \\ [(t_p + \delta t)^{1/2} - (\delta t)^{1/2}]; \\ [(t_p + \delta t)^{1/4} - (\delta t)^{1/4}] \end{array} \right\}$$

$$d(P^2w_s) / d(\delta t) \text{ vs } \left\{ \begin{array}{l} [t_p / (\delta t (t_p + \delta t))]; \\ [(\delta t)^{-3/2} - (t_p + \delta t)^{-3/2}]; \\ [(\delta t)^{-1/2} - (t_p + \delta t)^{-1/2}]; \\ [(\delta t)^{-3/4} - (t_p + \delta t)^{-3/4}] \end{array} \right\}$$

$$\log[d(\delta P^2w_s) / d(\delta t)] \text{ vs } \log \left\{ \begin{array}{l} [t_p / (\delta t (t_p + \delta t))]; \\ [(\delta t)^{-3/2} - (t_p + \delta t)^{-3/2}]; \\ [(\delta t)^{-1/2} - (t_p + \delta t)^{-1/2}]; \\ [(\delta t)^{-3/4} - (t_p + \delta t)^{-3/4}] \end{array} \right\}$$

$$\log[d(\delta P^2w_s) / d(\ln(\delta t))] \text{ vs } \log \left\{ \begin{array}{l} [t_p / (t_p + \delta t)]; \\ [(\delta t)^{-1/2} - \delta t (t_p + \delta t)^{-3/2}]; \\ [(\delta t)^{1/2} - \delta t (t_p + \delta t)^{-1/2}]; \\ [(\delta t)^{1/4} - \delta t (t_p + \delta t)^{-3/4}] \end{array} \right\}$$

Durante el estudio de interpretación, suficientes curvas tipo fueron usadas, algunas de ellas son:

Fractura Vertical de Conductividad Infinita

Fractura Vertical con Flujo Uniforme

Fractura Vertical en un Yacimiento Rectangular Cerrado

Fractura Vertical de Conductividad Finita

La técnica computacional empleada en este trabajo contempló el uso del programa WELLTEST desarrollado en la Universidad de Stanford. Este programa incluye 4 diferentes modelos de flujo, éstos son:

1. Modelo Radial Infinito, para pruebas de corta duración.
2. Modelo Radial con Fronteras, para pruebas de corta duración.
3. Modelo Radial Infinito, para pruebas de larga duración.
4. Modelo de Fractura Vertical de Conductividad Infinita, para pruebas de corta duración.

Ingeniería de Producción. El principio de parámetros de estancamiento a condiciones de yacimiento fue aplicado para determinar los valores medios tanto de presión como de temperatura en la vecindad del pozo. Estos parámetros fueron obtenidos haciendo uso tanto del simulador de pozos productores de vapor sobrecalentado desarrollado por S. Upton (1985) como de la información resultante de la prueba de producción. La profundidad de referencia empleada en el análisis fue de 620m. Aunque en la prueba transitoria de presión el elemento Kuster se localizó a 610m de profundidad, no hubo necesidad de hacer alguna corrección, ya que los parámetros termodinámicos del fluido a ambas profundidades son prácticamente los mismos.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos pueden ordenarse como sigue:

Ingeniería de Yacimientos. Técnica Convencional

Geometría de Flujo. Tomando en cuenta lo reportado por Cinco-Ley (1984), es posible distinguir en los gráficos especializados al menos tres diferentes tipos de flujo, a saber: un flujo bilineal en la parte inicial de la prueba; un flujo en transición (intermedio); y finalmente un flujo pseudolíneoal que comprende hasta la culminación de la prueba.

Curvas Tipo. Buen ajuste (Fig.2) de los datos se encontró al utilizar la curva tipo desarrollada por Wong (1984), que considera una Fractura Vertical con Conductividad Finita. Los parámetros de formación calculados al usar los resultados obtenidos en el análisis de estancamiento, son los siguientes:

$$kh = 1.2125 \text{ E-12 } [m^3]$$
$$k_{fp} \cdot w_{fp} = (k_f \cdot w) / (k \cdot x_f) = 2\pi \text{ a } 5\pi$$

Ingeniería de Yacimientos. Técnica Computacional

El mejor ajuste de los datos del transitorio de presión obtenido al utilizar el programa WELLTEST se encontró empleándose el modelo de Fractura Vertical de Conductividad Infinita. Los valores de los parámetros obtenidos son:

$$kh = 1.3165 \text{ E-12 } [m^3]$$
$$x_f (619 \text{ m}) = 84.95 [m]$$
$$P_i = 4.43 [MPa]$$

Ingeniería de Producción. Parámetros de estancamiento

Utilizando el principio de estancamiento a condiciones de yacimiento, se calcularon los siguientes parámetros:

$$P_s = 4.66 [MPa]$$
$$T_s = 536.2 [^{\circ}K]$$
$$v_s = 4.3189 \text{ E-02 } [m^3/kg]$$
$$u_s = 1.8069 \text{ E-05 } [Pa \cdot s]$$
$$C_s = 0.2495 [MPa^{-1}]$$

CONCLUSIONES

1. La temperatura estabilizada reportada durante el último periodo de perforación del pozo A-17 fue de 537.15 [°K], mientras que en el análisis de parámetros de estancamiento realizado en este trabajo se calcula una temperatura de 536.15 [°K], por lo tanto las temperaturas son bastante similares. Por otro lado, la presión media del yacimiento es del orden de los 4.7 [MPa], como se obtuvo del mismo análisis de estancamiento.

2. De acuerdo a los estudios Geológico-Estructurales realizados en esta parte del campo, se determinó que la Falla de Puentecillas y la Falla de Agua Ceniza tienen inclinaciones con respecto a la superficie de 82° y 84°, respectivamente. Las distancias en superficie del pozo A-17 a estas fallas son de 66 y 140 m, respectivamente, por lo tanto, la distancia del pozo a la Falla de Agua Ceniza a una profundidad de 620m es de 53m. Este hecho muestra la posibilidad de que la Falla de

Puentecillas actúe como una Fractura Vertical de Conductividad Finita con una longitud media de fractura del mismo orden que la arriba calculada. de esta manera, la Falla de Agua Ceniza se comporta como una de las dos fronteras impermeables características de estos tipos de sistemas. Asumiendo válida la tesis anterior y considerando una porosidad de la matriz rocosa del 5%, la permeabilidad del medio es de $9.6 \text{ E-}16 \text{ [m}^2\text{]}$; el espesor del yacimiento es de 1265m ; y la conductividad de la fractura esta entre $3.2 \text{ E-}13$ y $8.0 \text{ E-}13 \text{ [m}^3\text{]}$.

3. Los resultados obtenidos al emplear el modelo de Fractura Vertical de Conductividad Infinita incluido en el programa WELLTEST, proporciona parámetros básicos similares que aquellos encontrados en el modelo de Conductividad Finita, sin embargo, si los datos del transitorio de presión son superpuestos en la curva tipo del modelo de Conductividad Infinita, se puede observar que la forma de las dos curvas son bastante diferentes (las concavidades son opuestas), y no es posible encontrar un buen ajuste a lo largo de la curva tipo. Esto implica que la elección del modelo no fue la correcta y que se debe tener suficiente precaución para no cometer un error como el que implícitamente se expone.

4. Se considera conveniente para futuras pruebas transitorias de presión en este pozo, el empleo de tiempos más grandes (al menos 30% del actual) en el periodo de recuperación, de tal suerte que se puedan definir de mejor manera los parámetros de la formación.

5. Se recomienda como parte final de este reporte la utilización de la información disponible de las diferentes áreas comprendidas en geotermia para la interpretación de este tipo de pruebas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades proporcionadas por las autoridades de la Comisión Federal de Electricidad de México, y del Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica, para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Gringarten, A.C., Ramey, H.J., Jr., and Raghavan, R. : " Unsteady-State Pressure Distribution Created by a Well with a Single Infinite-Conductivity Vertical Fracture ", Paper SPE 4051, presented at SPE-AIME 47 th Annual Fall Meeting, San Antonio, Tex., Oct. 8-11, 1972.

Cinco-L., H., and Samaniego-V., F. : " Application of the Pseudolinear Flow Model to the Pressure Transient Analysis of Fractured Wells ", Paper SPE 13059, presented at the 59 th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, September 16-19, 1984.

Rodriguez, F., Horne, R.N., and Cinco-L., H. : " Pressure Transient Behaviour of a Finite-Conductivity Fracture ", Paper SPE 13057, presented at the 59 th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, September 16-19, 1984.

S.-Upton, P. : " A Superheated Steam Producing Well Simulator ", Non Edited, 1985.

Wong, D.W., Mothersele, C.D., Harrington, A.G., and Cinco-L., H. : " Pressure Transient Analysis of Finite Linear Reservoirs Using Derivative and Conventional Technics : Field Examples ", Paper SPE 15421, presented at the 61 th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, October 5-8, 1986.

Wong, D.W., Harrington, A.G., and Cinco-L., H. : " Application of the Pressure Derivative Function in the Pressure Transient Testing of Fractured Wells ", Paper SPE 13056, presented at the 59 th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Houston, September 16-19, 1984.

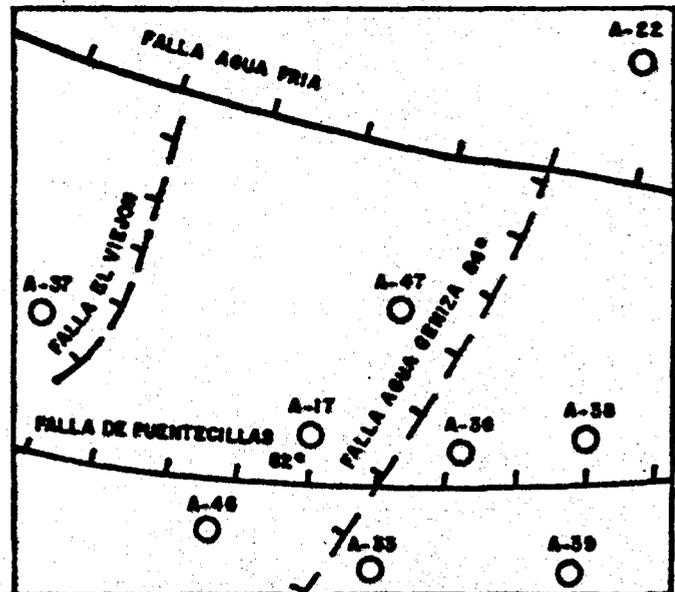


FIG. 1 LOCALIZACION DEL POZO A-17

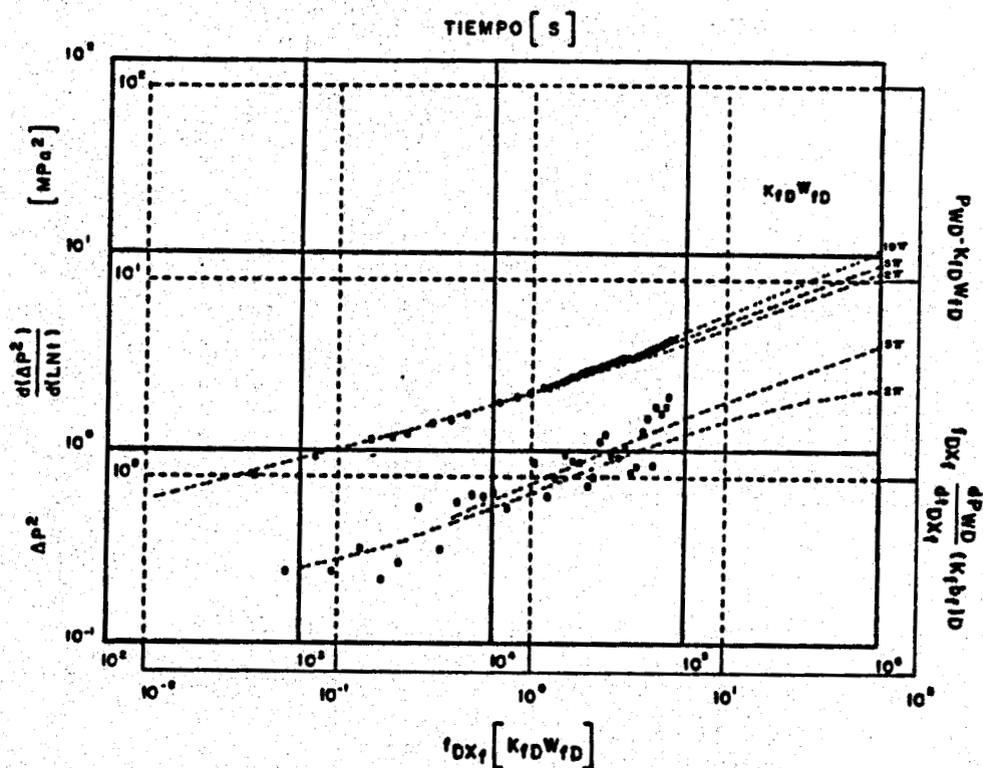


FIG. 2 SUPERPOSICION DE LOS DATOS DE LA PRUEBA SOBRE LA CURVA TIPO

TABLA 1. DATOS DE LA PRUEBA DE PRODUCCION

FECHA [D-M-A]	P _{cab} [MPa]	ORIFIC. [m]	VAPOR [kg/s]	GAS [kg/s]	ENTALPIA [kJ/kg]
03-03-87	0.57	0.2032	20.39	0.87	2767.40
05-03-87	0.67	0.1651	19.44	0.65	2778.50
07-03-87	0.97	0.1397	19.14	0.66	2793.70
09-03-87	1.33	0.1143	18.19	0.68	2809.70
11-03-87	1.86	0.0889	16.33	0.70	2818.93
17-03-87	3.18	0.0508	9.81	0.46	2828.16

TABLA 2. REGISTROS DE PRESION Y TEMPERATURA
POZO FLUYENDO POR ORIFICIO DE 0.0508m

PROF. [m]	PRESION MEDIDA [MPa]	PRESION CALCULADA [MPa]	TEMPERATURA MEDIDA [°C]	TEMPERATURA CALCULADA [°C]
0	3.183	3.183	244.32	243.84
100	3.220	3.211	244.86	244.70
200	3.246	3.239	245.50	245.55
300	3.274	3.267	245.86	246.40
400	3.304	3.295	246.23	247.25
500	3.362	3.356	247.14	248.65
525	3.386	3.378	247.50	249.13
550	3.406	3.400	247.78	249.59
575	3.449	3.423	248.24	250.06
600	3.453	3.445	248.43	250.52
619	3.460	3.462	248.62	250.89

TABLA 3. DATOS DEL TRANSITORIO DE PRESION

=====
 $t_p = 144$ [h]
 $m = 9.81$ [kg/s]
 LOCALIZACION DEL ELEMENTO KUSTER = 610 [m]
 DIAMETRO DEL AGUJERO A 620 m DE PROFUNDIDAD = 0.2159 [m]

TIEMPO [s]	PRESION [MPa]	TIEMPO [s]	PRESION [MPa]
0	3.389	27600	3.733
600	3.500	30000	3.743
1200	3.524	32400	3.750
1800	3.538	34800	3.756
2400	3.550	37200	3.766
3000	3.557	39600	3.776
3600	3.564	43200	3.787
4800	3.585	46800	3.797
6000	3.595	50400	3.806
7200	3.608	54000	3.813
8400	3.621	57600	3.820
9600	3.632	61200	3.830
10800	3.642	64800	3.841
13200	3.655	68400	3.847
15600	3.672	72000	3.857
18000	3.689	75600	3.867
20400	3.699	79200	3.877
22800	3.709	82800	3.888
25200	3.722		

=====