

Estimación de curvas características de producción de pozos geotérmicos empleando dos curvas de referencia adimensionales del comportamiento de influjo

Sara L. Moya
Alfonso Aragón
Leoncio González

Instituto de Investigaciones Eléctricas

En trabajos previos se obtuvieron numéricamente curvas de comportamiento de influjo para productividad másica, IPR (Inflow Performance Relationships) y para productividad térmica, GIPR (Geothermal Inflow Performance Relationships) de pozos geotérmicos. Las curvas IPR y GIPR relacionan el flujo másico producido en los pozos geotérmicos, con la presión y entalpía fluyentes en la intercara pozo-yacimiento, respectivamente. Las curvas obtenidas cubren un amplio rango de propiedades del medio roca-fluido de los yacimientos geotérmicos y diferentes etapas de explotación del mismo. Se consideraron yacimientos hipotéticos de agua pura así como también yacimientos con bióxido de carbono. Adicionalmente, fueron propuestas dos curvas de referencia adimensionales para estimar las productividades de masa (IPR) y de energía (GIPR*) de pozos geotérmicos. En este trabajo se efectúa un análisis preliminar de la aplicabilidad de las dos curvas de referencia propuestas, en la estimación de curvas características de producción de pozos geotérmicos (relación presión-flujo másico a boca de pozo), partiendo tan sólo de un par de datos de presión y flujo másico medidos a boca de pozo. Las curvas características estimadas por este procedimiento son comparadas con curvas obtenidas (medidas) directamente en campo. Finalmente, por superposición de la IPR estimada para un pozo dado, con curvas IPR teóricas, es posible determinar la permeabilidad de la roca geotérmica en las inmediaciones del pozo productor.*

Palabras clave: curvas características, producción, pozos geotérmicos, relaciones de influjo, masa y energía, Los Azufres, presión estática.

Introducción

La perforación de un pozo (petrolero, geotérmico o hidráulico) tiene por objeto la explotación del yacimiento respectivo, a través de la puesta en producción del pozo. Esta explotación, bajo un criterio razonado, conduce a la optimización de los recursos que se explotan.

Es una práctica común caracterizar el comportamiento productivo de un pozo geotérmico, por medio de las denominadas curvas características de producción (o curvas de salida), que relacionan la presión y el flujo másico del fluido producido, en cierta etapa de la vida productiva del pozo. Las curvas características reflejan el grado de declinación del pozo y, cuando

son comparadas con curvas características previas del mismo y de otros pozos, reflejan el grado de declinación del yacimiento en general.

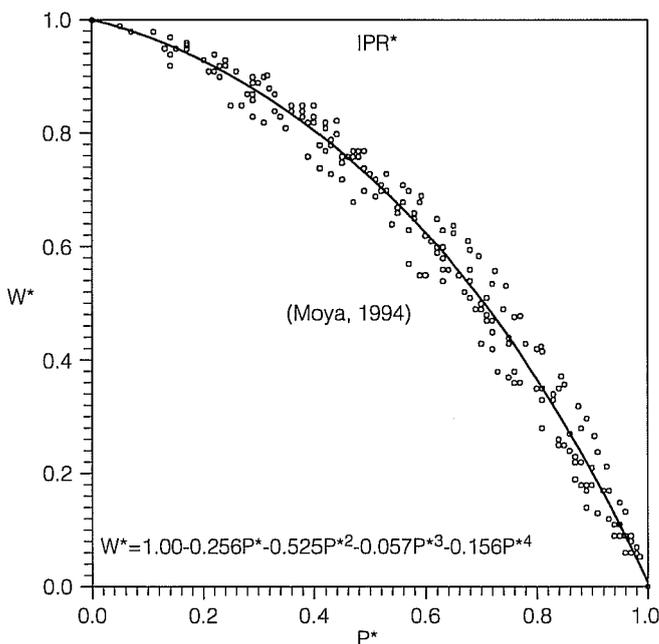
Con el inicio de la explotación de los hidrocarburos en la industria petrolera, surgió la necesidad de caracterizar el comportamiento productivo de tales pozos, en relación a las características (propiedades) del medio roca-fluido del yacimiento. Vogel (1968) obtuvo numéricamente relaciones de comportamiento de influjo (IPR, por sus siglas en inglés) las cuales son curvas características a condiciones de fondo de pozo, es decir, relacionan presión y flujo másico en la intercara pozo-yacimiento, proporcionando información relevante acerca de las propiedades de la roca y del fluido en

la intercara. Desde el trabajo de Vogel (1968), las IPR han mostrado ser de gran utilidad práctica en la industria petrolera.

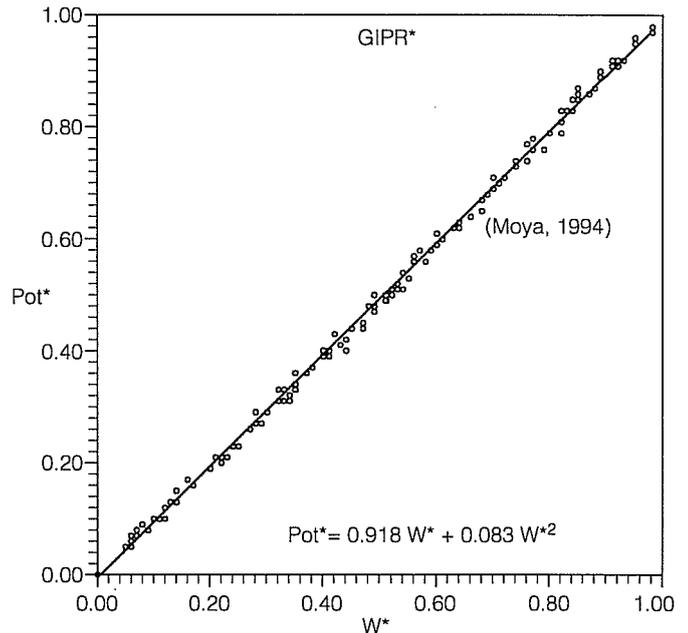
Con la finalidad de realizar una analogía en la industria geotérmica, se obtuvieron (Iglesias y Moya, 1990; Moya, 1994; Moya *et al.*, 1995) un gran número de curvas IPR aplicables a yacimientos geotérmicos. A diferencia de la industria petrolera, el principal recurso geotérmico es el calor. La potencia térmica es la velocidad a la que puede extraerse energía en forma de calor y es el producto de la entalpia específica y del flujo másico de la descarga. Las GIPR relacionan la potencia térmica del fluido en la intercara pozo-yacimiento con el flujo másico producido, y son, por lo tanto, inherentes a los yacimientos geotérmicos. Las curvas IPR Y GIPR obtenidas en trabajos previos (Moya, 1994; Moya *et al.*, 1995) contemplan amplios rangos de propiedades del sistema roca-fluido de los yacimientos geotérmicos, de condiciones iniciales y diferentes etapas de explotación del yacimiento.

Las curvas adimensionales respectivas delinearon prácticamente una sola curva (una para cada tipo) lo que permitió proponer dos curvas de referencia adimensionales, una para estimar productividad másica (IPR*), ilustración 1, y otra para estimar productividad térmica (GIPR*), ilustración 2. Las dos curvas de referencia propuestas son en principio aplicables a cualquier yacimiento geotérmico, independientemente de

1. Curva de referencia adimensional para determinar productividad másica de pozos geotérmicos



2. Curva de referencia adimensional para determinar productividad térmica de yacimientos geotérmicos



sus propiedades termofísicas y grado de explotación del mismo. Se espera que estas dos curvas lleguen a ser de gran utilidad práctica para dos problemas fundamentales en la ingeniería de yacimientos geotérmicos:

- La estimación de curvas características completas partiendo de un sólo punto medido a boca de pozo
- La caracterización de yacimientos geotérmicos (permeabilidad, porosidad, etc.) en la región adyacente al pozo.

Su aplicación, como una herramienta más de análisis de pozos, implicaría sustanciales ahorros en tiempo y costo para la industria geotérmica.

Metodología

Las curvas de referencia IPR* y GIPR* mostradas en las ilustraciones 1 y 2, permiten estimar la productividad másica de los pozos geotérmicos (W, t/h), así como la potencia térmica producida [Pot = W(h), MW] siendo h la entalpia específica en la intercara pozo-yacimiento. Para estas estimaciones, es suficiente conocer únicamente un par de datos presión-flujo (P,W) a condiciones de fondo de pozo (P,W)_{WF} y la presión estática del yacimiento P_{EST} a esa misma profundidad. Si no fuera disponible un punto (P,W) a fondo de pozo, entonces es posible partir de un punto (P,W) medido a

boca de pozo $(P, W)_M$ y, con un simulador de pozos, obtener $(P, W)_{WF}$. La presión adimensional correspondiente $P^* = P_{WF}/P_{EST}$ determina el valor de W^* mediante la curva de referencia IPR* y a su vez W^* determina el valor de Pot^* mediante la curva de referencia GIPR*.

El flujo máximo posible (W_{MAX} , $P \approx 0$) para un pozo dado, es el parámetro de escalamiento de todos los valores de flujo másico implicados en las curvas de referencia. Por tanto, una vez definidos P^* , W^* , Pot^* , y W_{MAX} , es posible construir, mediante las correlaciones propuestas (ilustraciones 1 y 2), la totalidad de las curvas IPR y GIPR (dimensionales), para el pozo en cuestión. La curva IPR así obtenida se toma como punto de partida para calcular, con un simulador de pozos, la curva característica a boca de pozo (curva de salida), la cual finalmente se compara con la curva obtenida con datos de campo. La metodología general se muestra en la ilustración 3. El simulador de pozos empleado en este trabajo fue el VSTEAM (INTERCOMP, 1981) a causa de su versatilidad para simular en dirección del flujo y a contraflujo.

La estimación de curvas características completas partiendo de un sólo punto (P, W) es recomendable, dado que esto reduciría el número de pruebas de descarga *in-situ*, que de otra manera tendrían que realizarse, con la consecuente inversión de recursos financieros, materiales y humanos. Sin embargo, la aproximación de la metodología (ilustración 3) depende de tres factores:

- La aproximación del simulador de pozos.
- La validez del modelo conceptual del pozo y la aproximación de los datos medidos en campo.
- La aplicabilidad de la IPR (o alguna otra relación de declinación convencional, e.g. Kjaran y Eliasson, 1983) para estimar la presión en la intercara pozo-yacimiento.

Goyal *et al.* (1980), Hadgu (1989) y Gunn *et al.* (1991), entre otros, han discutido con amplitud los dos primeros factores y, aún cuando son importantes, no son motivo de análisis en este estudio. Con referencia al tercer factor, Gunn y Freeston (1991) evaluaron una IPR previa (Iglesias y Moya, 1990) obtenida para un caso hipotético de agua pura. Ellos encontraron errores de hasta un 30% en la estimación de las presiones en la intercara pozo-yacimiento para un pozo del campo geotérmico de Broadlands, Nueva Zelanda. Es importante aclarar que el campo de Broadlands contiene cantidades significativas de bióxido de carbono.

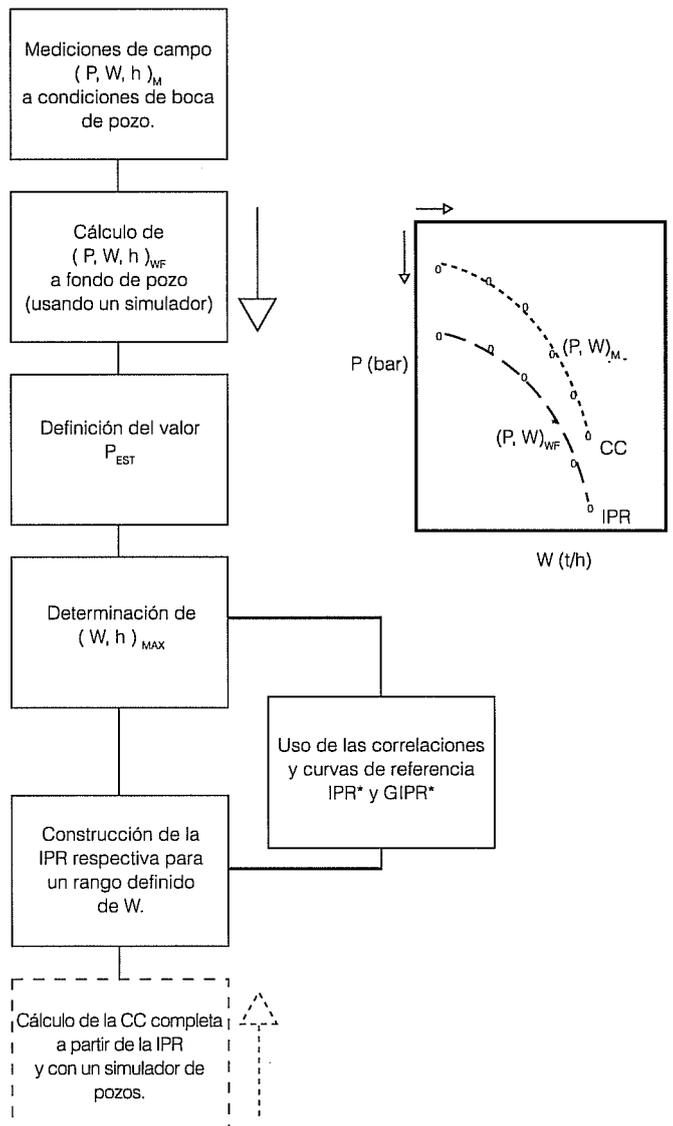
Las curvas de referencia IPR* y GIPR* que se discuten en este trabajo involucran el efecto del bióxido de carbono que se encuentra presente de manera im-

portante en la mayoría de los campos geotérmicos. Para su obtención se empleó un simulador geotérmico que involucra un modelo de solubilidad del CO_2 en agua (Moya e Iglesias, 1992) válido hasta $350^\circ C$ y 500 bar.

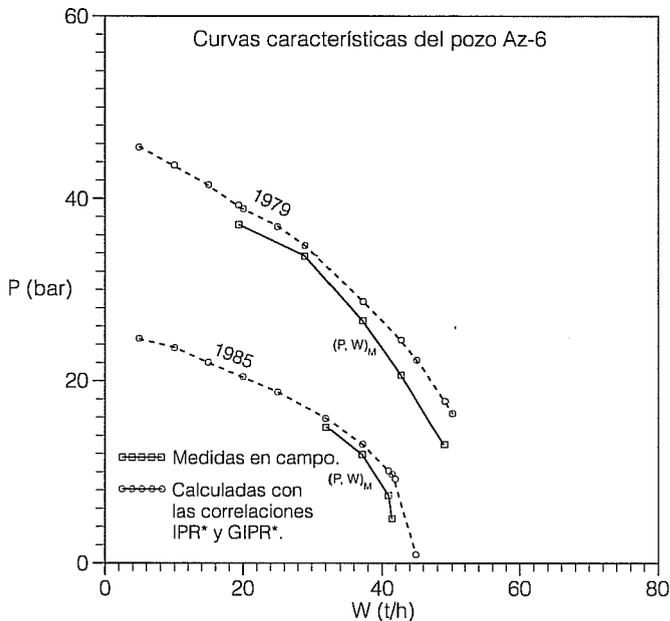
Resultados y discusión

La ilustración 4 muestra las curvas características obtenidas al aplicar la metodología descrita (ilustración 3) al pozo Az-6 del campo geotérmico Los Azufres, Mi-

3. Metodología para la estimación de la curva característica (CC) completa para un pozo dado a partir de una sola medición de campo $(P, W, h)_M$ y mediante el empleo de las curvas de referencia IPR* y GIPR*



4. Comparación de las curvas características medidas en campo, con las obtenidas mediante el empleo de las curvas de referencia, IPR* y GIPR* a partir de un sólo punto $(P,W)_M$ de la curva característica medida en campo



choacán. Estas curvas son comparadas con las curvas obtenidas a partir de mediciones realizadas directamente en el campo (Superintendencia de Estudios de Los Azufres), para dos desarrollos (pruebas de descarga) del pozo Az-6 en 1979 y 1985.

Para la estimación de la curva característica correspondiente a 1979, se consideró un valor P_{EST} de 50 bar y un valor inicial $(P,W)_M$ de (26.7,37.2) como se indica en la ilustración 4. Para la correspondiente a 1985 se consideró un valor P_{EST} de 24 bar y un valor $(P,W)_M$ de (12,37.2). De acuerdo a los resultados obtenidos (ilustración 4), la comparación en general es buena no obstante la discrepancia observada en la región de altas caídas de presión (flujos másicos elevados), región difícil de analizar tanto teórica como prácticamente. La desviación máxima encontrada resultó ser de aproximadamente un 12% en casi la totalidad de la curva característica correspondiente a 1979 que es la más completa.

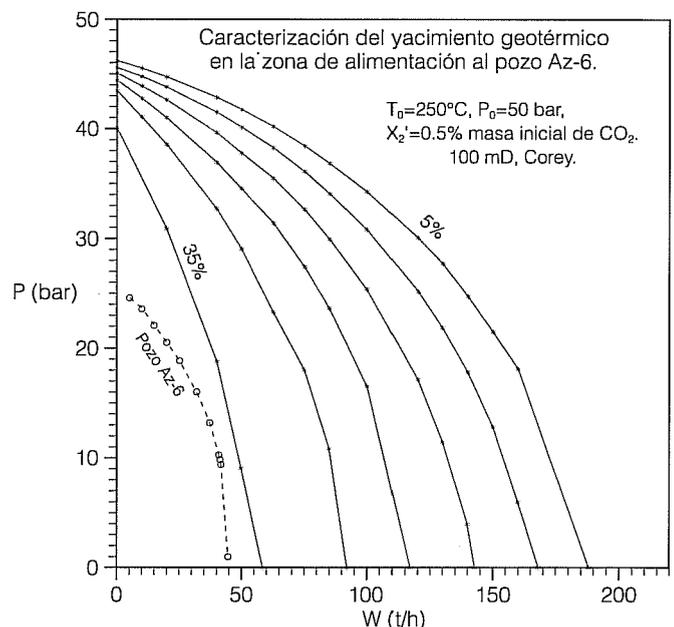
Una curva IPR (dimensional) obtenida para un pozo dado, puede además proporcionar información complementaria acerca de las propiedades termofísicas del medio roca-fluido que circunda al pozo, a la profundidad de su estrato de alimentación. Cada IPR muestra un comportamiento particular que depende precisamente de esas propiedades. En un trabajo previo (Moya, 1994) se obtuvieron curvas tipo para dife-

rentes propiedades de un yacimiento geotérmico, comprendiendo permeabilidades absolutas de 10 y 100 mD, permeabilidades relativas del tipo Corey y del tipo Lineal, condiciones iniciales de temperatura y presión de 250 y 350°C y de 50 y 170 bar (7 y 4 bar de presión de CO_2), respectivamente. El contenido de masa inicial de CO_2 considerado fue de 0.5%. Cada caso de curvas tipo abarca 6 curvas IPR, para 5, 10, 15, 20, 25 y 35% de masa producida acumulada.

Superponiendo la curva IPR obtenida para el pozo Az-6 (1985) a cada caso de las curvas IPR tipo, se encontró que se acopla mejor al caso mostrado en la ilustración 5. Este caso corresponde a un yacimiento con una temperatura inicial de 250°C (50 bar), con 100 mD de permeabilidad absoluta y con permeabilidad relativa del tipo Corey. Como se observa en la ilustración 5, la IPR obtenida para el pozo Az-6 (línea discontinua) queda ubicada abajo de la IPR tipo correspondiente a un 35% de masa producida acumulada.

Esto es indicativo de que la IPR obtenida se podría ajustar mejor a un caso de permeabilidad absoluta menor de 100 mD. Para definir mejor el valor de esta permeabilidad es necesario analizar los flujos máximos correspondientes. El rango de flujos másicos para el caso de 100 mD queda comprendido entre 50 y 200 t/h como se puede observar en la ilustración 5, en tan-

5. Caracterización del medio roca-fluido del yacimiento geotérmico, mediante superposición de la IPR obtenida para el pozo Az-6, con las obtenidas teóricamente (Moya, 1994) considerando un yacimiento geotérmico con las características indicadas



to que para el caso de 10 mD queda comprendido entre 5 y 20 t/h (Moya, 1994; Moya *et al.*, 1995).

En la ilustración 4 se aprecia que el flujo máximo del pozo Az-6 para el desarrollo de 1985 fue de aproximadamente 42-46 t/h, mientras que para el desarrollo de 1979 fue de 50-54 t/h. Como consecuencia, cabe esperar que la permeabilidad de la roca circundante al pozo Az-6 tenga un valor aproximado de entre 30 y 50 mD, considerando el grado de explotación del pozo. Durante 1989, Suárez *et al.* (1989) aplicaron un valor de 50 mD y permeabilidad relativa del tipo Corey para su estudio del sector Tejamaniles del campo geotérmico Los Azufres, justo donde se encuentra el pozo Az-6. Suárez se basó en el compendio de mediciones petrofísicas de Contreras *et al.* (1988).

Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los resultados presentados, la utilidad de las curvas de referencia (IPR* y GIPR*, ilustraciones 1 y 2) para estimar productividades de masa y energía de pozos geotérmicos, es evidente. Asimismo es evidente la aplicabilidad de las curvas dimensionales IPR para caracterizar el medio roca-fluido que se encuentra en las inmediaciones de los pozos geotérmicos.

La metodología presentada (ilustración 3) mostró ser de gran utilidad práctica y podría consolidarse como una herramienta más de análisis de pozos y de yacimientos geotérmicos. Es necesario mencionar sin embargo que los resultados teóricos obtenidos y el valor de W_{MAX} son muy sensibles al valor considerado de P_{EST} , por lo cual este valor debe establecerse con cuidado. W_{MAX} también es muy sensible al punto inicial $(P,W)_M$.

Este estudio fue una evaluación preliminar que muestra la gran potencialidad de la metodología aplicada. Sin embargo, es necesario analizar otros pozos geotérmicos con el objeto de definir mejor la exactitud del método. También resulta necesario ampliar el rango de aplicación de las curvas de referencia (IPR* y GIPR*) al caso de pozos alimentados con fase líquida. Más conveniente aún sería disponer de un simulador acoplado pozo-yacimiento, donde el fluido fuera considerado por lo menos como un sistema ternario H_2O-CO_2-NaCl y en donde los mapas y correlaciones empleadas para la modelación del flujo en el pozo fueran adecuadas a este sistema ternario.

Nomenclatura:

GIPR	"Geothermal Inflow Performance Relationship"
h	Entalpia específica
IPR	"Inflow Performance Relationship"
P	Presión

Pot	Potencia térmica (= Wh)
W	Velocidad de flujo máximo producido

Superíndices

* Indica parámetro adimensional

Subíndices

EST	A condiciones estáticas
M	Parámetro medido en superficie
MAX	Valor máximo del parámetro
WF	A condiciones de fondo de pozo

Recibido: abril, 1996
Aprobado: marzo, 1997

Referencias

- Contreras E., B., Domínguez, E., Iglesias, A., García, R., Huitrón, Compendio de resultados de mediciones petrofísicas en núcleos de perforación del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., GEOTERMIA Rev. Mex. de Geoenergía Vol. 4, No. 2, pp. 79-105, 1988.
- Goyal K. P., C. W. Miller, M. J. Lippmann, Effect of measured wellhead parameters and well scaling on the computed downhole conditions of Cerro Prieto Wells. Proc. 6th Workshop on Geothermal Reservoir Eng., Stanford University, California. 130-138, 1980.
- Gunn C. I. M., D. H. Freeston, T. Hadgu, Principles for wellbore simulator validation and calibration using matching analysis, Geothermics, Vol. 21, No. 3, pp. 341-361, 1992.
- Gunn C. and D. Freeston, Applicability of geothermal inflow performance and quadratic drawdown relationships to wellbore output curve prediction, Geothermal Resources Council TRANSACTIONS 15, 471-475, 1991.
- Hadgu T., Vertical two-phase flow studies and modeling of flow in geothermal wells., Tesis Doctoral. Universidad de Auckland. N. Z., 1989.
- Iglesias E. R. y S. L. Moya, Geothermal inflow performance relationships, Geothermal Resources Council TRANSACTIONS 14, II, 1201-1205, 1990.
- INTERCOMP, Vertical steam-water flow in wells with heat transfer (VSTEAM code) Manual de usuario, 1981.
- Kjaran S. P. and J. Eliasson, Geothermal Reservoir Engineering Lecture Notes, Report 1983-2, United Nations University Geothermal Training Program, Iceland, 1983.
- Moya S. L., Efectos del bióxido de carbono sobre el transporte de masa y energía en yacimientos geotérmicos, Tesis Doctoral. DEPEFI-UNAM, 1994.
- Moya S. L. y E. R. Iglesias, Solubilidad del bióxido de carbono en agua en condiciones geotérmicas, Geofísica Internacional, Vol. 31, No. 3, 305-331, 1992.
- Moya S. L., E. R. Iglesias y A. Aragón A., Curvas de referencia adimensionales para estimar productividades de masa y energía de yacimientos geotérmicos con/sin bió-

- xido de carbono, GEOTERMIA Revista Mexicana de Geología, Vol. 11, No. 3, 167-179, 1995.
- Moya S. L., E. R. Iglesias, y A. Aragón A, Inflow Performance Relationships for Geothermal Reservoirs With Carbene Dioxide, Sometido a Journal Petroleum Technology (SPE 31072), 1995.
- Moya S.L., A. Aragón A. y E. Iglesias, Estimación de curvas características de pozos geotérmicos mediante el empleo de relaciones de comportamiento de flujo, Memorias del tercer congreso de la Asociación Geotérmica Mexicana, 104-111, 1995.
- Suárez M. C., K. Pruess, M. Lippman, Preliminary modeling studies on Los Azufres geothermal field: Free convection in Tejamaniles, Workshop of Stanford Meeting, 161-172, 1989.
- Subgerencia de Exploración y Estudios de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, Reporte del estado actual del Campo Geotérmico de los Azufres, Michoacán, 1992.
- Vogel J. V., Inflow performance relationships for solution-gas drive wells, J. Pet. Tech, Enero, pp. 83-92, 1968.

Abstract

Moya S.L.; A. Aragón; L. Gonzalez "Estimation of production characteristics curves of geothermal wells, using two performance inflow dimensionless reference curves". Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish). Vol XII Num. 3, pages 35-40, September-December, 1997.

In a previous paper were obtained numerically, inflow performance curves for mass productivity (IPR, Inflow Performance Relationships) and for thermal productivity (GIPR, Geothermal Inflow Performance Relationships) of geothermal wells. The IPR and GIPR curves relate the mass flow produced in geothermal wells with pressure and enthalpy of well flowing in the interface well-reservoir. The obtained curves cover a wide range properties of geothermal reservoir rock-fluid medium and its different exploitation stages. Hypothetical reservoirs of pure water were considered, also reservoirs with carbene dioxide. Additionally were proposed two dimensionless reference curves to estimate massic (IPR) and energy (GIPR*) productivities of geothermal wells. In this paper a preliminary study on the applicability of both reference curves proposed is made, in order to estimate production characteristics curves of geothermal wells (relation pressure-mass flow rate at wellhead), from only one point (P, W) measured at wellhead. The characteristics curves obtained from this procedure are compared with these measured directly in the field. Finally matching the estimate IPR for a given well with IPR theoretical curves (Moya, 1994) is possible to determine the formation permeability in the wellbore.*

Key words: Characteristics curves, Production, Geothermal wells, Mass and energy inflow relationships, Los Azufres, Static pressure.