

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.

Producción de exceso de vapor en el Campo de Los Azufres

por

José Luis Quijano León, C.F.E., Morelia, Mich., México.
Alfred H. Truesdell, U.S.G.S., Menlo Park, Calif., USA.
David Nieva Gómez, I.I.E., Cuernavaca, Mor., México.
Mario Gallardo Allanís, C.F.E., Los Azufres, Mich., México.

RESUMEN

Los fluidos producidos en Los Azufres presentan un amplio rango de entalpías, desde valores correspondientes a únicamente líquido sin exceso de vapor hasta los correspondientes a vapor completamente seco. Las relaciones entalpía-cloruro y la historia de producción de cloruro y gases de algunos pozos indican la existencia de diferentes fuentes de fluidos que alimentan a los pozos: vapor y agua segregados naturalmente en las fracturas grandes, vapor producido por ebullición ayudada por la transferencia de calor de la roca y líquido mantenido en pequeñas fracturas o proveniente de niveles más profundos. Esto significa que el yacimiento tiene, al menos, dos rangos diferentes de tamaño de fracturas y diferentes saturaciones de vapor en zonas distintas. Todas estas peculiaridades deben considerarse en la simulación numérica del yacimiento.

INTRODUCCION

La producción de exceso de vapor en la descarga de sistemas geotérmicos de alta temperatura, debida a la ebullición, es una consecuencia casi inevitable de la explotación. (Truesdell, 1979). (El exceso de vapor se define como la diferencia -a una presión de separación dada- entre el vapor total producido y el vapor separado adiabáticamente de la fase líquida que entra al pozo, dividida por el vapor total). El vapor del yacimiento se produce en estos sistemas cuando el abatimiento de presión debido a la explotación provoca la ebullición del líquido, ya sea con transferencia de calor de la roca o sin ella. Aunque en términos generales el mecanismo es el mismo, la localización de la ebullición y la producción de exceso de vapor difieren en función de la estructura de la permeabilidad del yacimiento y las características de las fronteras del yacimiento (Lippmann et al, 1985, 1989). Esta también afecta al monto y al tiempo de la producción del exceso de vapor e influye en la concentración de gases y sales del fluido. La ebullición en el yacimiento provoca siempre la depositación de minerales en alguna parte de la formación. Estos minerales pueden encontrarse dispersos y ser inofensivos. Sin embargo, si el exceso de vapor se produce por ebullición localizada en la vecindad del pozo, la mineralización de la formación puede hacer

decrecer abruptamente la vida útil del pozo (Truesdell et al, 1984, Johnson, 1989). La ebullición en el yacimiento y la producción de exceso de vapor pueden evitarse únicamente si las presiones en las zonas de alimentación se mantienen por encima de la presión de vapor del agua saturada a la temperatura existente. Esto sucede cuando la recarga natural o la inyección de líquido igualan o exceden la tasa de abatimiento. La aparición de exceso de vapor puede ser diferida, más no evitada, obteniendo la producción de las zonas profundas donde las temperaturas iniciales están muy por debajo del punto de ebullición.

Aunque sólo unos cuantos pozos de Los Azufres han producido por un periodo largo, éstos muestran un amplio rango de entalpías, que varían desde fase líquida sin exceso de vapor hasta únicamente fase vapor sin líquido. Los pozos con producción simultánea de vapor y líquido tienden a presentar altas entalpías con montos de exceso de vapor considerables. La profundidad, la temperatura, la entalpía, y el monto de exceso de vapor de algunos pozos de Los Azufres se muestran en la Tabla 1 (ver texto en inglés).

EL ORIGEN DE LAS DESCARGAS DE EXCESO DE VAPOR.

Como ya se mencionó, el origen del exceso de vapor por ebullición y los mecanismos de flujo del vapor hacia los pozos son en términos generales similares en los distintos yacimientos geotérmicos. Sin embargo, la cantidad, el momento de aparición y los cambios con el tiempo difieren. Estos pueden distinguirse en forma simple de la siguiente manera.

Ebullición en un yacimiento con producción exclusiva de vapor.

En sistemas dominados por vapor como Larderello y Los Geysers, el vapor está contenido en fracturas y canales grandes y el líquido, en fracturas pequeñas y poros y retenido en la superficie de la roca (White et al, 1971). El abatimiento de presión del yacimiento tiene por consecuencia la ebullición del líquido, ayudada por la transferencia de calor de la roca adyacente. El vapor producido por esta ebullición se mueve hacia las fracturas grandes, se mezcla con el vapor ahí existente y fluye hacia los pozos productores. El agua se encuentra distribuida en todo el yacimiento y no se mueve hacia los pozos, de tal forma que la ebullición y la depositación resultante de minerales en la formación son

fenómenos dispersos, que no afectan por lo mismo a la permeabilidad. Puede suponerse que los pozos de Los Azufres que descargan únicamente vapor están produciendo mediante este mecanismo en un yacimiento dominado por vapor, parásito del yacimiento profundo dominado por líquido (Iglesias et al, 1985). La longevidad de estos pozos estará afectada por el tamaño del yacimiento dominado por vapor y por la cantidad de líquido que contiene; pero es poco probable que se vea afectada por decremento de permeabilidad por incrustación de la formación.

Ebullición en yacimientos con permeabilidad de matriz

Los yacimientos de alta temperatura y permeabilidad de matriz, como el de Cerro Prieto, pueden exhibir una manera de ebullición y de producción de exceso de vapor que pudiera causar un decremento repentino de la producción y una vida del pozo limitada. Cuando la presión de la matriz de la roca, a través de la que fluye el líquido hacia el pozo o hacia un grupo de pozos, cae por debajo de la presión de vapor del agua saturada, dará lugar a la formación de una zona de ebullición. El exceso de vapor se produce por la transferencia de calor de la roca hacia el fluido enfriado por ebullición. Al continuar la caída de presión, la zona de ebullición se expande y la temperatura dentro de la zona disminuye, provocando una transferencia de calor adicional. Si el yacimiento tiene una frontera de presión constante, como en el caso del yacimiento de Cerro Prieto I, la tasa de expansión decrece con el tiempo y eventualmente se vuelve estacionaria (Truesdell, 1979, Lippmann et al, 1989). Ya que la ebullición se concentra en la vecindad del pozo, la depositación de minerales también se concentra en esta zona, lo que produce un eventual taponamiento de la formación y la declinación de la producción. La producción de exceso de vapor, la mineralización de la formación y la declinación asociada del flujo han sido descritas por Truesdell et al. (1984) y Tovar y Quijano (1988), en el caso de los pozos de Cerro Prieto.

Ebullición en yacimientos fracturados

La ebullición y la producción de exceso de vapor en estos sistemas ha sido descrita por Grant y Glover (1984). Los yacimientos de agua de alta temperatura con producción proveniente de las fracturas son más complicados que aquellos con permeabilidad de matriz. La existencia de un rango de anchura y espaciado de fracturas permite una variada respuesta al abatimiento de presión. Estos yacimientos pueden tener zonas bifásicas dominadas por vapor o dominadas por líquido donde la temperatura corresponde a la curva de ebullición vs la profundidad, y una zona profunda de líquido donde la temperatura es constante. Si la permeabilidad a lo largo de las fracturas mayores es grande, la declinación de presión se propagará rápidamente sin provocar grandes gradientes de presión y la ebullición se dará a través de toda la zona bifásica, donde la presión caiga por debajo de la presión de vapor del agua saturada. La ebullición se dará con transferencia de calor de la roca y la entalpía de los pozos que

producen en la zona bifásica se incrementará; sin embargo, es probable que la mayor parte del vapor emigre hacia arriba y desplace al líquido. Cuando la frontera agua/vapor descienda al nivel de la zona productora del pozo, se dará una rápida transición a descarga de vapor seco. El campo se habrá convertido, al menos localmente, en dominado por vapor. Este proceso ha sido descrito por Grant et al. (1984), en los casos de Wairakei y Broadlands. Debido a que Wairakei tiene una zona profunda de líquido con temperatura constante, los pozos profundos continúan siendo alimentados exclusivamente por líquido y su entalpía se mantiene constante, mientras que otros pozos producen vapor o mezcla vapor-agua. Una rápida transición de vapor a líquido, y viceversa, se ha observado en Svartsengi, Islandia (Jon Orn Bjarnason, com. pers., 1988).

En yacimientos fracturados con menor permeabilidad, el rango de tamaño de fractura es más importante, debido a que la permeabilidad relativa al vapor y al líquido y la eficiencia de la transferencia de calor de la roca pueden variar en las diferentes fracturas. Si por ejemplo, las presiones se reducen en las fracturas pequeñas y en las grandes de tal forma que se dé la ebullición en ambas, la transferencia de calor de la roca podrá ser más efectiva en las fracturas pequeñas y causará mayor ebullición. Teniendo una mayor fracción de vapor en las fracturas pequeñas, la permeabilidad al líquido podrá reducirse y solo se moverá vapor de las fracturas pequeñas a las grandes, incrementándose la entalpía del fluido. Parece ser que este proceso tiene lugar en algunos pozos de Los Azufres, como se discutirá más adelante. La retención de diferentes cantidades de líquido y sales producirá un rango de entalpías totales y de cloruros, estando la saturación de vapor determinada por el número relativo de fracturas pequeñas y grandes y por sus propiedades. Este mecanismo no depende de la retención transitoria de líquido debido a la permeabilidad relativa, ya que el líquido residual es retenido permanentemente en las fracturas pequeñas. Sin embargo, si depende del creciente abatimiento de presión que provoca un aumento en la tasa de ebullición y posiblemente en el tamaño de la zona de ebullición. La mineralización se da principalmente en las fracturas pequeñas y no causa el taponamiento de la formación. Este mecanismo es similar al sugerido por Arnorsson et al. (1989) para explicar las concentraciones de gas en el vapor de Olkaria, Kenia.

Por tanto, dependiendo del tamaño y heterogeneidad de las fracturas, estos yacimientos pueden mostrar una variedad de comportamientos con relación a la ebullición. Si las fracturas son pequeñas y uniformes, la ebullición puede estar localizada como en el caso de permeabilidad de la matriz. Si las fracturas son grandes, puede darse una segregación de fases a gran escala, dando lugar a una zona de vapor en la parte alta y una de líquido en la parte baja. En caso de fracturas intermedias y con notoria heterogeneidad puede darse una segregación de fases a escala pequeña, dando lugar a un fluido bifásico dominado por líquido en las fracturas grandes y a un fluido

bifásico dominado por vapor en las pequeñas. Estos tipos de comportamiento de yacimientos pueden ser descubiertos comparando la concentración de cloruros en el fluido total (agua más vapor) y la calculada en el yacimiento versus la entalpía, en muestras de un grupo de pozos o de un pozo en diferentes fechas.

GRAFICOS DE CONCENTRACION-ENTALPIA EN SISTEMAS MODELO

La discusión anterior y la de Grant y Glover (1984) permiten distinguir varios casos de producción de exceso de vapor. Si la permeabilidad al vapor y al líquido son ambas grandes y una ebullición ampliamente distribuida da por resultado la segregación de fases, de tal forma que los pozos se alimentan por flujos de alta entalpía (vapor o mezcla); en tal caso la composición del fluido total se localizará a lo largo de una línea de ebullición que une la composición del vapor con la del líquido del yacimiento (Figura 1a). La composición del agua residual del separador o del vertedor se encontrará también en esta línea. Al cambiar el monto del exceso de vapor, no cambiará la posición de la línea de ebullición o la concentración de cloruros del vertedor. Si todo el vapor del sistema tiene la misma composición, todos los pozos se encontrarán en una sola línea, en un gráfico de gas-entalpía (Figura 1b).

Otro ejemplo simple de exceso de vapor es el producido por transferencia de calor de la roca (Figuras 2a y 2b). En el proceso idealizado, la entalpía del fluido se incrementa sin cambios en la concentración total de cloruros y de gases del yacimiento, pero el fluido se desplaza a una línea de ebullición diferente, en la que el líquido del yacimiento y a condiciones superficiales está más concentrado y el vapor más diluido. El proceso real involucra la ebullición del fluido y el descenso de la temperatura y la entalpía del líquido, pero las composiciones aún se sitúan a lo largo de la misma línea de ebullición producida por la transferencia de calor.

El proceso descrito anteriormente, en el que las fracturas pequeñas contribuyen con una cantidad extra de vapor procedente del líquido que ebulle más completamente y el agua residual es más o menos retenida en las fracturas, constituye una combinación de estos procesos. Si todo el líquido y, todas las sales contenidos en las fracturas pequeñas son retenidos y sólo se suministra vapor a las fracturas grandes, entonces el proceso es similar al de la Figura 1. Si no se retiene ni líquido ni sales, el proceso es el de la Figura 2. En el caso intermedio se obtiene una combinación en la que la composición total se desplaza hacia entalpías mayores y concentraciones de cloruros menores, que no se logran con la adición de vapor o calor descritas antes (Figuras 2a y 2b).

RELACIONES ENTALPIA-CLORUROS EN LOS AZUFRES

La entalpía y concentración de cloruros de muestras colectadas por el IIE se presentan en la Figura 3, donde se incluyen las composiciones del fluido total del yacimiento (entalpía y cloruros) junto con los valores de la entalpía del líquido calculada usando temperaturas de geotermómetros catiónicos. Un gráfico utilizando los archivos de datos de CFE da una imagen similar. Todas las entalpías del líquido y algunas entalpías del fluido total (mezcla) caen entre 1200 kJ/kg y 1500 kJ/kg, lo que indica temperaturas entre 275° y 330° C. Las muestras de pozos más profundos (19,22,26 y 28) no presentan exceso de vapor, ya que las entalpías calculadas del líquido y las entalpías medidas de la mezcla concuerdan razonablemente. Las muestras de fluidos de pozos de la zona sur con profundidades intermedias tienden a presentar mayores concentraciones de cloruros, mayores excesos de vapor y menores entalpías del líquido (16AD,18,36). Los pozos más profundos de esta zona tienen una alta concentración de cloruros, una alta entalpía del líquido, pero un pequeño o nulo exceso de vapor (22,26). Los pozos de la zona norte pueden dividirse en dos grupos. Un grupo tiene valores intermedios de exceso de vapor, menores concentraciones de cloruros y alta entalpía del líquido (5,13). El otro grupo es similar, pero no tiene exceso de vapor (19,28). Este comportamiento puede compararse con los modelos sencillos descritos anteriormente.

Los pozos de vapor seco y de alta entalpía de la zona sur están alimentados por vapor segregado de las fracturas grandes más una cantidad pequeña de líquido que ebulle total o parcialmente, ayudado por la transferencia de calor de la roca, al moverse hacia el pozo. El pozo 22 (zona sur) y los pozos de alta entalpía del líquido en la zona norte están alimentados por fase líquida exclusivamente sin exceso de vapor. Los pozos con exceso de vapor intermedio en la zona norte (5,13) muy probablemente están alimentados por líquido que ebulle parcialmente como consecuencia de la transferencia de calor de la roca, más una cantidad pequeña o marginal de vapor segregado. La mayor concentración de cloruros en los fluidos producidos en la zona sur sugiere un mayor monto de ebullición en esa zona, en comparación con la zona norte.

RELACIONES ENTALPIA-GAS EN LOS AZUFRES

La Figura 4 representa la entalpía y el contenido de gas del fluido total (mezcla) de muestras colectadas por CFE. Pueden distinguirse claramente dos grupos extremos. Un grupo representa la fase líquida y el segundo, el vapor del yacimiento. Este último grupo presenta un amplio rango de contenido de gas (2 a 8 por ciento en peso). Esto significa que la fase vapor tiene una composición heterogénea. Algunos otros pozos (16AD) representan una mezcla de líquido y vapor. Otro grupo bien definido está representado por

pozos (5,9,13) que tienen bajo contenido de gas y entalpías de la mezcla intermedias. Estos pozos obtienen su producción de líquido que ebulle parcialmente al moverse hacia el pozo, como consecuencia del abatimiento de presión y de la transferencia de calor de la roca. El pozo 18, cuya entalpía es del orden de 1600 kJ/kg y su contenido de gas del orden del 8% en peso, presenta un contenido de gas mayor del esperado por simple mezcla líquido-vapor.

HISTORIAL DE PRODUCCION DE GAS DE LOS POZOS 6 Y 17

Los pozos 6 y 17, localizados en el yacimiento somero sur, han estado produciendo vapor seco desde 1982. La Figura 5 muestra el comportamiento del contenido de gas en el tiempo. Los valores bajos en 1984 coinciden con la apertura de varios pozos localizados en el área de Tejamaniles (zona sur) durante Julio y Agosto. Una vez que los otros pozos se cerraron de nuevo, el contenido de gas del pozo 6 se incrementó paulatinamente y el contenido de gas del pozo 17 permaneció más o menos constante hasta 1988. En esa fecha el contenido de gas comenzó a decrecer de nueva cuenta, en respuesta a la apertura de los pozos en Tejamaniles, que alimentan la Central de 50MW.

Este comportamiento puede interpretarse como sigue. Cuando la mayoría de los pozos de Tejamaniles están cerrados, los pozos 6 y 17 obtienen su producción principalmente de vapor segregado rico en gas localizado en las fracturas grandes. Cuando se abren otros pozos, tiene lugar una súbita caída de presión la cual, a su vez, provoca la ebullición del líquido retenido en las fracturas pequeñas. Esta ebullición añade vapor casi libre de gas al vapor segregado rico en gas, dando como resultado un menor contenido de gas en el vapor que fluye a los pozos. Esto significa que la longevidad de los pozos de Tejamaniles depende fuertemente de la cantidad de líquido en el yacimiento parásito dominado por vapor.

HISTORIAL QUIMICO DEL POZO 13

Este pozo ha estado produciendo una mezcla vapor-agua desde 1982 y presenta un comportamiento interesante. La Figura 6 representa la concentración de cloruros del el yacimiento y de la mezcla en el tiempo. Los cloruros del yacimiento han permanecido más o menos constantes, mientras que la concentración de la mezcla se incrementó abruptamente en 1986. De manera similar, la entalpía de la mezcla decreció en la misma fecha, mientras que la entalpía del líquido del yacimiento -calculada con las temperaturas de Na/K y sílice- ha permanecido casi constante (Figura 7). El contenido de gas también muestra un comportamiento en el tiempo más bien constante (Figura 8). Estos hechos pueden explicarse si el pozo 13 obtiene su producción de líquido que ebulle parcialmente ayudado por la transferencia de calor de la roca y una cantidad marginal de

vapor segregado. Al principio de la producción la tasa de ebullición fue mayor y posteriormente se estabilizó, de tal manera que en la actualidad es casi únicamente líquido el que fluye al pozo. No existen evidencias químicas de una entrada de agua fría al pozo. Por lo tanto, esta porción del yacimiento representa el caso intermedio en el que un fluido bifásico dominado por líquido es retenido en las fracturas mayores y un fluido bifásico dominado por vapor, en las pequeñas. El yacimiento parásito dominado por vapor en la zona norte, de existir, debe tener una capacidad muy limitada.

CONCLUSION

El comportamiento de la entalpía y la química de los fluidos producidos en Los Azufres puede interpretarse considerando un yacimiento fracturado con, al menos, dos rangos distintos de tamaño de fractura -uno mayor y otro menor-, con un yacimiento parásito dominado por vapor y un yacimiento más profundo dominado por líquido. El monto de la ebullición y el tamaño de la zona de ebullición son mayores en la zona sur. Esto significa que existen, por lo menos, tres fuentes alimentadoras de fluidos a los pozos: vapor segregado naturalmente, vapor producido por ebullición ayudada por la transferencia de calor de la roca y líquido.

La evaluación de la capacidad de este tipo de yacimientos es difícil y requiere de simulación numérica más sofisticada, que pueda tomar en cuenta todas estas peculiaridades. En particular, deben usarse modelos capaces de simular el comportamiento de un pozo que obtiene su producción de varias capas con propiedades del fluido diferentes

REFERENCIAS

Ver versión en inglés.