

Aprovechamiento de vapor sobrecalentado en pozos geotérmicos con presencia de HCl (ácido)

Heber D. Diez L.¹, Magaly Flores A.¹, Miguel Ramírez M.¹, Rigoberto Tovar A.², Fernando Sandoval M.¹, César Rosales L.³ y Felipe Solano T.³

Comisión Federal de Electricidad (CFE), Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, ¹Sede, Morelia, Mich. Correo: heber.diez@cfe.gob.mx, ²Residencia Los Azufres, ³Residencia Los Humeros.

Resumen

Al menos siete pozos perforados en la década de los ochenta en el campo geotérmico de Los Humeros, ubicado en el estado de Puebla, debieron ser cementados y abandonados, ya que su operación era riesgosa debido a las características corrosivas de los fluidos producidos por ellos. Los fluidos presentaron un pH bajo, lo cual se atribuyó a la presencia de cloruro de hidrógeno (HCl gaseoso en su forma anhidra), el cual se ioniza al entrar en contacto con la humedad y forma ácido clorhídrico. En enero de 2008 se concluyó la perforación en ese campo del pozo H-43, presentando excelentes condiciones de producción pero fluidos corrosivos con valores de pH de alrededor de 3 y presencia de HCl confirmada en laboratorio. Por ello, en principio, el pozo no habría podido ser aprovechado. Sin embargo, el pozo presenta un sobrecalentamiento de unos 30°C, con una producción actual de alrededor de 35 t/h de vapor, una presión de cabezal de 40 barg (585 psig) y una temperatura de cabezal de 285°C. Se decidió aprovechar esta condición termodinámica de sobrecalentamiento para integrarlo comercialmente a las unidades generadoras, puesto que el sobrecalentamiento asegura que el HCl no se ionice ni forme ácido clorhídrico, evitando así la corrosión de la tubería de revestimiento del pozo. El vapor continúa sobrecalentado hasta la conexión con el vaporducto principal, en el cual se inyecta un inhibidor de corrosión, como se explica en este trabajo. De esta manera, el pozo ha venido suministrando vapor al sistema de generación de electricidad desde mayo de 2013. Este logro tiene gran relevancia ya que abre la posibilidad de explotar pozos con características similares, lo que podría representar alrededor de 100 MW adicionales de generación eléctrica en un futuro cercano en esta zona del yacimiento. Además, permite aprovechar otros yacimientos que presenten contenido de HCl con características termodinámicas y de producción diferentes.

Palabras clave: Vapor sobrecalentado, fluidos ácidos, HCl gaseoso, corrosión, inhibición, pozo H-43, Los Humeros.

Using superheated steam in geothermal wells at presence of HCl (acid)

Abstract

At least seven wells drilled in the Los Humeros, Puebla, Mexico geothermal field during the eighties, had to be cemented and abandoned. This was necessary because their operation became risky due to the highly corrosive nature of the produced fluids. The wells presented low pH values in the discharge fluid, which was attributed to the presence of gaseous hydrogen chloride. Gaseous HCl ionizes in the presence of humidity to form hydrochloric acid. In January 2008 the well H-43 was completed in that field, showing excellent production conditions, but the chemical analysis of the discharge showed a pH value of around 3 with HCl gas content. In principle, that prevented the use of the fluids. However, the well produces approximately 35 tons per hour of steam with around 30°C of superheating, at wellhead pressure of 40 barg (580 psig) and wellhead temperature of 285°C. It was decided to take advantage of this thermodynamic condition of the well to operate and connect it to the production system, since

superheating prevents the ionization of the HCl and the formation of liquid HCl, thereby preventing corrosion of the well casing and the superficial installations. The steam remains superheated up to the connection with the main steam-pipe, where a corrosion inhibitor is injected, as it is presented in this paper. The well has been supplying steam to the power plant since May 2013. The successful utilization of H-43 opens the possibility of exploiting wells with similar acid characteristics, representing approximately 100 MWe of power generation potential in this part of the reservoir.

Keywords: Superheated steam, acid fluids, gaseous HCl, corrosion, inhibition, well H-43, Los Humeros.

1. INTRODUCCIÓN

Al menos siete pozos productores que fueron perforados durante la década de los ochenta en el campo geotérmico de Los Humeros, ubicado en el estado de Puebla (Fig. 1) debieron ser abandonados por la naturaleza ácida de sus fluidos, lo que propiciaba una alta corrosión a sus tuberías e instalaciones superficiales. Los bajos valores de pH que mostraron en su descarga, fueron atribuidos a la presencia del gas cloruro de hidrógeno (HCl), que en presencia de humedad ioniza, formando ácido clorhídrico.

El pozo H-43 fue perforado de octubre de 2007 a enero de 2008, al noroeste del mismo campo geotérmico de Los Humeros. Al concluir su perforación fue probado, y los fluidos geotérmicos producidos en la descarga presentaron valores de pH alrededor de 3. Esto sugirió una naturaleza corrosiva en su fluido, lo que podría afectar la constitución mecánica del pozo y las instalaciones superficiales. Esta condición ácida se confirmó mediante el análisis químico de muestras de vapor condensado. Las muestras fueron colectadas bajo condiciones de operación del pozo correspondientes a una placa de orificio de 50.8 mm (2") de diámetro (tablas 1 y 2). El análisis de laboratorio también confirmó el exceso del ión cloruro (Cl^-), que se atribuye a la presencia de HCl en forma gaseosa. Esto llevó a diseñar una serie de pruebas para neutralizar el HCl y tratar de aprovechar el fluido del pozo.

Tabla 1: Composición química del vapor condensado (Cruz y Tovar, 2008).

Pozo	pH	Conduc. Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Alcalinidad Total (meq/L)	CL	B	HCO_3	SiO_2	SO_4	Na	K	Ca	Mg	As	Fe
				mg/l (ppm)										
H-43	4.47	145	0.4266	31	958	1.67	21.95	45	0.58	0.36	0.55	0.04	9.11	8.21

Tabla 2 Porcentaje en peso de gases (Cruz y Tovar, 2008).

Pozo	GAS TOTAL (% W_T)	Ar	CH_4	CO_2	H_2	H_2S	He	N_2	NH_3
		%Wi							
H-43	3.86	0.7645	0.0134	84.31	0.3995	9.62	0.00	4.8908	0.0041

El diseño original del sistema de neutralización de ácido se basó en pozos con producción de vapor en condiciones termodinámicas de saturación. Lo anterior de acuerdo a las características iniciales de producción que el pozo mostró de acuerdo con la información obtenida a partir de registros de presión y temperatura de fondo de pozo. Esto sugería la inyección de una solución de NaOH a través de un *tubing* de incoloy, con una cámara de dosificación que se instalaría a 1350 m, debajo de la tubería de revestimiento con la finalidad de neutralizar el HCl (Flores et al., 2010).

Las pruebas de neutralización se llevaron a cabo en los años 2009, 2011 y 2012 y demostraron que era factible y exitosa la inhibición del ácido. Sin embargo, también se presentaron diversos problemas, que se produjeron en el sistema de suministro del inhibidor. Una de ellas resultó en la pérdida de la tubería incoloy, en 2011.

Durante la última prueba se observó una incrustación de carbonato de sodio cristalizado en el cabezal del pozo. Esta se forma usualmente en condiciones de sobrecalentamiento, lo que fue confirmado más tarde con los datos de presión y de temperatura medidos en el cabezal del pozo. Esto indicó que el NaOH no estaba funcionando bajo esas condiciones. Las incrustaciones en el cabezal del pozo eran tan abundantes que obstruían sus válvulas.

La formación de la incrustación se debió a la reacción del NaOH con el vapor a condiciones de sobrecalentamiento. La composición química de la incrustación se obtuvo mediante análisis por difracción de rayos X, y se describe a continuación:

- Natrita (carbonato de sodio, Na_2CO_3).
- Termonatrita (carbonato de sodio hidratado, $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$).
- Posibles trazas de NaCl.

Debido a ello se decidió utilizar un inhibidor compuesto de carbonato de potasio (K_2CO_3) + Amina, lo cual tiene algunas ventajas sobre la solución de hidróxido de sodio (NaOH) y mayor tolerancia al nivel de sobrecalentamiento del fluido (Weres and Kendrick 2010).

2. TERMODINÁMICA DEL POZO H-43

En 2011 se diseñó una prueba de descarga atmosférica a fin de recuperar el *tubing* perdido dentro del pozo. La información termodinámica que se obtuvo durante la descarga corroboró que el fluido se hallaba sobrecalentado y se obtuvo una curva a diferentes condiciones de apertura del pozo. La Figura 2 muestra el gráfico de temperatura y presión de pozo obtenido durante la descarga atmosférica, junto con la temperatura de saturación a las condiciones de presión de cabezal y los correspondientes grados de sobrecalentamiento del fluido. La Figura 3 muestra los datos de presión y temperatura graficados en la curva de Clausius-Clapeyron, así como los valores correspondientes a diferentes orificios de producción. El gráfico corrobora que el pozo se ubica en la región de vapor sobrecalentado.

A partir de esas gráficas se determinó que el fluido del pozo era vapor con al menos 35°C de sobrecalentamiento, a condiciones de integración al sistema de generación de electricidad.

3. NEUTRALIZACIÓN DEL CLORURO DE HIDRÓGENO

Como se señaló anteriormente, el agente corrosivo principal es el ácido clorhídrico, que se origina por la ionización del gas conocido como cloruro de hidrógeno. Pero la condición de sobrecalentamiento del fluido impide que ese fenómeno ocurra dentro del pozo y por lo tanto el proceso de neutralización se puede simplificar y llevar a cabo en la superficie, como se indica en la Figura 4 (Hirtz et al., 1991).

3.1. Condiciones de operación

El pozo H-43 debe ser operado bajo una condición conocida y constante que permita el análisis de todas las variables involucradas, por lo que se decidió operarlo con un orificio de restricción de 50.8 mm (2") de diámetro, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Condiciones de operación, pozo H-43.

Condiciones de operación, pozo H-43.	
Placa de orificio	50.8 mm (2”) diámetro
Producción estimada	34 t/h de vapor sobrecalentado
Presión de cabezal	40 barg (585 psig)
Temperatura de cabezal	285°C
Sobrecalentamiento	30 °C

3.2. Análisis termodinámico en el sistema de tuberías

Hasta este punto sólo era necesario determinar dónde podría producirse la saturación termodinámica del vapor del pozo H-43, o dónde este vapor podría encontrar humedad en el sistema de tubería. Las pérdidas de energía por transferencia de calor fueron calculadas después de la placa de orificio, determinándose que son mínimas y que el vapor podría llegar sobrecalentado hasta la interconexión con el vaporducto colector principal.

Se previó así que no habría corrosión a lo largo de la tubería de transporte siempre que el vapor se mantenga sobrecalentado, y que la neutralización debía efectuarse cerca de la interconexión de tuberías para neutralizar el HCl en el vapor, en el momento en que este encuentre condiciones de humedad relacionadas con el estado termodinámico del fluido, como se indica en la Figura 5.

3.3. Dosificación del inhibidor (Amina)

Se tomó una serie de muestras representativas de vapor condensado del pozo H-43 y se analizaron bajo condiciones de operación, con la finalidad de dosificar el inhibidor de corrosión (Amina). Se calculó que la concentración de cloruros en el vapor era de alrededor de 35 partes por millón (ppm), que debería neutralizarse con la inyección de 35 litros por hora de solución con inhibidor al 10%. Durante las pruebas de inhibición originalmente se instaló el punto de inyección en una zona de la tubería con más de 20°C de sobrecalentamiento, lo que dio por resultado incrustaciones en forma de cloruro de potasio. Por ello se tomó la decisión de inyectar el inhibidor en el vaporducto colector principal para evitar la incrustación (ver Figura 5).

3.4. Operación de neutralización en superficie

El inhibidor se inyecta en el vaporducto colector principal, cinco metros antes de su interconexión con el vaporducto del pozo H-43. La presencia de una fase líquida que viaja en el colector principal, constituida por salmuera y condensados de otros pozos, se utiliza para prevenir la formación de incrustaciones originadas por la reacción entre el inhibidor y el fluido del pozo, cuando este es vapor sobrecalentado.

La turbulencia a lo largo de la tubería y en la interconexión favorece la transferencia de masa entre la mezcla de vapor y líquido con el inhibidor, dando como resultado la neutralización del HCl proveniente del pozo.

4. MONITOREO DE PARÁMETROS

La Figura 6 muestra el monitoreo termodinámico del pozo, que realiza para verificar que se mantenga el mismo sobrecalentamiento y evitar la corrosión del pozo, asegurar la integridad de sus instalaciones, de las instalaciones superficiales y del sistema de vaporductos hasta las turbinas.

La Figura 7 presenta el monitoreo de cloruros en el pozo, que se lleva a cabo con la finalidad de ajustar la dosificación del inhibidor en caso de que haya variaciones en la concentración, mientras que la Figura 8 muestra el monitoreo de hierro en el sistema. Este se emplea para la detección de alguna corrosión significativa que esté por arriba de los parámetros medidos y aceptados. Se puede observar que el pozo muestra un contenido aceptable de hierro, similar al de otros pozos productores. Este resultado contribuye a la confiabilidad en el suministro de vapor al sistema, que se traduce en el funcionamiento adecuado de las plantas generadoras.

Aunque se miden otros parámetros, los mencionados son los mínimos que deben monitorearse, además de llevar a cabo actividades periódicas y complementarias de vigilancia que consisten en inspecciones visuales y medición de espesores del cabezal del pozo, válvulas y tuberías que están en contacto con el fluido.

5. CONCLUSIONES

El pozo H-43 ha estado suministrando vapor al sistema de generación de electricidad desde mayo de 2013. Ha estado operando de manera satisfactoria, aprovechando el comportamiento del HCl en el vapor sobrecalentado e inyectando un inhibidor de corrosión en el vaporducto colector principal, donde ya hay humedad. Se considera posible mejorar el sistema de neutralización en un futuro cercano, para hacerlo aun más eficiente.

La inyección del inhibidor ayuda a prevenir la corrosión en las tuberías y equipo superficial en general, lográndose así aprovechar la producción de vapor del pozo H-43, que de otro modo no podría utilizarse. La producción actual del pozo se encuentra alrededor de las 34 toneladas de vapor por hora, lo que equivale a una generación de electricidad de 4.25 MW. Además, el pozo tiene una presión de cabezal suficientemente alta que permite incrementar la presión mediante la utilización de placas de orificio de mayor diámetro.

La implementación del sistema de neutralización ha tenido un gran impacto en el desarrollo futuro del campo geotérmico de Los Humeros, ya que abre la posibilidad de explotar pozos en el yacimiento profundo que presentan características termodinámicas y de acidez similares, o pozos con fluidos en condiciones de saturación. Esto podría representar alrededor de 100 MWe adicionales de generación eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al ingeniero Raúl Maya González, quien estuvo al frente de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, por su apoyo constante durante este proyecto. También agradecen a todas aquellas personas quienes de forma directa o indirecta participaron y continúan participando en este proyecto.

REFERENCIAS

Cruz, I., y Tovar, R., 2008. Evaluación Preliminar de la Cantidad de Inhibidor de Corrosión para la Neutralización del Fluido del H-43. CFE, informe interno DINYAC-012-2008. Inédito.

- Diez, H., 2013. Experiencia Operativa Neutralización H-43. CFE, informe interno DINYAC-004-2013. Inédito.
- Flores, A., y Tovar, A., 2006. Fracturamiento térmico del H-40. CFE, informe interno DINYAC-006-2006. Inédito.
- Flores, M., Ramírez, M., Tovar, R., and Sandoval, F., 2010. Neutralization of Acid Fluids: An Alternative of Commercial Exploitation Wells on Los Humeros Geothermal Field. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Hirtz, P., Buck, C. and Kunznan, R., 1991. Current Techniques in Acid-Chloride Corrosion Control and Monitoring at The Geysers, *Proceedings Sixteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, January 23-25, 1991. SGP-TR-134.
- Weres, O., and Kendrick, C. 2010. Corrosion by HCl in Dry Steam Wells Controlled using Potassium Carbonate without Destroying Superheat, *GRC Transactions*, Vol. 34, 2010.

(Figuras en páginas siguientes)

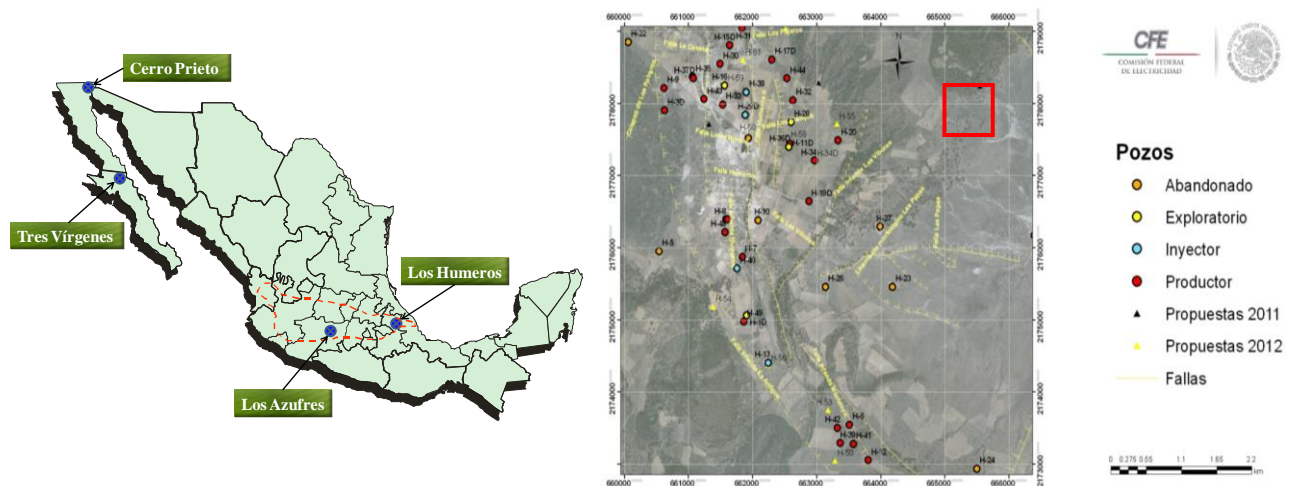


Figura 1. Pozo H-43 en el campo geotérmico de Los Hornos.

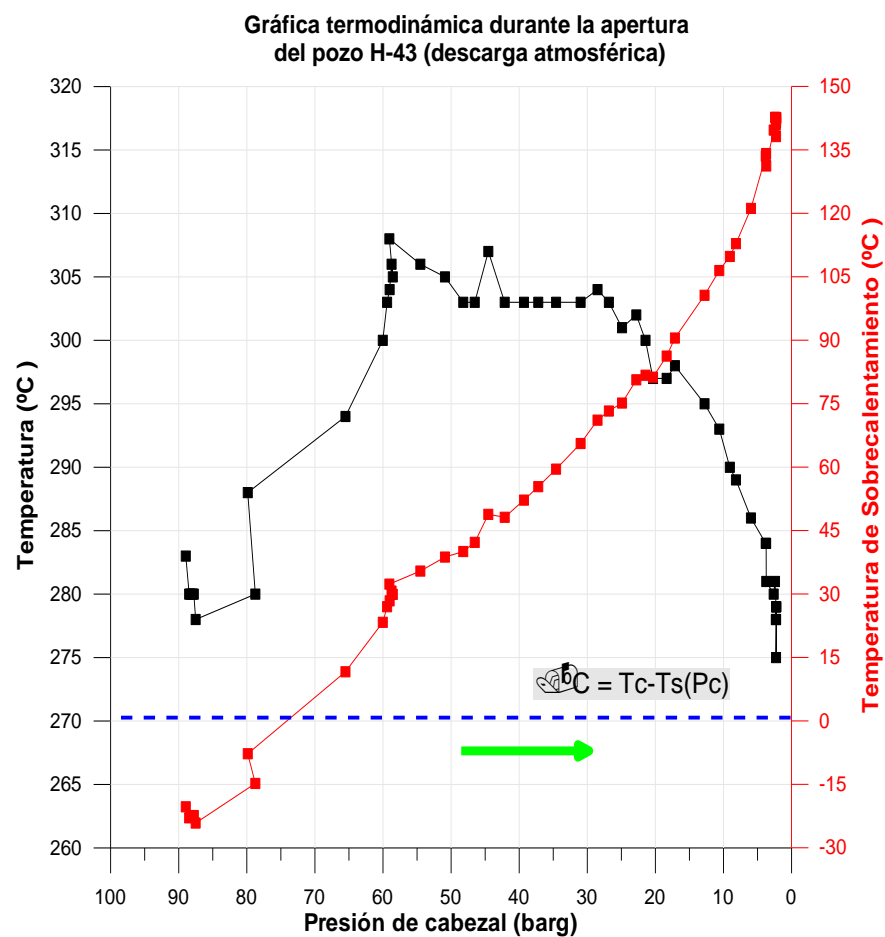


Figura 2. Condiciones termodinámicas durante la prueba de flujo del pozo H-43 (descarga atmosférica, Diez 2013).

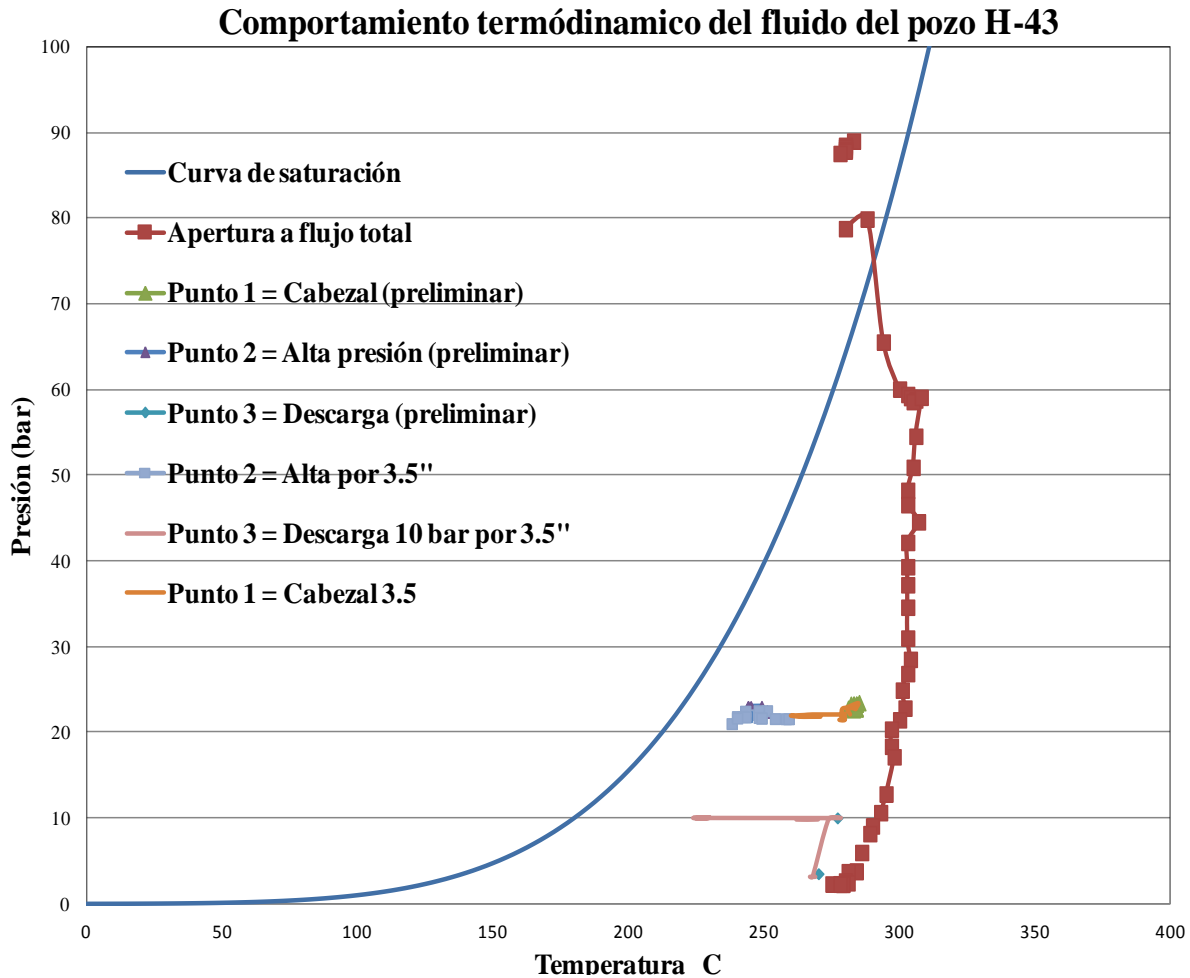


Figura 3. Comportamiento termodinámico del fluido del pozo H-43 (Diez, 2013).

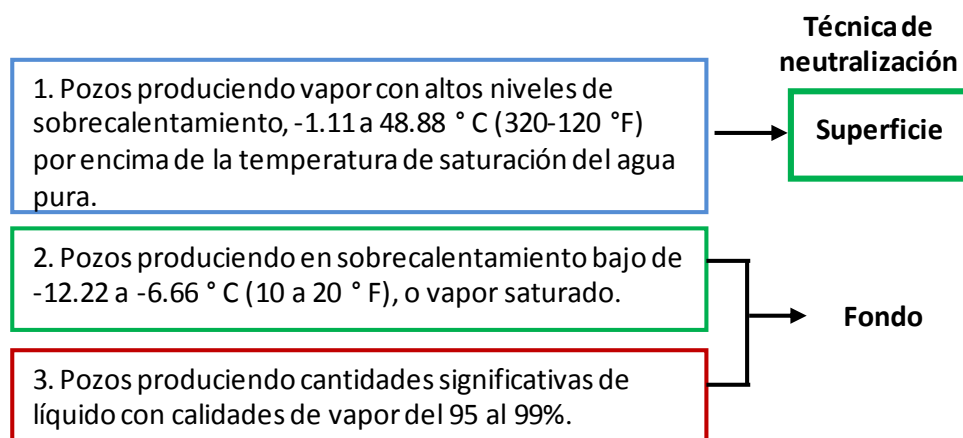


Figura 4. Clasificación de los pozos para definir la técnica de neutralización en función de su termodinámica.

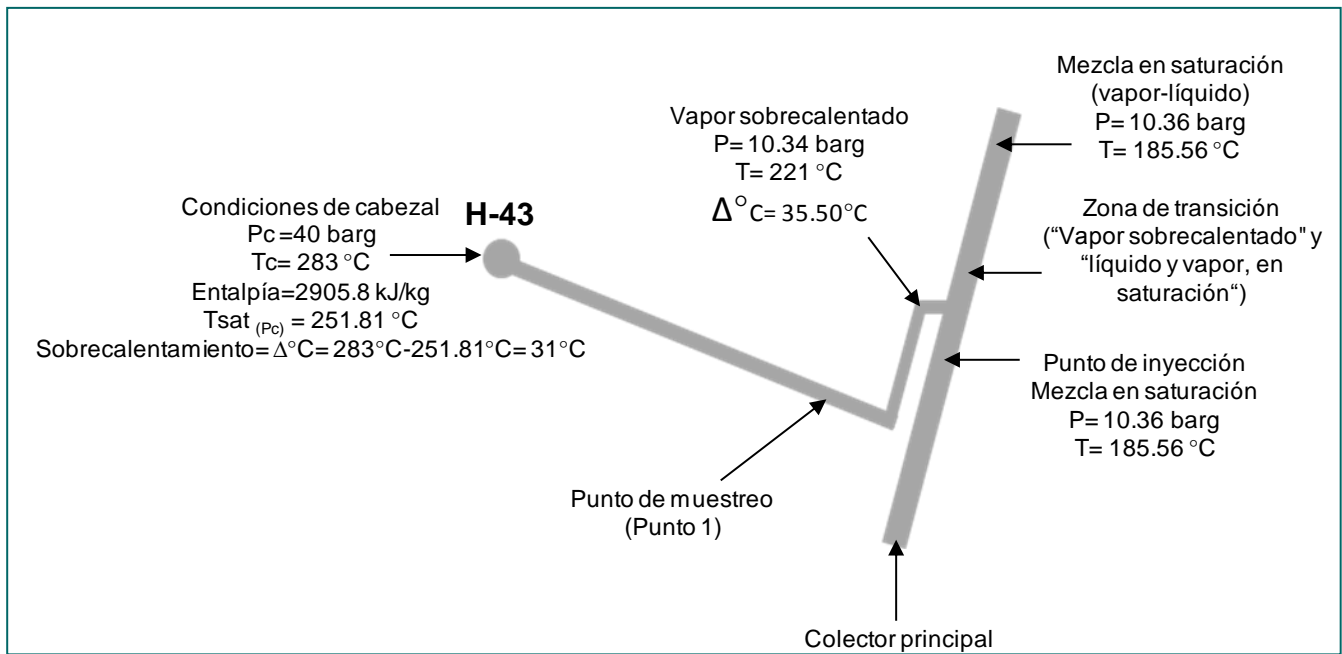


Figura 5. Termodinámica en el sistema de vaporductos del pozo H-43.

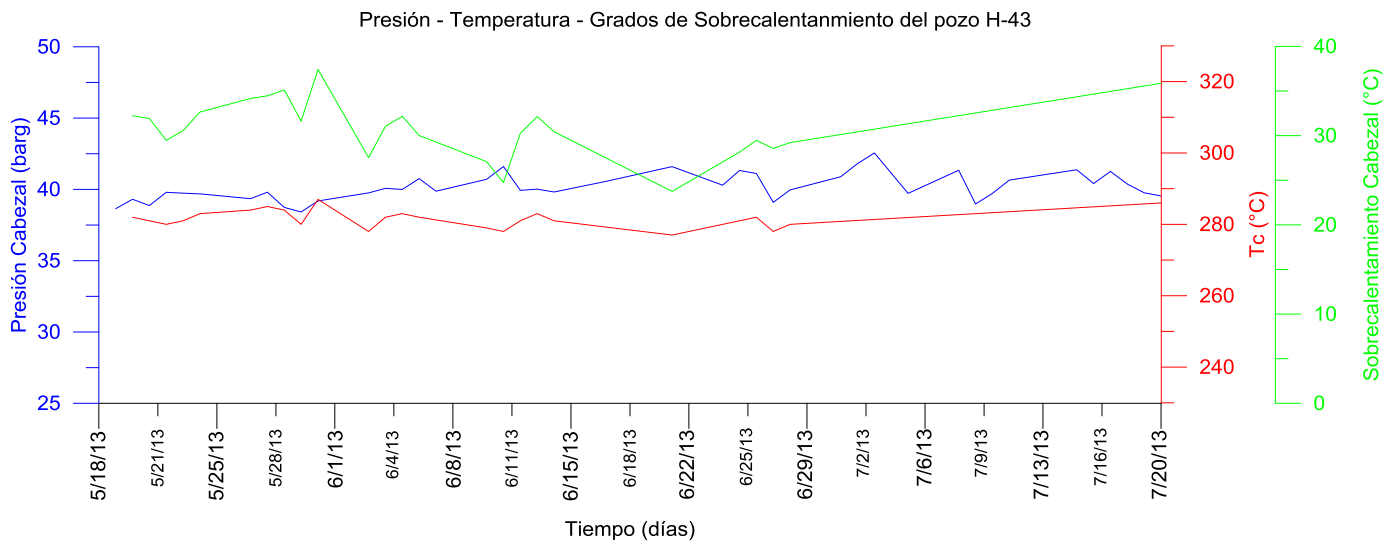
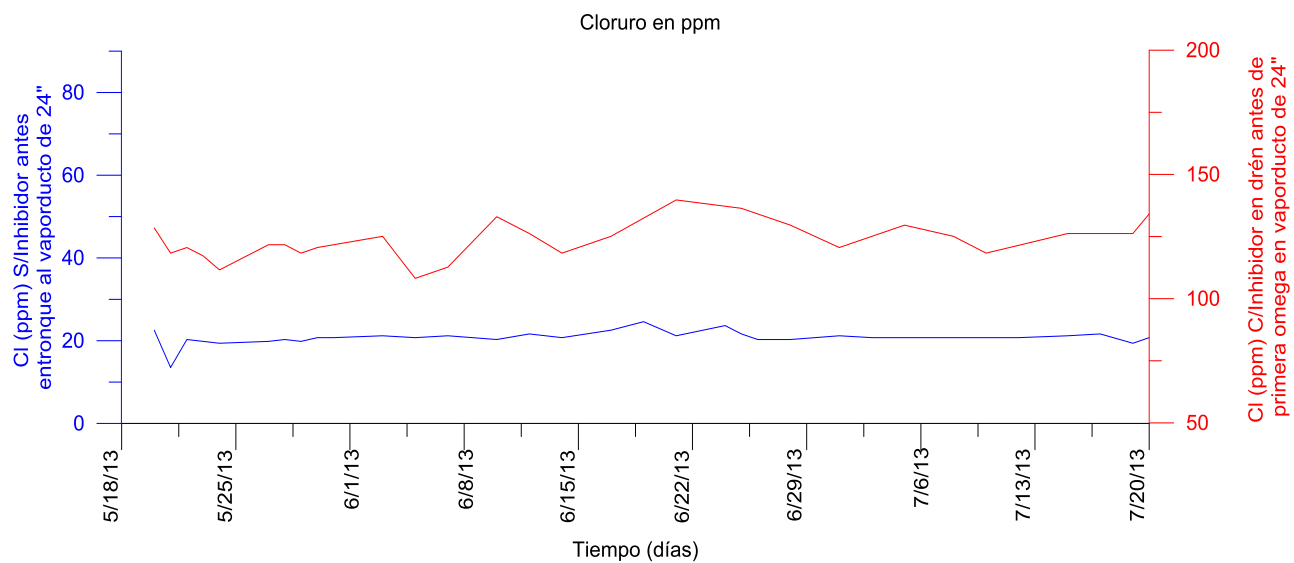
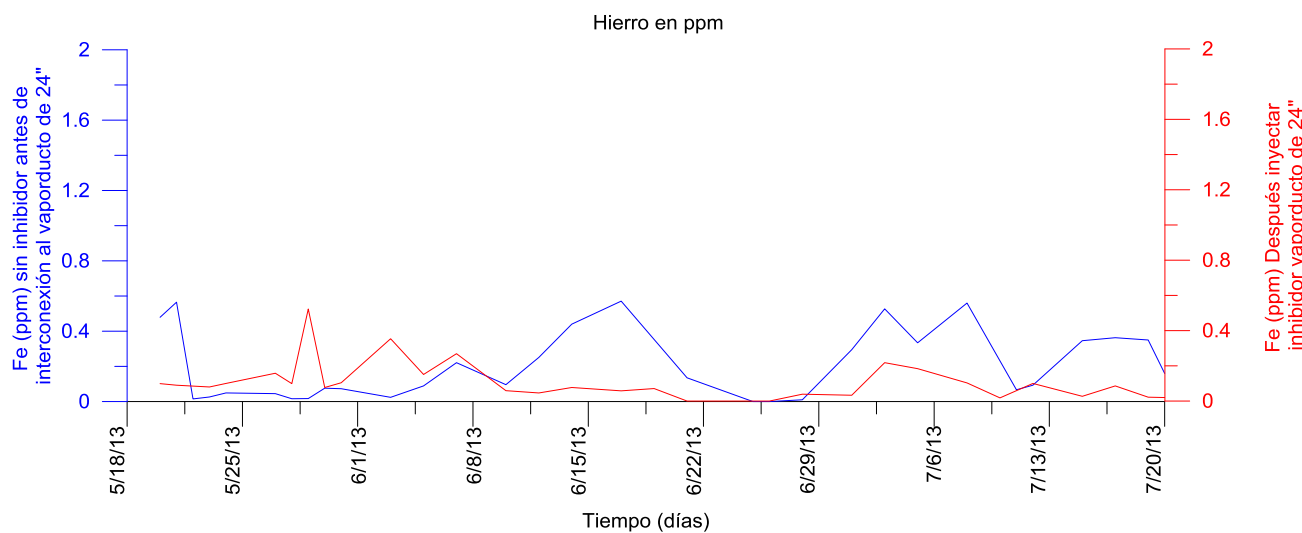


Figura 6. Monitoreo termodinámico del pozo H-43.

*Figura 7. Monitoreo de cloruros.**Figura 8. Monitoreo de hierro.*