

Estimulación ácida del pozo Az-68D en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

Magaly del Carmen Flores Armenta, Elvia Nohemí Medina Barajas, Miguel Ramírez Montes y Lilibeth Morales Alcalá

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectríficos, Alejandro Volta 655, Morelia, 58290, Mich. Correo: miguel.ramirez02@cfec.gob.mx

Resumen

El pozo Az-68D se perforó en 2006 en la zona norte del campo geotérmico de Los Azufres a una profundidad total de 1800 metros. Entre los 1244 y 1800 metros de profundidad se reportaron pérdidas de fluido de circulación con un volumen total de 8238 m³. Después de concluido, una prueba de inyección dio como resultado evidencias de daño en la formación. Durante el desarrollo del pozo se midió una producción por orificio de 50.8 mm (2") de 11 t/h de vapor a condiciones de separación de 10 bar (a) y una presión de cabezal de 10.9 bar (a), debido a lo cual no fue posible integrar al pozo al sistema de suministro de vapor. Por ello en 2008 el pozo fue sometido a un tratamiento ácido a base de HCl y HF, con lo que se logró incrementar su producción hasta 40 t/h de vapor y 118 t/h de agua a condiciones de separación de 10 bar (a), y una presión de cabezal de 18 bar (a), fluyendo por orificio de 4" de diámetro.

Antecedentes

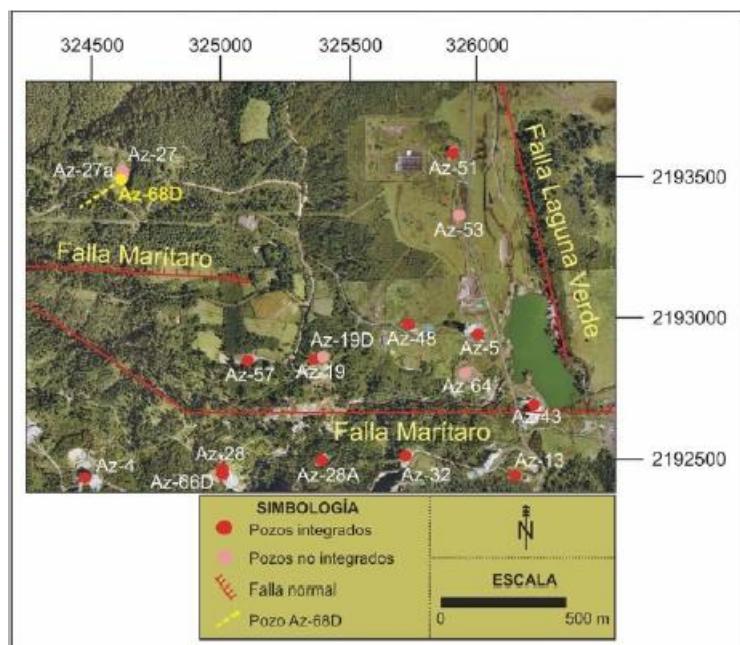


Fig. 1. Ubicación del pozo Az-68D.

Los Azufres es el segundo mayor campo geotérmico de México, con una capacidad instalada de 188 MW y más de cuarenta pozos productores en operación continua. Se localiza en la parte central del país, a unos 2800 msnm.

El pozo Az-68D se perforó en la zona norte de ese campo geotérmico (Fig. 1), específicamente en el sector conocido como Nopalito, entre el 19 de abril y el 4 de julio de 2006 a una profundidad total de 1800 m. Es un pozo desviado con rumbo S65°W con el objetivo estructural de interceptar el fracturamiento asociado a las fallas Nopalito y Marítaro, y con un desplazamiento horizontal total de casi 194 metros (Tabla 1).

Durante la perforación del agujero de 8 1/2" de diámetro (215.9 mm), a partir de los 1244 metros de profundidad empezaron a aparecer pérdidas parciales y totales del lodo de circulación, que se mantuvieron hasta alcanzar su profundidad total de 1800 metros. El volumen total de lodo perdido en ese intervalo se calculó en 8238 m³ (51,811 barriles) (Pérez *et al.*, 2007).

Después de concluido el pozo, en el mismo mes de julio de 2006 se realizó una prueba de inyección para determinar algunos datos relevantes. El resultado de la prueba arrojó un índice de inyectividad

de 1.8 toneladas por hora por bar (t/h-bar), un factor de daño (ΔP_{skin}) de 20 bar y una permeabilidad moderada de 0.9 D-m, además de obtenerse una temperatura estabilizada de 250°C. Todo ello indicó claramente la existencia de daño en la formación, lo que podría impedir el desempeño óptimo del pozo (CFE, 2006), lo cual se corroboró con la apertura y evaluación subsiguiente del mismo.

Coordenadas del cabezal	X = 324 570 m, Y = 2 193 619 m
Elevación del cabezal	Z= 2790 msnm
Inicio de la desviación	1100 m de profundidad
Zapata de la tubería de 9 5/8" de Φ	1000 m de profundidad
Cima del Liner de 7" Φ (ranurado)	1331.8 m de desarrollo
Fondo del Liner de 7" Φ (ranurado)	1795 m de desarrollo
Desplazamiento horizontal total	193.6 m
Rumbo final de la desviación	S65°W
Desarrollo Máximo	1800 m
Objetivo estructural	Fracturamiento NE-SW (Nopalito) y E-W (Falla Marítaro)

Tabla 1. Principales características del pozo Az-68D (Datos de Pérez et al., 2007).

Posteriormente el pozo fue abierto para evaluar su producción descargando hacia el silenciador, y en los meses de octubre-noviembre de 2006 se realizó su primer desarrollo. La producción medida por orificio de 2" (50.8 mm) fue de 11 toneladas por hora (t/h) de vapor y 8 t/h de agua, calculadas a condiciones de separación de 10 bar (absolutos), y una presión de cabezal 10.9 bar (a). Esta baja producción impidió que el pozo pudiera ser integrado al sistema de suministro de vapor a las unidades en operación (CFE, 2006).

Por ello, el pozo Az-68D fue programado para ser sometido a un tratamiento ácido en la matriz, con el objetivo de remover los minerales (principalmente sílice y calcita) que se pudieran encontrar en los alrededores del agujero y en las zonas de aporte, y dentro del pozo en las zonas de *flasheo* o ebullición, lo cual debería resultar en una mejor permeabilidad y capacidad de producción (Tello, 2007).

Operaciones de acidificación

La primera operación durante un proceso de acidificación (O'Sullivan and McKibbin, 1989) es el reconocimiento del pozo, bajando una tubería flexible. En el caso del pozo Az-68D la tubería bajó inicialmente hasta 1025 m de profundidad, desde donde se inyectó salmuera geotérmica a razón de 6, 8, 9.1 y 9.2 barriles por minuto (bpm, equivalentes a unas 57.2, 76.3, 86.8 y 87.8 t/h, respectivamente). La presión máxima registrada durante la inyección a 87.8 t/h fue de 9420 psig (Schlumberger, 2008).

La estimulación ácida propiamente dicha empezó con la inyección de ácido clorhídrico diluido al 10% (HCl 10%) para lo que se conoce como el prelavado, con el objetivo de disolver productos ferrosos y material carbonatado que pudiera precipitar minerales insolubles, por ejemplo CaF₂, al reaccionar posteriormente con el HF. Este prelavado funciona además como un espaciador entre el lavado principal y la salmuera geotérmica (Perry, 1994). Se empleó una relación de 50 galones de ácido por pie de desarrollo (unos 620 litros de HCl al 10% por metro de desarrollo del pozo), inyectándose a un gasto 85.9 t/h (9.0 bpm) (Schlumberger, 2008).

Inmediatamente después de la etapa de prelavado, se inyectó una mezcla de ácidos para el lavado principal del pozo. Para este caso se empleó una mezcla de ácidos de HCl diluido al 10% y de ácido

fluorhídrico (HF) diluido al 5% (HCl 10%–HF 5%). La mayor concentración de HCl con respecto al HF tiene como finalidad disolver la calcita depositada durante la etapa de producción del pozo en las inmediaciones del agujero (zona de *flasheo*), eliminando la resistencia en las paredes de la formación y el daño en sus inmediaciones. Se utilizó para el lavado la misma relación del prelavado y prácticamente el mismo gasto de inyección (84.9 t/h u 8.9 bpm) (Schlumberger, 2008).

Después de concluir el lavado, se procedió al llamado post-lavado, para lo cual volvió a utilizarse HCl al 10%. El objetivo del post-lavado es actuar como una transición o separación entre la mezcla de ácidos del lavado principal y la salmuera que después fluirá desde la formación, y reducir así la futura precipitación de minerales indeseables (Perry, 1994). El gasto de inyección del post-lavado fue también similar al del prelavado y al del lavado (84.9 t/h u 8.9 bpm) (Schlumberger, 2008).

Estas operaciones de prelavado, lavado y lavado, con las mismas concentraciones de ácidos y gastos similares se repitieron después a las profundidades de 1225, 1300, 1350 y 1525 metros, como se resume en la Tabla 2.

Profundidad (m)	Etapa	Fluido inyectado	Gasto (m ³ /h)	Presión (bar)
1025	Prelavado	HCl 10%	85.8	641.2
	Lavado principal	HCl 10%-HF 5%	83.9	647.7
	Post-lavado	HCl 10%	85.8	635.7
1225	Prelavado	HCl 10%	86.8	647.4
	Lavado principal	HCl 10%-HF 5%	83.9	639.8
	Post-lavado	HCl 10%	84.9	621.8
1300	Prelavado	HCl 10%	85.8	628.8
	Lavado principal	HCl 10%-HF 5%	84.9	642.0
	Post-lavado	HCl 10%	84.9	612.9
1350	Prelavado	HCl 10%	86.8	636.9
	Lavado principal	HCl 10%-HF 5%	84.9	646.0
	Post-lavado	HCl 10%	84.9	628.1
1525	Prelavado	HCl 10%	85.8	635.7
	Lavado principal	HCl 10%-HF 5%	84.9	634.6
	Post-lavado	HCl 10%	62.0	296.5

Tabla 2. Resumen de operaciones durante la estimulación ácida.

Finalmente se desplazó agua geotérmica para remover residuos ácidos de las tuberías. El volumen inyectado fue equivalente a 1.65 veces el volumen del lavado principal. Durante las etapas tercera y cuarta, se observó una disminución de aproximadamente 10 bar (a) en la presión del pozo, pero la presión se estabilizó y se mantuvo con el mismo valor hasta el final. El material divergente se colocó después del segundo y tercer intervalo.

La estimulación concluyó con el retiro de la tubería flexible del pozo y el cierre de la válvula maestra del pozo. Toda la operación de estimulación, desde la colocación de la tubería flexible hasta su retiro, se realizó en un solo día, abarcando casi once horas (645 minutos).

Resultados

Después de concluir la acidificación el pozo se mantuvo cerrado aproximadamente durante cuatro días, y al quinto comenzaron los trabajos de apertura por una línea de 2" de diámetro descargando al silenciador. Se dejó que el pozo fluyera por esta línea durante tres días midiéndose su producción

después y obteniéndose 27 t/h de vapor y 48 t/h de agua con una presión de cabezal de 14 bar (a). El pozo estaba regulado con la válvula de 254 mm (10") de diámetro, con 5 vueltas de apertura.

El pozo se mantuvo en estas mismas condiciones hasta el 4 de diciembre de 2008, cuando fue purgado por una línea de 12.7 mm (½"). Esto se hizo debido a que el agua que producía el Az-68D se enviaba al pozo inyector Az-52, pero éste también fue sometido a una estimulación ácida.

Después de que el pozo Az-52 volvió a estar en condiciones de operación, el pozo Az-68D fue reabierto y evaluado para determinar su capacidad máxima de producción y de esta manera conocer los resultados de su estimulación ácida. Los datos de producción de vapor se obtuvieron por el método de presión de labio; los de producción de agua se midieron a condiciones atmosféricas de separación de 0.93 bar (a) y después se calcularon a condiciones de separación de 10 bar (a). Los resultados se resumen en la Tabla 3.

Fecha	Presión de cabezal (bara)	Diámetro de orificio	Q vapor (t/h)	Q agua (t/h)	Q vapor (t/h)	Q agua (t/h)	Entalpía (kJ/kg)	
			Separación atmosférica					
11-12-2008	21.09	2"	19.57	34.94	11.81	42.70	1199.56	
15-12-2008	22.49	3"	42.91	74.98	26.20	91.69	1210.88	
17-12-2008	18.28	4"	62.37	96.29	40.49	118.17	1277.28	

Tabla 3. Valores medidos y calculados a condiciones de separación de 10 bara.

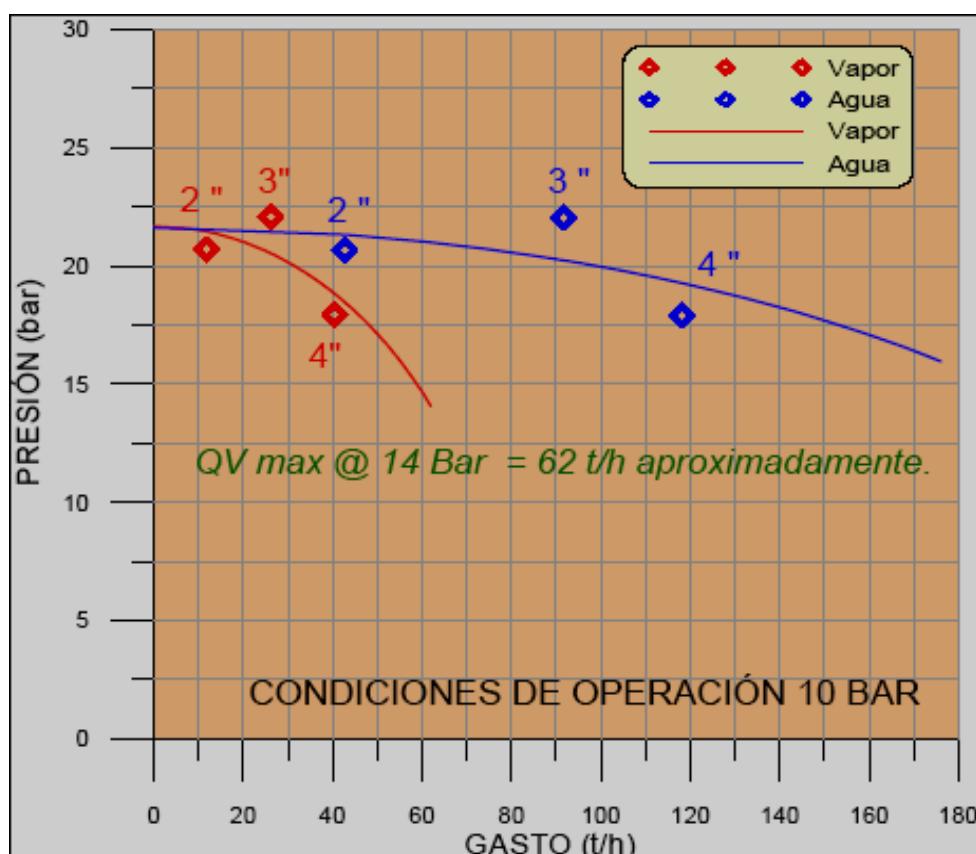


Fig. 2. Curva característica de producción del pozo Az-68D después de su estimulación ácida.

En la Figura 2 se presenta la curva característica de producción obtenida después de la estimulación ácida del pozo Az-68D y su capacidad máxima de producción.

Conclusiones

- La operación de estimulación ácida del pozo Az-68D se llevó a cabo sin ningún problema, en un lapso de 645 minutos.
- La producción del pozo antes de su estimulación, medida por orificio de 2" de diámetro y calculada a 10 bar (a) de separación, fue de 11 t/h de vapor y 8 t/h de agua, con una presión de cabezal de 10.9 bar (a), condiciones insuficientes para su explotación comercial. Después de su estimulación, se midió una producción de 40 t/h de vapor y 118 t/h de agua y una presión de cabezal de 18 bar (a), con el pozo fluyendo por orificio de 4" de diámetro.
- La capacidad máxima de producción del pozo después de su estimulación ácida alcanza las 62 t/h de vapor a 14 bar (a) de presión de cabezal, lo cual indica que el pozo obtuvo una ganancia máxima en su producción de 51 t/h de vapor, lo que refleja una mejoría del 463%.
- Tomando en cuenta esos resultados, se concluye que la estimulación ácida del pozo Az-68D fue exitosa y es altamente recomendable para pozos perforados con lodo y con fuertes pérdidas de circulación.

Referencias

- CFE, 2006. Base de datos GDManager del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Base de datos de la Subgerencia de Estudios, CFE. Inédito.
- Schlumberger, 2008. Reporte final del pozo AZ-68D. Informe preparado para la CFE. Inédito.
- O'Sullivan, M., and R. McKibbin, 1989. *Geothermal Reservoir Engineering*. Draft edition #1.
- Pérez, H., C. Ordaz, L. Reyes, E. Medina y A. Sandoval, 2007. Informe final de los resultados de la perforación del pozo Az-68D. Informe interno No. 0-2159-019-R-01. Residencia de Los Azufres-Residencia de Estudios, CFE. Inédito.
- Perry, R., 1994. *Chemical Engineer's Handbook*. International Edition, 3rd Printing.
- Tello, M., 2007. Proyecto de acidificación de los pozos Az-25, Az-36 y Az-68D del campo geotérmico de Los Azufres. Informe Interno No. DINYAC-013-2007, Departamento de Ingeniería de Yacimientos, CFE. Inédito.