

## Operación exitosa con la opción de perforación bajo balance en pozos geotérmicos

**Alberto Barbosa Gallegos**

Weatherford de México, Base Norte Reynosa, Av. Industrial San Juan Ed. 3, M-7, L-6, Parque industrial del norte, Reynosa, Tams., México, 88730. Correo: [alberto.barbosa@la.weatherford.com](mailto:alberto.barbosa@la.weatherford.com)

### Resumen

La perforación bajo balance (UDB: *under balanced drilling*) se ha empleado en los campos geotérmicos de Cerro Prieto, BC, Los Azufres, Mich., y Los Humeros, Pue., con excelentes resultados ya que ha sido posible finalizar la perforación con circulación, es decir, minimizando la pérdida de fluido de perforación, asegurando la limpieza del agujero y garantizando la máxima producción del pozo. Se han perforado alrededor de 10 pozos en esos campos, entre ellos: Az-52, Az-80, Az-83 y Az-89 en Los Azufres, 517, 518, 520D y 522 en Cerro Prieto, y H-48 y H-49 en Los Humeros. Usando el equipo bajo balance puede maximizarse la producción del pozo ya que mediante el sistema de inyección de aire y agua se alcanzan ECD (densidad equivalente de circulación) de 0.33 a 0.99 g/cm<sup>3</sup> o presiones de fondo del orden de 1000-1500 psi. Esto permite que haya circulación en el agujero en todo momento y levantar a la superficie los recortes o sólidos cortados por la barrena, lo que a su vez minimiza el empaquetamiento de estos recortes en la formación y permite caracterizar la litología con el estudio de las muestras en superficie. Un pozo perforado con la técnica de bajo balance permite que los trabajos de estimulación y fracturamiento sean más efectivos ya que el daño a la formación resulta menor que en la perforación convencional. Una ventaja adicional es que el pozo no necesariamente se debe trabajar en condición de bajo balance sino que puede perforar en condición de balance, permitiendo que no se caliente demasiado el pozo, sino sólo lo necesario, permitiendo así ligeros aportes de la formación y manteniendo controlada la temperatura de retorno en todo momento. Además, normalmente se utiliza en campo un programa de cómputo de modelado hidráulico a condiciones de estado estable, el cual permite modelar las condiciones cambiantes durante la perforación, presiones de fondo (BHP: *bottom hole pressure*), densidad equivalente de circulación (ECD: *equivalent circulation density*), cambios de temperatura, presiones en el espacio anular, etc. En cuanto a la corrosión, esta puede minimizarse mediante la inyección de inhibidores para mantenerla dentro de los parámetros de norma en todo momento. Por ello es recomendable monitorear cada cuatro horas la cantidad de hierro presente en el sistema del fluido de perforación y efectuar pruebas de laboratorio para determinar si la cantidad de inhibidor es suficiente, así como instalar testigos o anillos de corrosión en la tubería de perforación para determinar el nivel de corrosión presente. Este trabajo presenta procedimientos y resultados con el uso de esta opción tecnológica en la perforación de pozos geotérmicos.

*Palabras clave:* Perforación, pozos, UBD, ECD, densidad equivalente de circulación, daño a la formación.

## Successful operations using Under Balanced Drilling for geothermal wells

### Abstract

This paper describes the successful application of Under Balanced Drilling (UBD) methods in the Mexican geothermal fields of Cerro Prieto, BC, Los Azufres, Michoacán, and Los Humeros, Puebla. Thanks to UBD it was possible to complete wells with reduced circulation losses, assuring the cleaning of the holes and allowing maximum production in every case. Around ten geothermal wells have been drilled using UBD in those fields, among them: Az-52, Az-80, Az-83 and Az-89 in Los Azufres, 517, 518, 520D and 522 in Cerro Prieto, and H-48 and H-49 in Los Humeros. Using UBD allows maximize

production since the injection of air and water produces equivalent circulation densities (ECD) in the fluid of 0.33 to 0.99 g/cm<sup>3</sup>, and bottom hole pressures (BHP) of 1000-1500 psi. This avoids circulation losses all time and also assures the lifting of cuttings to the surface, which in turn prevents possible bit and drilling pipes trappings while allows collect cutting samples to characterize the underground lithology cut by the well. Stimulation and fracturing techniques are usually more effective in wells drilled with UBD, since the formation damage is lesser than using conventional drilling. One additional advantage is the possibility to shift to the Balance Drilling technique, allowing small heating in the well and small flows from the formation when it is deemed convenient. During drilling a steady-state hydraulic model software is used in the field, which allows predict changes in the drilling conditions, BHP, ECD, temperature, annular space pressure, and so on. Corrosion can be prevented by injecting inhibitors, for which it is recommendable to monitor every four hours the iron content in the circulation fluid and run laboratory tests to define the proper inhibitor amount. It is also convenient to place corrosion rings in the drilling pipe to test the current corrosion level. This paper presents procedures and results of the use of UBD in geothermal wells of Mexican fields.

**Keywords:** Drilling, wells, UBD, ECD, formation damage.

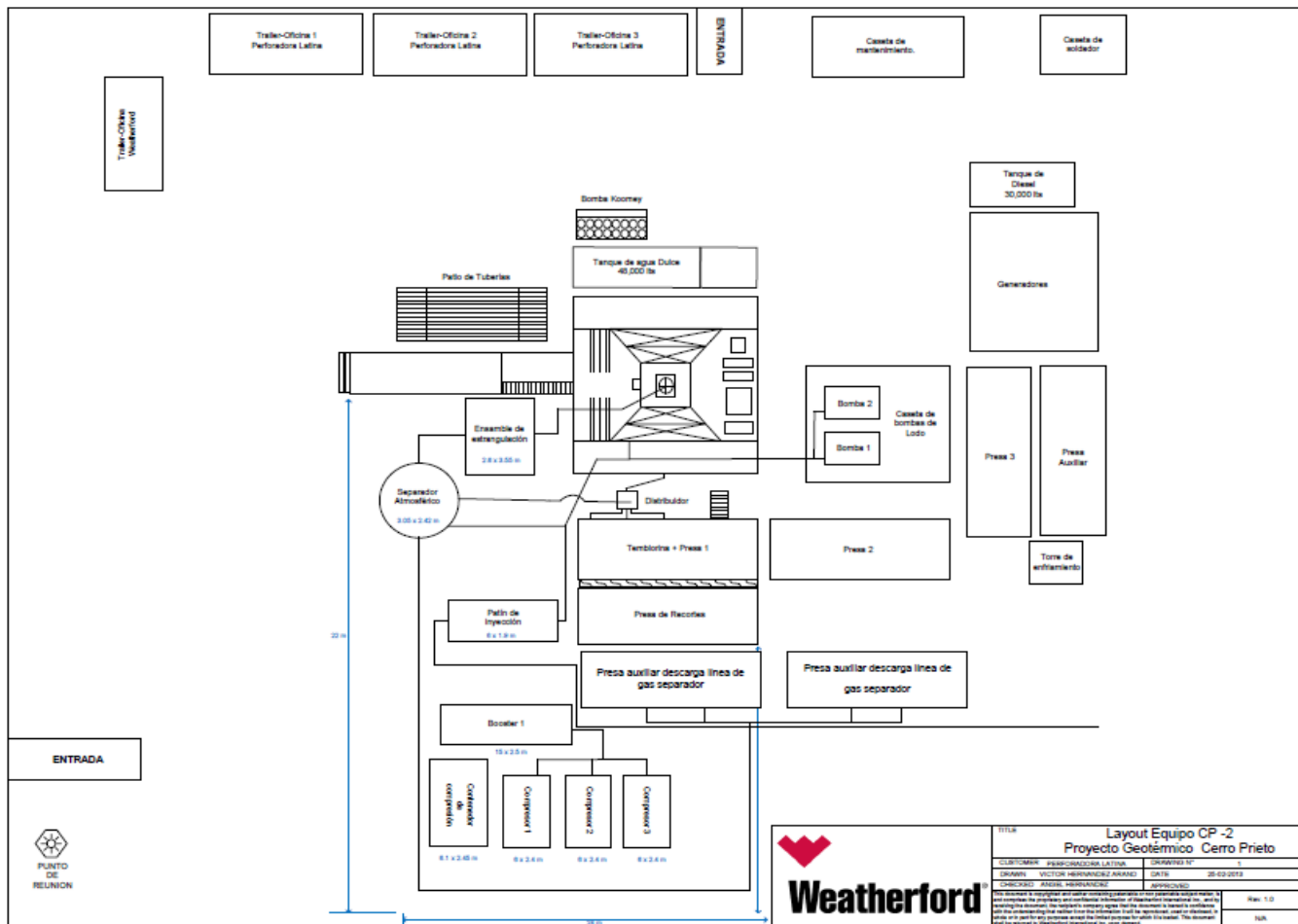
## Introducción

La técnica de Perforación Bajo Balance (*UDB: Under Balanced Drilling*) utiliza un sistema cerrado en superficie para controlar la presión en el espacio anular del agujero, en lugar de mantener el hueco abierto a la atmósfera, como se hace en la perforación convencional. La perforación bajo balance utiliza una cabeza rotatoria (RCD: *Rotating Control Device*) instalada sobre el preventor anular para cerrar el pozo en la superficie, la cual permite un mayor y mejor control del perfil de presión del pozo. Con ello se logran operaciones de perforación más eficientes ya que la cabeza rotatoria permite rotar y mover la tubería hacia arriba y hacia abajo aun con presión en el pozo. La RCD está diseñada para dirigir los recortes o sólidos cortados por la barrena y el fluido aireado hacia el Separador Bajo Balance. Por diferencia de densidades, este separador separa el aire enviándolo al cárcamo y el fluido o agua y los recortes hacia el equipo de control de sólidos, y posteriormente a las presas de fluido de perforación (ver Figura 1).

El elemento sellante de la cabeza rotatoria rota junto con los *rubbers* o hules de sello y la tubería cuando se está perforando, lo que permite hacer conexiones o viajar dentro o fuera del hueco con o sin presión en el espacio anular.

La International Association of Drilling Contractors (IADC) define la técnica UBD como la actividad de perforación que utiliza el equipo y controles apropiados para que la presión ejercida en el agujero resulte intencionalmente menor que la presión de poro, con la intención de tener aporte de fluidos de la formación en superficie.

Otra técnica que hemos empleado en la perforación de pozos geotérmicos en los campos mencionados es la llamada Managed Pressure Drilling (MPD). Esta es definida por la IADC como un proceso de perforación adaptativo para controlar el perfil de presión anular a lo largo del pozo. La intención de la MPD es evitar influjo continuo de la formación hacia la superficie. Cualquier incidente de influjo en la operación deberá ser contenido de manera segura con un proceso apropiado.



*Fig. 1. Arreglo del equipo de perforación UBD/MPD/AD en la plataforma del pozo 518 de Cerro Prieto.*

Las dos técnicas, UBD y MPD, son en realidad variantes de la técnica de perforación con aire (Air Drilling AD). Air Drilling AD es la aplicación de un sistema de un líquido aireado para disminuir la densidad del fluido de perforación. Esta técnica es ampliamente aceptada para perforar pozos geotérmicos porque aumenta la velocidad de penetración.

Y, en general, tanto la técnica de AD, como sus variantes UBD y MPD vienen siendo métodos de control de presión durante la perforación, conocida como Control Pressure Drilling (CPD).

## Ventana Operativa

Lo primero es realizar un modelado de fluido bifásico con el fin de determinar la ventana operacional en cada escenario posible, partiendo de datos del pozo como presión de fondo y temperatura. Esto permite determinar la presión correspondiente a las pérdidas por fricción, propiedades del fluido de perforación, tasa de inyección de aire y gasto de bomba óptimo para alcanzar la Densidad Equivalente de Circulación (ECD) que a su vez permita obtener tanto la condición de presión de circulación requerida como una adecuada limpieza del agujero. Ello también permite determinar los valores de presión de cabezal (WHP) necesarios para mantener una determinada presión de fondo de pozo (BHP) en la eventualidad de encontrar una presión diferente a la esperada.

En las figuras 2 y 3 se muestra una ventana operativa realizada para el pozo Az-89 del campo de Los Azufres. En la Figura 2 se ve que la ECD deseada, de  $0.60 \text{ g/cm}^3$ , se puede obtener de diferentes maneras cambiando los valores de gasto de líquido entre 300 gpm (galones por minuto) y 400 gpm y la inyección de aire entre  $20 \text{ m}^3/\text{min}$  y  $29 \text{ m}^3/\text{min}$  de aire. Para ese pozo Az-89 se estimó una presión de poro (PP) límite de  $0.594 \text{ g/cm}^3$ , es decir siempre que no se rebase esa PP la perforación se hará bajo balance.

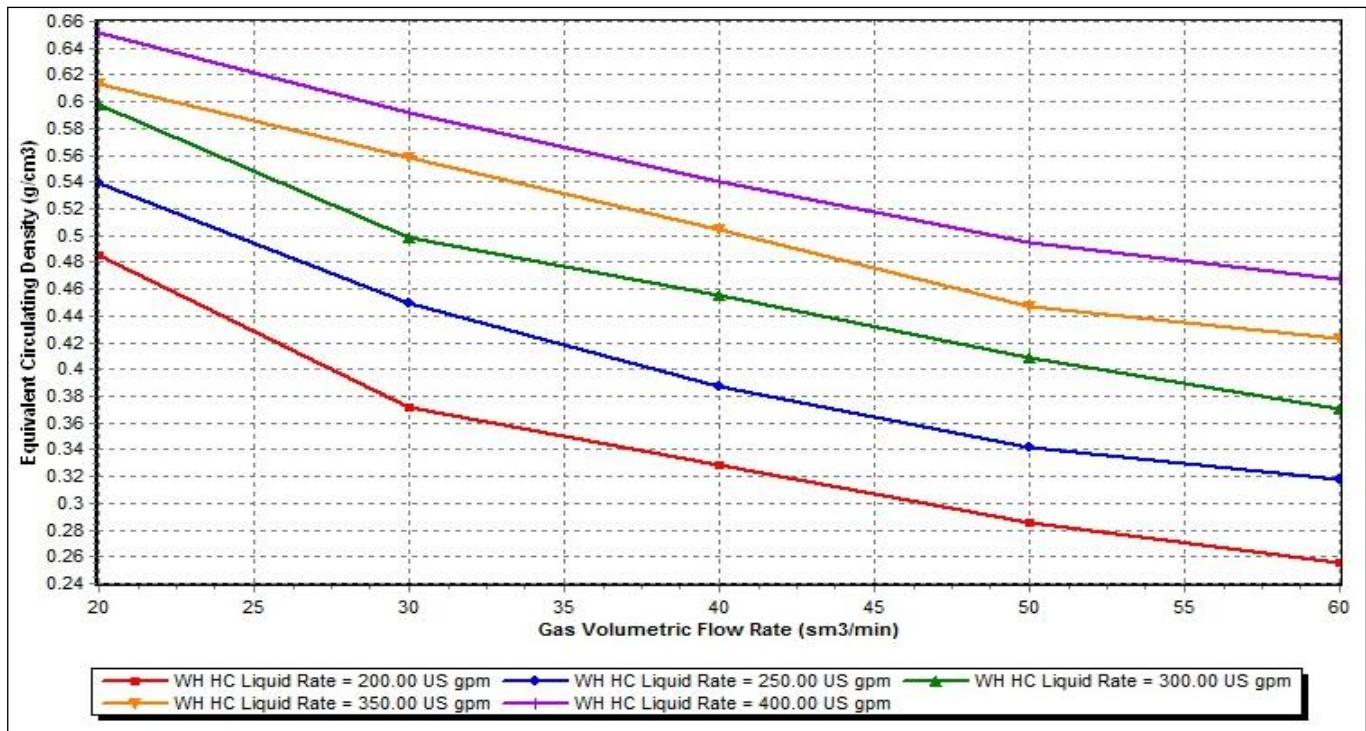


Fig. 2. Inyección de aire vs Densidad Equivalente de Circulación (ECD) en el pozo Az-89 de Los Azufres.

En la Figura 3 se observa la tasa volumétrica de influjo de agua que se producirá en diferentes escenarios. Dependiendo de los diferentes gastos de líquido y tasas de inyección de aire se generará una diferencia de presión entre la presión de fondo (BHP) y la presión de poro (PP). Entre más diferencia de presión se maneje, mayor será el volumen de influjo que ingresará al agujero.

El objetivo de la UBD a utilizar es tener una producción mínima de agua de formación de 60 gph, para mantener controlado el sistema de fluido de perforación. Así, en la gráfica de Ventana Operativa se determinó que un gasto de 300-350 gpm y una tasa de inyección de aire de  $30\text{-}50 \text{ m}^3/\text{min}$  se encuentran dentro de los límites establecidos por la ventana. Con ello se permite perforar con una Densidad Equivalente de Circulación (ECD) de  $0.59\text{-}0.63 \text{ g/cm}^3$ . Considerando que la Presión de Poro (PP) fue establecida en  $0.594 \text{ g/cm}^3$ , se estaría generando una diferencia de presión de  $0.02 \text{ g/cm}^3$ . A 1800 m de profundidad esta diferencia representa 25 psi, que permite un ingreso al agujero de unos 2-10 gpm de agua de producción.

Durante la perforación se observaron ECD de  $0.33 \text{ g/cm}^3$ , que eran menores de los programados, por lo que fue necesario variar los gastos de inyección de aire y fluido de perforación para evitar la pérdida de fluido.

## Objetivo

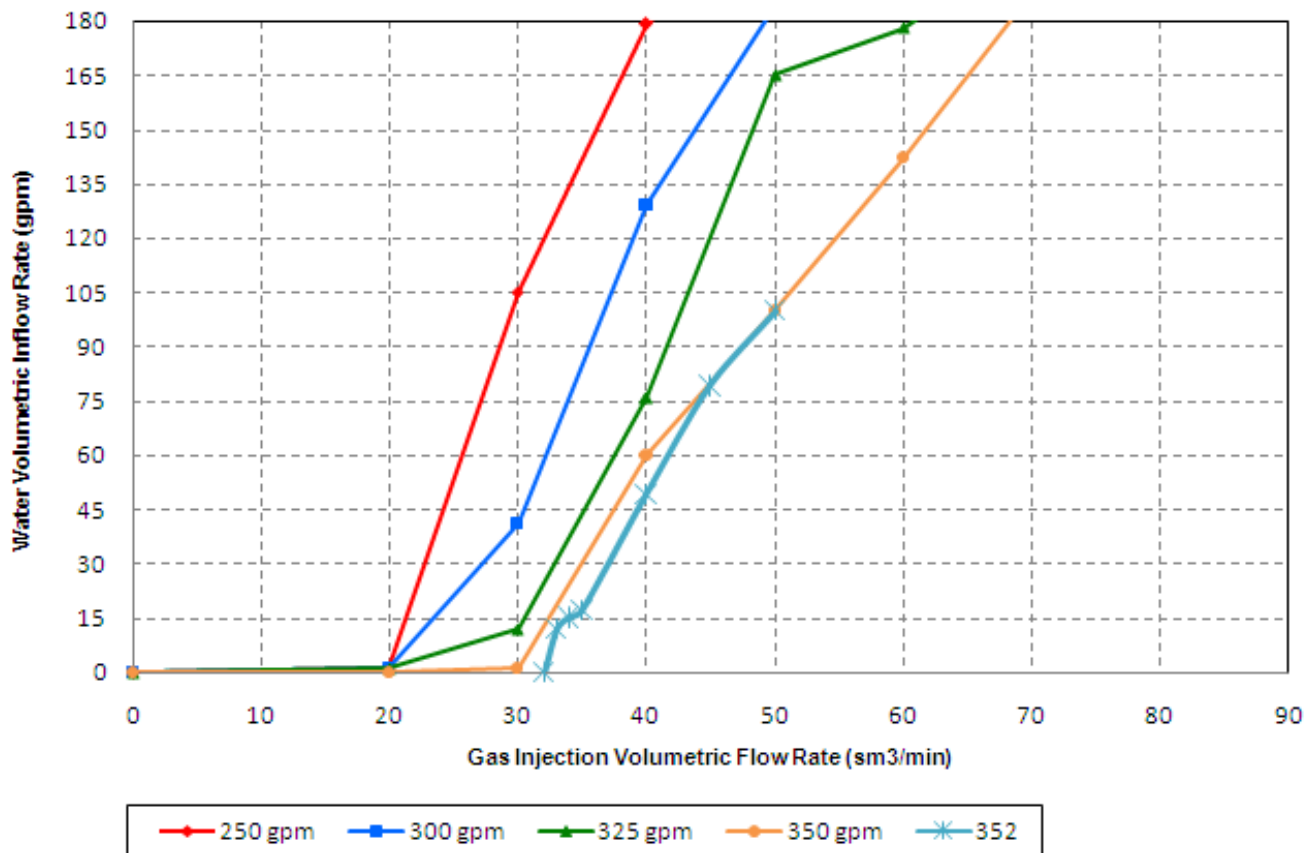


Fig. 3. Influjo en gpm vs inyección de aire en el fluido de perforación del pozo Az-89 de Los Azufres.

El objetivo de la técnica UBD/MPD/AD era finalizar la perforación del pozo en la etapa de 8 ½” de diámetro, es decir, dentro de la zona productora, hasta la profundidad final programada. Para ellos se buscó:

- Perforar en la zona productora con un fluido de dos fases (agua y aire) manteniendo una condición UBD/MPD en el agujero a fin de evitar causar daño a la formación.
- Evitar problemas como pérdida de lodo y atrapamientos de tubería.
- Perforar con un mayor ritmo de penetración para disminuir los días de perforación.
- Perforar con retorno de sólidos para poder caracterizar la formación.
- Evaluar la producción del yacimiento mientras se perforaba.

## Modelado

El proceso de modelamiento permite analizar las circunstancias y características del sistema de fluidos que se busca generar en campo. Pero una vez iniciada la operación el modelo debe calibrarse con las propiedades y características particulares reales, con el fin de validar los resultados obtenidos durante el modelado inicial. Para esto se emplea un simulador WellFlo, versión 8.3.0, que es de flujo estable (*steady state*), por lo que en la práctica deben monitorearse cuidadosamente los parámetros de operación con el fin de prever situaciones puntuales que signifiquen riesgos para la operación.

Mediante el WellFlo se determinan las condiciones de perforación bajo balance, y por tanto:



- Se evalúan relaciones de gas-líquido para determinar las condiciones de presión de fondo (BHP).
- Se definen las mínimas velocidades de líquido necesarias para determinar la capacidad de acarreo de sólidos o capacidad de limpieza de hueco. Para una sección vertical se considera una velocidad de 45 m/min y para una horizontal de 55 m/min.
- No se debe exceder el ELV (*Equivalent Liquid Volume*) del motor de la bomba de lodos.
- La relación de transporte de recortes (CTR: *Cuttings Transport Ratio*), que es otro parámetro que indica la limpieza del agujero, debe ser mayor de 0.7 en la sección vertical y mayor de 0.9 para la sección horizontal de pozos verticales.

Para el modelado se requiere alimentar al software de datos tales como estado mecánico, diámetros de tubería de perforación, gravedad específica del gas utilizado, composición del gas inyectado, trayectoria del agujero así como propiedades del fluido de perforación. De igual forma se toma en cuenta el gradiente térmico de la formación considerando el intercambio de energía calorífica de esta con el fluido de perforación.

Durante la perforación de la etapa de 8 ½" del pozo Az-89, en la Figura 4 se puede observar el comportamiento de la limpieza a una profundidad de 1554 m, perforando con un gasto de 240 gpm, con 50 m<sup>3</sup>/min de aire y una ECD de 0.36 g/cm<sup>3</sup>. La relación de transporte de recorte (CTR) es mayor de 0.7 en esta sección vertical, lo que cumple el criterio de limpieza para pozos verticales ya mencionado.

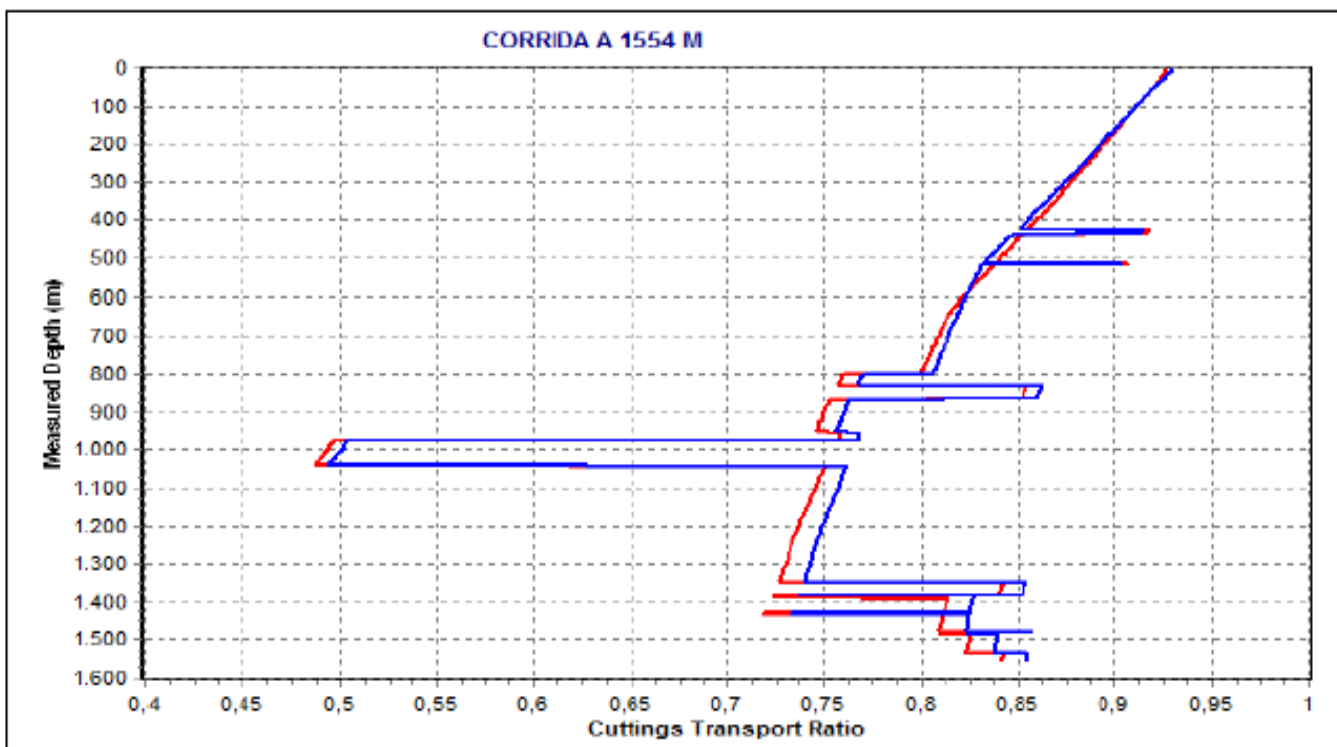


Figura 4. Comportamiento de la limpieza a 1554 m de profundidad en el pozo Az-89, con 240 gpm y 50 m<sup>3</sup>/min de aire y una ECD de 0.36 g/cm<sup>3</sup>.

## Perforación con aire

La fase gaseosa del fluido bifásico de circulación en la perforación bajo balance es aire, el cual es inyectado a presión mediante compresores y *booster*. El aire tiene un peso molecular de 29.98 mol, una

densidad de  $1.2929 \text{ kg/m}^3$  y una gravedad específica de 1. Para disminuir la corrosión en el aire se inyecta un inhibidor de corrosión Triplex compuesto de tres productos: un inhibidor formador de película sobre la tubería, un inhibidor para alta temperatura y un inhibidor por presencia de  $\text{H}_2\text{S}$ .

El mejor inhibidor de corrosión para operaciones de AD, MPD y UBD es un éster anódico de fosfato. Este inhibidor trabaja muy bien hasta en presencia de altas concentraciones de oxígeno, promoviendo la formación de un recubrimiento protector de fosfato de hierro con una barrera de hidrocarburos. La estructura molecular del éster de fosfato incluye un componente polar inicial que reacciona con cualquier superficie metálica adhiriéndose a ella, mientras que el éster apolar final forma una segunda capa protectora previniendo la corrosión.

Para evitar el proceso de picaduras (*pitting*) debido al propio inhibidor, se requiere una concentración mínima, por lo que se mantienen unas 50 ppm de fosfato residual en el fluido de perforación. Pero debe tenerse en cuenta que concentraciones bajas de éster de fosfato pueden no evitar la corrosión debido a que la película protectora está incompleta y el metal queda expuesto a picaduras.

El aire se emplea ampliamente en la perforación bajo balance debido a su bajo costo. Y con un buen programa de inhibición de corrosión se pueden cumplir los estándares de la norma NACE 1D177 que establecen mantener la corrosión por debajo de 2 libras por pie cuadrado por año ( $\text{lb/ft}^2/\text{yr}$ ).

Para maximizar la eficiencia de los inhibidores de corrosión se hacen pruebas de laboratorio en campo, para mantener el nivel de los fosfatos dentro del rango de 60-300 ppm. También se mide continuamente el contenido de hierro en el sistema, que no debe superar las 10 ppm cada 4 horas. Estas mediciones las lleva a cabo el personal especialista, quien indica si se debe agregar más o menos cantidad de inhibidor durante todo el proceso de perforación con aire.

### **Caso del pozo 518 del campo geotérmico de Cerro Prieto**

La etapa final de 8 ½” de diámetro del pozo 518 del campo de Cerro Prieto se perforó con equipo de perforación UBD/MPD. Primeramente se armó y bajó la sarta de perforación hasta reconocer la cima de cemento donde se efectuó desplazamiento y acondicionamiento del fluido del sistema con el sistema TRIPLEX de inhibición de corrosión. Luego se llevó a cabo la molienda de cemento y zapata de 9 5/8” hasta 2548 m de profundidad, reconociendo fondo perforado con barrena de 12 ¼” hasta 2550 m donde se circuló para limpieza del pozo hasta observar retornos limpios. Posteriormente se alineó el retorno del pozo a través del equipo bajo balance UBD/MPD iniciando la operación a partir de 2550 m de profundidad, reportándose a continuación los datos de los tramos de profundidad siguientes.

2550 – 2572 m: Se perfora con parámetros de inyección de 350 gpm de líquido, ECD de  $0.87 \text{ g/cm}^3$ , pero a la profundidad de 2572 m se observa pérdida total de circulación (Zona de pérdida 1).

2572 – 2607 m: Con nivel de líquido encontrado a 1239 m, se restablece circulación inyectando 200 gpm y 30 a  $55 \text{ m}^3/\text{min}$  de aire. Se continúa perforando con 200 gpm y  $55 \text{ m}^3/\text{min}$ , manejando una ECD de  $0.42 \text{ g/cm}^3$  y con circulación constante. Se acondiciona el fluido de perforación.

2607 – 2830 m: A la profundidad de 2608 m se observa pérdida parcial de fluido, se ajustan parámetros de perforación con 200 gpm, 60 a  $65 \text{ m}^3/\text{min}$  de aire y ECD de  $0.36 \text{ g/cm}^3$ , manteniendo circulación constante (Zona de pérdida 2).

2830 – 2917 m: Se perfora con 200 gpm y 65 m<sup>3</sup>/min de aire. Al llegar al metro 2831 se observa pérdida de circulación, y se ajustan parámetros a 200 gpm y 70 m<sup>3</sup>/min de aire, generando una ECD de 0.32 g/cm<sup>3</sup> y se continúa la perforación (Zona de pérdida 3). Se acondiciona fluido de perforación.

2917 – 2950 m: Perfora con gastos de inyección de 200 gpm de líquido y 65 m<sup>3</sup>/min de aire. Al perforar el metro 2918 se nota pérdida parcial de circulación por lo cual se ajustan parámetros con 180 gpm y 70 m<sup>3</sup>/min de aire generando una ECD de 0.30 g/cm<sup>3</sup>. (Zona de pérdida 4). Se restablece circulación constante y se perfora hasta la profundidad programada 2950m.

Como se observa de la descripción previa, mediante el equipo bajo balance fue posible ajustar los parámetros de caudal de inyección de aire y lodo para alcanzar una presión de fondo BHP o densidad equivalente de circulación ECD que permita la circulación en el agujero pero disminuyendo la invasión de sólidos y maximizando la producción.

## Conclusiones

Además de mantener sin problemas la recolección de muestras de canal de la roca atravesada, puede concluirse que las principales ventajas de la perforación bajo balance UBD/MPD en los campos de México donde se ha aplicado son las siguientes.

### Disminución del tiempo perdido por pérdidas de circulación, y consiguiente aumento en la velocidad de penetración

Al terminar de perforar la zapata se continúa la perforación hasta encontrar una zona de pérdida de fluido de perforación, procediendo a levantar la sarta a la zapata para tomar un nivel de fluido en el pozo mediante el Ecómetro. Este, mediante un disparo generado por nitrógeno y analizado por un software, determina el nivel de fluido. Con esta altura de fluido en el pozo se determina la presión de fondo (BHP), y con este dato se simulan mediante los gastos de inyección de aire y fluido de perforación con los que se puede circular el pozo, disminuyendo la pérdida de lodo y aumentando el ritmo de penetración de 10-15 m/h. En la Figura 5 se presenta la gráfica de profundidad vs tiempo para el pozo 518 de Cerro Prieto, notándose que se tuvo un avance promedio de 100 metros diarios.

### Toma de *survey* para control direccional

Durante las experiencias iniciales en los pozos Az-89 (Los Azufres) y H-49 (Los Humeros) hubo problemas para la toma de *survey* para tener control direccional del pozo. Se utilizaba la herramienta de pulsos, teniendo fallas continuas al no lograr tomar el *survey*. Esto daba lugar a tiempos no productivos ya que era necesario efectuar viajes a la zapata una vez perforada una cantidad de metros y bajar una varilla para tomar el *survey* para posteriormente empezar nuevamente a circular el pozo. Posteriormente se planteó el uso de la herramienta electromagnética para toma de *survey*, obteniendo excelentes resultados al disminuir notablemente los tiempos no productivos.

### Control de corrosión

La adición de inhibidores en el fluido de perforación permite controlar la corrosión y mantenerla dentro de los niveles máximos de la norma (<2 lb/ft<sup>2</sup>/yr). Los niveles de hierro presentes en el sistema deben monitorearse antes de iniciar la perforación bajo balance, así como cada 4 horas para verificar que esos niveles no sean mayores de 10 ppm. De igual forma se monitorea el nivel de fosfatos cada 4 horas para verificar que se tiene la dosificación correcta en el sistema de fluido de perforación (60-300 ppm).



De igual forma, al inicio de la perforación se instalan anillos de corrosión o cupones en la sarta de perforación. Los anillos son pesados antes de colocarse y se registra el dato. Al concluir la perforación se retiran y se pesan de nuevo para verificar que el desgaste por corrosión esté dentro de la norma. Se pueden instalar varios anillos, pero uno deberá colocarse en las lingadas inferiores y otro cerca de la superficie para verificar con más precisión el comportamiento de la corrosión.

En la Tabla 1 se reportan los datos de anillos de corrosión en el pozo 518 de Cerro Prieto. Se observa que en el primer anillo testigo la corrosión es superior a la norma, pero que en todos los demás está dentro de norma, lo que se considera normal ya que al inicio se está iniciando la inhibición del sistema a la corrosión. Otro punto importante es mantener el PH del fluido entre 10-11.

| # Anillo | Ubicación   | Fecha de Entrada | Hora de Entrada | Peso inicial | Fecha de salida | Hora de Salida | Peso final   | Total de horas | Tasa de corrosión |
|----------|---|------------------|-----------------|--------------|-----------------|----------------|--------------|----------------|-------------------|
| 30765    | Entre la 1ra y 2da lingada a 144.82 mts             | 24-03-2013       | 09:45           | 79.624 2gr.  | 28-03-2013      | 16:00          | 77.5 445g r. | 102.15 hrs.    | 5.1lb/ft2/año     |
| 30790    | Entre la lingada 85 y 86 a 2546mts arriba de la NRV | 24-03-2013       | 10:20           | 79.638 0gr.  | 27-03-2013      | 09:20          | 79.2 057g r. | 71 hrs         | 1.54 lb/ft2/año   |
| 30798    | Entre la lingada 85 y 86 a 2546mts arriba de la NRV | 27-03-2013       | 09:25           | 79.847 0gr.  | 28-03-2013      | 10:10          | 79.7 163g r. | 24.45 hrs      | 1.35lb/ft2/año    |
| 30807    | Entre la lingada 84 y 85 a 2505.4 mts               | 30-03-2013       | 13:00           | 77.444 9gr.  | 31-03-2013      | 14:20          | 77.4 250     | 25.2 hrs       | .193 lb/ft2/año   |

*Tabla 1. Comportamiento de la corrosión en el pozo 518 de Cerro Prieto, según los anillos colocados en la sarta de perforación durante la UBD.*