

SISTEMA DE FLUIDO DE PERFORACIÓN DE BAJO ECD INCREMENTA EL ALCANCE DE LA PERFORACIÓN DE POZOS PROFUNDOS, ALTA PRESIÓN/ALTA TEMPERATURA CON VENTANA DE LODO REDUCIDA EN LA CUENCA SUBANDINA DE BOLIVIA

Claudio Balda / Pluspetrol S.A. / cbalda@pluspetrol.net

Horacio Piagentini / Pluspetrol S.A. / hpiagentini@pluspetrol.net

Gabriel Dordoni / Pluspetrol Bolivia Corporation / gdordoni@pluspetrol.net

Enrique Pulido / Halliburton / enriqueesteban.pulido@halliburton.com

Osvaldo González / Halliburton / osvaldoenrique.gonzalez@halliburton.com

SINÓPSIS

Por largo tiempo, los fluidos OBM (Oil Base Mud) convencionales han sido empleados en la perforación de pozos en la cuenca Subandina de Bolivia debido a sus ventajas en estabilidad de paredes y resistencia a ambientes de alta presión y alta temperatura, siendo la mejor opción disponible para la perforación de pozos profundos HPHT (High Pressure-High Temperature). Sin embargo, la perforación de tramos extensos, una ventana angosta de presión de poro y gradiente de fractura, combinado con diámetros de perforación reducidos y limitaciones en los equipos de superficie, requirieron la aplicación de un fluido de perforación capaz de alcanzar la densidad programada con un perfil reológico optimizado.

Para enfrentar este problema, un fluido de perforación OBM especial libre de arcillas organofílicas fue desarrollado para alcanzar el equilibrio entre baja reología y suspensión del material densificante en condiciones de alta presión, alta temperatura y alta desviación de pozo.

Posterior al éxito de un primer pozo de 6100mMD de profundidad, en este caso de estudio se alcanzó una profundidad de 6802mMD / 6612mTVD – de los pozos más profundos perforados en Bolivia – con ~~una sección~~ secciones de pozo de: 5197m de cañería de 7.5/8”, 1279m de cañería de 5” y 326m 4.1/8” OH (Open Hole) en los que se mantuvo los parámetros de trabajo según programa y dentro de la capacidad operativa del equipo de superficie.

El principal reto que se debió enfrentar fue alcanzar la limpieza efectiva del hoyo con valores controlados de ECD (Equivalent Circulation Density) y un plan direccional agresivo. Un caudal y perfil reológico optimizados permitieron la perforación según programa y una limpieza de pozo eficiente en condiciones de alta desviación 47°incl, ambientes de alta presión y temperatura +366°F (185°C) con una densidad del fluido de hasta 17.3ppg (SG 2.07).

El resultado de la perforación de este pozo profundo HPHT con configuración Deep-Slim-Hole (Pozo Profundo de Diámetro Reducido) empleando este nuevo fluido de perforación de emulsión inversa de bajo ECD será presentado en este documento. Registros operativos de la presión de circulación, tasa de penetración y propiedades del fluido son revisados y comparados con pozos vecinos perforados con el uso de fluido convencional. Este nuevo sistema de fluido de bajo ECD representa una herramienta probada para incrementar el alcance de la perforación de pozos profundos, con diámetros reducidos, donde los sistemas convencionales adicionarían limitaciones para alcanzar el objetivo del proyecto. La aplicación de modelos hidráulicos patentados y soporte continuo de laboratorio fueron cruciales para el éxito del pozo.

INTRODUCCIÓN

Selección del Fluido de Perforación

La aplicación de fluidos de emulsión inversa convencionales en la perforación de pozos HPHT profundos en el campo Tacobo ha llevado a escenarios operacionales límites debido a la sobrepresión del campo combinado con pequeño margen entre la PP (Presión de Poro) equivalente de 15.0ppg (SG 1.80) y el GF (Gradiente de

Fractura) 17.5-18.9ppg (SG 2.10-2.26). Esto incluye admisión severa al momento de circular el pozo y escenarios de control de influjos al tener el pozo estático. ~~Esto ha obligado~~ Por lo cual se debió a mantener limitaciones estrictas en la tasa de bombeo y en la densidad y reología del fluido.

Enfrentar estos problemas operacionales en la perforación de pozos HPHT altamente desviados pone en riesgo la integridad del pozo, el equipo de superficie y aún más importante, la seguridad del personal. Ante este escenario, la aplicación de un fluido de perforación optimizado OBM de bajo ECD resultó la mejor opción técnica y económica para la perforación de estos nuevos pozos propuestos con mayor exigencia que los ya perforados con el sistema convencional.

El fluido OBM de Bajo ECD fue seleccionado para esta aplicación debido a sus excelentes resultados controlando el ECD en proyectos ~~previos~~ costa afuera como el Golfo de México y Mar del Norte en Noruega. ~~Este fluido es el resultado de una personalización profunda de los fluidos de emulsión inversa libres de arcillas organofílicas, cuya tecnología ha sido probada por más de 16 años, con innumerables éxitos operacionales.~~

Comentario [RAC1]: NO SE ENTIENDE MUY BIEN ESTA FRASE- YO LA ELIMINARIA

Antecedentes con el Sistema de Bajo ECD en Pozos del Campo

El primer pozo perforado en el campo con este sistema de lodo de bajo ECD fue el SID-X1 Re, pozo vertical de 6100m, re-entry del original perforado en la década del 80 entubado hasta 3200m. Para tener la integridad requerida, se debió correr y cementar cañería combinada de 7.5/8" (6.54" ID) + 1780m 7in (6.05" ID) hasta 4860m y ~~recién~~ luego perforar 1240m con trépano 6" hasta 6100m, profundidad final del proyecto (ver Imagen N°1) . Esta fase de interés del proyecto, que fue exigente en cuanto a condiciones de perforación, control de verticalidad y control de pozo, fue perforada según programa con 326°F BHST (Bottom Hole Static Temperature), una densidad de lodo de 16.0ppg (SG 1.92), 150gpm y una presión de circulación de 3500psi. Con el buen rendimiento y resultados alcanzados, se procedió a la planificación del siguiente pozo, también de configuración Deep-Slim-Hole, pero de mayor exigencia técnica en temperatura, trayectoria, condiciones hidráulicas y operaciones de control de pozo.

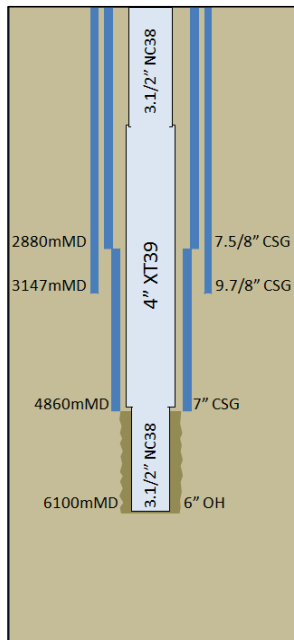


IMAGEN N°1 – Esquema mecánico y sarta de perforación pozo Antecedente

Perforación Pozo TCB-X1001 St – Pozo en Estudio

El pozo tuvo una configuración programada 9.5/8in CSG + 7.5/8in LNR + 6.1/4in OH, con una PF (Profundidad Final) de 6500mMD y 6280mTVD (ver Imagen N°3). Por condiciones de integridad, se decidió correr 7.5/8in tieback y por requerimiento de Geología incrementar el alcance del proyecto a una PF de 6802m que fue perforada con trépano 4.1/8". La ejecución de estas dos contingencias in-place junto a otros factores no programados llevaron al límite las condiciones de perforación.

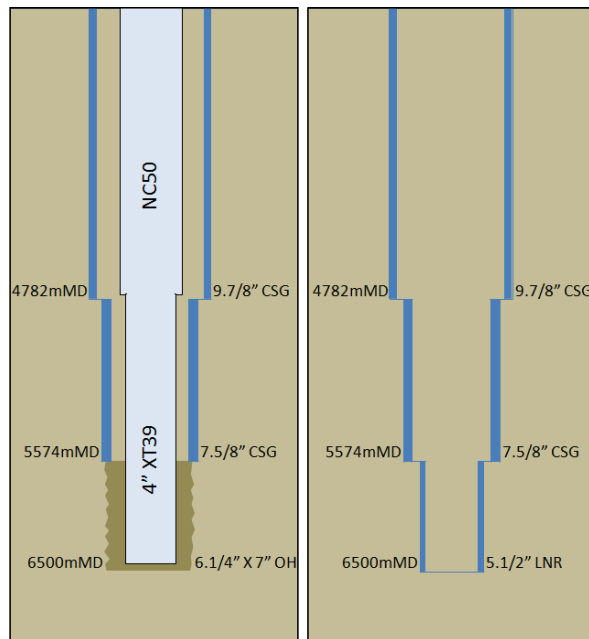


IMAGEN N°2 –Esquema mecánico y sarta de perforación programados

DESARROLLO

Química del Fluido y Propiedades

El fluido OBM de Bajo ECD está basado en la tecnología de los fluidos de emulsión inversa libres de arcillas organofílicas que permiten controlar el perfil reológico del fluido de perforación. El mismo exhibe un comportamiento de adelgazamiento al ser sometido a altas tasas de corte pero sin perder ~~la reología~~ propiedades reologicas en las bajas tasas de corte, previniendo así la decantación de los recortes y barita del fluido. Sumado a esto, este fluido es capaz de formar una estructura de gel competente e igualmente frágil que mantiene los sólidos en suspensión en condiciones estáticas. Estos elementos son los que le confieren las características de bajo ECD a este fluido.

Estas características son posibles al eliminar todas las arcillas y lignitos organofílicos del fluido (usados para control de filtrado y reología), y sustituyendo los mismos con polímeros organofílicos, combinaciones patentadas de ácidos grasos y una mezcla específica de materiales de suspensión. ~~La sinergia de estos elementos manteniendo unos rangos específicos de relación aceite/agua (OWR) y sólidos de baja gravedad (LGS).~~ La Tabla N°1 muestra los elementos básicos de un fluido de emulsión inversa convencional y uno de bajo ECD LE-IEF:

Comentario [RAC2]: ESTA FRASE CARECE DE SENTIDO

OBM – CONVENCIONAL	OBM – BAJO ECD
Emulsificante Primario	Emulsificante/Humectante
Emulsificante Secundario	
Humectante	
Arcilla organofílica	Paquete de suspensión
Lignito Organofílico	Controlador de filtrado polimérico
Diésel	Diésel
Modificador reológico	Modificador reológico
Cal Hidratada	Cal Hidratada
Agua	Agua
Barita	Barita
Cloruro de Calcio	Cloruro de Calcio

TABLA N°1 – Elementos básicos de un fluido de emulsión inversa

Una característica remarcable de este fluido es que usa barita API (American Petroleum Institute), convirtiéndolo en una opción económica y logísticamente eficiente debido a la fácil disponibilidad de dicho material densificante. La química interna del fluido permite el uso de este material sin comprometer las características de bajo ECD ni incrementar el riesgo de su decantamiento. Esto resulta en una ventaja operacional comparado con otras opciones de fluidos con bajo ECD disponibles ~~en el mercado~~ actualmente basados en barita ultrafina u otro tipo de material densificante (hematita, tetraóxido de manganeso, galena, entre otros).

Para la construcción del pozo en estudio fue necesario optimizar la formulación del fluido para poder alcanzar el rango de propiedades específicas del proyecto que pudieran proveer una limpieza efectiva del hoyo y control del ECD sin comprometer los parámetros de perforación como la tasa de bombeo o la presión máxima de funcionamiento de los equipos de superficie. Las propiedades programadas se detallan debajo en la Tabla N°2:

PROPIEDADES PROGRAMADAS		
DENSIDAD	ppg	15.8 – 16.7
VP	cP	18 – 40
PC	lb/100ft ²	12 - 25
R6/R3	cP	>7/>6
TAU 0	lb/100ft ²	>5
FILTRADO HTHP	mL/30min	<5 @ 300 F

TABLA N°2 – Propiedades programadas OBM – Bajo ECD

Simulaciones Hidráulicas

Para validar las capacidades de bajo ECD se desarrolló un modelo detallado de simulación hidráulica que incluye los efectos de la presión y temperatura sobre las propiedades del fluido, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, todo amalgamado en un robusto paquete hidráulico para modelaje computarizado. Este modelo permitió el cálculo del ECD bajo las condiciones más severas de perforación, con la máxima densidad y máximo caudal programado.

Densidad de Lodo – Presión de Influjo No Programada

La profundidad final de perforación, el límite de los equipos de superficie, en conjunto con la ventana de lodo, significó que se debía ajustar la densidad ~~de lodo~~ a un máximo programado de 16.5ppg. Con el avance de la perforación direccional 6.1/4” OH, en 5800m surgió el primer evento no programado: se debió controlar un influjo en una lutita con microfracturas rellenas de calcita con una presión de poro estimada en 16,800psi (17.0ppg) que además admitía lodo con un ECD de 17.4ppg. Se definió continuar la perforación en bajo balance con una densidad ~~de lodo~~ de 16.6ppg (menor que la PP 17.0ppg) y un ECD de 17.7ppg con el objetivo de reducir el riesgo por admisiones severas (ver Imagen N°3). Una vez mejorado el sello de esta microfractura hasta 18.1ppg a través tratamientos stress-gage, se incrementó la densidad del sistema a 16.8ppg (18.1ppg ECD) con el objeto de mejorar la operación durante las maniobras: reducir tiempo, ~~y~~ volumen de baches y

~~contaminados~~contaminación del fluido. Esta situación no programada incrementó el desafío para el sistema de lodo en lo que refiere capacidad de sostén de material densificante, ya que además fue acompañado con un incremento de la relación O-W (aceite-agua) que redujo la reología para compensar el incremento de sólidos del sistema. Con esta densidad se alcanzó 6480mMD (6297mTVD), profundidad donde ocurrió el segundo evento no programado, donde se debió controlar un nuevo influjo, esta vez de 18,800psi (17.5ppg), debiendo incrementarse el peso del lodo hasta 17.2ppg (18.4ppg ECD). Este último incremento de densidad significó una admisión de 570bbl de lodo, que ~~de manera parcial~~ fue devuelto parcialmente por efecto ballooning una vez apagadas las bombas durante la maniobra. Controlado el influjo y normalizada la admisión, se procedió a asegurar la integridad del pozo corriendo y cementando liner 5" hasta 6476mMD.

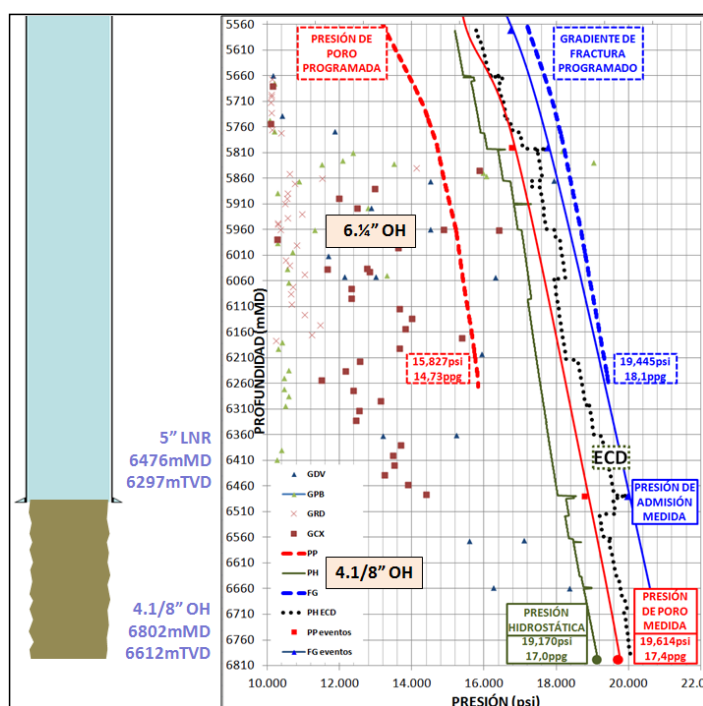


IMAGEN N°3 – Ventana de lodo programada y Ventana de lodo real

Contingencias In Place – Configuración Deep-Slim-Hole

Corrido el Liner 5" en la profundidad final del proyecto, por requerimiento de Geología, se continuó la perforación con 4.1/8" OH hasta 6802mMD. Esta fase de configuración Deep-Slim-Hole, con 5197m-7.5/8in CSG corrido para alcanzar la integridad requerida del pozo, 5" LNR en 6476m y 4.1/8in OH hasta 6802m, fue perforada con sarta combinada 5150m 4" y 1600m 2.7/8" HT-Pac (ver Imagen N°4). El nivel de exigencia hidráulico de esta fase fue mayor que la anterior, ya que además de la profundidad alcanzada de 6802mMD, que incluyó 326m de 4.1/8in OH, las condiciones de reservorio incrementaron hasta una presión de poro estimada en 19,600psi (17.4ppg) que significó continuar perforando en bajo balance con una densidad de lodo de 17.0ppg.

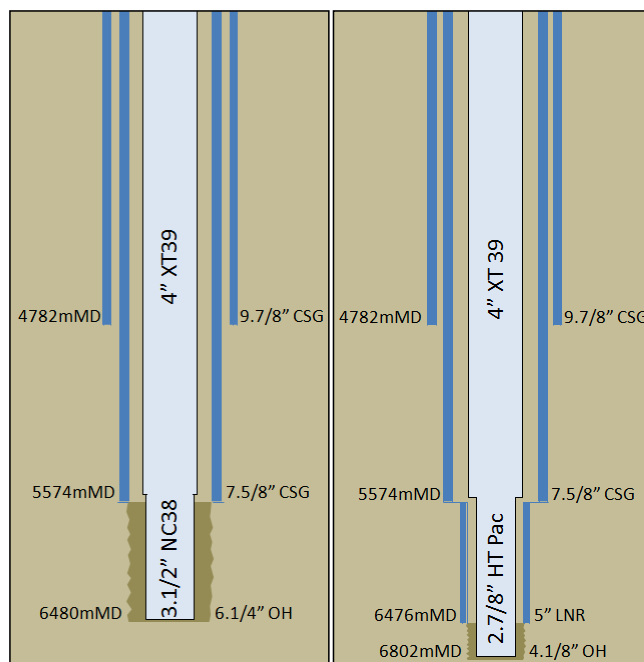


IMAGEN N°4 –Esquema mecánico ejecutado

La operativa que se siguió fue la misma de la fase anterior, pero con el beneficio de contar con el zapato 5” con un tramo de pozo abierto menor. Los parámetros de perforación con los que se trabajó fueron limitados, caudal de 75 a 95gpm y rotación de 75-85rpm. La SPP (Presión del Stand Pipe) se la mantuvo entre 4500-4800psi, pudiéndose observar el comportamiento predicho por los technical papers de hidráulica en pozos slim hole en donde la presión total del sistema es función de la rata de bombeo y velocidad rotación de la sarta (ver Imagen N°5).

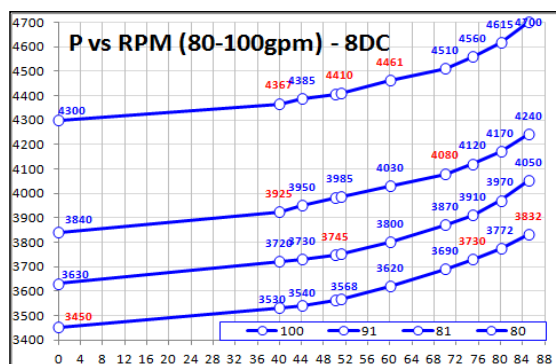


IMAGEN N°5 - Curvas Presión (psi) vs Rotación (rpm) vs Caudal (gpm)

RESULTADOS

Comparación de ventanas operativas

Los resultados del fluido LE-IEF (OBM de Bajo ECD) se muestran a continuación, comparando los mismos con los resultados de un fluido OBM Convencional de la misma densidad.

La información de reología proviene de un pozo previamente perforado en el campo. Un resumen de los resultados se presenta a continuación:

		OBM Bajo ECD	OBM Convencional
DENSIDAD	sg	17.0	17.0
VP	cp	42	80
PC	lb/100ft2	12	27
R6/R3	cp	9/8	10/9
TAU 0	lb/100ft2	7.96	6.75
FILTRADO HTHP	ml/30min	3.6	2.8

TABLA N°3 - Propiedades p/simulaciones hidráulicas – Bajo ECD y Convencional

Sistema de Fluido	SECCIÓN 6.1/4" OH				SECCIÓN 4.1/8" OH			
	CAUDAL		ECD		CAUDAL		ECD	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
IEF Bajo ECD	100	170	18.00	18.3227	45	805	18.50	19.330
IEF Convencional	100	105	18.457	18.5050	45	55	19.05	19.3025

TABLA N° 4 - Resumen de Reporte Hidráulico – OBM – Bajo ECD y Convencional

Comentario [RAC3]: REVISAR VALOR

Comentario [RAC4]: REVISAR ESTOS VALORES

Estos cuatro escenarios ilustran las condiciones geométricas del pozo en estudio y densidad real del fluido de perforación para las secciones de 6.1/4" y 4.1/8" OH, comparando los valores de ECD para los diferentes perfiles reológicos usados según sea el fluido OBM convencional u OBM bajo ECD.

La ventana operacional optimizada con el uso del fluido de Bajo ECD muestra que la presión dinámica en el fondo del pozo se mantiene por debajo del gradiente de fractura para ambas secciones, resultando como única limitante la presión máxima de bombeo de los equipos de superficie. Estas condiciones operacionales sirven para mitigar el riesgo de pérdida de circulación por fracturas inducidas. Además, la nueva ventana operacional permite cierta tolerancia en la tasa de bombeo para la perforación sin comprometer la estabilidad del pozo.

En el caso del fluido de emulsión inversa convencional, la ventana de ECD arroja una tasa de bombeo baja de 45-55gpm. Cualquier variación en las presiones del pozo o tasas de bombeo resultará en el fracturamiento de la formación y escenarios de pérdida de circulación.

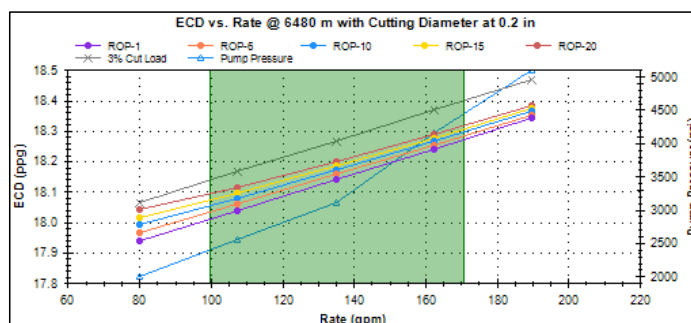


IMAGEN N°6 - Ventana operativa perforación – 6.250" OH @ 6480m – OBM Bajo ECD

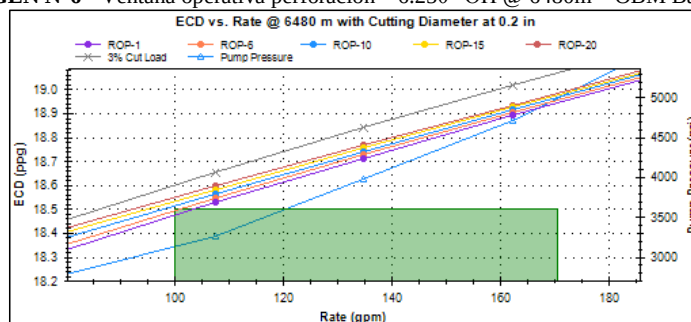


IMAGEN N°7 - Ventana operativa perforación – 6.250" OH @ 6480m – OBM Conv.

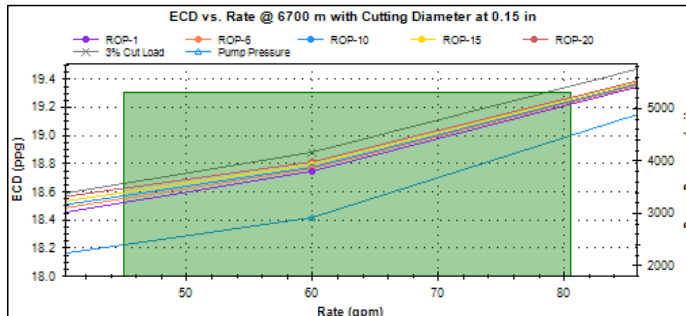


IMAGEN N°8 - Ventana operativa perforación – 4.125” OH @ 6802m – OBM Bajo ECD

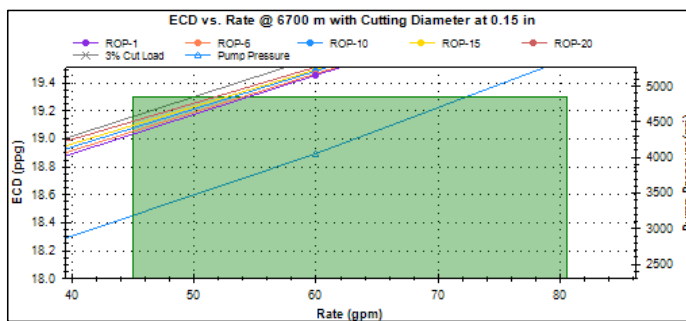


IMAGEN N°9 - Ventana operativa perforación – 4.125” OH @ 6802m – OBM Conv.

Beneficios del Sistema

Tanto en la perforación de la fase 6.1/4 como 4.1/8” OH, fue crítico que el sistema de lodo tuviera un perfil reológico optimizado. Este perfil permitió trabajar en la fase 6.1/4 y 4.1/8” OH con los caudales requeridos para la limpieza de pozo sin superar la presión límite de trabajo de los equipos de superficie. En la fase 6.1/4” OH en promedio se trabajó con 160gpm-4,000psi-50rpm (2.30ft/s en 7.5/8 CSG); y en la fase 4.1/8” OH se trabajó con 80gpm-4,000psi-80rpm (1.15ft/s-7.5/8 CSG) manteniéndose siempre dentro de los valores límites de los equipos de superficie (4,900psi). Luego, al incrementar la densidad de lodo, se alcanzó valores de 4400-4800psi en ambas fases. Este sistema también permitió que se perforara con un estrecho equilibrio entre el ECD, PP y GF, en condiciones de bajo balance sin ocasionar pérdidas masivas de lodo. Este beneficio se observó de manera más marcada en la fase 6.1/4” en la que se tuvo 906m de extensión sección de pozo abierto con puntos de influjo y admisión simultáneos en 5800 y 6476mMD. Durante esta fase, la distribución de la pérdida de carga en promedio fue de 2600psi (65%) en la directa y 1400psi (35%) en el espacio anular, con un ECD de 18.3ppg. Durante la fase 4.1/8” OH, con las mismas condiciones de densidad y reología, la distribución aproximada fue de 2200psi (46%) en la directa y 2600psi (54%) en el espacio anular, es decir, un ECD de 19.3ppg.

Comparación con Sistema OBM Convencional

Utilizando un fluido OBM convencional, se hubiese tenido condicionantes en a ambas fases de perforación, 6.1/4 y 4.1/8” OH, habrían estado operacionalmente --condicionadas. En la fase 6.1/4” se hubiese tenido que trabajar con un caudal de hasta 105gpm para no superar el GF limitando el uso de herramientas direccionales y haciendo más lenta las maniobras y circulaciones del pozo. En la fase 4.1/8” el condicionante hubiese sido el GF y los equipos de superficie limitando la operación a una tasa de bombeo de 45-55gpm, haciendo aún más compleja, o imposible, la perforación bajo esas condiciones.

Otra comparación válida es que manteniendo los mismos parámetros de perforación utilizados, pero con el uso de un fluido OBM convencional, en la fase 6.1/4” OH se hubiese alcanzado un ECD de 18.9ppg y 5,200psi

como presión de circulación en los equipos de superficie; y en la fase 4.1/8" se hubiese alcanzado un ECD de 20.2ppg y una presión de circulación de 6,600psi.

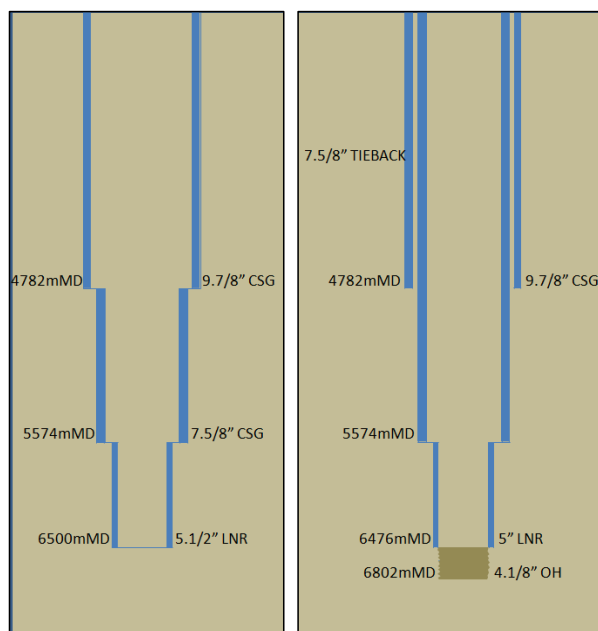


IMAGEN N°9 - Esquema mecánico programado vs Esquema mecánico ejecutado

CONCLUSIONES

- Se perforó uno de los pozos más profundos de Bolivia, con configuración Deep-Slim-Hole, de 6802m con 1600m de sarta 2.7/8" HT Pac, con OBM de Bajo ECD densidad 17.3ppg bajo condiciones de ventana de lodo reducida, manteniendo en superficie parámetros operativos seguros.
- Con fluido OBM convencional la perforación hubiese sido limitada a 105gpm en la fase 6.1/4" OH y a 55gpm en la fase 4.1/8" OH, limitando seriamente alcanzar el objetivo del proyecto.
- Este fluido OBM de bajo ECD, a diferencia de ~~otras opciones en el mercado~~ otros, utiliza barita API (American Petroleum Institute), convirtiéndolo en una opción económica y logísticamente eficiente debido a la fácil disponibilidad de dicho material densificante.
- Este nuevo sistema de fluido de bajo ECD representa una herramienta probada para incrementar el alcance de la perforación de pozos profundos, con diámetros reducidos, donde los sistemas convencionales adicionarían limitaciones para alcanzar nuevos objetivos de mayor exigencia técnica.