

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PERFORACIÓN CON MSE E IMPACTO EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO EN EL CAMPO YARIGUÍ – CANTAGALLO

Helmuth Portilla R¹, Yuliana Mejía R², Diego Suarez A³, Hernando Sara Ch⁴

RESUMEN

Este trabajo contiene la información, seguimiento y análisis del mapa de parámetros y de datos de MSE (Energía Mecánica Específica), durante la perforación de un pozo en tiempo record del campo Yariguí a partir de la metodología propuesta en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) [1] en la cual se evalúa la relación de la energía suministrada durante la perforación del pozo contra las propiedades geomecánicas de las formaciones atravesadas, para determinar los parámetros óptimos que inciden la tasa de penetración.

La metodología MSE se enmarca en la optimización de la perforación de pozos, buscando la disminución de tiempos y en consecuencia costos operacionales a partir de la evaluación y optimización de los parámetros de perforación en tiempo real garantizando un mejor desempeño durante la perforación. La evaluación en tiempo real se presenta como una respuesta y solución a los retos y las necesidades actuales de la industria donde cada día se requiere no solo la visualización en Tiempo Real de todo el proceso de la perforación sino aumentar la eficiencia en la misma. La metodología MSE en tiempo real permite evaluar en una sola vista la eficiencia [6] y la estabilidad de la energía consumida como respuesta a la combinación de los parámetros de perforación identificando tiempos invisibles y oportunidades de mejora.

En este orden de ideas y después de tener disponible en las unidades de mudlogging el registro del parámetro MSE se decidió implementar un piloto de seguimiento en campo con el objetivo de realizar un análisis en tiempo real de los parámetros de perforación mediante la información entregada por la cabina de geología, realizando pruebas de perforabilidad, estableciendo la sensibilidad de los parámetros y entregando recomendaciones pertinentes y oportunas en campo.

El seguimiento en tiempo real permite la interacción del personal involucrado en la operación en diferentes disciplinas, lo cual representa un valor agregado bajo todo punto de vista en especial el espacio de discusión y retroalimentación, lo que genera decisiones técnicamente más ágiles, acertadas y concertadas traducidas en mejores y más satisfactorios resultados, asegurando además las mejores prácticas, el trabajo en equipo y el mejoramiento continuo.

Palabras claves: Perforación, energía mecánica, geomecánica.

1. Ingeniero de Petróleos. Instituto Colombiano del petróleo (ICP), Ecopetrol S.A. Piedecuesta, Colombia. Email: Helmuth.Portilla@ecopetrol.com.co

2. Ingeniera de Petróleos. Corporación Natfrac – Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). Piedecuesta, Colombia. Email: yulianamejia@gmail.com

3. Ingeniero de Petróleos. Instituto Colombiano del petróleo (ICP), Ecopetrol S.A. Piedecuesta, Colombia. Email: Diego.Suarez@ecopetrol.com.co

4. Ingeniero de Petróleos. Ecopetrol S.A. Bogotá Colombia. Email: Hernando.Sara@ecopetrol.com.co

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF DRILLING WITH MSE AND IMPACT ON THE CONSTRUCTION OF A WELL IN THE FIELD YARIGUI – CANTAGALLO

ABSTRACT

This paper contains monitoring information, and analysis of drilling parameters based on Mechanical Specific Energy log taken while drilling the record well in Yarigui field as from the methodology proposed in the Colombian Petroleum Institute (ICP) [1] where the relation between the energy provided and the geomechanical properties of the formations penetrated is evaluated on site while drilling by determining optimal parameters affecting the penetration rate

The MSE methodology is frame in the drilling optimization strategy, looking for time reduction and operational costs based on real time evaluation and optimization of drilling parameters to ensure improved performance while drilling. The real time evaluation appears as a solution to the current challenges of the industry, where each day not just required the Real Time visualization of the drilling process but also increase their efficiency.

The MSE methodology allows evaluating in a single view efficiency and stability of drilling parameter combination as function of the energy expended to identify invisible time and improvement opportunities. [6]

Accordingly and after getting available MSE log and drilling parameters was decided to implement a pilot program to follow on site and building a real-time drilling parameters analysis using the mudlogging data and drill off tests to know the parameter sensitivity and providing pertinent and timely recommendations.

The real time monitoring allows the interaction between all staff involved, representing an added value in every possible way especially the discussion and feedback opportunity, creating accurate and concerted decisions translated into better and more satisfactory results, while also ensuring best practices, teamwork and continuous improvement.

Keywords: Drilling, mechanical energy.

INTRODUCCIÓN

El desempeño de la perforación está directamente relacionado a aspectos fundamentales como las variables geomecánicas que pueden afectar la estabilidad de los pozos, los equipos de perforación, las nuevas tecnologías, los procedimientos utilizados y los parámetros operacionales.

Aproximadamente un 30% del tiempo total de construcción de un pozo [2] corresponde al tiempo rotando y deslizando, en este orden de ideas la optimización de la tasa de penetración “ROP” tiene un directo impacto en la reducción de tiempos y costos. Esta reducción tiene como valor agregado: viabilizar económicamente las campañas de perforación y desarrollo de los campos.

En la perforación, la geomecánica tiene como objetivos principales: definir la trayectoria más apropiada del pozo, los puntos de ubicación del revestimiento y la ventana de lodos; siendo esta última una representación gráfica del mínimo peso de lodo permitido para prevenir colapso del pozo (o influjo de fluidos), y el máximo peso permitido para prevenir pérdidas de fluido hacia la formación [5]. En el caso específico de la evaluación de la eficiencia de un sistema de perforación podemos utilizar las propiedades geomecánicas para identificar la resistencia de las rocas que se van cortando ante el avance de la broca y el ensamblaje de fondo.

Las condiciones en las que se encuentra la operación de perforación son monitoreadas continuamente y gran parte de ese diagnóstico es hecho a partir de la

información de los parámetros de perforación. Su continuo seguimiento permite establecer patrones de comportamiento durante las operaciones y cuando se observan comportamientos anómalos o desviados, su correcta interpretación puede ser decisiva en la identificación de los parámetros óptimos.

Diferentes autores han desarrollado modelos de predicción de ROP, dentro de los cuales los más utilizados son el de Bourgoyne & Young, el modelo de Bingham y el modelo modificado de Warren. La predicción o análisis del rendimiento del sistema involucrado en la perforación puede derivarse de la energía mecánica específica donde se puede determinar el efecto y las contribuciones de cada parámetro involucrado en el comportamiento en la ROP. La energía mecánica específica “MSE” (Mechanical Specific Energy) se define como la energía necesaria para perforar un volumen unitario de roca. Es un parámetro muy útil, que puede considerarse como indicativo de la eficiencia en un trabajo de perforación. La energía mecánica específica combina cada uno de los parámetros registrados en la perforación, y puede expresarse en la relación matemática, propuesta por Teale [3] en 1964:

$$MSE = \frac{480 (\text{Torque}) (RPM)}{D^2 (ROP)} + \frac{4 (WOB)}{\pi D^2} \quad (1)$$

MSE = “Mechanical Specific Energy”, Energía mecánica específica.

T = Torque.

RPM = Revoluciones por minuto de la broca

WOB = Peso en la broca

ROP = Rata de perforación o penetración

D = Diámetro de la broca

La ecuación en términos del motor de la herramienta de fondo, es la siguiente

$$MSE (Kpsi) = \frac{4 (WOB)}{\pi D^2} + \frac{480 (N + K_N * Q)}{(ROP)} \left[\frac{\left(\frac{Tq_{MAX}}{\Delta P_{MAX}} \right) \Delta P}{1000} \right] \quad (2)$$

Dónde:

MSE = “Mechanical Specific Energy”, Energía mecánica específica.

Tq_{MAX} = Torque. Máximo del motor

ΔP_{MAX} = Diferencial máximo del motor

N = Revoluciones por minuto de la broca en superficie

K_N = Constante del Motor

Q = Caudal

WOB = Peso en la broca

ROP = Rata de perforación o penetración

D = Diámetro de la broca

Los parámetros operacionales utilizados para el cálculo y el análisis de MSE se enuncian a continuación

Tasa de penetración (ROP): es la velocidad con la que se avanza a través de las diferentes formaciones durante la perforación y se expresa en Pies/hr.

Revoluciones por minuto (RPM): Es el número de rotaciones de la broca en la perforación.

Torque (TQ): Es la fuerza ejercida en el equipo para generar la rotación y avance de la sarta de perforación y se expresa en Kpie- lb

Peso sobre la broca (WOB): Es el peso aplicado sobre la broca. Se expresa en Klb.

Presión en la tubería (SPP): Es la presión de circulación del fluido (lodo) de perforación en la tubería. Se expresa en psi.

Caudal (GPM): Es la tasa de flujo del fluido de perforación circulando en el sistema. Se expresa en gpm.

METODOLOGÍA

La evaluación de la eficiencia del sistema de perforación se realizó utilizando las propiedades geomecánicas del pozo: Perfil CCS calculado por personal de geomecánica del grupo de Ingeniería para identificar la resistencia de las rocas de las diferentes formaciones que se atraviesan durante la perforación del mismo [1]. El CCS para la trayectoria planeada del pozo se cargó en el sistema de la compañía de la unidad de mudlogging. Los parámetros involucrados en la operación y la curva de la energía mecánica específica MSE fueron monitoreados continuamente, con el propósito de detectar comportamientos anómalos: indicadores de problemas o ineficiencia visualizados en forma gráfica y en tiempo real desde la cabina de Mud Logging. Finalmente se realizó una comparación con el mejor pozo del clúster perforado unas semanas antes para determinar puntos de mayor o menor eficiencia.

POZO PERFORADO EN TIEMPO RECORD

Este pozo perteneciente a la campaña de perforación 2014 fue perforado como pozo de desarrollo A2 de tipo

Direccional tipo S con una profundidad final alcanzada de 8020 pies. El seguimiento y análisis se realizó en la segunda sección del pozo, donde se utilizó una broca PDC de 8 1/2", Tipo U516m con diseño de cuerpo de acero de 5 aletas, cortadores de 16 mm, sistema

hidráulico compuesto por 5 puertos intercambiables y JSA de 17,08 in². TFA de 0,61 in² y potencia hidráulica HSI entre 5 y 6,8 hp. El mapa de parámetros planeado para el pozo se presenta en la *Tabla 1* a continuación:

Tabla 1. Mapa de parámetros para el pozo Yariguí 549

FORMACIÓN	Profundidad inicial	Profundidad final	RPM		WOB	GPM
	Pies	Pies	Superficie	O/B	Klb	gpm
La Cira shale	0	1816	50-70	87-177	5-16	300-610
Colorado	1816	2866	50-80	171-183	5-19	590-630
Mugrosa	2866	3799	50-90	182-185	5-21	625-635
Arenas b1	3799	4238	50-75	131-183	5-20	450-630
Arenas b2	4238	5035	50-75	180-185	5-20	618-635
Arenas b3	5035	5701	50-75	180-185	8-18	620-635
Arenas C	5701	5837	50-75	180-185	9-14	615-630
Arenas C2	5837	6042	50-75	180-185	8-14	618-635
Arenas C3	6042	6214	50-75	180-185	8-14	615-630
Arenas C5	6214	6598	50-75	175-185	5-19	605-635
Arenas CG	6598	6741	50-75	180-185	8-14	450-630
Arenas CG1A	6741	6990	50-75	131-183	8-18	450-630
Arenas CG2A	6990	7922	50-75	180-185	8-18	620-635

PARÁMETROS PLANEADOS VS PARÁMETROS REALES

En la planeación de un pozo se determina un set de parámetros por unidad litológica teniendo en cuenta la experiencia operacional, la arquitectura del pozo y la herramienta de fondo. Sin embargo durante la construcción del mismo y sujeto a la respuesta del sistema se perfora realizando ajustes y cambios a los mismos.

Los parámetros de Perforación se registraron y se compararon con los planeados buscando evaluar el efecto de los cambios en el comportamiento de la energía mecánica específica y recrear un panorama general de la operación.

A continuación se grafican Peso sobre la broca (WOB), Caudal (GPM) y Revoluciones por minuto (RPM) *Ver Figura 1*.

Se observa que el peso sobre la broca se mantuvo estable y dentro de los rangos propuestos en el mapa de parámetros durante toda la operación, es de resaltar que se propusieron y utilizaron valores más altos a los aplicados en pozos anteriores y que concluido este pozo

se pudo establecer un WOB optimizado con las pruebas de perforabilidad.

El Caudal se mantuvo estable durante toda la operación cercano a los 650 GPM por consideraciones del grupo de Ingeniería de Operaciones, se realizaron pruebas durante la perforación y se pudo establecer y sugerir la aplicación de un caudal óptimo entre 600 y 620 GPM logrando una ROP del mismo orden a la obtenida con 650 GPM. Se puede también apreciar una reducción del mismo en la zona de chert la cual se atravesó con parámetros controlados.

Por requerimientos del plan direccional se manejaron RPM de superficie menores a 75 revoluciones por minuto a pesar que el mapa de parámetros estableció 90 RPM en algunas zonas. Las variaciones de este parámetro, que en la mayor parte del pozo presenta valores superiores a los planeados son consecuencia del uso de un caudal superior al proyectado, análogamente se observan zonas con valores inferiores donde se utilizaron parámetros controlados especialmente un caudal reducido. En la construcción se mantuvo como prioridad las condiciones dispuestas por el personal direccional, sin embargo se pudo observar un desempeño satisfactorio en la ROP.

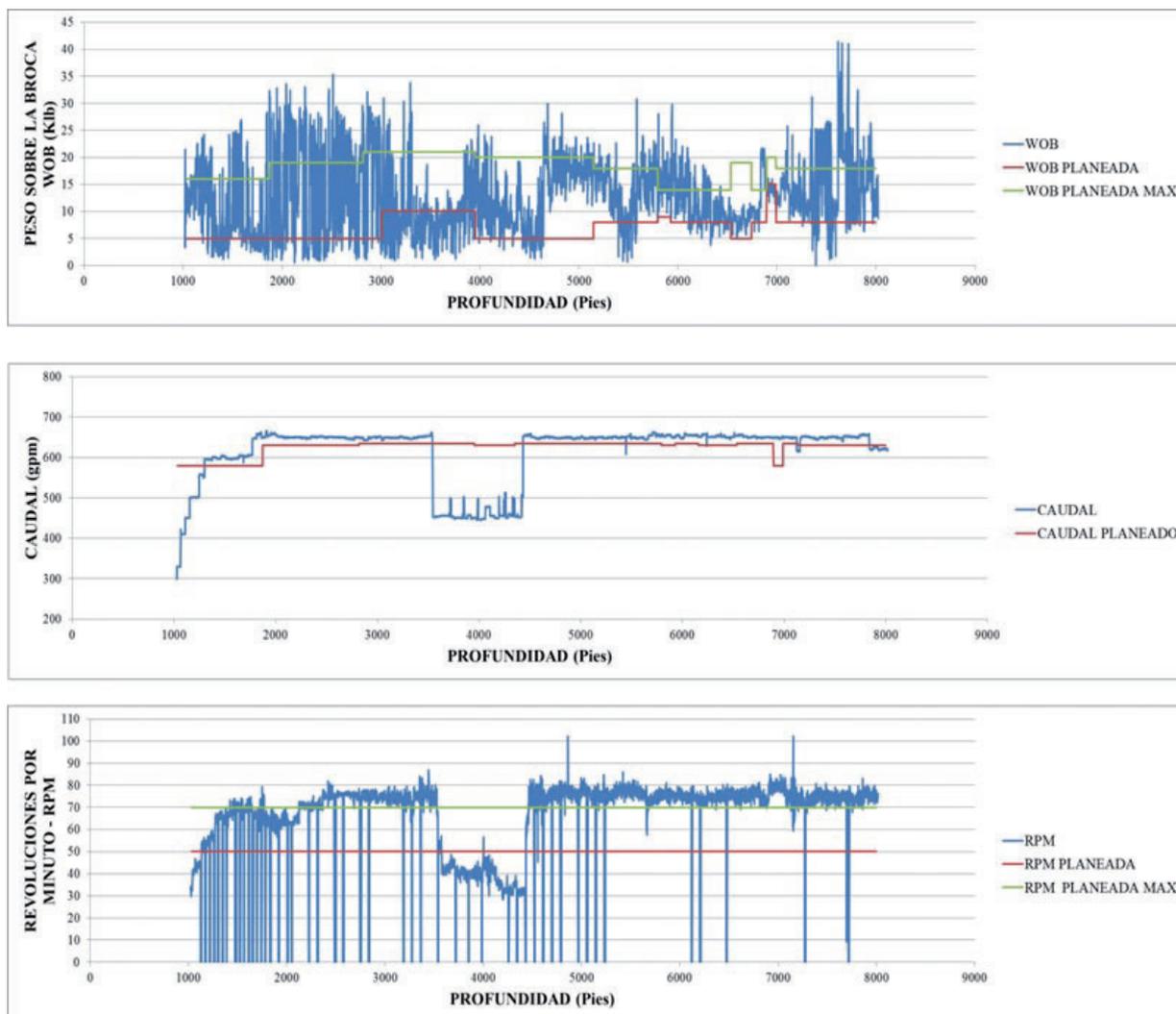


Figura 1. WOB, Caudal y RPM para el pozo Yariguí 549

Finalmente y reflejando el éxito de la operación se observa una ROP por encima de la esperada en casi la totalidad del pozo. En la *Figura 2* se muestra el registro de la tasa de perforación en función de la profundidad el cual se observa constante y estable, incluso en la zona de chert con parámetros controlados se obtiene un buen rendimiento.

La ROP disminuye hacia el final del pozo debido a algunos controles que se establecen por seguridad debido a la presencia de gas, sin embargo cabe resaltar que no cae a los niveles observados en pozos anteriores donde la ROP se ve afectada dramáticamente

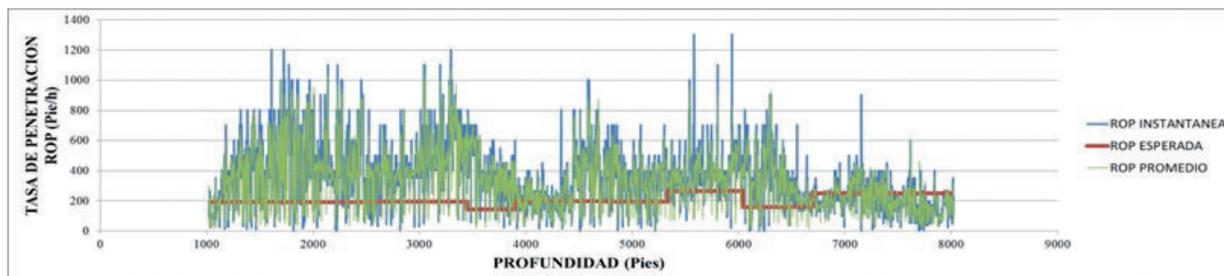


Figura 2. ROP para el pozo Yariguí 549

PRUEBAS DE PERFORABILIDAD

Se realizaron y documentaron pruebas de perforabilidad durante la perforación de la sección de 81/2" las cuales se discutieron con el personal del taladro. A los 4263 pies en la Formación Mugrosa, con parámetros

controlados se realizó una prueba aumentando el WOB en intervalos de 5 Klb manteniendo las RPM y el GPM constantes: 35 RPM y 450 GPM en la zona de Chert. 300 de Diferencial, torques entre 7000 y 9000 lb pie. Se presenta el resumen de la prueba en la *Tabla 2*:

Tabla 2. Resumen Prueba de perforabilidad a 4263 pies

FORMACIÓN / PROFUNDIDAD (Pies)	PARÁMETROS			ANÁLISIS	RESULTADOS
Mugrosa @4263 pies Litología 10% Chert, 30% Arena conglomerática, 40% Arcilla, 20% arena	WOB (klb)	20	25	Realizó Drill off test aumentando el peso (con parámetros controlado en la zona de Chert) para determinar el WOB adecuado y obtener la ROP óptima.	Se observó que la Rop óptima se obtuvo al aplicar WOB entre 20 - 22 Klb
	RPMs	35	35		
	RPMm (rev/gal)	188,5	188,5		
	Q (gpm)	450	450		
	SPP (psi)	1600	1600		
	Torque (Kpie/lb)	7-8	8-9		
	ΔP (psi)	300	350		
	ROP(pies/h)	230	97		

Se observó que la ROP óptima se obtuvo al aplicar WOB 20 Klb obteniendo una ROP: 230 pies/h.

Cuando se aplicó más de 25 Klb la ROP no aumentó linealmente lo que indicó el founder point para este intervalo de Chert como se muestra en la *Figura 3*.

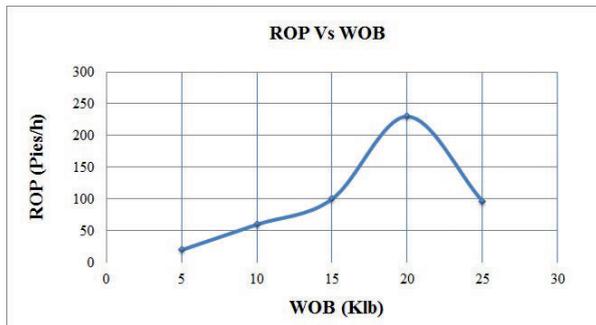


Figura 3. ROP Vs. WOB Founder point a 4263 pies

A los 4356 pies en la Formación Mugrosa, con parámetros controlados se realizó una prueba aumentando el WOB en intervalos de 5 Klb incrementando el diferencial en intervalos de 50 psi y manteniendo las RPM y el GPM constantes: 35 RPM y 450 GPM en zona de Chert como se aprecia en la *Figura 4*

Se observó que la ROP aumentó linealmente conforme el diferencial aumentaba mostrando sensibilidad a dicho parámetro, como se muestra en la figura 4 tenemos el mejor desempeño de la ROP con un peso de 20 WOB y 450 psi de diferencial.

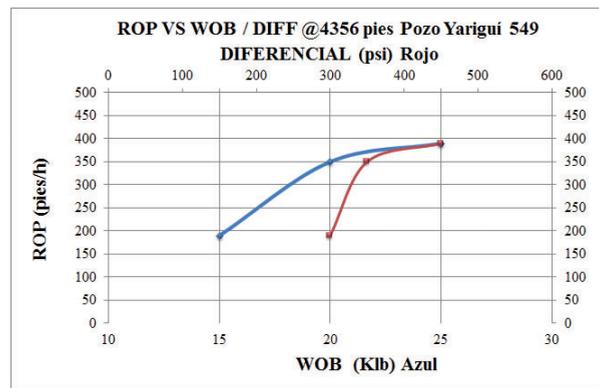


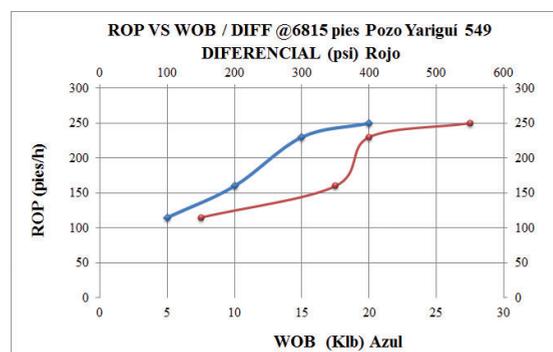
Figura 4. ROP Vs. WOB / DIFERENCIAL Prueba de perforabilidad a 4356 pies

Se presenta el resumen de la prueba en la *Tabla 3*:

Tabla 3. Resumen Prueba de perforabilidad a 4356 pies

FORMACIÓN / PROFUNDIDAD (Pies)	PARÁMETROS		ANÁLISIS	RESULTADOS
Mugrosa @4356 pies Litología 10% Chert, 30% Arena conglomerática, 40% Arcilla, 20% arena	WOB (klb)	20 25	Realizó Drill off test aumentando el peso y diferencial (con parámetros controlado en la zona de Chert) para determinar la sensibilidad del diferencial sobre la ROP óptima.	Se observó que la ROP aumentó linealmente con el aumento del diferencial
	RPMs	35 35		
	RPMm (rev/gal)	188,5 188,5		
	Q (gpm)	450 450		
	Torque (Kpie/lb)	7-8 8-9		
	ΔP (psi)	350 450		
ROP(pies/h)	350 390			

A los 6815 pies en la Formación la Paz, se realizó una prueba de perforabilidad, el resumen se muestra en la *Tabla 4*: se aumentó el WOB en intervalos de 5 Klb, incrementando el diferencial, manteniendo las RPM y el GPM constantes: 75 RPM y 650 GPM. Se observa en la *Figura 5* que la ROP aumentó linealmente conforme el WOB y el diferencial aumentaba. El torque se observó dentro de los rangos normales. El peso se llevó hasta 20 Klb dado que incrementar el diferencial generaba una presión cercana a los límites de seguridad de las bombas.

**Figura 5.** ROP VS WOB / Diferencial. Prueba de perforabilidad a 6815 pies**Tabla 4.** Resumen de Prueba de perforabilidad a 6815 pies

FORMACIÓN / PROFUNDIDAD (Pies)	PARÁMETROS		ANÁLISIS	RESULTADOS
La Paz @6815 pies Litología 40% Arcilla, 60% Arena	WOB (klb)	15 20	Realizó Drill off test aumentando el peso WOB en intervalos de 5 Klb, incrementando el diferencial, manteniendo RPM y GPM constantes.	Se observó que la Rop aumentó linealmente
	RPMs	75 75		
	RPMm (rev/gal)	188,5 188,5		
	Q (gpm)	650 650		
	SPP (psi)	3200 3200		
	Torque (Kpie/lb)	12-13 12-13		
	ΔP (psi)	400 550		
ROP(pies/h)	230 250			

A los 7126 pies en la Formación la Paz, se realizó una prueba de perforabilidad Ver *Tabla 5*, donde se sugirió reducir el caudal a 620 GPM. Se simularon Hidráulicas con 600, 620 y 650 GPM para determinar el resultado esperado en la presión. Se redujo el GPM para determinar el WOB óptimo, manteniendo RPM constante: 75 RPM.

Se observó un aumento del torque. El aumento lineal de la ROP cambió al aplicar el WOB mayor a 22 Klb y la reducción del MSE es apreciable lo que indica una mayor eficiencia. La ROP muestra valores satisfactorios y estables con 620 GPM como se aprecia en la *Figura 6*.

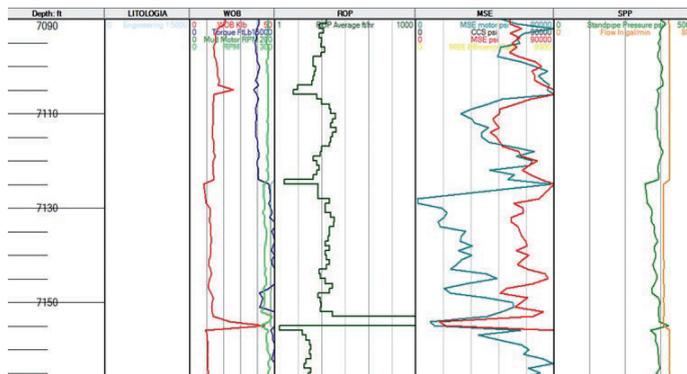


Figura 6. Visualización plantilla para seguimiento en campo MSE. Prueba de perforabilidad a 7126 pies

Tabla 5. Resumen de Prueba de Perforabilidad a 7126 pies.

FORMACIÓN / PROFUNDIDAD (Pies)	PARÁMETROS		ANÁLISIS		RESULTADOS
LA PAZ @7126 pies Litología 40% Arcilla, 60% Arena	WOB (klb)	18	20	Realizó Drill off test disminuyendo a 620 GPM para identificar el WOB adecuado y obtener la ROP más óptima.	Se observó un aumento del torque. No se observó aumento lineal de la ROP al aplicar WOB mayor a 22 klb la reducción del MSE es considerable al trabajar con 620 GPM:
	RPMs	75	75		
	RPMm (rev/gal)	188,5	188,5		
	Q (gpm)	620	650		
	SPP (psi)	3200	3350		
	Torque (Kpie/lb)	14-16	14-16		
	ΔP (psi)	500	500		
ROP(pies/h)	340	380			

CALIFICACIÓN Y RENDIMIENTO DE LA BROCA

La broca se recuperó en buenas condiciones con una calificación IADC:

0-1-WF-S-X-I-ER-TD



Figura 7. Broca Ulterra Recuperada

Concluyendo la perforación con el Bit record que se muestra en la *Tabla 6*:

Tabla 6. Bit Record pozo Yariguí 549

PROFUNDIDAD TD (pies)	8020
FOOTAGE	7000
HORAS EFECTIVAS	29,58
HORAS TOTALES	73,4
ROP Efectiva promedio (pies/h)	236,64
ROP Total promedio (pies/h)	95,23

RESULTADOS

ANÁLISIS COMPARATIVO MSE

Previo a la perforación del pozo Yariguí 549 se recopiló la información correspondiente al pozo Yariguí 548 que se tomó como referencia por sus buenos resultados, ya que fue el pozo con el mejor rendimiento en el clúster hasta ese momento.

Con base al análisis de los pozos 550 y 548 se solicitó a la compañía de brocas un mapa de parámetros y se concertó una meta para el pozo Yariguí 549. Se ve en la *Figura 8* del MSE Vs Profundidad que en el Pozo Yariguí 549 la energía mecánica específica es menor que la empleada en el 548 con tiempos y ROP muy satisfactorias.

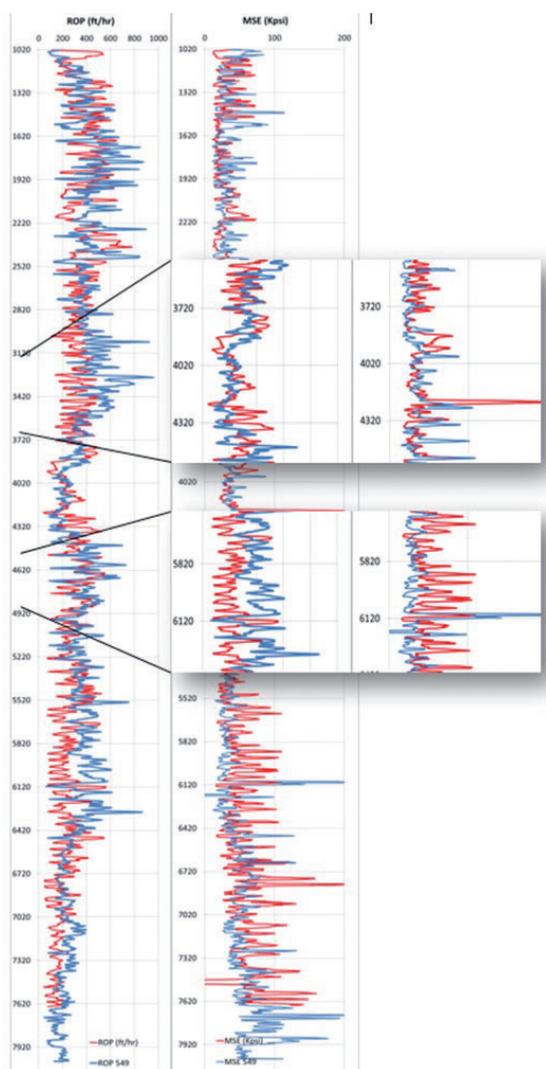


Figura 8. ROP (Pies/h) y MSE Vs Profundidad (Pies). Yariguí 549 (Azul) y 548 (Rojo)

Se observa una reducción del MSE del pozo Yariguí 549 (AZUL) con respecto del MSE del pozo Yariguí 548 (ROJO) en casi la totalidad del pozo. De igual forma en el Chert se mantuvieron controlados y constantes los parámetros de perforación, la ROP del pozo Yariguí 549 (AZUL) resultó ligeramente inferior a la ROP del pozo Yariguí 548 (ROJO) donde los parámetros se fueron incrementando durante la perforación hasta restablecer los parámetros normales. Sin embargo se evidencia mayor eficiencia en el comportamiento de MSE en el caso del pozo 549 vs 548.

El pozo Yariguí 549 se perforó como el más rápido en la historia del campo al alcanzar la profundidad planeada 8020 pies el día 6 de los 10,75 días totales de operación con una ROP efectiva promedio de 236,64 (pies/h), todo esto como resultado del trabajo de un equipo comprometido, el aseguramiento de las mejores prácticas operativas, la optimización de parámetros con la energía mecánica específica MSE, el uso de perforador automático, reducción de viajes de calibración del hueco, y en general la búsqueda constante de mejora.

CONCLUSIONES

Se puede identificar que los parámetros críticos durante la operación en los pozos estudiados son el peso sobre la broca y el caudal cuyas variaciones inciden notablemente en la ROP.

Del análisis se puede concluir que al manejar parámetros controlados durante la perforación de toda la zona de Chert en la Formación Mugrosa se obtiene una ROP muy similar a la obtenida con la práctica en pozos anteriores de reducir parámetros solo al inicio e ir incrementándolos hasta restablecer los normales. Sin embargo con parámetros controlados tenemos un MSE más bajo, lo que representa mayor eficiencia: menos energía gastada y mayor integridad de las herramientas de fondo.

Del análisis realizado es posible determinar que con un caudal de 650 GPM hay un exceso de energía gastada que se puede optimizar obteniendo una buena ROP con un caudal óptimo para este caso de 600 a 620 GPM. De igual forma un caudal de 600-620 GPM permite mantener la presión en la tubería más baja y lejana del límite de seguridad de las bombas, lo que se comprobó en la prueba de perforabilidad donde se evaluó este parámetro donde al reducir el caudal de 650 a 620 GPM se evidencia una reducción importante en el MSE del pozo 549 sin un cambio notorio en la ROP.

Se concluye que la aplicación de la Energía mecánica específica en la evaluación y optimización de los parámetros de perforación en tiempo real acompañado de buenas prácticas operacionales conducen a casos de éxito como la perforación en tiempo record del pozo Yariguí 549 donde se redujo el tiempo de perforación un 23% con respecto al promedio de los pozos del área.

BIBLIOGRAFÍA

1. PORTILLA H., SUAREZ, D. y CORZO, R. "Metodología para la optimización de parámetros de perforación a partir de propiedades *geomecánicas*". Fuentes: El Reventón Energético ISSN: 1657-6527 ed: Ediciones Universidad Industrial del Santander v.10 No.2 pág. 5-11. 2012.
2. FEAR, M.J. "How to Improve Rate of Penetration in Field Operations", Paper SPE-55050, IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, November 1998.
3. TEALE, R. "The Concept of Specific Energy in Rock Drilling," Int. J. Rock Mech. Mining Sci. (1965) 2, 57-53.
4. PESSIER, R.C., FEAR, M.J.: "Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and bit-specific coefficient of sliding friction,". Paper SPE-24584. SPE Conference, Washington, D.C. October 1992.
5. FJAER, E. et al. "Petroleum Related Rock Mechanics". Second Edition, 2008
6. DUPRIEST, F. and KOEDERITZ, W. "Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy,". Paper SPE-92194 Drilling Conference, Amsterdam, February 2005.
7. KOEDERITZ W AND WEIS J. "A Real-Time Implementation of MSE." AADE-05-NTCE-66 AADE National Technical Conference and Exhibition. Houston, TX, American Association of Drilling Engineers. 2005.
8. ARMENTA M. "Identifying Inefficient Drilling Conditions Using Drilling Specific Energy." SPE 116667. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, CO. Society of Petroleum Engineers. 2008.

Recepción: 22 de septiembre de 2014

Aceptación: 4 de noviembre de 2014