

METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PERFORACIÓN A PARTIR DE PROPIEDADES GEOMECÁNICAS

Helmuth Esteban Portilla¹, Diego Fernando Suárez², Reinel Corzo³

RESUMEN

La optimización en la perforación de pozos está enfocada en la disminución de tiempos y por ende costos operacionales. Esto se puede lograr a partir de la evaluación de los parámetros de perforación utilizados durante la perforación de los pozos vecinos y con el desarrollo de programas de mejoramiento continuo y procesos eficientes del desempeño durante la perforación.

Este artículo presenta una fácil y práctica metodología en la cual se evalúa la relación de la energía suministrada durante la perforación de un pozo con las propiedades geomecánicas, para determinar los parámetros óptimos que permitan aumentar la eficiencia del sistema de perforación y por lo tanto aumentar la tasa de penetración.

Del análisis de los parámetros de perforación, utilizados en los pozos, se estima la eficiencia mecánica del sistema y se definen las zonas más críticas para implementar acciones de optimización de la perforación en pozos futuros de la zona, con la ayuda de la información registrada en la operación.

Palabras claves: Perforación, geomecánica, energía mecánica.

ABSTRACT

Drilling optimization is focused on time operational cost reduction. This can be accomplished from the evaluation of drilling parameters used during offset wells drilling and the development of continuous improvement programs and performance efficient processes during drilling.

This paper presents a simple and practical methodology that evaluates the ratio of the energy supplied during the drilling of a well with geo-mechanical properties to determine the optimal parameters that increase the efficiency of the drilling system and therefore increase penetration rate.

The analysis of the parameters used in drilling wells estimates the mechanical efficiency of the system and defines the most critical areas for implementing the optimization actions in future of wells in the zone studied, with the aid of the information registered during the operation.

Keywords: Drilling, geomechanics, mechanical energy.

1 Ingeniero de Petróleos. Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Ecopetrol S.A. Piedecuesta, Colombia. E-mail: Helmuth.portilla@ecopetrol.com.co

2 Ingeniero de Petróleos. Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Ecopetrol S.A. Piedecuesta, Colombia. E-mail: diego.suarez@ecopetrol.com.co

3 Ingeniero de Petróleos M.Sc. Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Ecopetrol S.A. Piedecuesta, Colombia. E-mail: reinel.corzo@ecopetrol.com.co

1. INTRODUCCIÓN

El desempeño de la perforación está directamente relacionado a aspectos fundamentales como son las variables geomecánicas que pueden afectar la estabilidad de los pozos, los sistemas de perforación que incluyen equipos involucrando el uso de nuevas tecnologías, y finalmente los procedimientos utilizados en la construcción de pozos en los que se pueden incluir los parámetros operacionales. De estadísticas mundiales, del tiempo total consumido en la perforación de un pozo, aproximadamente un 30% es utilizado en rotación [1], por lo cual la optimización de la tasa de penetración “ROP” es un parámetro a considerar en la reducción de costos de perforación.

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 [6]. En el caso específico de la evaluación de la eficiencia de un sistema de perforación se puede 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 desarrolla la operación de perforación son monitoreadas continuamente y gran parte de ese diagnóstico es hecho a partir de los parámetros de perforación. Su continuo seguimiento permite establecer patrones de comportamiento durante las operaciones y cuando se observan comportamientos anómalos, su correcta interpretación puede ser decisiva en la identificación del tipo de problema que se puede presentar en la perforación. Los parámetros operacionales se pueden registrar en tiempo real y en profundidad, y su visualización o presentación puede ser gráfica o como datos.

Algunos de los parámetros de perforación que rutinariamente se registran en la operación de perforación son presentados y explicados brevemente en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros comunes registrados en la operación de perforación de un pozo.

Nombre de Parámetro	Sigla	Unidades	Descripción
Tasa de penetración	ROP	Pies/hr	Velocidad a la que profundiza la perforación
Revoluciones por minuto	RPM	rpm	Es la tasa a la que la broca es rotada durante las operaciones de perforación
Torque	TQ	Klbs-ft	Es la fuerza creada por la sarta de perforación debida a su rotación en el pozo
Peso sobre la broca	WOB	Klbs	Peso ejercido sobre la broca
Presión en la tubería	SPP	psi	Presión de circulación del fluido de perforación circulando en la tubería
Caudal	GPM	gpm	Tasa de flujo del fluido de perforación circulando en el sistema
Peso de lodo	MW(in/out)	lbs/gl	Densidad del fluido de perforación entrando y saliendo del sistema

La búsqueda de la optimización de la perforación que permite la reducción de tiempos y costos en la operación y especialmente en lo que concierne al mejor desempeño en términos de tasas de penetración (ROP), necesita de un punto de comparación que involucre los parámetros de perforación, para lo cual existen relaciones matemáticas que facilitan observar el efecto particular de cada parámetro en la ROP. Una de estas relaciones es la energía específica mecánica (MSE), que relacionada a las propiedades mecánicas de las rocas especialmente a la resistencia a la compresión confinada (CCS) puede proveer una herramienta de predicción del comportamiento del desempeño de perforación.

ENERGÍA ESPECÍFICA MECÁNICA, MSE

La predicción o análisis del rendimiento de una broca y en general de todo el sistema involucrado en la perforación puede derivarse de la energía específica cuyos principios fundamentales se basan en la cantidad de energía requerida para destruir una unidad de volumen de roca y la eficiencia de las brocas en esta operación. Esta teoría [2], fundamentada con pruebas de laboratorio, propone este concepto de energía en función de parámetros de perforación como se puede observar en la siguiente fórmula:

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

En donde:

MSE = 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 mayoría de datos son tomados de medidas de superficie. Por este motivo y cuando se tienen datos poco confiables de torque, es importante incorporar un coeficiente específico a cada broca por fricción de deslizamiento (μ), expresando el torque en función del peso en la broca:

$$T = \frac{\mu * D * WOB}{36} \quad (2)$$

Este coeficiente de fricción fue introducido por Teale (1965), además de los conceptos de energía específica mínima y máxima eficiencia mecánica (EFFm). La energía mecánica específica mínima es alcanzada cuando esta se aproxima a la resistencia a la compresión no confinada (UCS) de la roca que está siendo perforada. La máxima eficiencia mecánica se calcula de la siguiente manera:

$$EFFm = \frac{MSEmin}{MSE} * 100 \quad (3)$$

Donde:

MSEmin = Resistencia de la roca = UCS

Pessier (1998) [3] validó la ecuación de máxima eficiencia mecánica de Teale (1965) bajo presión hidrostática donde la resistencia de la roca está bajo confinamiento (CCS). Esto permitió un mejor acercamiento a lo que realmente está ocurriendo al momento de la perforación modificando la eficiencia; de la siguiente manera:

$$EFFm = \frac{CCS}{MSE} \quad (4)$$

Reemplazando MSE de la ecuación 4 por la ecuación 1 y el torque en función del peso sobre la broca, se resuelve una ecuación para ROP como se muestra a continuación:

$$ROP = \frac{13.33\mu * RPM}{D * \left[\frac{CCS}{EFFm * WOB} - \frac{1}{Ab} \right]} \quad (5)$$

Donde:

Ab = Área de la broca.

Para el caso de roca permeable en un pozo vertical, la resistencia compresiva confinada (CCS) se calcula por el siguiente método [6]:

$$CSS = UCS + DP + 2DP * \frac{Sen(AFI)}{(1 - Sen(AFI))} \quad (6)$$

Dónde:

DP = Presión diferencial = Esfuerzo de confinamiento = ECD – Presión de poro.

AFI= Angulo de fricción interna de la roca.

ECD = Densidad equivalente de Circulación.

Para el caso de roca impermeable en un pozo vertical, la resistencia compresiva confinada (CCS) se calcula incorporando la relación descrita por Skempton (1954) [6].

$$CCS_{SK} = UCS + DP_{SK} + 2DP_{SK} * \frac{Sen(AFI)}{(1 - Sen(AFI))} \quad (7)$$

$$DP_{SK} = ECD - PP_{SK} \quad (8)$$

Donde PPsk es la presión de poro de Skempton a la profundidad de perforación. Esta presión de poro se calcula utilizando la siguiente ecuación [6]:

$$PP_{SK} = PP - (OB - ECD)/3 \quad (9)$$

Donde:

PP = Presión de poro

OB = Presión de sobrecarga

Finalmente, para predecir el comportamiento de la ROP, es factible definir los coeficientes de fricción de deslizamiento, eficiencia mecánica; WOB y RPM, para cada tipo de broca en función de la resistencia aparente de la roca, mediante pruebas de laboratorio, o con datos de campo si se encuentran disponibles.

2. METODOLOGÍA

La metodología que se plantea es la comparación de la resistencia de la roca con la energía utilizada para destruirla y de esta forma conocer las causas que provocan ineficiencia en el proceso de la perforación de un pozo de producción de hidrocarburos. Todo esto con la ayuda de la mayor información posible que hoy se puede obtener en los taladros de perforación.

Los pasos que constituyen la metodología se describen a continuación:

CÁLCULO DE UCS Y CCS

Como base para el proceso de identificar la eficiencia del sistema de perforación, se calcula la UCS utilizando registros eléctricos de pozo, para lo cual es necesario contar con registro Sónico (DT), Porosidad (NPHI), Gamma Ray (GR) y Densidad (RHOB). Previo al cálculo de la UCS y a partir de los registros eléctricos se modelan otras propiedades necesarias como el índice de arcillosidad (V_{shale}), velocidad de la onda compresional y relación de Poisson [6].

Con base en el índice de arcillosidad se definen los valores de resistencia de la roca con las siguientes ecuaciones [6].

Para formaciones arcillosas:

$$UCS = 145.077 * 0.72 * V_p^{32} \quad (10)$$

Para areniscas limpias y medianamente sucias y limolitas:

$$UCS = 145.077 * 1.9E-20 * \rho^2 * V_p^4 * \left[\frac{1+v}{1-v} \right]^2 * (1-2v)(1+0.78V_{SHALE}) \quad (11)$$

Con la UCS modelada se realiza un ajuste al comportamiento experimental observado en las rocas durante ensayos mecánicos de laboratorio, validando los datos generados de los registros. Con esta UCS calculada, se deriva la resistencia a la compresión confinada, CCS.

CÁLCULO DE MSE

La otra característica de comparación, es calcular la energía mecánica específica, para lo cual se toman los parámetros de WOB, Torque, RPM y ROP que se obtienen del registro continuo de superficie que realiza normalmente las empresas de Mud Logging en pozo. Es importante tener en cuenta que el valor resultante debe incluir un factor por eficiencia mecánica que usualmente es de 35%, valor obtenido de pruebas de laboratorio de rocas [5].

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE BAJA EFICIENCIA

El siguiente paso es estandarizar una plantilla (figura 1) con los datos registrados en los taladros de perforación y los calculados, para la visualización de los diferentes parámetros involucrados en la metodología; que puede incluir información de litología, CCS, MSE, WOB, torque, RPM, MW, ECD, ROP, SPP y si están disponibles datos adicionales de vibración, y cavings.

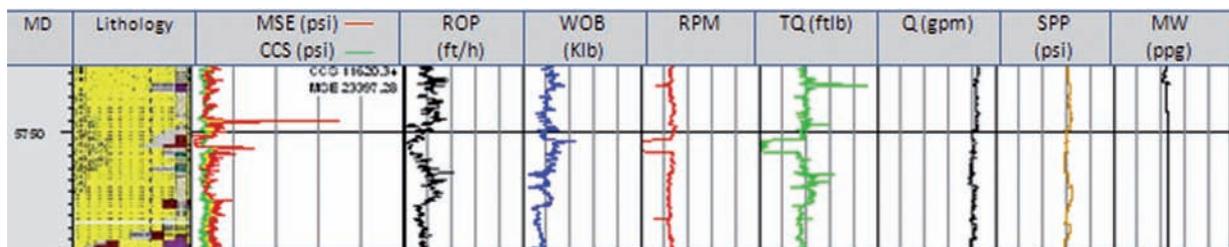


Figura 1. Plantilla base de comparación MSE vs CCS incluyendo parámetros.

A partir de la comparación de la energía mecánica (con factor de eficiencia mecánica de 0.35) y la curva CCS, se identifican las zonas de ineficiencia y con ayuda de la información adicional registrada en pozo y visualizada en la plantilla de datos se analizan las causas posibles de ineficiencia, dentro de las que se pueden mencionar las siguientes:

- Límite en equipos o BHA.
- Desgaste o daño de broca.
- Vibración.
- Limpieza de hueco.

- Embotamiento de la broca.

En los casos que se tengan herramientas de medición de fondo se puede hacer una comparación de la energía mecánica calculada con datos de superficie (taladro, mud Logging) y de fondo, observando la diferencia para tener una idea en el caso de pozos altamente desviados del efecto de la fricción con las paredes del hueco y poder tener un criterio para optimizar los BHA, con el objetivo de disminuir el colgamiento de las sartas si es el caso y en general mejorar las condiciones del pozo.

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PERFORACIÓN

Para maximizar la ROP, es necesario determinar los parámetros óptimos de perforación, para lo cual es importante hacer pruebas de perforabilidad en diferentes formaciones del pozo, las cuales pueden ser definidas por cambios de litologías y/o variaciones apreciables en los valores de CCS estimados. La prueba de perforabilidad es un proceso en el que se van alterando los parámetros para maximizar la tasa de penetración hasta encontrar el punto óptimo que se encuentra cuando la relación de ROP con WOB y RPM se deja de comportar de una forma lineal. En el caso de análisis histórico de información en los que no se relacionen pruebas de perforabilidad es posible realizar gráficas que relacionen WOB y RPM con ROP,

definiendo los mejores parámetros que pueden servir de partida para nuevos pozos dentro del campo que se esté analizando.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

Siguiendo los pasos de la metodología planteada, a continuación se realiza su aplicación teniendo en cuenta datos de un pozo perforado en Valle Medio del Magdalena.

CÁLCULO DE UCS Y CCS

Partiendo de registros sínicos del área, se calculó a partir de correlaciones la UCS (figura 2) obteniéndose valores entre 750 y 6300 psi. Estos datos fueron calibrados con pruebas de laboratorio de mecánica de rocas.

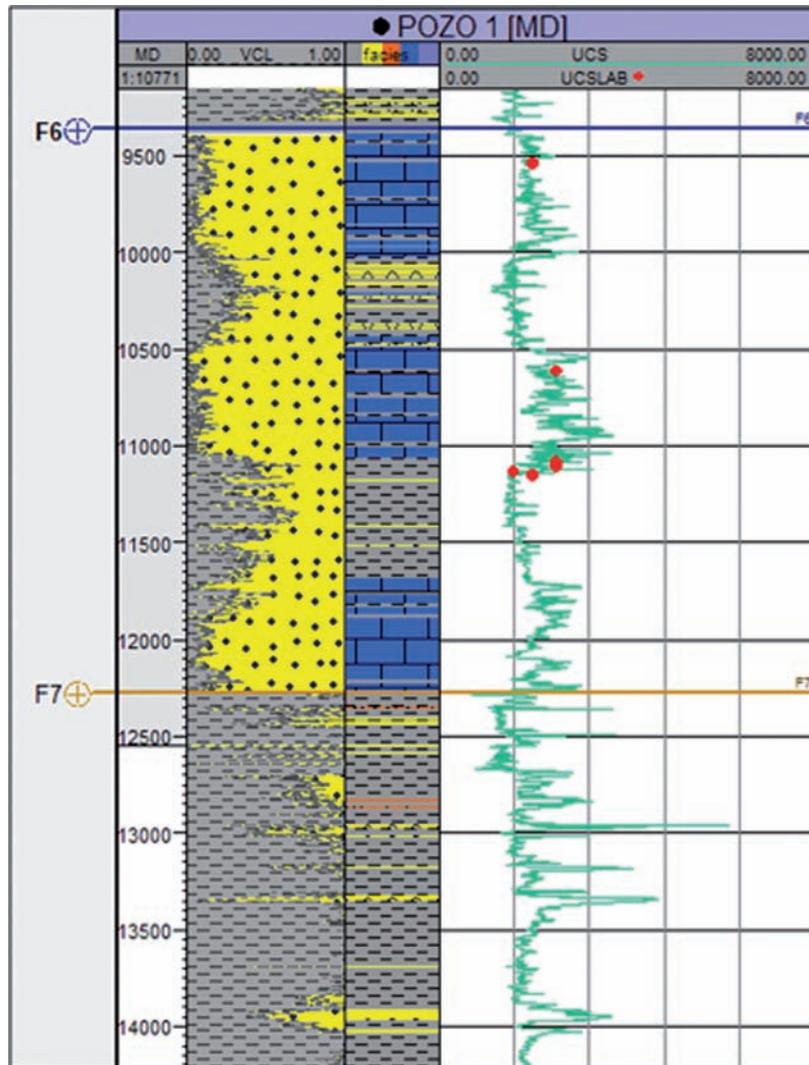


Figura 2. Cálculo de UCS con Calibración de pruebas de laboratorio.

CÁLCULO DE MSE

Con la información obtenida de los datos sensados de la unidad de Mud Logging del pozo Base, se inició con la corrida de la ecuación de energía mecánica para comparar que tan cerca estuvo el desempeño de los BHA de su punto óptimo.

Para el cálculo de la energía mecánica (MSE) se utilizaron los datos de los parámetros de perforación aplicados hasta la sección del hueco de 17.5 pulgadas.

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE BAJA EFICIENCIA

Los resultados obtenidos en el numeral 2, se compararon contra los datos de CCS calculados a partir de los datos geomecánicos, para identificar que tan lejos se está del punto óptimo e iniciar el trabajo de ir calibrando tanto la ecuación como los parámetros para llegar al punto más cercano aplicable para este caso base (figura 3).

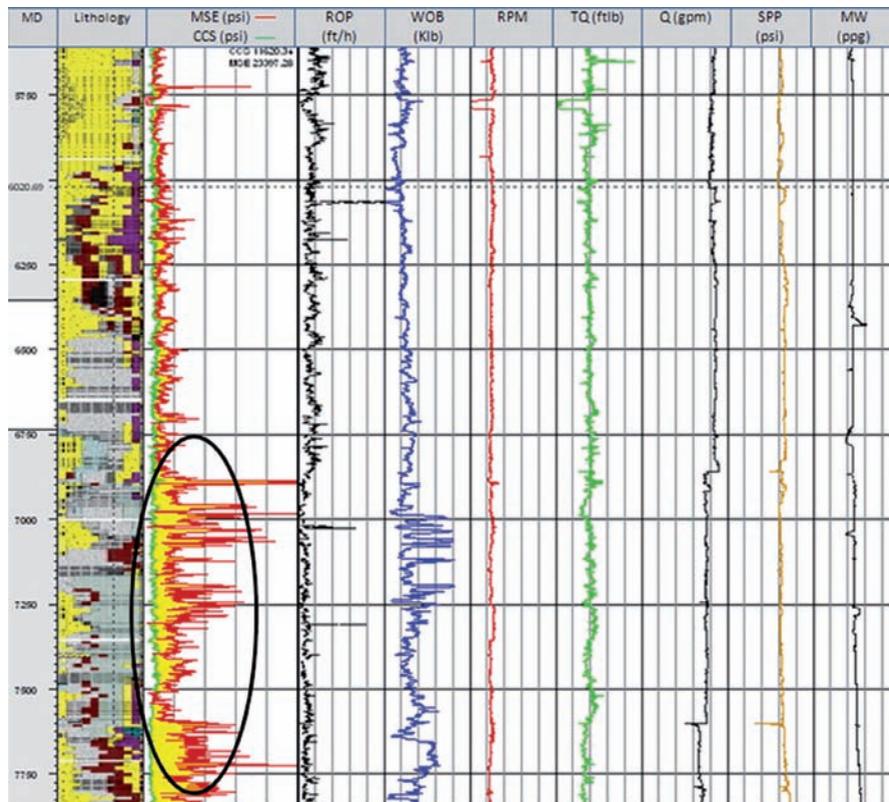


Figura 3. MSE vs CCS pozo base.

En la figura 3 se señaló la zona con mayor desviación entre la energía mecánica y la CCS.

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PERFORACIÓN

En las zonas identificadas con menor eficiencia, el análisis se concentró inicialmente en el estudio en la variación del peso sobre la broca (WOB) para analizar su efecto sobre la ROP. Para esto, se divide la perforación en grupos de diferentes profundidades y se grafican tal como se observa en la figura 4, para analizar cómo se afecta la ROP con el WOB y conocer con que valores se obtuvo mejor desempeño.

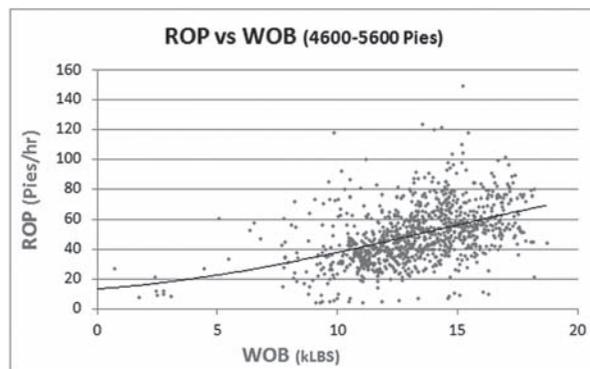


Figura 4. Relación ROP vs WOB pozo base.

En la tabla 2, se puede observar que para cada intervalo en profundidad, se ha escogido el WOB que genera la mayor ROP promedio (resaltado en color verde). Ese WOB óptimo es reemplazado en la ecuación 5 con el fin de conocer la ROP óptima que se tendría en pozos futuros que perforen el mismo intervalo estratigráfico.

Tabla 2. Resumen con la ROP promedio para cada rango de WOB

Profundidad	WOB(Klb)						
	2-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
ROP(1600'-2600')	101	79	71	63			
ROP(2600'-3600')	26	45	63	59			
ROP(3600'-4600')	21	17	35.5	48	45		
ROP(4600'-5600')	15	36	47.9	62			
ROP(5600'-6600')	28.6	27	35	18			
ROP(6600'-7600')	11	18	24	21	18	11.5	
ROP(7600'-8600')	13.1	18.8	15.9	15.8	14.8	16.2	17.7
ROP(7600'-9370')		8.5	9.2	9.2	12.2	10.2	10.5

Teóricamente con los cambios en peso en la broca se puede obtener un 10% de aumento en la tasa de penetración, lo que implica una mejora en los tiempos de perforación de futuros pozos en la zona de interés del pozo base de estudio.

4. CONCLUSIONES

- La ecuación de la energía específica es de fácil aplicación a datos de perforación de estudios de campo y puede ser correlacionada fácilmente entre pozos.
- La metodología de comparación de propiedades mecánicas de roca con la energía utilizada en la perforación de pozos es un índice de la eficiencia del sistema, permitiendo identificar zonas para implementar actividades de optimización de la tasa de penetración.
- La utilización de una presentación gráfica de los parámetros de perforación con las curvas de

energía mecánica y resistencia a la compresión es una herramienta práctica en la evaluación del rendimiento de perforación, aplicable a las operaciones en campo en tiempo real.

- Las correcciones en peso en la broca analizados después de la perforación del pozo base, permite aumentar la eficiencia del proceso de perforación a pozos futuros de la zona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FEAR, M.J. “How to Improve Rate of Penetration in Field Operations”, SPE 55050, IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, November 1998.
2. TEALE, R. “The Concept of Specific Energy in Rock Drilling,” Int. J. Rock Mech. Mining Sci. (1965) 2, 57-53.
3. PESSIER, R.C., FEAR, M.J.: “Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and bit-specific coefficient of sliding friction,” paper SPE-24584 presented at 1992 SPE conference, Washintong, D.C. October 4-7.
4. WAUGHMAN, R., KENNER, J., MOORE, R. “Real-Time Specific Energy Monitoring Reveals Drilling Inefficiency and Enhance the Understanding of When to Pull Worn PDC Bits,” SPE 74520, Dallas Texas, February 2002.
5. DUPRIEST, F. and KOEDERITZ, W. “Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy,” SPE 92194 Drilling Conference, Amsterdam, February 2005.
6. FJAER, E. HOLT, R.M. HORSRUD, P. RAAEN, A.M. and RISNES, R. “Petroleum Related Rock Mechanics”. Second Edition, 2008

Recepción: 15 de noviembre de 2012

Aceptación: 18 de diciembre de 2012