

Well Drilling Optimization: A Comprehensive Approach in Geology, Geomechanics, Technical and Economics

Walter Sánchez¹; Oscar Cortegana, Ing¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, walter.sanchez.c@uni.pe, ocortegana@uni.edu.pe

Abstract— *This research proposes a comprehensive methodology for the optimization of well drilling, addressing geological, geomechanical, technical and economic aspects. Using data from the Sheshea 126-17-1X well, located in the Ucayali basin, electrical logs from the LAS archives were examined to interpret the lithology of the subsurface formations. The study focuses on the calculation of the mechanical specific energy (MSE) and its correlation with the mechanical properties of the rock, such as unconfined compressive strength (UCS) and confined compressive strength (CCS), complemented by the analysis of operational parameters such as weight on bit (WOB), revolutions per minute (RPM) and torque. Likewise, seismic velocities (V_p and V_s) and elastic properties (Young's Modulus and Poisson's ratio) were calculated to determine the stiffness and deformability of the formations. According to these analyses, adequate WOB ranges were determined to obtain an optimum rate of penetration (ROP), reaching increases in ROP of up to 8.41%, drilling time reduction of up to a maximum of 7.76%, and a maximum economic saving of 8.33%, compared to the actual values observed. It is concluded that the integration of a geomechanical and operational analysis makes it possible to identify and correct inefficiencies associated with excess energy during drilling, optimizing the process and reducing operating costs.*

Keywords—Optimization, mechanical specific energy, geomechanical, rate of penetration, weight on bit

Optimización de la Perforación de pozos: Enfoque integral en Geología, Geomecánica, Técnico y Económico

Walter Sánchez¹; Oscar Cortegana, Ing¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, walter.sanchez.c@uni.pe, ocortegana@uni.edu.pe

Resumen— La presente investigación propone una metodología integral para la optimización de la perforación de pozos, abordando aspectos geológicos, geomecánicos, técnicos y económicos. Empleando datos correspondientes al pozo Sheshea 126-17-1X, localizado en la cuenca Ucayali, se examinaron registros eléctricos propios de los archivos LAS para interpretar la litología de las formaciones del subsuelo. El estudio se enfoca en el cálculo de la energía mecánica específica (MSE) y su correlación con las propiedades mecánicas de la roca, tales como la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y resistencia a la compresión confinada (CCS), complementadas con el análisis de parámetros operacionales como peso sobre la broca (WOB), revoluciones por minuto (RPM) y el torque. De igual modo, se calcularon velocidades sísmicas (V_p y V_s) y propiedades elásticas (Módulo de Young y Coeficiente de Poisson) para determinar la rigidez y deformabilidad de las formaciones. Según estos análisis se precisaron rangos adecuados de WOB para obtener una Tasa de Penetración (ROP) óptima, alcanzando incrementos en la ROP de hasta 8.41%, disminución de tiempo de perforación de hasta un máximo de 7.76%, y un ahorro económico máximo de 8.33%, en comparación con los valores reales observados. Se concluye que la integración de un análisis geomecánico y operacional posibilita identificar y corregir ineficiencias asociadas al exceso de energía durante la perforación, optimizando el proceso y aminorando costos operativos.

Palabras clave—Optimización, energía mecánica específica, geomecánica, tasa de penetración, peso sobre la broca

I. INTRODUCCIÓN

La operación de perforación se considera una parte integral de cualquier proyecto de ingeniería relacionado con la Tierra, es decir, en ingeniería civil, ingeniería de minas e ingeniería petrolera. La complejidad del proceso de perforación se deriva principalmente de las incertidumbres relacionadas con las formaciones del subsuelo, los regímenes tectónicos activos, la presión de los poros, la distribución de las fracturas de rocas, etc [1].

Uno de los mayores desafíos durante la perforación de un pozo, es determinar los parámetros óptimos de la misma, que permitan una reducción de tiempos y costos por medio de un mejor desempeño en términos de optimizar la tasa de penetración [2]. Esto se puede lograr partiendo de una evaluación de parámetros de perforación empleados durante la perforación de pozos vecinos y con un desarrollo de programas de mejoramiento continuo y procesos eficientes del desempeño durante el desarrollo de la misma [3].

Los perforadores realizan una variedad de pruebas para optimizar el rendimiento. La más común es la prueba de "velocidad de perforación", que consiste simplemente en

experimentar con varias configuraciones de peso sobre la broca (WOB), revoluciones por minuto (RPM) y observar los resultados. Luego se utilizan los parámetros que dieron como resultado la tasa de penetración (ROP) más alta. En cierto sentido, todos los esquemas de optimización utilizan un proceso comparativo similar. Es decir, buscan identificar los parámetros que otorgan los mejores resultados en relación con otras configuraciones [4].

La implementación de la energía mecánica específica (MSE), además de permitir la estimación de parámetros óptimos de perforación, es útil para la detección de irregularidades en factores importantes que puedan afectar la eficiencia del sistema de perforación [2]. Según [5], Waughman propuso una metodología para medir la MSE por cada sección perforada combinada con el tipo de litología utilizando lecturas de rayos gamma, esta podía ser efectiva para evaluar el rendimiento de la broca y su desgaste. Sin embargo, para este estudio la geomecánica interviene mediante la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y resistencia a la compresión confinada (CCS), debido a que estas representan los esfuerzos de la naturaleza que derivan en la dureza de la roca [3,6].

En la presente investigación se propone una optimización de la ROP partiendo de un análisis geomecánico y caracterización geológica de las zonas perforadas del pozo Sheshea 126-17-1X, ubicado en la actual área de promoción UC-XP-014 (anteriormente denominada Lote 126) en la cuenca Ucayali. El objetivo es establecer dicho método para futuros proyectos de desarrollo, sean en el mismo campo o para otros. Esto permitirá seleccionar los parámetros adecuados y así brindar mejores resultados optimizando la perforación, generando grandes beneficios como la reducción del costo de perforación, reducir tiempos de perforación y maximizar la ROP.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Datos y Fuentes de Información

Para este estudio, se emplearon datos de registros eléctricos y parámetros de perforación correspondientes al pozo Sheshea 126-17-1X ubicado en la Cuenca Ucayali.

Los datos fueron obtenidos a partir de reportes técnicos y del archivo en formato LAS generado por la compañía a cargo Petrominerales, y proporcionados por Perupetro.

Las curvas alojadas en el archivo LAS fueron procesadas mediante scripts en Python para la visualización y posterior análisis de los intervalos de interés.

B. Energía Mecánica Específica

La energía mecánica específica se define como la cantidad de energía necesaria para destruir una unidad de volumen de roca. Un valor menor de energía mecánica específica significa que se utiliza menos energía en el proceso de recorte [7].

Además, la fuerza de corte y la energía mecánica específica de un cortador determinan de forma directa la estabilidad de trabajo y la eficiencia de perforación de las brocas PDC [8].

Dupriest incluyó un parámetro de eficiencia mecánica E_m en su modelo para el cálculo de MSE asumiendo siempre que se encuentra en el rango de 30 a 40% [1].

$$MSE = E_m \cdot \left(\frac{WOB}{A_{bit}} + \frac{120 \cdot \pi \cdot RPM \cdot T}{A_{bit} \cdot ROP} \right) \quad (1)$$

donde:

MSE: Energía mecánica específica (psi)

RPM: Revoluciones por minuto de la broca (rev/min)

WOB: Peso sobre la broca (Lbf)

ROP: Tasa de penetración (ft/hr)

T: Torque sobre la broca (lbf.ft)

A_{bit} : Área de la broca

Así mismo se introdujo un coeficiente de fricción por deslizamiento (μ) específico de la broca para expresar la torsión en función del WOB. En este modelo, el coeficiente de fricción es 0.25 y 0.5 para una broca tricónica y PDC respectivamente [1].

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

donde:

D: Diámetro de la broca

μ : Coeficiente de fricción

C. Parámetros Mecánicos de la Roca

Las ondas compresionales (denominadas ondas primarias, u ondas P) se propagan alternando compresión y dilatación en la dirección de las ondas [6].

$$V_p = 304800 \cdot \left(\frac{1}{\Delta t_p} \right) \quad (3)$$

donde:

V_p : Velocidad de onda P (m/s)

Δt_p : Tiempo de tránsito compresional (us/ft)

Las ondas de cuerpo de cizallamiento (denominadas ondas secundarias, transversales o S) se propagan por una deformación de cizallamiento sinusoidal pura en una dirección perpendicular a la dirección de las ondas [6].

$$V_s = 0.862 \cdot V_p - 1172 \quad (4)$$

donde:

V_s : Velocidad de la onda S (m/s)

D. Propiedades Geomecánicas

Mediante el módulo de Young, medimos la relación entre el esfuerzo y la deformación. Es una medida de la rigidez de la muestra, es decir, la resistencia de la muestra siendo comprimido por un esfuerzo uniaxial [9].

$$E = \rho \cdot V_s^2 \cdot \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (5)$$

donde:

E: Módulo de Young (Pa)

ρ : Densidad de la Roca ($\frac{kg}{m^3}$)

El Coeficiente de Poisson es una medida adimensional de expansión lateral en relación con la contracción longitudinal [9].

$$\nu_d = \frac{\frac{1}{2}(V_p / V_s)^2 - 1}{(V_p / V_s)^2 - 1} \quad (6)$$

Los ensayos de compresión son aquellos en los que simplemente se comprime una muestra axialmente (sin esfuerzo radial) hasta que falla en un valor definido como resistencia a la compresión no confinada (UCS) [10].

Basado en [6], Horsrud desarrolló una ecuación fundamental para la estimación de la UCS en formaciones arcillosas.

$$UCS = 145.038 \cdot 0.77 \cdot (V_p/1000)^{2.93} \quad (7)$$

donde:

UCS: Resistencia a la compresión no confinada (psi)

Las pruebas de compresión triaxial son la forma más común de medir la resistencia de la roca en condiciones que presumiblemente simulan las de la profundidad [10].

Existe un método de mecánica de rocas ampliamente practicado y aceptado para calcular la resistencia a la compresión confinada de la roca (CCS) [3,8].

$$CCS = UCS + PD + 2PD \cdot \frac{\text{Sen}(AFI)}{1 - \text{Sen}(AFI)} \quad (8)$$

donde:

CCS: Resistencia a la compresión confinada (psi)

AFI: Ángulo de fricción interna (grados)

ECD: Densidad equivalente de circulación

PD: Presión diferencial = ECD – Presión de poro

E. Relación entre la MSE y la UCS

Al relacionar el parámetro de rendimiento de perforación (MSE) con el parámetro ambiental/geológico (UCS), se puede definir el nivel de eficiencia producido. La relación entre el MSE ajustado y el UCS debe permanecer alrededor de 1.0 cuando la eficiencia de perforación es alta [11].

La energía óptima se logra cuando el valor de MSE se acerca al valor de la UCS que se obtiene de la fórmula empírica para calizas o formaciones arcillosas [12].

F. Estimación de ROP

Según [1,3] en términos de MSE y el T en función del WOB, se resuelve la siguiente ecuación para el ROP:

$$ROP = \frac{13.3 \cdot \mu \cdot RPM}{D \cdot \left[\frac{CCS}{E_m \cdot WOB} - \frac{1}{A_{bit}} \right]} \quad (9)$$

G. Obtención de Vp y Vs

Dada la existencia de la curva de Registro Sónico (DT) en el archivo en formato LAS, se determinaron las velocidades de onda P y S mediante la ecuación (3) y (4) respectivamente (ver Fig. 1).

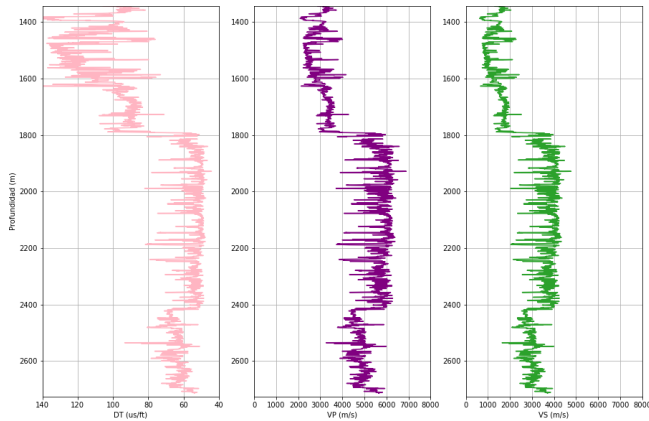


Fig. 1 Método para determinar las velocidades de onda sísmica

H. Obtención del Módulo de Young y Coeficiente de Poisson

El módulo de Young permitirá comprender la rigidez de la roca al momento de ser perforada, mientras que el coeficiente de Poisson indica la facilidad de su deformación lateral conforme un esfuerzo es aplicado a la roca, formando parte del análisis mecánico de la roca y complementando a la UCS. Con las ecuaciones (5) y (6) logramos dicho propósito.

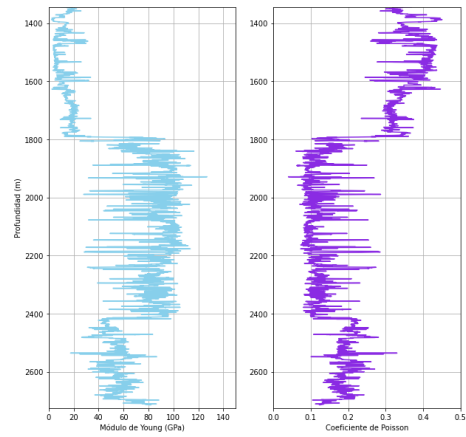


Fig. 2 Método para determinar las propiedades elásticas de las rocas según la profundidad

I. Parámetros de Perforación y Cálculo de la MSE

Los parámetros de perforación RPM, ROP y WOB fueron extraídos de [13]. Se calculó el torque sobre la broca mediante la ecuación (2), y la MSE de Dupriest usando la ecuación (1).

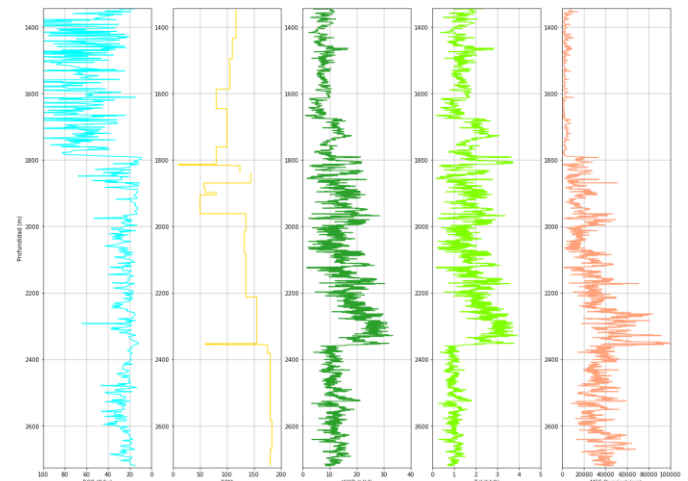


Fig. 3 Parámetros de perforación empleados para el cálculo de la MSE

J. Zonas con Desgaste Energético durante la Perforación

Como se muestra en la Fig. 4, se exhiben las curvas esenciales para el análisis de zonas donde hubo problemática durante la perforación, así como el tipo de broca empleada durante la misma, denotándose problemas en la sección inferior de 8 1/2 in, y en toda la sección 6 1/8 in. como se aprecia en la columna 4, donde el color anaranjado (0 – 0.9) representa un empleo de energía menor al requerido teóricamente, el verde una perforación óptima (0.9 – 2) y la zona roja (mayor a 2) excesivo uso de energía durante la perforación.

Esto se reflejó en el estado de integridad de las brocas PDC utilizadas en dicha zona crítica, reportándose rotura en los cortadores al momento de su extracción [13].

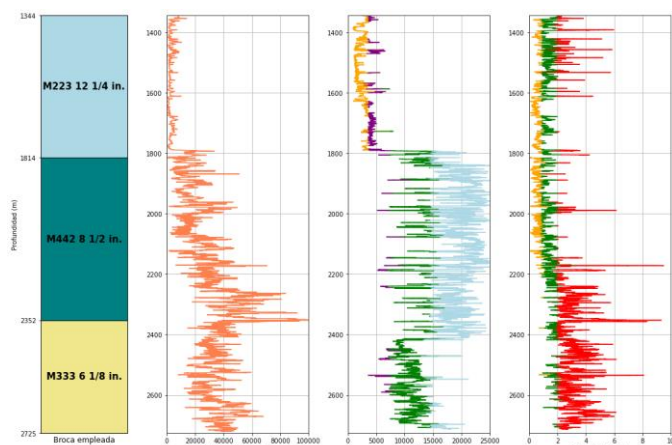


Fig. 4 Criterio de comparación entre la MSE (Dupriest) y la UCS

K. Clasificación de la Dureza de Roca según la UCS

Según la ecuación (7), se pudo calcular los valores de UCS acorde a la profundidad perforada. Cuando no es posible realizar pruebas de laboratorio, se pueden realizar estimaciones de campo de la resistencia de la roca examinando muestras y recortes de perforación [6].

La Tabla I muestra los valores de [6], donde añadimos una columna que indique la tonalidad de la curva para este trabajo de investigación.

TABLA I
Clasificación de la roca según su UCS

Dureza	UCS (psi)	Ejemplo	Tonalidad en la Curva
Muy Fuerte	14500–36250	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneis, granodiorita, caliza, mármol, riolita, tuff	Turquesa
Fuerte	7250 – 14500	Caliza, mármol, filita, arenisca, lutita	Verde
Medianamente Fuerte	3625 – 7250	Roca arcilla, carbón, concreto, esquisto, limolita	Morado
Débil	725 – 3625	Tiza, sal de roca, potasa	Anaranjado
Muy Débil	145 – 725	Roca muy erosionada o alterada	Amarillo oscuro
Extremadamente Débil	36.25 – 145	Gubia de falla rígida	Plomo

La Fig. 4 muestra el desperdicio de energía durante la perforación del tramo inferior de la sección 8 ½ in. y la sección 6 1/8 in. apreciándose valores de MSE/UCS superiores a 2.

L. Desgaste de Energía respecto al WOB y UCS

La Fig. 5 muestra el Intervalo I (2170 – 2352.1 m), donde se observa una predominancia de dureza muy fuerte según los valores de UCS y la Tabla I. El intervalo de WOB óptimo se encuentra en el rango de 4.5 a 15 klbf.

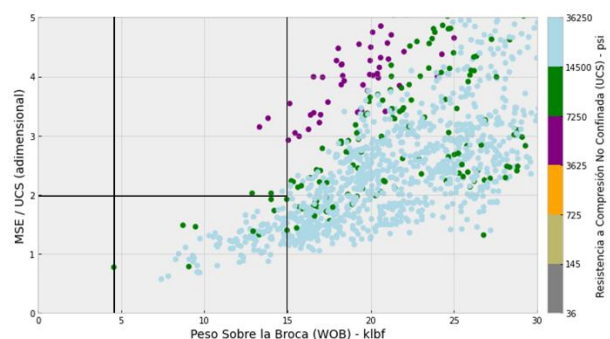


Fig. 5 Zona óptima de WOB para el intervalo (2170 – 2352.1 m) correspondiente a la sección 8 ½ in.

La Fig. 6 presenta el Intervalo II (2354 – 2713 m), donde se aprecia una predominancia de dureza fuerte según los valores de UCS y la Tabla I. El intervalo de WOB óptimo se encuentra en el rango de 3 a 7.5 klbf.

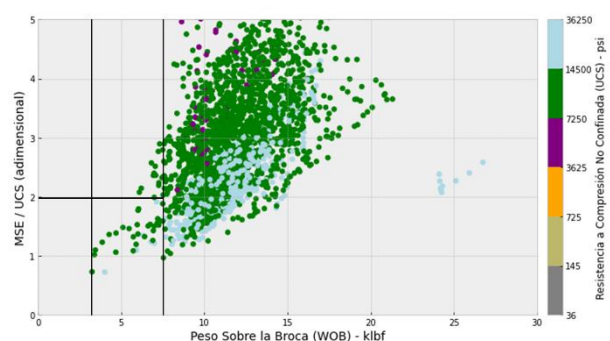


Fig. 6 Zona óptima de WOB para el intervalo (2354 – 2713 m) correspondiente a la sección 6 1/8 in.

M. Relación entre la CCS y la MSE

Se puede ver en la Fig. 7 que predominan zonas donde la curva de la MSE excede por mucho a la curva de la CCS, indicando que se empleó una energía mayor de la necesaria para perforar. Esto se puede corregir disminuyendo la MSE considerando los intervalos de WOB de la Fig. 5 y Fig. 6.

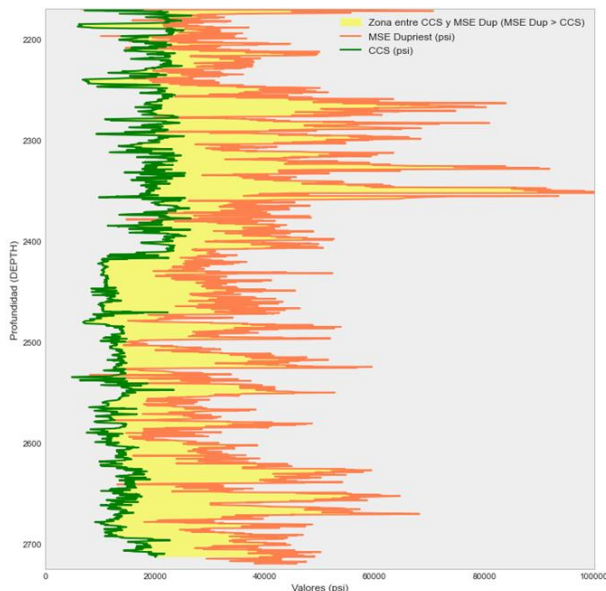


Fig. 7 Relación entre la CCS y la MSE (2170 – 2713 m)

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis Geológico

El documento [14] permitió conocer la litología de las zonas correspondientes al pozo Sheshea 1X, las cuales se relacionaron con los valores UCS a fin de clasificar respecto a la dureza según la Tabla I, como se aprecia en la Tabla II.

TABLA II
Clasificación de las rocas correspondientes a las zonas problemáticas del pozo Sheshea 1X según su UCS

Dureza	UCS (psi)	Tipo de Roca	Tonalidad en la Curva
Muy Fuerte	14500 – 36250	Caliza	Turquesa
Fuerte	7250 – 14500	Anhidrita, Limolita, arenisca	Verde
Medianamente Fuerte	3625 – 7250	Arcilla gris	Morado

El Intervalo I contiene mayor presencia de Caliza, las propiedades elásticas de la zona muestran un módulo de Young superiores a 80 GPa y coeficientes de Poisson con valores aproximados a 0.1, denotando una roca sumamente dura y resistente a la deformación.

El Intervalo II tuvo una transición que pasó de Caliza a formaciones de Anhidrita, Limolita y Arenisca, donde el módulo de Young se redujo y el coeficiente de Poisson aumentó, indicando que eran zonas menos duras y más deformables, como se ve en la Fig. 2.

B. Estimaciones de ROP óptimas

La Fig. 8 muestra una comparación entre los promedios de las ROP reales y las óptimas acorde a los intervalos evaluados. Dichas ROP ideales fueron obtenidas mediante la ecuación (9) para las profundidades respectivas de cada Intervalo.

Fueron empleados los valores promedio entre el máximo y mínimo correspondientes a los rangos de WOB calculados de la Fig. 5 y Fig. 6.

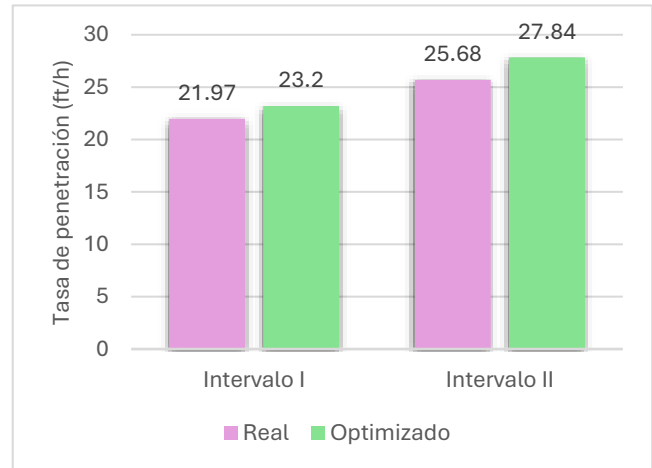


Fig. 8 Comparación de tasas de penetración real y optimizada

La ROP del Intervalo I mejorará en un 5.59% respecto a su valor real, de la misma manera que la ROP del Intervalo II, incrementándose en 8.41%.

C. Evaluación de Tiempos durante la Perforación

La Fig. 9 muestra los tiempos de perforación ideales determinados a partir de las ROP óptimas de la Fig. 8, comparados con los tiempos de perforación reales correspondientes a dichos intervalos.

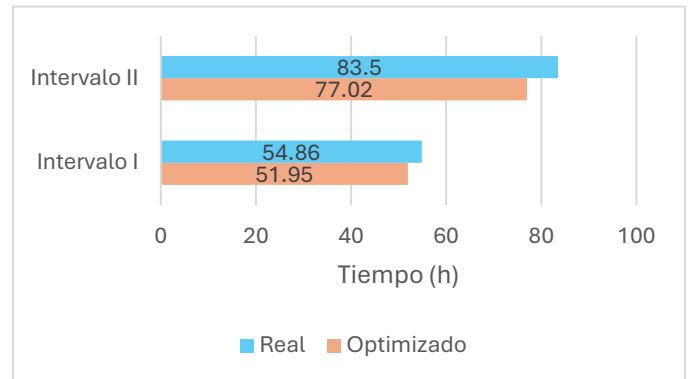


Fig. 9 Comparación de tiempos de penetración según tasas de penetración reales y optimizadas

El tiempo empleado del Intervalo I disminuiría en un 5.30% respecto a su valor real, de la misma manera que en el Intervalo II, reduciéndose en 7.76%.

D. Estimación de Gastos durante la Perforación

La Fig. 10 muestra los gastos de perforación determinados a partir de los tiempos de perforación ideales de la Fig. 9, comparados con los gastos reales de dichos intervalos.

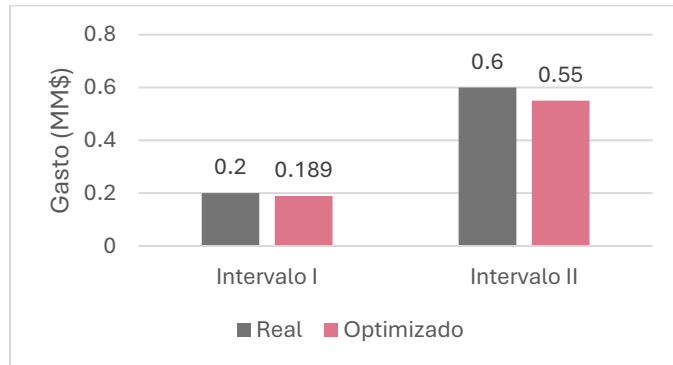


Fig. 10 Comparación de gastos de perforación según tasas de penetración reales y optimizadas

El gasto de la perforación del Intervalo I disminuiría en un 5.5% respecto a su valor real, de la misma manera que el Intervalo II, reduciéndose en 8.33%.

IV. CONCLUSIONES

La metodología empleada permitió reconocer áreas con requerimiento de optimización en términos de desgaste energético durante la perforación. Se detectaron zonas donde fue aplicada una energía superior a la requerida, así como intervalos donde la eficiencia fue óptima, lo que permitirá mejorar estrategias para futuros proyectos.

El análisis de propiedades geomecánicas facilitó la caracterización de las formaciones con mayor desgaste de energía, permitiendo establecer rangos óptimos de WOB para optimizar la ROP. Además, se evidenció que los picos repentinos de MSE están relacionados a transiciones de formación.

La optimización de los parámetros operacionales manifestó una mejora con un porcentaje máximo de 8.41% en la ROP, reduciendo tiempos de perforación y generando un ahorro de hasta 8.33%. Por consiguiente, implementar estrategias basadas en el análisis de eficiencia energética puede mejorar el rendimiento y reducir costos en operaciones futuras.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se agradece al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería y a los docentes que apoyaron con dudas respecto al tema de investigación.

REFERENCIAS

- [1] M. Khalilidermani y D. Knez, «A Survey of Application of Mechanical Specific Energy in Petroleum and Space Drilling,» *Energies*, pp. 1-4, 2022.
- [2] M. J. Benavides Cedeño, Artist, *Implementación del concepto de energía mecánica específica (MSE) para la optimización de los parámetros de perforación del campo Palo Azul*. [Art]. Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [3] H. E. Portilla, D. F. Suarez y R. Corzo, «Metodología para la Optimización de Parámetros de Perforación a partir de Propiedades Geomecánicas,» *El Reventón Energético*, vol. 10, n° 2, p. 2, 2012.
- [4] F. E. Dupriest y W. L. Koederitz, «Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy,» de *SPE/IADC Drilling Conference*, Amsterdam, 2005.
- [5] R. K. Abbas, A. Hassanpour, C. Hare y M. Ghadiri, «Instantaneous Monitoring of Drill Bit Wear and Specific Energy as a Criteria for the Appropriate Time for Pulling Out Worn Bits,» de *SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition*, Astana, 2014.
- [6] J. J. Zhang, *Applied Petroleum Geomechanics*, Cambridge: Elsevier, 2019, pp. 50-105.
- [7] R. Al-Kindi, M. Cesetti, R. Singh, R. Antillon, C. Kirby, C. Vanlammeran y P. Paila, «Optimizing the Drill Bit/ Bottom Hole Assembly Pull Out of Hole Decision - Making Process Through the Use of Realtime, Downhole Drilling Data and Downhole Drilling Data and Downhole Mechanical Specific Energy,» de *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, Abu Dhabi, 2017.
- [8] C. Xiong, Z.-W. Huang, H.-Z. Shi, R.-Y. Yang, G. Wu, H. Chen y W.-H. He, «Performances of a Stinger PDC cutter breaking granite: Cutting force and mechanical specific energy in single cutter tests,» *Petroleum Science*, vol. XX, n° 2, pp. 1087-1103, 2022.
- [9] E. Fjaer, R. M. Holt, P. Horsrud, A. M. Raaen y R. Risnes, *Petroleum Related Rock Mechanics*, Second ed., Amsterdam: Elsevier, 2008, p. 20.
- [10] M. D. Zoback, *Reservoir Geomechanics*, New York: Cambridge University Press, 2007, p. 85.
- [11] M. F. Al Dushaishi, R. Nygaard, M. Andersen, C. Jeffery, S. Helvik, A. Saasen y G. Harelaand, «Selecting Optimum Drilling Parameters by Incorporating Vibration and Drilling Efficiency Models,» *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*, p. 7, 2018.
- [12] A. Alsubaiah, F. Albadran y N. Alkanaani, «Mechanical Specific Energy and Statical Techniques to Maximizing the Drilling Rates for Production Section of Mishrif Wells in Southern Iraq Fields,» de *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, 2018.
- [13] Petrominerales Perú S.A., «Reporte Final de Perforación Pozo Sheshea 126-17-1X,» 2012.
- [14] Weatherford, Petrominerales S.A., «Masterlog Sheshea - 1X,» Ucayali, 2012.