



LGFS

LABORATORIO DE GEODESIA FÍSICA Y SATELITAL Dr. MELVIN HOYER

REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA



UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Laboratorio de Geodesia Física y Satelital Dr. Melvin Hoyer
Desde su fundación en 1997 ha sido un referente en docencia, investigación
y extensión, contribuyendo en la formación de profesionales altamente
capacitados en Agrimensura e Ingeniería Geodésica.

Metodología para la aplicación de matrices de evaluación de vibraciones en la sarta durante la perforación

Juan Ernesto Zambrano Govea¹  Jesús Enrique Quintero Luzardo¹
Maribel Colina¹, Egda Marina Prieto¹

¹ Programa de Ingeniería de Petróleo, Escuela de Petróleo. Facultad de Ingeniería,
Universidad del Zulia, Sector Grano de Oro, Apartado postal 4011-A-526.

Autor de correspondencia: jaordugue@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v48a03>

Recepción: 18 marzo 2025 | Aceptación: 22 septiembre 2025 | Publicación: 22 octubre 2025.

Resumen

La investigación tiene como objetivo diseñar una metodología para aplicar matrices de evaluación de vibraciones en la sarta durante la perforación, para optimizar los parámetros de perforación y desempeño de la sarta; optimizando la ROP del pozo a perforar; y en algunos casos prevenir atrapamientos o colapso del hoyo por efecto mecánico. Es un estudio proyectivo que aborda las vibraciones de la sarta mediante técnicas documentales y de observación para la adquisición de datos. La metodología se desarrollará en fases: primero, investigación y recopilación de datos de pozos y literatura existente; luego, clasificación de la información y análisis de criterios de evaluación de vibraciones utilizados por distintas empresas. Posteriormente, se compararán los rangos operacionales de estas empresas para establecer un método unificado que permita determinar el tipo de vibración específica mediante registros en tiempo real (LWD/MWD) y proponer soluciones o indicaciones a seguir. Finalmente, se diseñarán matrices de evaluación de vibraciones mecánicas en la sarta de perforación, clasificadas según la fuerza y tipo de vibración (axiales, torsionales, o laterales), tomando como referencia los perfiles de pozos estudiados. Una vez identificada la vibración por su valor, se emitirá una recomendación en tiempo real para corregir anomalías o continuar la perforación.

Palabras clave: axiales, laterales, sarta de perforación, torsionales, vibraciones.

Methodology for the Application of Evaluation Matrices for Vibration in the String During Drilling

Abstract

The research aims to design a methodology for applying vibration assessment matrices to the drill string during drilling to optimize drilling parameters and string performance; optimize the ROP of the well being drilled; and, in some cases, prevent entrapment or hole collapse due to mechanical effects. This is a projective study that addresses drill string vibrations using documentary and observational techniques for data acquisition. The methodology will be developed in phases: first, research and collection of well data and existing literature; then, classification of the information and analysis of vibration assessment criteria used by different companies. Subsequently, the operational ranges of these companies will be compared to establish a unified method for determining the specific vibration type using real-time recordings (LWD/MWD) and proposing solutions or guidelines. Finally, mechanical vibration assessment matrices will be designed for the drill string, classified by strength and type of vibration (axial, torsional, or lateral), using the studied well profiles as a reference. Once the vibration value has been identified, a real-time recommendation will be issued to correct the anomalies or continue drilling.

Keywords: axial, drill string, lateral, torsional, vibrations.

Metodologia para a aplicação de matrizes de avaliação de vibrações na sarta durante a perfuração

Resumo

A investigação tem como objetivo desenvolver uma metodologia para aplicar matrizes de avaliação de vibrações na sarta durante a perfuração, para otimizar os parâmetros de perfuração e desenho da sarta; otimizando o ROP do poço a perfurar; e em alguns casos prevenir atrapamientos ou colapso do sono por efeito mecânico. É um estudo de projeto que aborda as vibrações da sarta por meio de técnicas documentais e de observação para aquisição de dados. A metodologia será desenvolvida em fases: primeira, investigação e compilação de dados de pozos e literatura existente; além disso, classificação das informações e análise de critérios de avaliação de vibrações utilizadas por empresas distintas. Posteriormente, você comparará as faixas operacionais dessas empresas para estabelecer um método unificado que permita determinar o tipo de vibração especificamente por meio de registros em tempo real (LWD/MWD) e propor soluções ou indicações a seguir. Finalmente, serão projetadas matrizes de avaliação de vibrações mecânicas na parte de perfuração, classificadas de acordo com a força e o tipo de vibração (axiais, torcionais ou laterais), tomando como referência os perfis de pontos estudados. Uma vez identificada a vibração por seu valor, você emitirá uma recomendação em tempo real para corrigir anomalias ou continuar a perfuração.

Palavras-chave: axiais, laterais, sarta de perfuração, torcionais, vibrações.

Introducción

La perforación de pozos lleva implícita una serie de retos en lo que respecta a la selección adecuada del arreglo de fondo de BHA, sobre todo en pozos direccionales. Sistemas como el MWD, LWD, Motores de fondo, RSS etc., son vitales para la consecución de un hoyo estable y seguro. Sin embargo, la presencia de vibraciones en la sarta de perforación, que pueden ser laterales, axiales, torsionales, y tangenciales (combinación de vibraciones laterales y torsionales), puede convertirse en una de las principales causas de daño en el arreglo de fondo (Barrena, DHM, DC, HWDP) así también llegando a generar derrumbes por efecto mecánico y trayendo consigo altos torques, arrastres, subida de presión y empaquetamiento. Esta problemática puede provocar un desgaste prematuro del arreglo de fondo de perforación, ocasionando fatiga y fallas inducidas. Es importante internalizar que en la mayoría de los pozos perforados están presentes las vibraciones (Mac Donald y Cedro, 2010).

El grado de severidad de las vibraciones y su impacto en el proceso de perforación dependen del diseño de la parte inferior del ensamblaje de fondo (BHA) y, en gran medida, de la elección de los parámetros de perforación, especialmente el peso sobre la barrena (WOB) y la velocidad de rotación (RPM) de la sarta de perforación (Esmaeili et al., 2012).

En forma concurrente, un mal diseño del arreglo de fondo BHA y la selección de la barrena provoca vibración en la sarta de perforación, baja tasa de penetración ROP y aprisionamiento de tubería en el fondo del pozo. Asimismo, la inestabilidad de la pared del pozo, debida a factores mecánicos, ausencia o disminución de la circulación de fluido de perforación, pérdida de este en la formación, lleva consigo el atrapamiento de la tubería y finalmente el propio derrumbe de la pared del pozo (Ajhuacho, 2015).

El impacto financiero de estas fallas es importante en términos de costos cuando se reemplazan componentes dañados y por el tiempo de funcionamiento prolongado causado por eventos no planificados, generando tiempos no productivos (Non-Productive Time, NPT) (Malik, 2015).

El aumento de los costos de perforación y el uso de herramientas de fondo en los pozos más complejos y costosos, hacen que el monitoreo de vibración y el control sean clave en la optimización de la perforación (Suarez y Navarro-Lopez, 2005).

En los últimos años se ha hecho un gran esfuerzo por entender, simular, medir, controlar y reducir las vibraciones que aparecen en la sarta durante la perforación (Bukowitz et al, 2008; Yaveri et al, 2010; Song et al, 2024).

Se han establecido niveles de riesgo basados en diferentes criterios para cada uno de los tipos de vibraciones. En tal sentido, las principales empresas contratistas alrededor del mundo, como son Schlumberger, Halliburton, Baker-Hughes, National Oil Varco (NOV), Gyrodata; entre otras han generado una serie de análisis (los cuales han sido tabulados), donde se puede observar la relación entre los niveles de riesgos y los tiempos límites para la ocurrencia de fallas por vibraciones. Estas tablas han resultado ser muy útiles en el análisis de la problemática de las vibraciones de la sarta. En este trabajo consideramos dichas tablas como un aporte, de tal manera que se propone matrices de evaluación basadas en las mediciones que se realizan durante las operaciones. La idea central de estas matrices es ofrecer una vía expedita para la toma de decisiones en tiempo real, ya que se utilizan mediciones aportadas por las herramientas del BHA.

La presente investigación está orientada a ofrecer una alternativa lógica de análisis y evaluación de las vibraciones con el interés último de coadyuvar a minimizar el impacto de estas durante el proceso de perforación.

Materiales y Métodos

Matrices de evaluación de vibraciones mecánicas en la sarta de perforación

Se investigaron las variables utilizadas por el sensor de vibraciones usado en los datos obtenidos (en este caso de Halliburton).

Una vez establecidas las variables, se investigaron las condiciones necesarias en estas variables para que se produzca un determinado tipo de vibración. Estas condiciones se dividieron en 3 grupos para poder distribuirlas en la matriz principal (Tabla 1).

Tabla 1. Tabla principal de variables para la metodología de las matrices.

VARIABLES		
Condición A	Condición B	Condición adicional
Alto Prom Z	Alto Pico Z	Prom X - Prom Y > 1,5g
Alto Prom X y Y	Alto Pico X y Y	Prom X y Prom Y igual
Med Prom X y Y	Med Pico X y Y	Pico X y Y igual
Bajo Prom X y Y	Alto Pico Y	Prom X - Prom Y < -1,5g
Alto Prom Y	Alto Pico X	Prom X > Prom Y
Estallido Z Pico	Alto Pico X, Y y Z	Estallido: Igual X y Y Frecuencias
		Estallido: Alto Pico X y Pico Y frecuencias
		Estallido: Magnitudes > 1g2/Hz

Luego, se establecen dos grupos principales para llevar a cabo un descarte inicial. (Condiciones A y B) (ver Tabla 2).

Tabla 2. Grupos principales para descarte inicial.

VARIABLES		
Condición A	Condición B	Condición adicional
Alto Prom Z	Alto Pico Z	Prom X - Prom Y > 1,5g
Alto Prom X y Y	Alto Pico X y Y	Prom X y Prom Y igual
Med Prom X y Y	Med Pico X y Y	Pico X y Y igual
Bajo Prom X y Y	Alto Pico Y	Prom X - Prom Y < -1,5g
Alto Prom Y	Alto Pico X	Prom X > Prom Y
Estallido Z Pico	Alto Pico X, Y y Z	Estallido: Igual X y Y Frecuencias
		Estallido: Alto Pico X y Pico Y frecuencias
		Estallido: Magnitudes > 1g ² /Hz

El tercer grupo de condiciones (la condición adicional) se usará para confirmar los tipos específicos de vibraciones (Tabla 3).

Tabla 3. Tabla secundaria para definir los tipos de vibraciones según las condiciones.

VIBRACIONES	
Vibraciones	Condición adicional
Stick Slip (Deslizamiento de la sarta)	Solo una condición: Prom X - Prom Y > 1,5g
Bit bouncing (Rebote de la barrena)	Sin condición adicional
Bit whirl (Rotación de la barrena)	Estallido: Magnitudes > 1g ² /Hz
BHA Whirl (Rotación del BHA)	Prom X y Prom Y igual
Impactos laterales	Pico X y Y igual
Resonancia torsional	Prom X - Prom Y < -1,5g
Resonancia parametrica	Estallido: Igual X y Y Frecuencias
Bit chatter (Barrena rajada)	Estallido: Alto Pico X y Pico Y frecuencias
Acoplamiento modal	Prom X > Prom Y

La matriz de decisión se realizó usando los dos grupos de condiciones (Tabla 4), permitiendo una primera clasificación de la vibración presente basado en dos condiciones solamente.

Tabla 4. Matriz de decisión basado en dos condiciones.

MATRIZ PRINCIPAL							
	Alto Pico Z	Alto Pico X y Y	Med Pico X y Y	Alto Pico Y	Alto Pico X	Alto Pico X, Y y Z	Prom X - Prom Y > 1,5g
Alto Prom Z	Bit bouncing (Rebote de la barrena)	!	!	!	!	!	!
Alto Prom X y Y	!	Bit whirl (Rotación de la barrena)/ BHA Whirl (Rotación del BHA)/Bit chatter (Barrena rajada)	!	!	!	!	!
Med Prom X y Y	!	Bit whirl (Rotación de la barrena)/ BHA Whirl (Rotación del BHA)	!	!	!	!	!
Bajo Prom X y Y	!	Impactos laterales	Impactos laterales	!	!	Acoplamiento modal	!
Alto Prom Y	!	!	!	Resonancia Torsional	!	!	!
Estallido Z Pico	!	!	!	!	Resonancia Paramétrica	!	!
							Stick Slip (Deslizamiento de la sarta)

Bit bounce (Rebote de la barrena) y Stick Slip (Deslizamiento de sarta), se pueden confirmar con menos de tres condiciones, utilizando la tabla 3, pero para el resto de los tipos de vibraciones es necesario evaluar una tercera condición (utilizando la tabla 5), después de una primera clasificación en la tabla 3.

Tabla 5. Tercera condición de las vibraciones.

MATRIZ PRINCIPAL							
	Alto Pico Z	Alto Pico X y Y	Med Pico X y Y	Alto Pico Y	Alto Pico X	Alto Pico X, Y y Z	Prom X - Prom Y > 1,5g
Alto Prom Z	Bit bouncing (Rebote de la barrena)	!	!	!	!	!	!
Alto Prom X y Y	!	Bit whirl (Rotación de la barrena)/ BHA Whirl (Rotación del BHA)/Bit chatter (Barrena rajada)	!	!	!	!	!
Med Prom X y Y	!	Bit whirl (Rotación de la barrena)/ BHA Whirl (Rotación del BHA)	!	!	!	!	!
Bajo Prom X y Y	!	Impactos laterales	Impactos laterales	!	!	Acoplamiento modal	!
Alto Prom Y	!	!	!	Resonancia Torsional	!	!	!
Estallido Z Pico	!	!	!	!	Resonancia Paramétrica	!	!
							Stick Slip (Deslizamiento de la sarta)



Condición adicional	Vibración
Estallido: Magnitudes > 1g ₂ /Hz	Bit whirl (Rotación de la barrena)
Prom X y Prom Y igual	BHA Whirl (Rotación del BHA)
Estallido: Alto Pico X y Pico Y frecuencias	Bit chatter (Barrena rajada)
Pico X y Y igual	Impactos laterales
Prom X - Prom Y < -1,5g	Resonancia Torsional
Estallido: Igual X y Y Frecuencias	Resonancia Parametrica
Prom X > Prom Y	Acoplamiento modal

Las vibraciones resaltadas en verde solamente requieren las condiciones observadas en la tabla 3, mientras que las vibraciones resaltadas en rojo requieren una tercera discriminación en la tabla 4 para confirmar este tipo de vibración. Nota: En el caso de Stick-Slip, solamente una condición es necesaria: PromX – PromY > 1.5g; no es necesaria una segunda condición (ver Tabla 5).

En la figura 1, se ilustran los principales tipos de vibraciones, que son: axial, lateral, deslizamiento de la sarta y torsional. En cada caso el tratamiento de atenuación difiere como se plantea en las tablas constitutivas de las matrices.

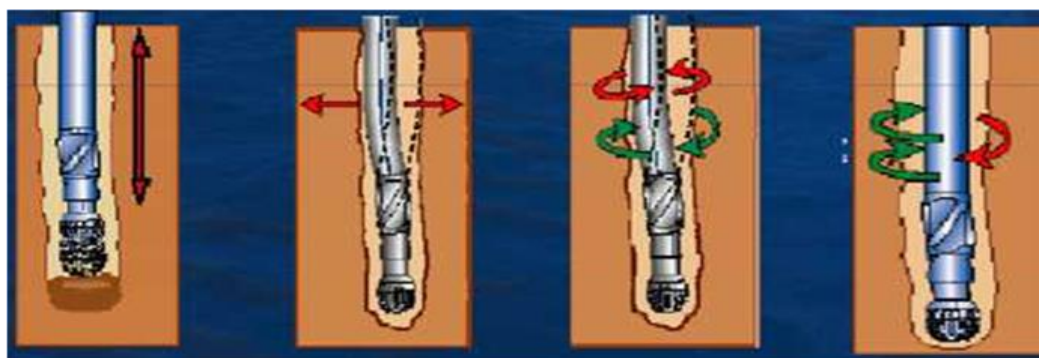


Figura 1. Tipo de vibraciones por discriminación (axial, lateral, deslizamiento de la sarta -stick-slip, torsional).

Una vez que el tipo de vibración ha sido confirmado (utilizando tablas 3 y 4), procedemos a revisar la tabla 6 para establecer las acciones recomendadas para la vibración en tiempo real.

Tabla 6. Acción de repuesta en tiempo real.

Vibración	Acción de respuesta en tiempo real
Bit bouncing (Rebote de la barrena)	Aumente el PSB (WOB) y reduzca las RPM (+/- 10% recomendado). Correlacionar cambio de posiciones de estabilizadores y de la formación.
Stick Slip	Reduzca PSB y aumente RPM (+/- 10% recomendado).
Bit whirl (Rotación de la barrena)	Aumente PSB (WOB) y reduzca RPM (+/- 10% recomendado). Verifique los límites máximos de la mesa giratoria.
BHA Whirl (Rotación del BHA)	
Bit chatter (Barrena rajada)	Ajuste las RPM alejadas de las utilizadas y ajuste el PSB (WOB) si es necesario. En casos extremos, saque el BHA del hoyo y cambie el patrón de corte de la broca.
Impactos laterales	Reduzca RPM y la energía de entrada (MSE), -10% recomendado.
Resonancia torsional	Cambie las RPM y evite la frecuencia de excitación (se recomienda +/- 10%)
Resonancia parametrica	Aumente PSB (WOB) y reduzca RPM (se recomienda +/- 10%).
Acoplamiento modal	Detenga la rotación y levante desde el fondo del pozo. Reinicie la perforación con PSB (WOB) y RPM modificados (se recomienda comenzar con RPM bajas).

Para cada tipo de vibración en la sarta de perforación o el BHA se deben realizar acciones que mitiguen su efecto en tiempo real. Estas acciones se deben realizar cambiando los parámetros mecánicos de la perforación como son el

PSB (WOB), RPM y EME (MSE). Así como disminuir el caudal de perforación de las bombas de lodo (GPM) sin afectar la limpieza del hoyo y disminuir el PSB (WOB) en el caso de vibraciones axiales perforando con barrenas tricónicas.

También podríamos establecer en una matriz la relación entre los valores de aceleración del sensor con el valor RMS. El valor RMS (Root Mean Square) es una métrica que se utiliza para medir la energía total de una señal de vibración. Es una medida más representativa de la energía de vibración que los valores pico y pico a pico. Es la raíz cuadrada de la suma de dichos valores del sensor. Con el valor de RMS podríamos dar una confirmación adicional del tipo de vibración presente. La ecuación de la aceleración del sensor a_{RMS} con el valor de RMS es (McCann y Shah, 1979):

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (1)$$

Donde a_i son las aceleraciones en cada eje x, y y z y n es el número de mediciones.

Determinando la energía mecánica específica MSE podríamos tener una idea de qué tipo de formación estamos perforando, usando la fórmula y la tabla a continuación (Teale, 1965):

$$EME (MSE) = 0,35 * \left(\frac{PSB}{A_B} + \frac{120 * \pi * RPM * T}{A_B * ROP} \right) \quad (2)$$

Donde:

EME (MSE)=Energía mecánica específica, lpc

PSB (WOB)=Peso sobre la barrena (lbs)

A_B = Área de la barrena, pulg

RPM=Velocidad de rotación, rev/min

T=Torque, lbf-pie

ROP= Tasa de penetración, pie/hr

Factor = 0,35 (Factor de eficiencia)

Dependiendo del tipo de roca o de formación se tienen diferentes niveles de resistencia los cuales se clasifican con valores de mayor a menor resistencia yendo desde muy alta, alta, media, baja y muy baja. En la tabla 7, se presentan los diferentes tipos de roca con los valores de resistencia compresiva de acuerdo con la clasificación antes descrita.

Tabla 7. Clasificación de Ingeniería de la roca intacta basada en la resistencia compresiva.

Clasificación de Ingeniería de la roca intacta basada en la resistencia compresiva				
Clase	Nivel de Resistencia	Resistencia en Lpc	Resistencia en Mpa	Roca representativa
A	Muy alta	32000	220	Cuarcita, diabasa y basalto denso
B	Alta	16000-32000	110-220	La mayoría de las rocas ígneas, la mayoría de rocas calizas y dolomita, areniscas bien cementadas y lutitas.
C	Media	8000-16000	55-11	La mayoría de las lutitas, areniscas porosas y rocas calizas.
D	Baja	4000-8000	27,5-55	Arenisca friable, roca volcánica porosa
E	Muy baja	4000	25,5	Esquisto arcilloso, sal de roca

Información de entrada para las matrices

Para la data de entrada, se establecieron tres tablas: Información general, parámetros de vibración y parámetros de perforación.

Información general:

La primera será solo información general acerca del pozo (nombre del pozo, tipo de registro, sección registrada, y tamaños de herramientas las cuales tienen tres tipos de sensores 9", 8" y 6.75". Para ilustrar la tabla se muestran los datos de uno de los pozos considerados en el cual se usó en la sección de producción un sensor de 9".

Actualmente se emplean herramientas de 4 ¾" en la perforación de hoyos de 5 7/8", 6", 6-1/8", 6 ½" y 6 ¾", pero para este caso de estudio se citarán los tres diámetros arriba mencionados.

A continuación, se muestra la Tabla 8.

Tabla 8. Datos de Entrada.

Información general	
Nombre del pozo	PETE1061
Tipo de registro	Tiempo Real
Sección del pozo	Producción
Profundidad registrada (pie)	5000-5600
Tamaño de la herramienta (pulg)	9,00

En la segunda tabla (9), se muestran los valores reales de un registro de vibración (Valores Promedios y Picos en los ejes X, Y, y Z). Se pueden observar unos valores para el eje z.

Tabla 9. Entrada de Valores del Registro de Perforación (LWD/MWD).

Parámetro de vibración	Valor
Prom X (g)	
Prom Y (g)	
Prom Z (g)	5
Pico X (g)	
Pico Y (g)	
Pico Z (g)	50
Prom X - Prom Y(g)	
Estallido (g ² /hz)	
Estallido X Pico (g ² /hz)	
Estallido Y Pico (g ² /hz)	
Estallido Z Pico (g ² /hz)	

La última tabla de datos de entrada será sobre otros parámetros de perforación tales como PSB (WOB), Área de la barrena, RPM, ROP y Torque. Ver tabla 10. En la mismo se colocan unos valores hipotéticos para el pozo evaluado.

Tabla 10. Entrada de Parámetros de Perforación.

Parámetros de perforación	
PSB (WOB) (lbs)	5000
Área de la barrena (pulg ²)	57
RPM (velocidad de rotaria)	100
ROP (pie/hr)	350
Torque (lbsf-pie)	5000

Antes de ingresar los datos de entrada, es necesario seleccionar los umbrales del sensor. Esta tabla se llenará con los valores según el tipo de sensor utilizado para registrar las vibraciones. En este caso, se usaron 3 sensores de Halliburton debido a los registros adquiridos. Algunos otros sensores de Halliburton pueden ser usados, si este es el caso la tabla de abajo necesita ser ajustada con los nuevos valores de umbrales. Ver tabla 11.

Tabla 11. Umbrales de Sensores de Vibración.

UMBRALES DEL SENSOR DE VIBRACIÓN				
Parámetros	Severidad	Herramientas de 9"	Herramientas de 8"	Herramientas de 6,75"
Prom X & Y (g)	Baja	2	3	3
	Med	2 - 4	3 - 5	3 - 5
	Alta	4	5	5
Prom Z (g)	Baja	2	2	2
	Med	2 - 4	2 - 4	2 - 4
	Alta	4	4	4
Prom X - Prom Y (Delta, g)	Baja	1	1	1
	Med	1 - 2	1 - 2	1 - 2
	Alta	2	2	2
Pico X & Y (g)	Baja	30	30	30
	Med	30 - 90	30 - 90	30 - 90
	Alta	90	90	90
Pico Z (g)	Baja	15	15	15
	Med	15 - 40	15 - 40	15 - 40
	Alta	40	40	40

Identificación del tipo de vibración.

La siguiente etapa será la identificación del tipo de vibración. En la siguiente tabla, después de ingresados todos los datos en las tres tablas de entrada y determinados los rangos de umbral con la tabla anterior, se identificará el tipo de vibración mostrando un SÍ al lado del tipo identificado. En este caso se identificó la vibración como Bit Bounce (Rebote de la barrena). En la tabla 12 se muestra el resultado.

Tabla 12. Identificación del tipo de Vibración.

Tipo de vibración	
Tipo de vibración	Presencia
Stick Slip (Deslizamiento de la sarta)	NO
Bit bouncing (Rebote de la barrena)	SI
Bit whirl (Rotación de la barrena)	NO
BHA Whirl (Rotación del BHA)	NO
Impactos laterales	NO
Resonancia torsional	NO
Resonancia paramétrica	NO
Bit chatter (Barrena rajada)	NO

Una vez identificado el tipo de vibración, se dará justo al lado del tipo de vibración la acción recomendada en tiempo real para esa vibración. Esta acción recomendada se comparará con la acción tomada en vivo para cada pozo

hipotético y se evidenciará la sinergia de las matrices de evaluación propuestas con las acciones o sugerencias del equipo de perforación en tiempo real. Tabla 13.

Tabla 13. Acción recomendada para el tipo de vibración.

Cálculos									
Identificación de la vibración		Acción recomendada							
Tipo de vibración	Presencia								
Stick Slip (Deslizamiento de la sarta)	NO								
Bit bouncing (Rebote de la barrena)	SI	PSB (WOB)	5500	/	RPM	90	/	Correlación de la posición de los estabilizadores y los cambios de formación.	
Bit whirl (Rotación de la barrena)	NO								
BHA Whirl (Rotación del BHA)	NO								
Impactos laterales	NO								
Resonancia torsional	NO								
Resonancia parametrica	NO								
Bit chatter (Barrena rajada)	NO								
Aconplamiento modal	NO								

Resultados y Discusión

Para validar la matriz de decisión se estudiaron las mediciones reales en tres pozos cuyos nombres reales fueron cambiados por razones de confidencialidad. En los registros tomados en estos pozos se observan las mediciones de parámetros usadas en la matriz de decisión (se consideraron solo las zonas donde hubo variaciones considerables de las variables). Los pozos de estudio son el PETE-1061, PETE-1063 y PETE-1065. Allí se visualizan tanto los Prom (Avg), como los Picos (Peak) y Deltas Prom (Avg) y Picos (Peak) en los ejes X, Y, Z, además de la profundidad y los parámetros mecánicos e hidráulicos de perforación a lo largo del pozo. En el primer caso tenemos el registro PWD-DDSr DGR en el pozo PETE-1061. Figuras 2a y 2b.

Del análisis del pozo PETE-1061 se obtuvieron las siguientes evaluaciones a las profundidades mostradas en la tabla 14, allí se puede observar el tramo evaluado, el tipo de vibración presente, la litología (en caso de ser determinada), la solución recomendada y si esta resulto ser funcional. Podemos ver que el tipo de vibración presente en los intervalos evaluados (8915'-8920', 8867'-8873', 8873'-8880') fue stick-slip, sin embargo, la litología encontrada solo pudo ser identificada en el intervalo 8915'-8920', como cuarcita, diabasa y basalto denso, mientras en los otros dos intervalos no se pudo identificar por ser la sección con presencia de TR. En todos los intervalos se recomendó reducir la PSB (WOB) y aumentar las RPM como se indica en la tabla.

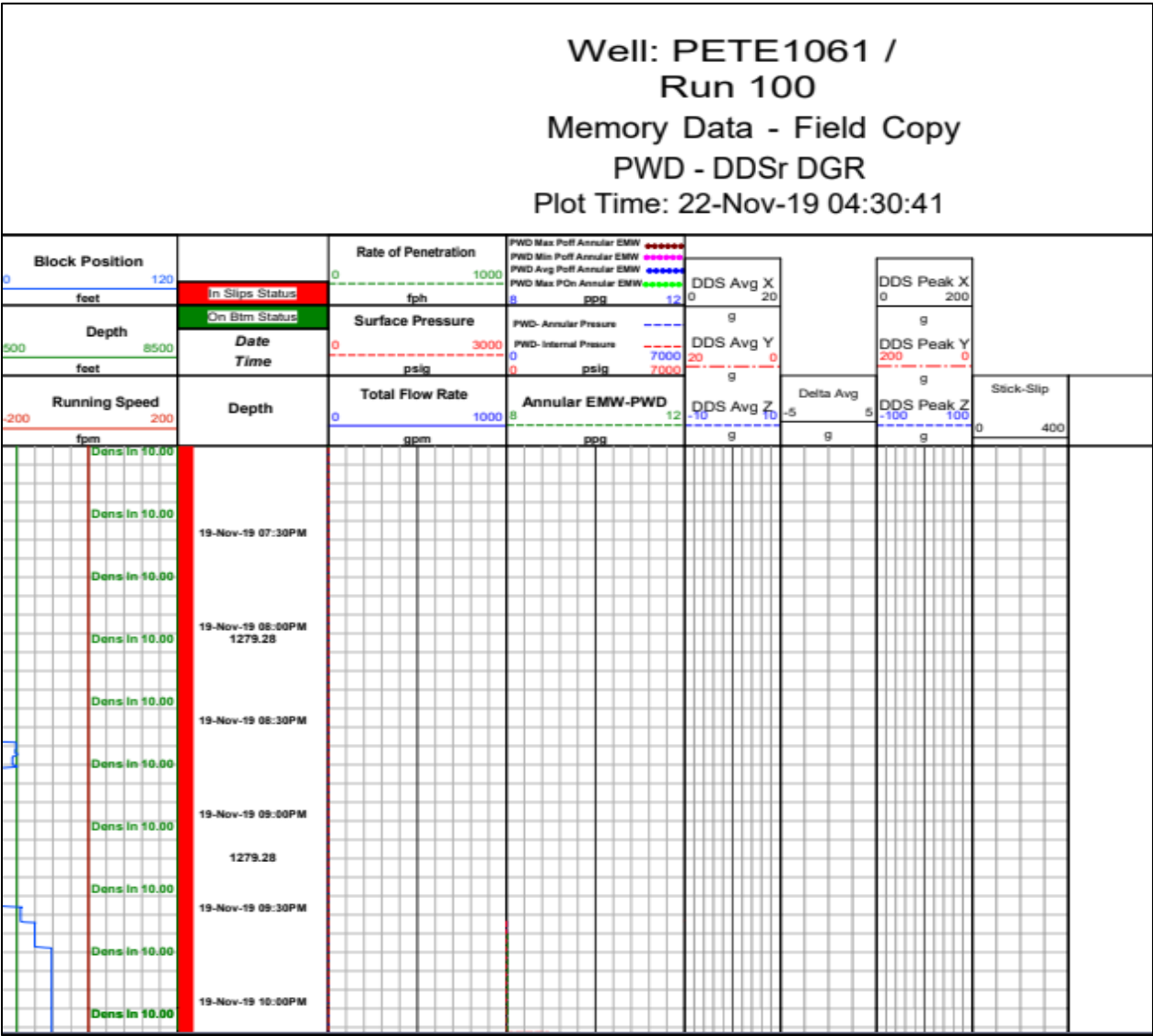


Figura 2a. registro PWD-DDSr DGR en el pozo PETE-1061.

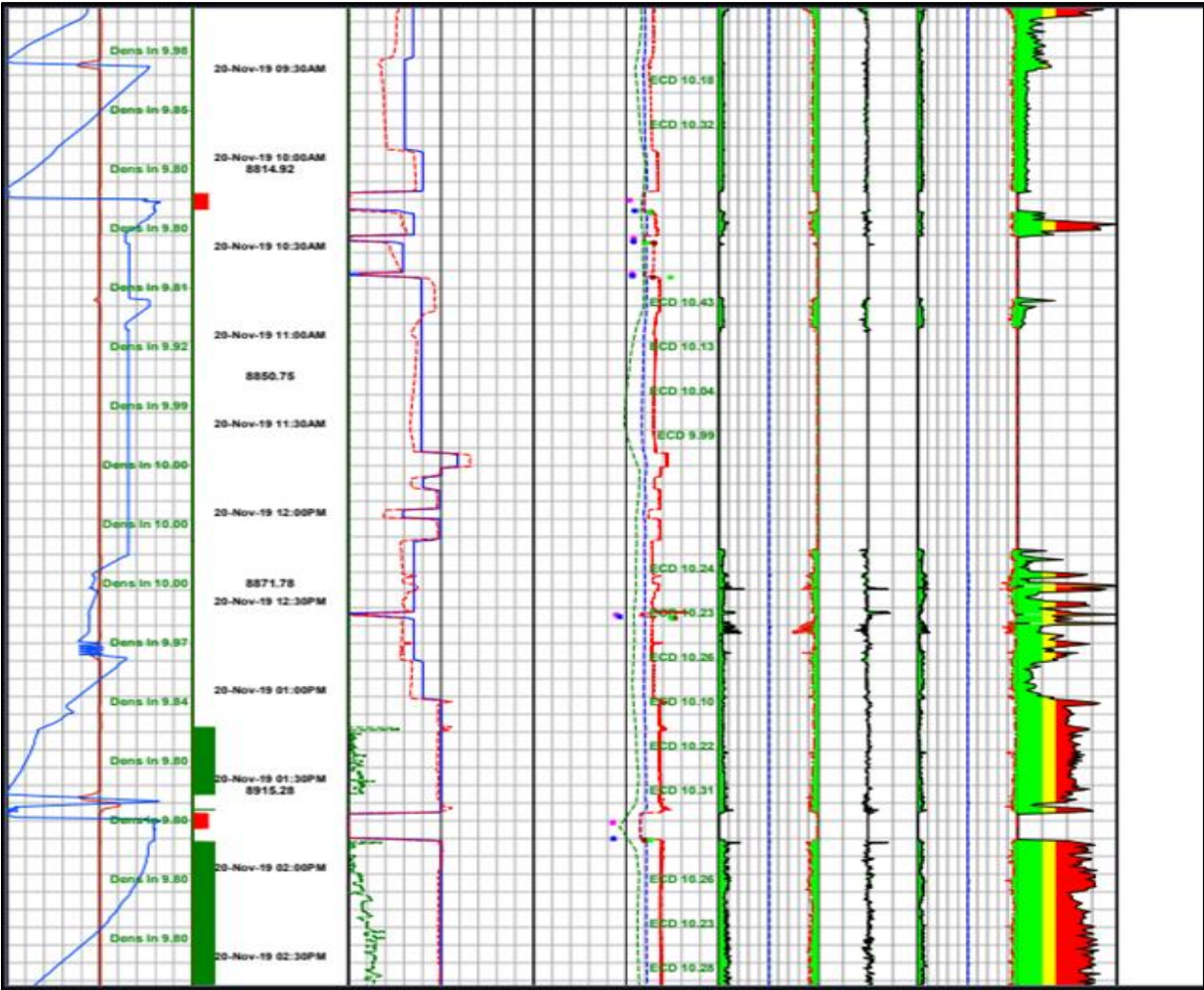


Figura 2b. Registro PWD-DDSr DGR en el pozo PETE-1061.

Tabla 14. Tipo de vibración presente, la litología (en caso de ser determinada), la solución recomendada y si la metodología funciona en el pozo PETE 1061.

Pozo	Sección	Zona	Profundidad	Tipo de vibración	Litología	Solución recomendada	¿Funcionó?
PETE1061	Producción	1	8915-8920	Stick Slip (Deslizamiento de la sarta)	Cuarcita, diabasa y basalto denso	Reduzca el PSB (WOB) a 9000, e incremente las RPM a 96.8	La presencia de stick slip (Deslizamiento de la sarta), ocurrió justo en el momento en que la barrena hizo el primer contacto con la formación, al comenzar a perforar el tubo vertical. Sin embargo, también se observó que luego del contacto la vibración no continuaba, por lo que no fue necesario aplicar las recomendaciones.
		2	8867-8873	Stick Slip (Deslizamiento de la sarta)	No se detectará litología en esta zona porque en esta sección está la TR.	Reduzca el PSB (WOB) a 9000, e incremente las RPM a 51.7	No se aplicó, no era necesario.
		3	8873-8880	Stick Slip (Deslizamiento de la sarta)	No se detectará litología en esta zona porque en esta sección está la TR.	Reduzca el PSB (WOB) a 9000, e incremente las RPM a 58.3	No se aplicó, no era necesario.

Al comparar las acciones o soluciones recomendadas con aquellas de los reportes de perforación pudimos observar que la metodología aplicada arroja la solución correspondiente y que en algunos casos los operadores por temas de tiempos prefieren realizar otras acciones a las recomendadas que en algunos casos resultan no ser las adecuadas y por lo cual se generan tiempos no productivos (NPT) y por lo tanto gastos adicionales.

Al momento de analizar el siguiente pozo (PETE 1065) se obtuvieron las siguientes evaluaciones a las profundidades mostradas en las figuras 3a y 3b y la tabla N°15, allí se puede observar el tramo evaluado, el tipo de vibración presente, la litología (en caso de ser determinada), la solución recomendada y si esta resulto ser funcional. Podemos ver que el tipo de vibración presente en los intervalos evaluados (8010'-8015') fue stick-slip, y a (8070'-8080') impacto lateral, la litología encontrada se identificada mayoría de roca ígnea, mayoría de roca caliza y dolomita, arenisca bien cementada y lutitas en el intervalo (8010'-8015'), y como cuarcita, diabasa y basalto denso, en el intervalo (8070'-8080'). En el intervalo (8010'-8015') se recomendó reducir la PSB (WOB) y aumentar las RPM, mientras que en el intervalo (8070'-8080') se recomendó reducir tanto la PSB (WOB) como las RPM, como se indica en la tabla. Tal como en el pozo anterior, se compararon las decisiones ofrecidas por las matrices con la toma de decisiones en tiempo real del equipo de perforación, y se denota sinergia en las soluciones recomendadas.

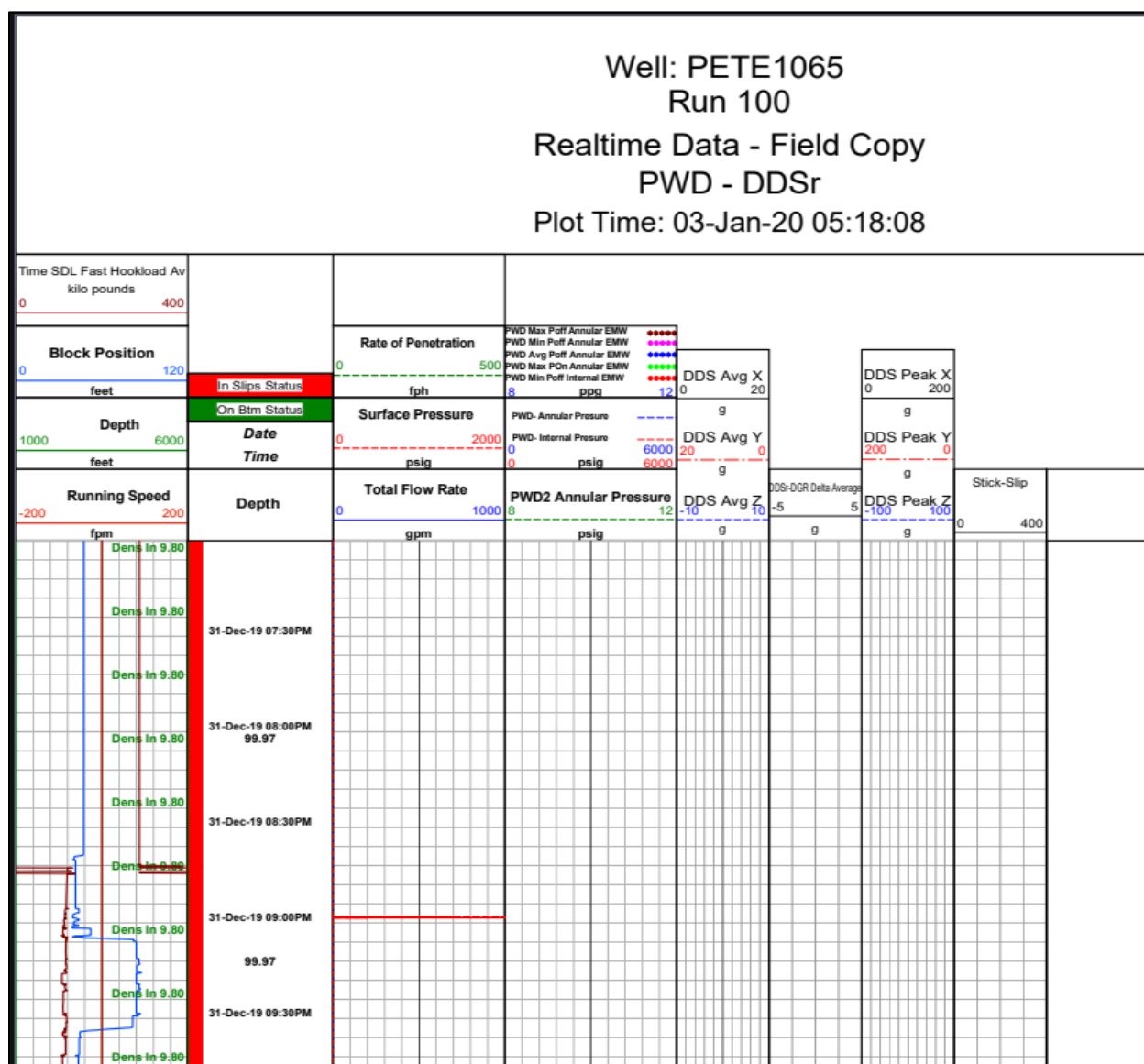


Figura 3a. Registro PWD-DDSr DGR en el pozo PETE-1065.

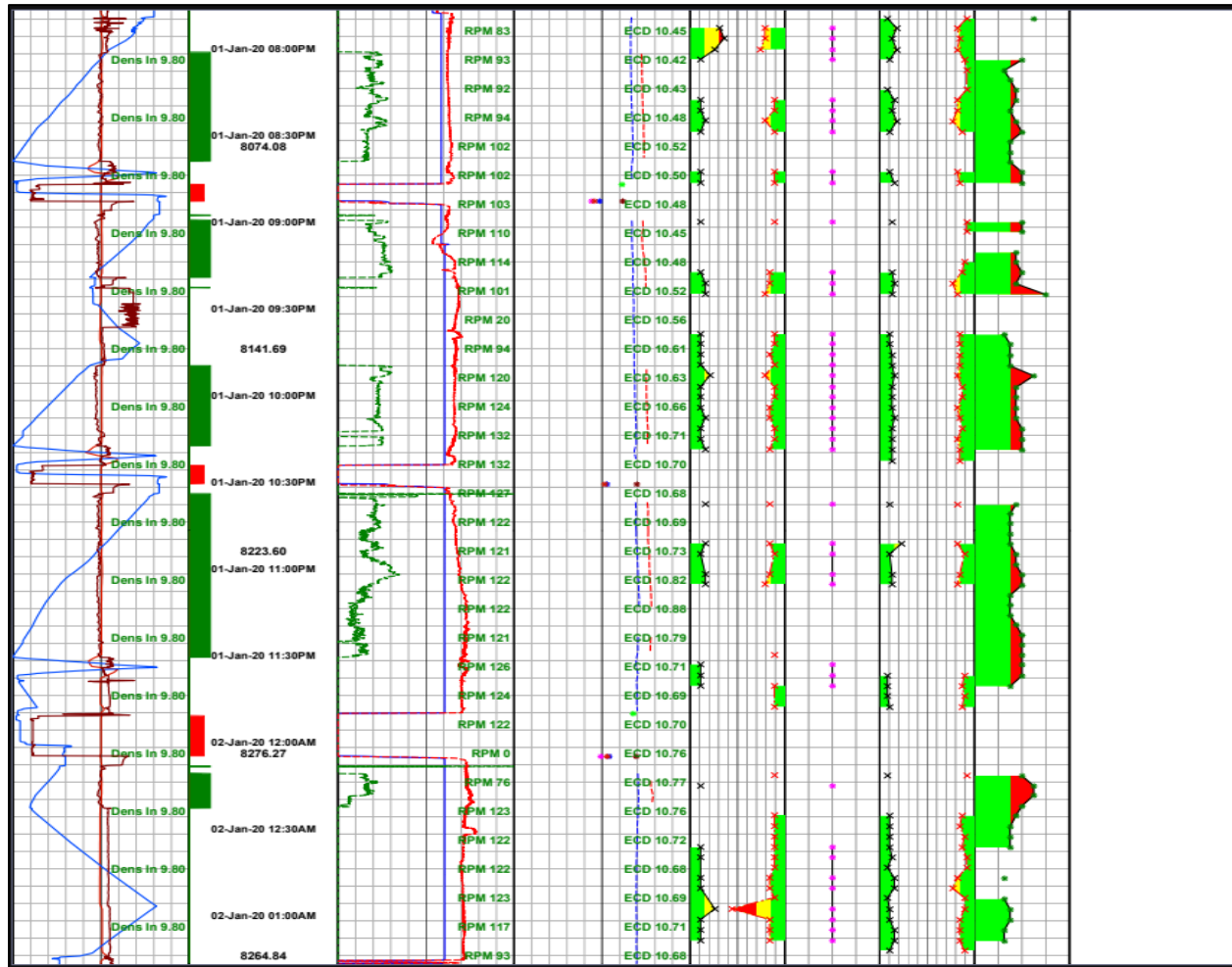


Figura 3b. Registro PWD-DDSr DGR en el pozo PETE-1065.

Tabla 15. Tipo de vibración presente, la litología (en caso de ser determinada), la solución recomendada y si la metodología funciona en el pozo PETE 1065.

Pozo	Sección	Zona	Profundidad	Tipo de vibración	Litología	Solución recomendada	¿Funcionó?
PETE1065	Producción	1	8010-8015	Stick Slip (Deslizamiento de la sarta)	La mayoría de las rocas son ígneas, la mayoría de rocas son calizas y dolomita, areniscas bien cementadas y lutitas.	Reduzca el PSB (WOB) a 9000, e incremente las RPM a 91.3	Si, El PSB (WOB) se reduce a 8000, y las RPM se incrementan a 93
		2	8070-8080	Impacto lateral	Cuarcita, diabasa y basalto denso	Reduzca las RPM a 84.6 y Reduzca la EME (MSE)	La recomendación no se aplicó en la operación en tiempo real, por lo que se puede observar que la vibración persiste

Conclusiones

La validación de la matriz de decisión aplicada en los pozos PETE-1061 y PETE-1065 permitió confirmar su eficacia para la identificación y mitigación de vibraciones durante la perforación. Los resultados muestran una correlación entre las recomendaciones de la matriz y las soluciones aplicadas en campo, lo que respalda su aplicabilidad operativa.

Se evidenció que el tipo de vibración predominante en los pozos analizados fue el Stick-Slip, seguido del impacto lateral, lo que sugiere la necesidad de estrategias diferenciadas para mitigar cada fenómeno. Las recomendaciones de ajuste de PSB (WOB) y RPM mostraron efectividad en la reducción de las vibraciones, validando así la metodología propuesta.

La identificación litológica fue clave para comprender el comportamiento mecánico de las secciones perforadas. La presencia de rocas ígneas, cuarcitas y basaltos densos en los intervalos evaluados influyó significativamente en la propagación de vibraciones, lo que resalta la importancia de integrar datos geológicos en la toma de decisiones operativas.

Se observó que, en algunos casos, las decisiones operativas en campo no siguieron estrictamente las recomendaciones de la matriz de decisión debido a restricciones de tiempo, lo que generó eventos de NPT y costos adicionales. Esto resalta la necesidad de optimizar la comunicación y la implementación de estrategias predictivas en tiempo real.

La comparación entre las soluciones propuestas por la metodología y las decisiones tomadas en campo refleja una alta sinergia, lo que sugiere que la matriz de decisión puede ser utilizada como una herramienta confiable para mejorar la eficiencia en la perforación y reducir tiempos improductivos y costos operacionales.

Referencias Bibliográficas

- Ajuacho, R. (2015). Propuesta de un ensamblaje de fondo (BHA) para minimizar la vibración de la sarta de perforación en la formación Los Monos - sur de Bolivia. Tesis. Universidad del Zulia.
- Bukowitz, D., Morán, J., Bravo, R. (2008). Programa computacional para predecir las frecuencias y modos de vibración transversales en sarts de perforación mediante el método de elementos finitos y análisis modal, Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 31(2)
- Esmaeili, A. *et al.* (2012). Laboratory scale control of drilling parameters to enhance rate of penetration and reduce drill string vibration, SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia.
- Malik, A. (2015). Propuesta de un ensamblaje de fondo para minimizar el impacto de las vibraciones en pozos de Campo Boscán. Tesis. Universidad del Zulia.
- McCann, M. y Shah, H. (1979). Determining strong-motion duration of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 6(4), 1253-1265.
- McDonal J., Cedro, Y. (2010). Vibración en la sarta de perforación. Tesis. UNAM, 187
- Navarro-Lopez, E, Suarez, R. (2005). Vibraciones mecánicas en una sarta de perforación: problemas de control. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. 2(1), 43-54.
- Song, J. *et al.* (2024) The state-of-the-art review on the drill pipe vibration. *Geoenergy Science and Engineering*, 243, 213337.
- Teale, R. (1965). The Concept of Specific Energy in Rock Drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 2, (1), 57-73.
- Yaveri, M., Damani, K., Kalbhor, H. (2010). Solutions to the Down Hole Vibrations During Drilling. *SPE* 136956, 5.

Editor Asociado: Dr. Gioswald Inciarte Fermín

Ingeniero de Petróleo – LUZ, Maestro en Ingeniería de petróleo – LUZ, Doctor en Gestión Ambiental

gioswald.inciarte@cbmex.com.mx

Institución CBMEX – LUMINA GEOPHYSICAL MÉXICO



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

Volumen 48. Año 2025, Edición continua_____

*Esta revista fue editada en formato digital y
publicada en enero 2025, por el **Fondo
Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia.
Maracaibo-Venezuela***

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org