

**IMPACTO DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE PERFORACIÓN EN  
LA CALIDAD DEL HUECO**

**JHONATAN FELIPE GUTIÉRREZ GÓMEZ  
NICOLÁS FERNANDO ARIAS SEPÚLVEDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

**IMPACTO DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE PERFORACIÓN EN  
LA CALIDAD DEL HUECO**

**JHONATAN FELIPE GUTIÉRREZ GÓMEZ  
NICOLÁS FERNANDO ARIAS SEPÚLVEDA**

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos

Director:

**Wilson Raúl Carreño Velasco  
Ingeniero de Petróleos**

Co-director:

**Helmuth Esteban Portilla Rodríguez  
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

*A mi madre Maria Rosmira Gómez Cañas, por ser mi modelo a seguir y estar al lado mío acompañándome en todos los momentos difíciles; por sus consejos, porque todas las preocupaciones durante mi proceso de formación no eran solo mías, si no de los dos; nada de esto sería posible sin ella.*

*A mi padre Asen Gutiérrez Gutiérrez, quien siempre quiso darme la mejor formación posible y siempre me acompañó, ya que, aunque no viviera conmigo, siempre sentí que estaba a mi lado apoyándome en lo que necesitará.*

*A mis amigos y compañeros, los cuales aportaron grandes experiencias, valores y conocimientos que complementaron de gran manera mi formación; su compañía y sus palabras de motivación fueron una parte importante para hacer esto posible, los recordaré con agrado, especialmente a Jose y Leonardo.*

*Jhonatan Felipe Gutiérrez Gómez*

## DEDICATORIA

*A Dios por ser mi guía, por brindarme fortaleza, paciencia, sabiduría y perseverancia durante el transcurso de mis estudios universitarios. Por permitirme alcanzar un nuevo logro en mi vida.*

*A mi madre Betsy, a pesar de su pronta partida sembró grandes valores en mí que me permitieron crecer y superar adversidades; hoy sé que cuento con su compañía en cada paso que doy.*

*A mi padre Carlos, por su esfuerzo y dedicación para brindarme la mejor formación posible; por ser mi ejemplo a seguir y por brindarme valiosos consejos.*

*A mi hermana Mayra, por su cariño y comprensión.*

*A mi novia Daniela, por su amor y bondad, por ser una persona incondicional y brindarme gratos momentos los cuales hicieron más ameno este proceso.*

*A mis amigos y compañeros, los cuales aportaron grandes experiencias, valores y conocimientos que complementaron de gran manera mi formación, los recordaré con agrado, especialmente a Efraín, Pablo y Daniel.*

*Nicolás Fernando Arias Sepúlveda*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Grupo de Investigación Estabilidad de Pozos por brindarnos la orientación necesaria en el proceso investigativo y el respectivo desarrollo de este proyecto.

A los Ingenieros Wilson Raúl Carreño Velasco y Helmuth Esteban Portilla Rodríguez por sus valiosas observaciones, apoyo y acompañamiento durante la realización de este proyecto.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos, su personal docente y administrativo, por poner a nuestra disposición, valiosas herramientas que nos permitieron desarrollar grandes aptitudes y un perfil integral como profesionales.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirnos crecer a nivel personal y profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	14
1. MARCO TEÓRICO.....	15
1.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	15
1.1.1 Parámetros operacionales .....	15
1.1.2 Parámetros de diseño .....	19
1.2 TIPOS DE VIBRACIONES.....	21
1.2.1 Vibración axial.....	21
1.2.2 Vibración torsional .....	24
1.2.3 Vibración lateral .....	26
1.3 DETECCIÓN DE VIBRACIONES CON SENSORES DE FONDO.....	28
1.4 DETECCIÓN DE VIBRACIONES CON PARAMETROS DE SUPERFICIE .....	32
1.4.1 Consideraciones .....	32
1.4.2 Índice de <i>Stick/Slip</i> .....	33
1.4.3 Muestreo de datos .....	35
2. METODOLOGÍA.....	38
2.1 TRANSFORMADA DE FOURIER.....	38
2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA DETECCIÓN DE VIBRACIONES .....	40
2.3 APLICACIÓN .....	42
3. CONCLUSIONES.....	47
4. RECOMENDACIONES .....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efectos del peso sobre la broca sobre el comportamiento de la sarta en fondo.....	22
Figura 2. Vibración axial. ....	23
Figura 3. Vibración torsional. ....	25
Figura 4. Vibración lateral .....	27
Figura 5. Desgaste de los cortadores según el tipo de vibración.....	29
Figura 6. Velocidad de rotación en fondo vs tiempo de un caso de <i>Stick/Slip</i> . ....	31
Figura 7. <i>Stick/Slip Index</i> vs tiempo. ....	35
Figura 8. Frecuencias de muestreo. ....	37
Figura 9. Representación gráfica de la transformada de Fourier.....	39
Figura 10. Paso a paso propuesto. ....	40
Figura 11. Gráfica de torque vs tiempo completa (3:00:00 a 4:00:00 pm). ....	43
Figura 12. Gráfica de amplitud vs frecuencia (transformada de Fourier). ....	44
Figura 13. Gráfica de amplitud vs frecuencia, primer intervalo (0 a 236 segundos – 3:00:00 a 3:03:55 pm).....	44
Figura 14. Gráfica de amplitud vs frecuencia, segundo intervalo (236 a 472 segundos – 3:03:55 a 3:07:52 pm). ....	45
Figura 15. Gráfica de amplitud vs frecuencia, tercer intervalo (472 a 708 segundos – 3:07:52 a 3:11:47 pm).....	45
Figura 16. Gráfica de amplitud vs frecuencia, cuarto intervalo (708 a 944 segundos – 3:11:47 a 3:15:02 pm).....	46

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Mecanismos de falla según el tipo de broca. ....	20
Tabla 2. Caracterización de vibraciones axiales. ....	23
Tabla 3. Caracterización de vibraciones torsionales. ....	25
Tabla 4. Caracterización de vibraciones laterales. ....	27
Tabla 5. Clasificación de mecanismos de vibración. ....	29
Tabla 6. Recomendaciones para detección de vibraciones con los parámetros de superficie. ....	32

## NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

**WOB:** Peso sobre la broca

**RPM:** Revoluciones por minuto

**ROP:** Tasa de perforación

**DSSI:** Índice de *stick/slip* en fondo

**SSSI:** Índice de *stick/slip* en superficie

**X:** Amplitud de la transformada de Fourier para un valor de frecuencia específico

**Buckling:** Fenómeno de pandeo o inestabilidad elástica

## RESUMEN

**TÍTULO:** IMPACTO DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE PERFORACIÓN EN LA CALIDAD DEL HUECO\*.

**AUTORES:** Jhonatan Felipe Gutiérrez Gómez

Nicolás Fernando Arias Sepúlveda\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Perforación, calidad de hueco, parámetros operacionales, vibraciones.

**DESCRIPCIÓN:** La calidad del hueco es una consideración importante durante el proceso de perforación, ya que una mala calidad de hueco puede ser resultado de diversos fenómenos indeseables tales como problemas de inestabilidad geológica y vibraciones, estas últimas son especialmente importantes de detectar ya que dependen directamente de la optimización que se le dé a los parámetros operacionales y aunque fenómenos de este tipo pueden ser corregidos, si no se tratan a tiempo pueden llegar a causar problemas tan graves como la pérdida de la sarta en el hueco.

En este trabajo se identificó que las vibraciones son las mayores causantes de mala calidad del hueco y se obtuvo una metodología la cual permite detectar la presencia de vibraciones torsionales y/o axiales con base en las mediciones de los sensores de superficie, esto permite la detección y toma de acciones correctivas oportunamente, lo cual conlleva a la obtención de mejor calidad de hueco sin la necesidad del uso de sensores de fondo.

Los resultados obtenidos confirmaron que efectivamente era posible la utilización de parámetros de superficie para la detección de vibraciones en fondo, sin embargo, se observó que es importante la utilización de una frecuencia de datos lo suficientemente alta para que se puedan detectar todos los posibles fenómenos vibratorios que ocurren en el pozo.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Wilson Raúl Carreño Velasco, Ingeniero de Petróleos. Co-director: Helmuth Esteban Portilla Rodríguez, Ingeniero de Petróleos.

## ABSTRACT

**TITLE:** IMPACT OF THE DRILLING OPERATIONAL PARAMETERS ON THE HOLE'S QUALITY\*.

**AUTHORS:** Jhonatan Felipe Gutiérrez Gómez

Nicolás Fernando Arias Sepúlveda\*\*

**KEYWORDS:** Drilling, hole's quality, operational parameters, vibrations.

**DESCRIPTION:** Hole's quality is an important consideration during the drilling process, this is due to the fact that a poor hole quality can be a result of different undesirable causes such as wellbore stability problems and vibrations, it's specially important to detect the former ones because they depend on the optimization of the operational parameters, and even though they can be dealt with, if it isn't done fast enough they can cause severe problems such as the lost of the drillstring inside the hole.

In this work, it was identified that vibrations are the major cause of poor hole quality and a methodology was obtained which allows to detect the presence of torsional and/or axial vibrations based on the measurements from the surface sensors. This allows the detection of the presence of vibrations which allows taking corrective actions fast enough. Which ultimately will end up in a better hole without the need for the use of downhole sensors.

The results confirmed that it was indeed posible the use of surface parameters to detect downhole vibrations, although it was also found that the frequency used for the acquisition of the data must be high enough to be able to detect all the posible frequencies of the vibrations happening downhole.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Wilson Raúl Carreño Velasco, Ingeniero de Petróleos. Co-director: Helmuth Esteban Portilla Rodríguez, Ingeniero de Petróleos.

## INTRODUCCIÓN

Las vibraciones se han identificado comúnmente como fenómenos que originan ineficiencia en todos los sistemas mecánicos, la naturaleza de su origen durante la perforación depende principalmente de las condiciones dinámicas en fondo, por lo cual es necesario conocer las causas que las originan para así poder controlarlas.

Diversas compañías han incursionado en esta temática prestando servicios a la industria y han logrado alcanzar altos estándares de calidad en sus prácticas, lo cual se ha visto reflejado en menores tiempos y costos de operación. Sin embargo, los métodos que utilizan estas compañías a nivel mundial se basan en la utilización de costosos sensores de fondo para la detección de las vibraciones y aunque esta puede ser la única alternativa posible para analizar las vibraciones en pozos de alta complejidad (pozos de alta inclinación, pozos muy profundos) es una alternativa poco atractiva para pozos más simples que aun así se beneficiarían de una metodología que permita detectar las vibraciones con base en las mediciones de parámetros que se hacen en todos los pozos en superficie (torque, carga en el gancho, rpm, entre otros).

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Con el fin de conocer cómo se generan los fenómenos vibracionales durante la perforación y definir la relación entre el comportamiento de los parámetros operacionales y las vibraciones, es necesario realizar una revisión de los conceptos básicos que abarcan esta temática ya que la presencia o no de vibraciones dependerá tanto de los parámetros operacionales (peso sobre la broca, torque, velocidad de rotación, entre otros) como de los parámetros de diseño del BHA (estabilizadores, ensanchadores, tipo de broca, entre otros).

**1.1.1 Parámetros operacionales.** El manejo dado por el perforador a los parámetros operacionales durante la perforación tiene un impacto directo en las condiciones dinámicas en fondo, y por ende en la generación de vibraciones.

Adicionalmente, el desempeño de la perforación se encuentra directamente relacionado con aspectos geológicos de la zona a perforar y su interacción con los parámetros operacionales como se mencionó anteriormente, ya que por ejemplo, los parámetros operacionales óptimos en cierta formación pueden no funcionar en otra por muy similares que sean, de ahí la importancia del monitoreo en todo momento del comportamiento en fondo, para de esta manera analizar lo que está ocurriendo en un momento en particular.

Los parámetros de perforación son indicativos claves del comportamiento de los equipos utilizados en fondo y la eficiencia con la cual se está siendo llevado a cabo el proceso. Gracias a los numerosos avances tecnológicos y logísticos con los que cuenta la industria petrolera, actualmente las operaciones de perforación son monitoreadas en tiempo real por medio del comportamiento de los parámetros en

fondo lo cual permite la toma de decisiones asertivas mientras la operación está en marcha y la corrección de posibles errores que se puedan presentar, obteniendo finalmente una mejor calidad del hueco, lo cual reduce problemas típicos de huecos espiralados o con alta tortuosidad como lo son el aumento del torque y el arrastre, la disminución del peso que se transmite a la broca, el aumento del desgaste de la tubería y el BHA, el posible riesgo de pega, entre otros.

### **a) Velocidad de rotación (RPM)**

La velocidad de rotación indica el número de rotaciones en la broca de perforación, este parámetro posee una relación directamente proporcional con la velocidad de penetración (ROP)<sup>1</sup>. Sin embargo, existen determinados valores de velocidades de rotación, conocidos como velocidades críticas, en los cuales suelen presentarse condiciones de alta resonancia, este fenómeno induce la generación de vibraciones en la sarta de perforación con amplitudes de onda de gran tamaño, lo cual representa un riesgo tanto para equipos como para la integridad del pozo. La generación de resonancia no solo es dependiente de las revoluciones por minuto, adicionalmente debe tenerse en cuenta aspectos físicos de la tubería y el BHA utilizado, tales como, la masa, la rigidez, la estructura/asimetría de la broca y la amortiguación. Con base en lo mencionado anteriormente, se podría decir que hay que buscar un balance entre la mayor cantidad de RPM posible sin llegar a comprometer la sarta (ya sea por vibraciones o RPM'S demasiado altas las cuales pueden desgastar prematuramente los equipos).

---

<sup>1</sup> GREENWOOD, Jeremy. Vibration Monitoring and Mitigation – An Integrated Measurement System. IADC/SPE-178773-MS (2016).

## **b) Peso sobre la broca (WOB)**

El peso sobre la broca es un indicativo de la carga axial aplicada en la estructura de corte, al igual que la velocidad de rotación, este parámetro posee una relación directamente proporcional con la velocidad de penetración (ROP)<sup>2</sup>, con altos valores de WOB se aumenta la profundidad de penetración de los cortadores o dientes (dependiendo del tipo de broca) sobre la formación. Sin embargo, altos valores de WOB pueden ser causantes de vibraciones axiales en la sarta de perforación, generando el fenómeno conocido como *bit bounce* en el cual ocurre un rebote continuo de la broca sobre la formación generando mala calidad en la estructura del pozo y desprendimiento o daño de equipos presentes en el BHA.

La vibración no es el único problema a tener en cuenta cuando se utilizan altos valores de peso sobre la broca, una de las mayores limitantes para usar altos WOB es el fenómeno conocido como *buckling*, este fenómeno ocurre cuando la sarta está sometida a altos esfuerzos de compresión los cuales pueden causar que la sarta se comprima ya sea de manera sinusoidal o helicoidal, perforar bajo estas condiciones (especialmente la segunda) aumenta el riesgo significativamente debido al aumento del contacto con la formación, lo cual aumenta el torque y el arrastre y conlleva a riesgos de pegas. Además de esto, perforar bajo estas condiciones representa un alto riesgo en la integridad de la sarta.

## **c) Caudal**

El caudal indica la tasa a la cual está siendo bombeado el fluido de perforación dentro del pozo, debido a la relevancia que tiene el fluido de perforación utilizado y

---

<sup>2</sup> GREENWOOD, Jeremy. Vibration Monitoring and Mitigation – An Integrated Measurement System. IADC/SPE-178773-MS (2016).

sus características, se hace necesario un conocimiento detallado de las propiedades reológicas del mismo (densidad, viscosidad, esfuerzo de cedencia, entre otros) y los diferentes modelos reológicos que determinan su comportamiento.

El caudal es un parámetro bastante importante ya que del lodo dependen diversas cosas dentro del pozo (limpieza de recortes, sostenimiento de las paredes de las formaciones, presión diferencial en las herramientas de perforación, entre otros) y es necesario tener en cuenta todos estos puntos para hacer una elección adecuada del mismo. Por ejemplo, un galonaje muy alto podría causar *washouts* en las formaciones, sin embargo, un galonaje muy bajo puede que no sea suficiente para generar una limpieza adecuada del hueco o de proveer la suficiente presión diferencial necesaria en el motor o en las boquillas de la broca.

#### **d) Torque**

Es la fuerza ejercida en el equipo en superficie para generar la rotación y avance de la sarta de perforación, generalmente se expresa en Kft-lb. El torque tiene una relación directa con la velocidad de rotación de la sarta y la combinación de ambos parámetros es un indicativo clave de la presencia de vibraciones en fondo. Ya que, por ejemplo, detectar que hay un torque alto y RPM'S bajas seguidos por un ciclo de torque bajo y RPM'S altas podría ser un indicador de la presencia de vibraciones torsionales en fondo. Lastimosamente, en muchos casos los sensores que miden el torque en superficie no están ubicados justo debajo del top-drive lo cual hace que las mediciones no sean del todo precisas, si se desea detectar vibraciones en fondo a partir de parámetros en superficie sería ideal entonces la ubicación del medidor de torque debajo del top-drive para que este haga una medición directa del torque siendo transmitido. Además de vibraciones, el torque en superficie es un buen indicador de otras condiciones en el pozo, ya que este puede ser utilizado para detectar por ejemplo aumento del contacto entre la sarta y la formación, lo cual

puede ser debido a varias razones, sin embargo, es importante tener en cuenta estos aumentos, especialmente si son significativos, ya que pueden conllevar a situaciones de pega.

**1.1.2 Parámetros de diseño.** Los parámetros de diseño pueden afectar de manera significativa el comportamiento de la sarta durante la perforación, por ejemplo, en brocas tricónicas, la ubicación de los conos influye en la generación de vibraciones, si los conos estuvieran ubicados de manera complemente simétrica esto haría que en el caso de presentarse una frecuencia de vibración, esta se vea amplificada debido a la simetría de los conos, resultando en un problema aún mayor.

Ahondar en los pequeños detalles de los efectos que tienen las diferentes partes del BHA en el comportamiento del mismo durante la perforación requeriría un libro completo por sí solo, sin embargo, a continuación, se mencionan dos parámetros de diseño importantes y cómo estos afectan el comportamiento del BHA.

#### **a) Estructura de corte de la broca**

El tipo de estructura de corte utilizada para una sección de perforación y su configuración determina en gran medida la eficiencia con la cual será perforada la sección y el tipo de corte realizado sobre la misma, lo cual está relacionado con la calidad de hueco obtenida. Los principales factores a tener en cuenta son el tipo de broca (PDC, tricónica o impregnada), el área de contacto o *gage* de la broca y el número de cortadores.

Las brocas tricónicas aplican un esfuerzo de compresión sobre la formación. Debido a que poseen partes móviles (conos) son menos susceptibles a generar

inestabilidad en la sarta de perforación, pero suelen registrar valores de ROP más bajos<sup>3</sup>.

Las brocas PDC ejercen un esfuerzo de cizalla o corte sobre la formación debido a que poseen pequeñas incrustaciones fijas llamadas cortadores en lugar de los conos, esto les permite alcanzar mayores velocidades de penetración, pero las hace más susceptibles a generar inestabilidad en la sarta de perforación. La tabla 1 resume lo mencionado anteriormente.

**Tabla 1. Mecanismos de falla según el tipo de broca.**

Broca tricónica	Falla por esfuerzo de compresión
Broca PDC	Falla por esfuerzo cortante

Fuente: Modificado de Selección de barrenas en el proceso de selección de pozos. Programa de entrenamiento acelerado para supervisores. Schlumberger.

## **b) BHA y estabilizadores**

La configuración escogida para el BHA influye en gran medida en la prevención o generación de vibraciones en la sarta, en especial las vibraciones laterales, casos de estudio sobre el fenómeno de *spiraling* demuestran que la ubicación de los estabilizadores a lo largo de la sarta puede llegar a disminuir de manera considerable la magnitud de las amplitudes de onda de las vibraciones o incluso eliminarlas<sup>4</sup>. Sin embargo, la ubicación de los estabilizadores también afecta significativamente la tendencia del BHA ya sea a construir a tumbar o a mantener ángulo, por lo cual es importante tener esto en cuenta para hacer un balance entre

---

<sup>3</sup> Selección de barrenas en el proceso de selección de pozos. Programa de entrenamiento acelerado para supervisores. Schlumberger.

<sup>4</sup> DUPRIEST, F. The Real Causes of Borehole Misbehavior and Operational Practices to Eliminate Them. Texas A&M University.

la posición de los estabilizadores que se preferiría para reducir las vibraciones y la posición de los estabilizadores que ayude a llevar la tendencia deseada en el pozo que se esté analizando.

## **1.2 TIPOS DE VIBRACIONES**

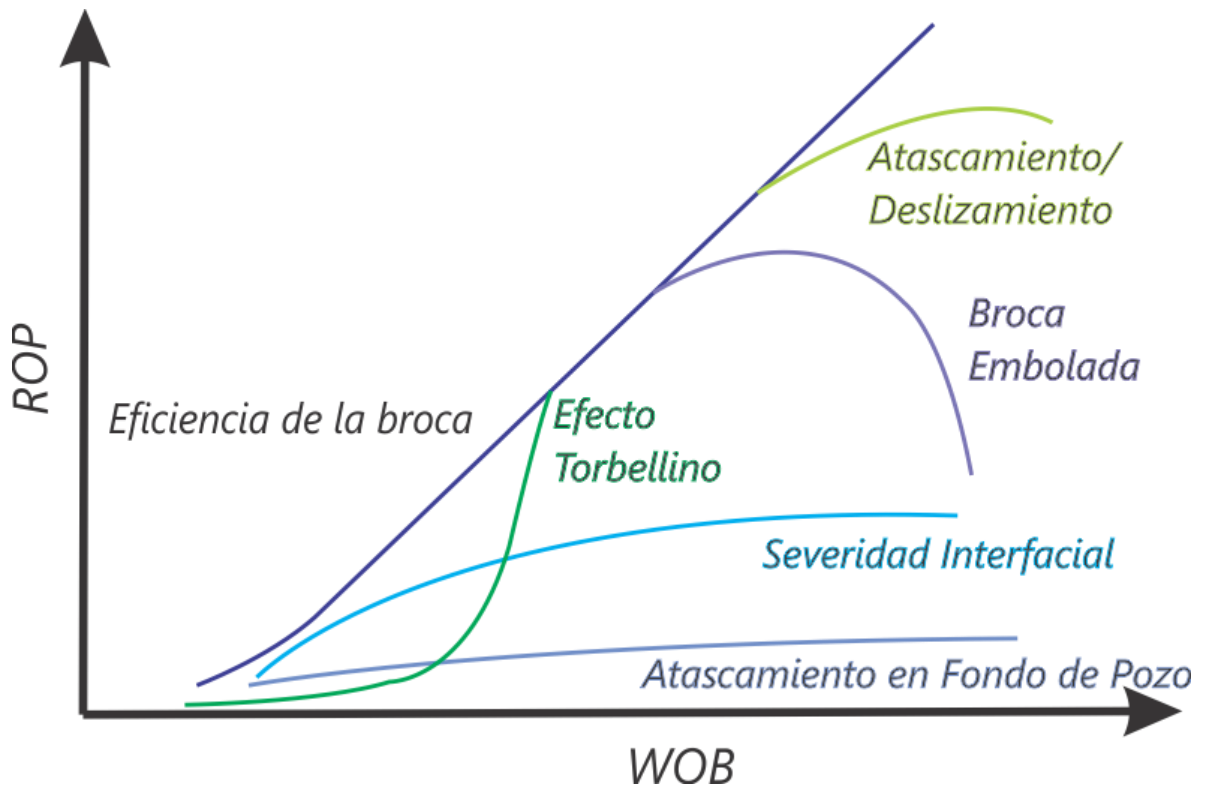
Las vibraciones son fenómenos mecánicos generados en la sarta de perforación, los cuales se consideran como la causa dominante de un corte ineficiente en la broca y por lo tanto mala calidad de hueco<sup>5</sup>. Este fenómeno suele atribuirse al diseño de la broca y a la configuración del BHA, pero de igual o mayor influencia tiene la forma en la cual se operen los parámetros de perforación como las RPM, el peso sobre la broca, el caudal y/o el torque. En la figura 1 se observan diferentes problemas según la combinación de ROP/WOB que se tenga.

**1.2.1 Vibración axial.** Las vibraciones axiales generan un rebote continuo de la broca sobre la formación como se puede observar en la figura 2. Este tipo de vibraciones suelen presentarse en pozos verticales, litologías duras y en brocas tricónicas. El principal parámetro que afecta la generación de estas vibraciones es el peso sobre la broca, ya que altos pesos sobre la broca tienden a agravar su efecto. Las vibraciones axiales suelen generar problemas como desgaste en la broca, fallas en el BHA, disminución de la ROP, mala calidad de hueco y además tiende a inducir otros tipos de vibraciones más severas como lo son las vibraciones laterales, las cuales se explicarán más adelante.

---

<sup>5</sup> MENSA-WILMOT, G. et al. Drilling Efficiency and Rate of Penetration – Definitions, Influencing Factors, Relationships and Values. IADC/SPE 128288.

**Figura 1. Efectos del peso sobre la broca sobre el comportamiento de la sarta en fondo.**

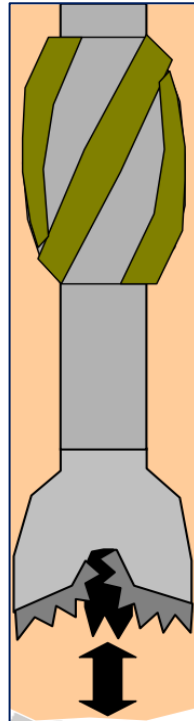


Fuente: Modificado de IADC Drilling Manual. 12th Edition. Vol 1. Drilling practices (2014).

Este tipo de vibraciones se pueden presentar de dos maneras: vibración vertical mientras la broca aún está en contacto con la formación y *Bit Bouncing* cuando la broca pierde rápidamente el contacto con el fondo de pozo. Este fenómeno suele iniciarse en el momento en que la broca es desplazada hacia fondo de pozo y toca la formación con mucha fuerza, cuando existe un cambio de litología (el cual aumenta las fuerzas de impulso sobre la broca o cuando se presenta un desgaste excesivo y desigual en la broca).

En la tabla 2 se resumen los problemas asociados a las vibraciones torsionales, los factores que contribuyen a su generación, ciertas características que nos ayudan a identificar la presencia de este tipo de vibraciones y las posibles soluciones para remediar este problema.

**Figura 2. Vibración axial.**



Fuente: EVANS, L. HAWKER, D. y DARIO, R. Monitoreo de la Vibración en Superficie. Datalog (2001).

**Tabla 2.** Caracterización de vibraciones axiales.

Problemas asociados	Factores que contribuyen	Identificación	Soluciones propuestas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desgaste en la broca.</li> <li>- Fallas en el BHA.</li> <li>- Disminución en ROP.</li> <li>- Inducir otras vibraciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Broca tricónica.</li> <li>- Litología dura.</li> <li>- Angulo del pozo.</li> <li>- Longitud del BHA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- WOB errático.</li> <li>- Vibración en superficie.</li> <li>- Variación en SPP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajar la broca suavemente.</li> <li>- Disminuir WOB.</li> <li>- Usar broca PDC.</li> </ul>

Fuente: EVANS, L. HAWKER, D. y DARIO, R. Monitoreo de la Vibración en Superficie. Datalog (2001).

**1.2.2 Vibración torsional.** Las vibraciones torsionales son fenómenos generados debido a la presencia de valores erráticos en las velocidades de rotación en la broca, esto se debe a una relación inversa entre el torque y las RPM como se explicó anteriormente. Este fenómeno se divide básicamente en dos etapas, la primera de ellas conocida como atascamiento (*stick*), durante esta etapa se observan valores de torque muy altos y valores de RPM casi nulos debido a que la rotación de la broca es obstruida por la fricción entre la broca y la formación. La segunda etapa se conoce como deslizamiento (*slip*), en esta etapa el torque logra vencer la fricción y la broca, lo cual hace que la broca se deslice obteniendo valores muy altos de RPM debido a la energía liberada y que los valores de torque disminuyan considerablemente, en la figura 3 se puede observar este fenómeno.

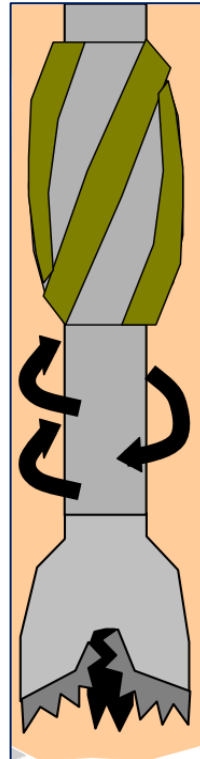
Debido a este comportamiento de la broca en fondo pueden ocurrir daños en cortadores, fatiga en las conexiones, *twist-offs*, operaciones de pesca y mayores tiempos y costos de perforación<sup>6</sup>. En el caso de las vibraciones torsionales los cortadores que más se ven afectados son los cortadores internos (figura 5) ya que estos generalmente van a velocidades más bajas y con valores de torque más altos.

En la tabla 3 se resumen los problemas asociados a las vibraciones torsionales los cuales pueden ser tan graves como una ruptura de la sarta de perforación debido a los valores de torque excesivo que se pueden alcanzar durante la fase de atascamiento de la broca, también se incluyen los factores que contribuyen a su generación y ciertas características que nos ayudan a identificar la presencia de este tipo de vibraciones y las posibles soluciones para remediar este problema; estas soluciones son con base en el estándar de la industria el cual menciona lo que se debe hacer en el caso de detectar presencia de vibraciones.

---

<sup>6</sup> MENSA-WILMOT, G. et al. Drilling Efficiency and Rate of Penetration – Definitions, Influencing Factors, Relationships and Values. IADC/SPE 128288.

**Figura 3. Vibración torsional.**



Fuente: EVANS, L. HAWKER, D. y DARIO, R. Monitoreo de la Vibración en Superficie. Datalog (2001).

**Tabla 3. Caracterización de vibraciones torsionales.**

Problemas asociados	Factores que contribuyen	Identificación	Soluciones propuestas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Daños en cortadores.</li> <li>- Disminución en ROP.</li> <li>- Fatiga en las conexiones.</li> <li>- <i>Twist-off</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Broca PDC.</li> <li>- Angulo del pozo.</li> <li>- Peso y estabilidad del BHA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oscilación en el torque.</li> <li>- Relación inversa torque-RPM.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento en RPM.</li> <li>- Disminución en WOB.</li> </ul>

Fuente: EVANS, L. HAWKER, D. y DARIO, R. Monitoreo de la Vibración en Superficie. Datalog (2001).

**1.2.3 Vibración lateral.** Las vibraciones laterales son el tipo de vibración más común y complejo que se puede presentar en un proceso de perforación, consiste en la generación de un movimiento sinusoidal en la sarta de perforación que puede llegar a convertirse en un movimiento helicoidal, generando de esta forma el fenómeno conocido como spiraling, el cual es el principal factor de mala calidad de hueco (figura 4) Algunos factores que contribuyen a su aparición son el uso de brocas PDC, la alternancia de litologías y los pozos con trayectorias verticales.

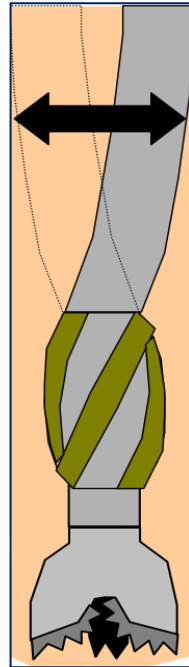
El movimiento lateral que se genera hace que la sarta de perforación rote de manera excéntrica (rotación descentralizada) como resultado de este desajuste, la sarta de perforación sufrirá constantes impactos laterales con las paredes del pozo. Finalmente, esto llevara a un desbalance dinámico dando paso a otro tipo de vibraciones (axiales y torsionales).

En la tabla 4 resumen los problemas asociados a las vibraciones torsionales, los factores que contribuyen a su generación, ciertas características que nos ayudan a identificar la presencia de este tipo de vibraciones y las posibles soluciones para remediar este problema.

Este tipo de vibraciones puede causar problemas como aumento en el diámetro del pozo, daño del revestimiento, desgaste prematuro de la broca, inestabilidad del pozo, disminución en ROP y generación de otro tipo de vibraciones. A pesar de diversas investigaciones basadas en su comportamiento, no existe una metodología clara que permita identificar su generación.

Aunque la vibración lateral no se puede detectar usando las mediciones que se tienen en superficie, sí es posible hacerlo para los otros dos tipos de vibraciones, lo cual ayuda a prevenir la generación de vibraciones laterales en primer lugar, ya que generalmente la presencia de vibraciones torsionales o axiales tienden a generar vibraciones laterales.

**Figura 4. Vibración lateral**



Fuente: EVANS, L. HAWKER, D. y DARIO, R. Monitoreo de la Vibración en Superficie. Datalog (2001).

**Tabla 4. Caracterización de vibraciones laterales.**

Problemas asociados	Factores que contribuyen	Identificación	Soluciones propuestas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ROP reducida.</li> <li>- Inestabilidad del pozo.</li> <li>- Mala calidad de hueco.</li> <li>- Daño en el revestimiento.</li> <li>- Desgaste desigual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo de broca.</li> <li>- Centralización del BHA.</li> <li>- Estabilidad del BHA.</li> <li>- Litología.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difícil de detectar.</li> <li>- Alto torque errático.</li> <li>-Vibraciones axiales y/o torsionales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducir RPM.</li> <li>- Diseño de broca.</li> <li>- Cambios en WOB.</li> </ul>

Fuente: EVANS, L. HAWKER, D. y DARIO, R. Monitoreo de la Vibración en Superficie. Datalog (2001).

Los diferentes tipos de vibraciones tienden a generar desgaste en zonas diferentes de la broca como se observa en la figura 5, en el caso de las vibraciones axiales los cortadores que se ven mayormente afectados son los que se encuentran en la parte inferior de la broca, es decir, los primeros que entran en contacto con la formación y por lo tanto los que reciben el impacto cuando se presentan este tipo de vibraciones.

Un trabajo extensivo ha sido realizado con el fin de identificar los diferentes tipos de mecanismos de vibración que pueden presentarse durante el proceso de perforación<sup>7</sup>. Se resaltan principalmente 9 tipos de mecanismos, los cuales tiene mayor presencia y pueden caracterizarse según la dirección dominante en la que vibra la sarta de perforación (Ejes X,Y,Z). Como se puede observar en la tabla 5, el mecanismo de stick/slip es el que presenta las menores frecuencias (0.01 Hz– 5 Hz) y suele ser el de mayor presencia en las operaciones, inicialmente no representa un riesgo para la integridad de equipos y paredes de pozo, pero si no se detecta y mitiga a tiempo puede ser factor generador de otros mecanismos de vibración más severos.

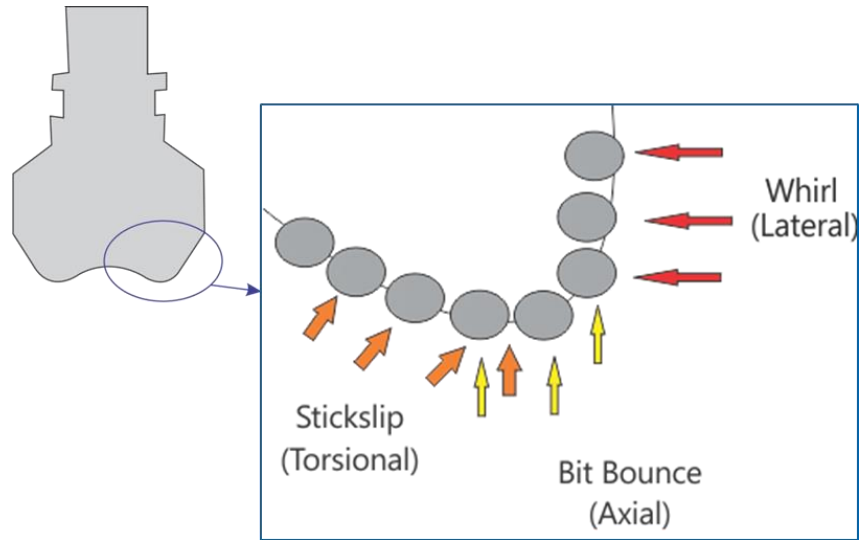
### **1.3 DETECCIÓN DE VIBRACIONES CON SENSORES DE FONDO**

El hecho de que las vibraciones en fondo puedan causar un desgaste prematuro o inclusive la falla en la sarta de perforación y la broca, es ampliamente aceptado por la industria. Por esta razón se han desarrollado extensivos estudios con el fin de encontrar una forma efectiva de detectarlas y mitigarlas los cuales han resultado en el desarrollo de diversos coeficientes los cuales permiten detectar la presencia de vibraciones a través del uso de la telemetría.

---

<sup>7</sup> GREENWOOD, Jeremy. Vibration Monitoring and Mitigation – An Integrated Measurement System. IADC/SPE-178773-MS (2016).

**Figura 5. Desgaste de los cortadores según el tipo de vibración.**



Fuente: Modificado de IADC Drilling Manual. 12th Edition. Vol. 1. Drilling practices (2014).

**Tabla 5. Clasificación de mecanismos de vibración.**

Clasificación	Modo dominante de dirección	Rango de frecuencia [Hz]
<b><i>Stick/Slip</i></b>	Torsional	0.01-5
<b><i>Bit Bounce</i></b>	Axial	1-10
<b><i>Bit Whirl</i></b>	Lateral (presencia leve de torsional y axial)	3-50
<b><i>BHA Whirl</i></b>	Lateral	5-20
<b><i>Lateral Shocks</i></b>	Lateral	No tiene frecuencia dominante
<b><i>Torsional Resonance</i></b>	Torsional	20-350
<b><i>Parametric Resonance</i></b>	Axial y Lateral	0.1-10
<b><i>Bit Chatter</i></b>	Lateral y Torsional	20-250
<b><i>Modal Coupling</i></b>	Lateral, Torsional y Axial	0.1-20

Fuente: GREENWOOD, Jeremy. Vibration Monitoring and Mitigation – An Integrated Measurement System. IADC/SPE-178773-MS (2016).

Actualmente la industria cuenta con sofisticados sensores en fondo que pueden cumplir esta tarea, la principal desventaja de estos es su alto costo y mantenimiento. Por otra parte, también es posible realizar esta tarea por medio del monitoreo de los parámetros operacionales en superficie, este tipo de metodología no ha sido ampliamente usado debido a que tiene ciertas restricciones, pero ha mostrado ser eficiente.

Los sensores de fondo utilizados para la detección de vibraciones tienen como componentes principales un set de acelerómetros los cuales son ubicados perpendicularmente entre sí, en las direcciones X, Y, Z<sup>8</sup>.

El acelerómetro ubicado en la dirección Z permite detectar presencia de vibraciones axiales, mientras que los otros dos acelerómetros permiten detectar vibraciones laterales, las cuales se presentan en los ejes X y Y. Adicionalmente, estos sensores pueden medir la velocidad angular del BHA y la broca, permitiendo la identificación de vibraciones torsionales. El muestreo se realiza por periodos de tiempo, es decir, no hay un muestreo continuo, sin embargo, la frecuencia de muestreo de datos de estos sensores suele ser muy alto y el operador puede definir la frecuencia a la cual se almacenan datos para su análisis posterior. La transmisión de datos obtenidos en fondo en tiempo real es realizada por medio de telemetría.

Este tipo de funciones generalmente vienen incluidas en las herramientas MWD ofrecidas por las diferentes compañías de servicio, por lo tanto la ventaja que tienen es que en el caso de que se requieran herramientas (MWD/LWD) para operaciones como geo navegación, este tipo de sensores generalmente ya viene incluidos dentro de las mismas.

También es posible la utilización de sensores que van ubicados directamente en la broca, estos sensores generalmente capturan información a una alta frecuencia durante cierto tiempo y la transmite a intervalos regulares, entre los datos que

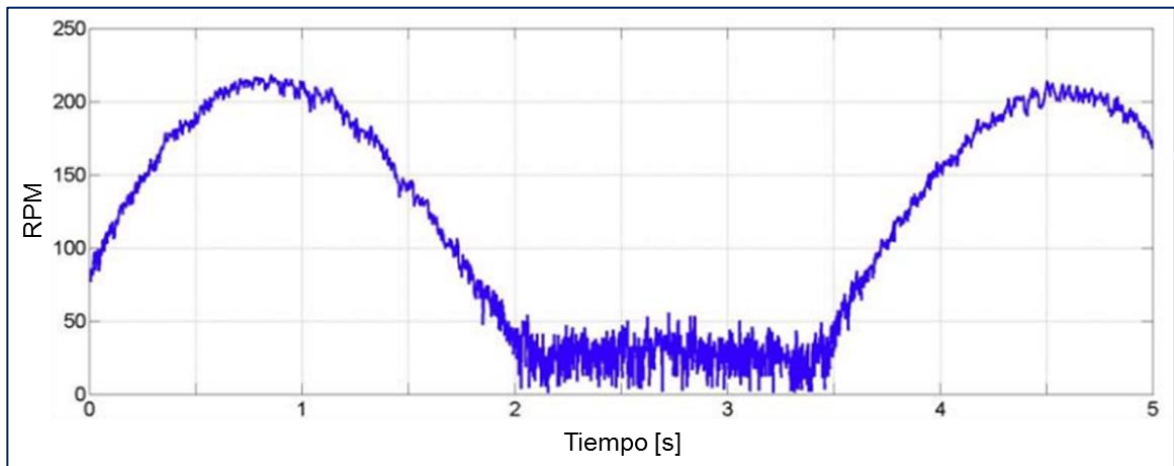
---

<sup>8</sup> LEDGERWOOD III, L.W. HOFFMAN, O. et al. Downhole Vibration Measurement, Monitoring and Modeling Reveal Stick-Slip as a Primary Cause of PDC Bit Damage in Today's Applications. SPE 134488 (2010).

calcula están la aceleración axial y lateral, la velocidad de rotación mínima, máxima y promedio.

Este tipo de sensores son extremadamente útiles para detectar las vibraciones en fondo y proveen al ingeniero de la información necesaria para optimizar en tiempo real los parámetros de perforación. LEDGERWOOD III, L.W. HOFFMANN, O. et al. hicieron un análisis de los datos obtenidos a partir de sensores de fondo y en la mayoría de los casos era claro cuando había presencia de vibraciones, por ejemplo, de tipo Stick/Slip como se puede observar en la gráfica de RPM en fondo vs tiempo que se muestra en la figura 6.

**Figura 6. Velocidad de rotación en fondo vs tiempo de un caso de *Stick/Slip*.**



Fuente: Modificada de LEDGERWOOD III, L.W. HOFFMAN, O. et al. Downhole Vibration Measurement, Monitoring and Modeling Reveal Stick-Slip as a Primary Cause of PDC Bit Damage in Today's Applications. SPE 134488 (2010).

Como se puede observar hay un periodo donde las revoluciones por minuto son bastante bajas entre 2 y 3.5 s, este es el periodo conocido como atascamiento (*stick*) seguido por un periodo de aumento de las revoluciones por minutos (también conocido como etapa de deslizamiento), esta constante disminución y aumento de las revoluciones por minuto de la broca es la encargada de causar los diversos problemas mencionados anteriormente.

## 1.4 DETECCIÓN DE VIBRACIONES CON PARAMETROS DE SUPERFICIE

**1.4.1 Consideraciones.** Los parámetros operacionales de superficie (RPM, Torque, Carga en el gancho) son indicadores claves del comportamiento dinámico en fondo de pozos (en pozos de baja complejidad), las fluctuaciones que puedan presentarse en cada uno de estos parámetros son tenidos en cuenta por el equipo de monitoreo para tomar acciones correctivas y así evitar problemas en el pozo. Detectar vibraciones por medio de estos parámetros representa una alternativa a los sensores que se mencionaron anteriormente, además de que permiten un monitoreo en tiempo real y no dependen de la telemetría del lodo de perforación. Sin embargo, para obtener resultados representativos es necesario tener en cuentas ciertas recomendaciones, las cuales se encuentran recopiladas en la tabla 6.

**Tabla 6. Recomendaciones para detección de vibraciones con los parámetros de superficie.**

<b>Profundidad</b>	Profundidades menores a 10000 ft.
<b>Inclinación</b>	Inclinaciones menores a 30 grados.
<b>Ubicación del sensor</b>	Debajo del <i>Top Drive</i> .
<b>Frecuencia de muestreo</b>	Dos veces la frecuencia del tipo de vibración que se desee detectar.
<b>Peso sobre la broca</b>	El recomendado para evitar el fenómeno de <i>buckling</i> .

Profundidades demasiado altas, especialmente combinadas con inclinaciones también significativas, hacen que la transmisión de los datos de fondo a superficie no sea muy representativa, ya que la tubería entra en contacto con las paredes, lo cual hace que la transmisión del torque en fondo a superficie no se dé correctamente y, por lo tanto, no se detecten los fenómenos de *Stick/Slip* que se presenten en fondo.

En el caso de la ubicación del sensor, la idea de ubicarlo justo debajo del *Top Drive* es obtener la información más confiable posible del torque, ubicar el sensor en este lugar hace que la medición del torque sea directa y más confiable que las mediciones de torque en superficie convencionales.

La frecuencia de muestreo es importante por el teorema de Nyquist-Shannon, el cual será explicado en detalle más adelante, y finalmente, el peso sobre la broca es importante, aunque la recomendación que se hace también es válida por muchas otras razones (generalmente no se quiere perforar con una tubería pandeada, a menos que sea absolutamente necesario), sin embargo, en este caso en particular, esta recomendación se hace debido a que si la tubería se pandea, hace que exista un aumento en el contacto entre la tubería y las paredes, lo cual conlleva al mismo problema que ocurre en el caso de pozos muy profundos y/o con alta inclinación.

**1.4.2 Índice de *Stick/Slip*.** Como se mencionó anteriormente, el fenómeno de *Stick/Slip* se refiere a las vibraciones torsionales que ocurren en la sarta de perforación, en casos severos, la broca detiene su rotación y vuelve a iniciar en un ciclo continuo<sup>9</sup>. Este comportamiento es causado principalmente por las propiedades elásticas de la tubería y las fuerzas de fricción entre la broca y la roca.

La severidad de este fenómeno está relacionada con la diferencia entre la máxima y la mínima velocidad angular en la broca. Cuando hay presencia de vibraciones torsionales, la broca puede rotar a frecuencias muy bajas y muy altas, pero siempre girará a la misma velocidad promedio del *Top Drive* en superficie. La industria petrolera ha adoptado una medida estándar para representar la severidad del *Stick/Slip* conocido como índice de *Stick/Slip* en fondo y está definido por la siguiente ecuación:

---

<sup>9</sup> LAI, Stephen. BLOOM, Matthew. WOOD, Mitchell. EDDY, Aaron. y HOLT, Trevor. *Stick/Slip Detection and Friction-Factor Testing with Surface-Based Torque and Tension Measurements*. SPE 170624 (2016).

$$DSSI = \frac{\max(\omega_b) - \min(\omega_b)}{2 * avg(\omega_b)} \text{ Ecuación 1}$$

Donde:

$DSSI = \text{Downhole Stick/Slip index.}$

$\omega_b = \text{Velocidad angular de la broca.}$

LAI, Stephen. Et al., propusieron que de esa misma manera es posible detectar las vibraciones a partir de las mediciones en superficie, utilizando un coeficiente similar al anterior, pero en vez de hacer uso de la velocidad angular en la broca, se hace uso del torque en superficie, este coeficiente está definido por la siguiente ecuación:

$$SSSI = \frac{\max(T_s) - \min(T_s)}{2 * avg(T_s)} \text{ Ecuación 2}$$

Donde:

$SSSI = \text{Surface Stick/Slip index}$

$T_s = \text{Torque en superficie.}$

La ventaja del coeficiente que se puede observar en la ecuación 2, es que no depende de ningún modelo de la sarta de perforación si no simplemente de los datos de torque obtenidos, lo cual hace mucho más simple su uso. Dentro de la evaluación realizada por los autores, se compararon los dos índices para ver si era factible la utilización del SSSI como reemplazo del DSSI en el caso de no contar con información de fondo, sin embargo, es importante aclarar que numéricamente el SSSI no será igual al DSSI ya que el primero es una relación entre torques, mientras que el segundo es una relación entre velocidades angulares, es por esto que si se quisiera hacer los dos factores iguales numéricamente, sería necesario ingresar un factor de escalamiento el cual relacione el valor de SSSI con el valor de DSSI como se muestra en la siguiente ecuación:

$$SSSI_{scaled} = SF * SSSI \text{ Ecuación 3}$$

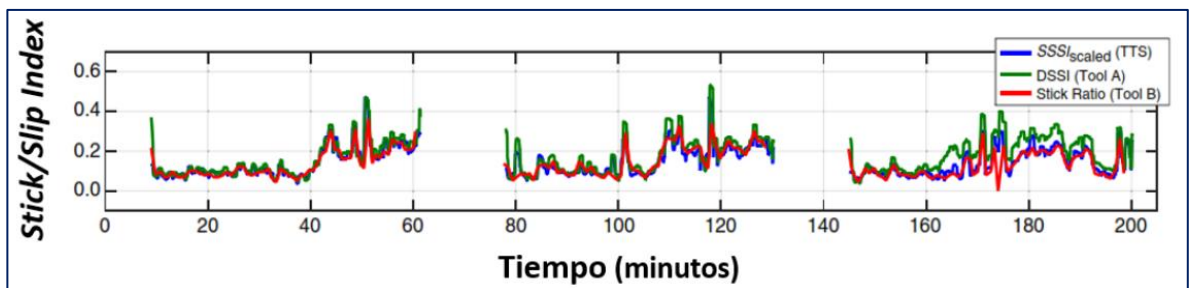
Donde:

$SSSI_{scaled}$  = *Surface Stick/Slip Index* escalado.

$SF$  = Factor de escalamiento.

Del estudio se pudo concluir que efectivamente el SSSI escalado era una medida representativa del DSSI ya que tanto la tendencia como los valores eran muy similares como se puede observar en la figura 7.

**Figura 7. *Stick/Slip Index* vs tiempo.**



Fuente: LAI, Stephen. BLOOM, Matthew. WOOD, Mitchell. EDDY, Aaron. y HOLT, Trevor. *Stick/Slip Detection and Friction-Factor Testing with Surface-Based Torque and Tension Measurements*. SPE 170624 (2016).

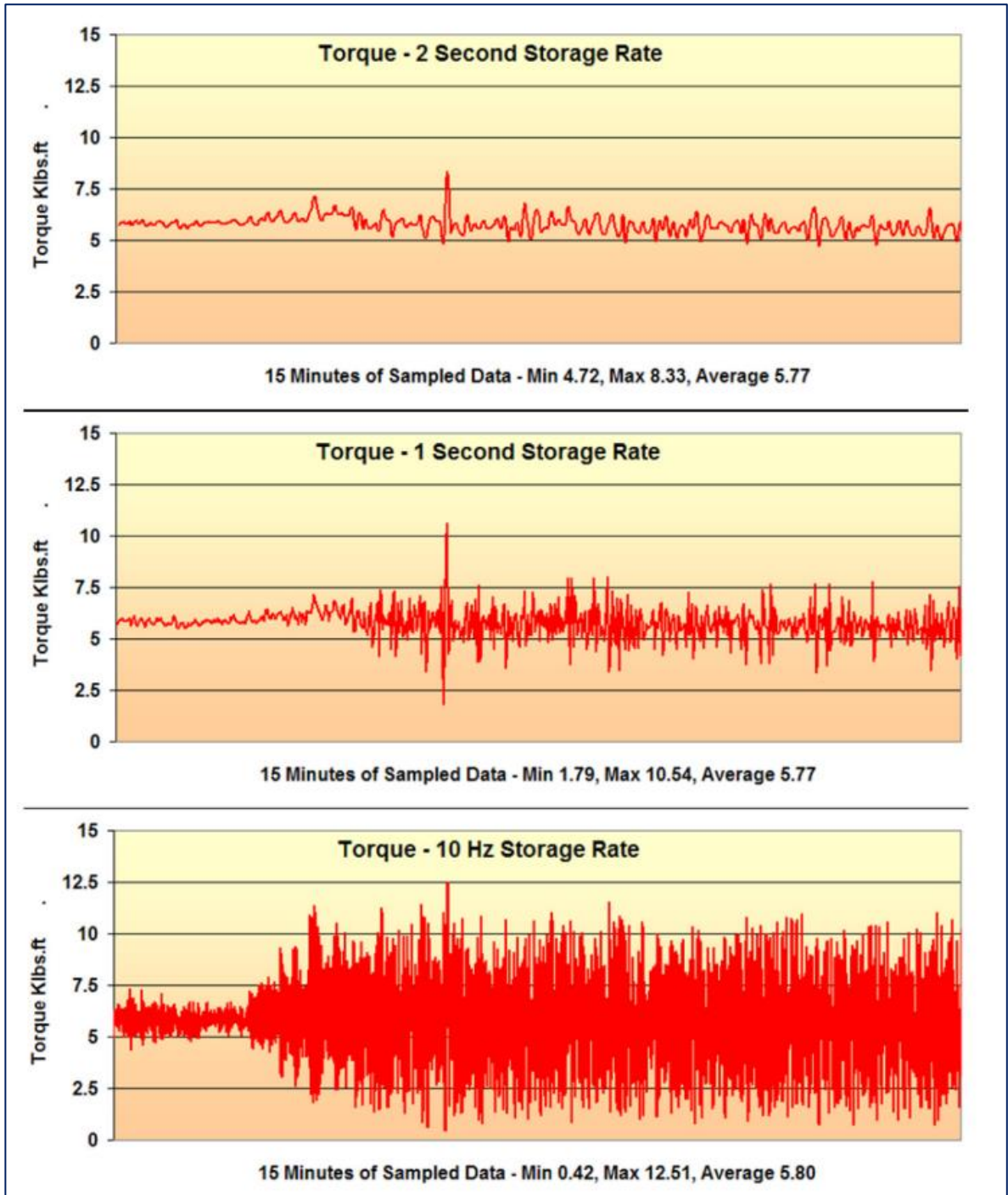
**1.4.3 Muestreo de datos.** Es importante tener en cuenta cómo se debe realizar el muestreo de datos previo al análisis de los mismos, por ejemplo, según el teorema de Nyquist-Shannon<sup>10</sup>. Para detectar y reproducir cualquier tipo de señal periódica, es necesario que la frecuencia de adquisición de datos sea el doble de la máxima frecuencia que se quiere detectar. Esto quiere decir que si, por ejemplo, se quiere detectar una señal sinusoidal con una frecuencia de 5 Hz es necesario utilizar una tasa de muestreo de al menos 10 Hz.

<sup>10</sup> OPPENHEIM, A.V. SCHAFFER, R.W. y BUCK, J.R. *Discrete-Time Signal Processing*. 1999.

Teniendo lo anterior en cuenta, entre mayor sea la frecuencia de muestreo, mejor será la información que se pueda obtener a partir de ella. Por ejemplo, en la figura 8 se puede observar la diferencia que hay entre una frecuencia de adquisición de datos de 0.5 Hz, 1 Hz y 10 Hz respectivamente. El primer hecho importante que sale a la luz, es que mientras que en la información de solo 0.5 Hz no había gran diferencia entre los valores mínimos y máximos de torque (3.61 Klbs-ft) en la data de 10 Hz la diferencia es significativamente más grande (12.09 Klbs-ft) como se puede observar, esto cambiaría significativamente el valor del SSSI mencionado anteriormente de aproximadamente 0.31 (para el caso de 0.5 Hz) a 1.04 (para el caso de 10 Hz).

Teniendo en cuenta esto, lo ideal sería tener frecuencias de muestreo altas. Sin embargo, los equipos de medición tienen límites de frecuencias, entonces ¿Cómo asegurarse de tener una frecuencia lo suficientemente alta para la detección de todas las frecuencias de vibraciones? Para responder esta pregunta, solo basta con tener en cuenta las frecuencias presentadas en la tabla 5 y el teorema de Nyquist-Shannon, según la tabla 5, para el caso de *Bit Bounce* los rangos de frecuencias están entre 1 y 10 Hz lo ideal sería tener una frecuencia de 20 Hz para detectar todas las frecuencias de movimientos axiales que se están presentando, para el caso de vibraciones torsionales, los comportamientos periódicos están en frecuencias de 0 a 25 Hz con lo cual en este caso una frecuencia de 50 Hz sería lo ideal, sin embargo, incluso con frecuencias de muestreo más bajas, aun sería posible hacer un análisis de la presencia de vibraciones de baja frecuencia. Esto hace a la transformada de Fourier una herramienta excelente en comparación al coeficiente mencionado anteriormente, ya que, aunque las frecuencias de adquisición sean bajas, se puede hacer uso de la información disponible para detectar comportamientos anormales de baja frecuencia.

Figura 8. Frecuencias de muestreo.



Fuente: GREENWOOD, J. Vibration Monitoring and Mitigation – An Integrated Measurement System. IADC/SPE-178773-MS (2016).

## **2. METODOLOGÍA**

A continuación, se describe la metodología propuesta para detectar vibraciones presentes durante el proceso de perforación a partir del monitoreo e interpretación del comportamiento de los parámetros operacionales, utilizando como herramienta de análisis la Transformada de Fourier.

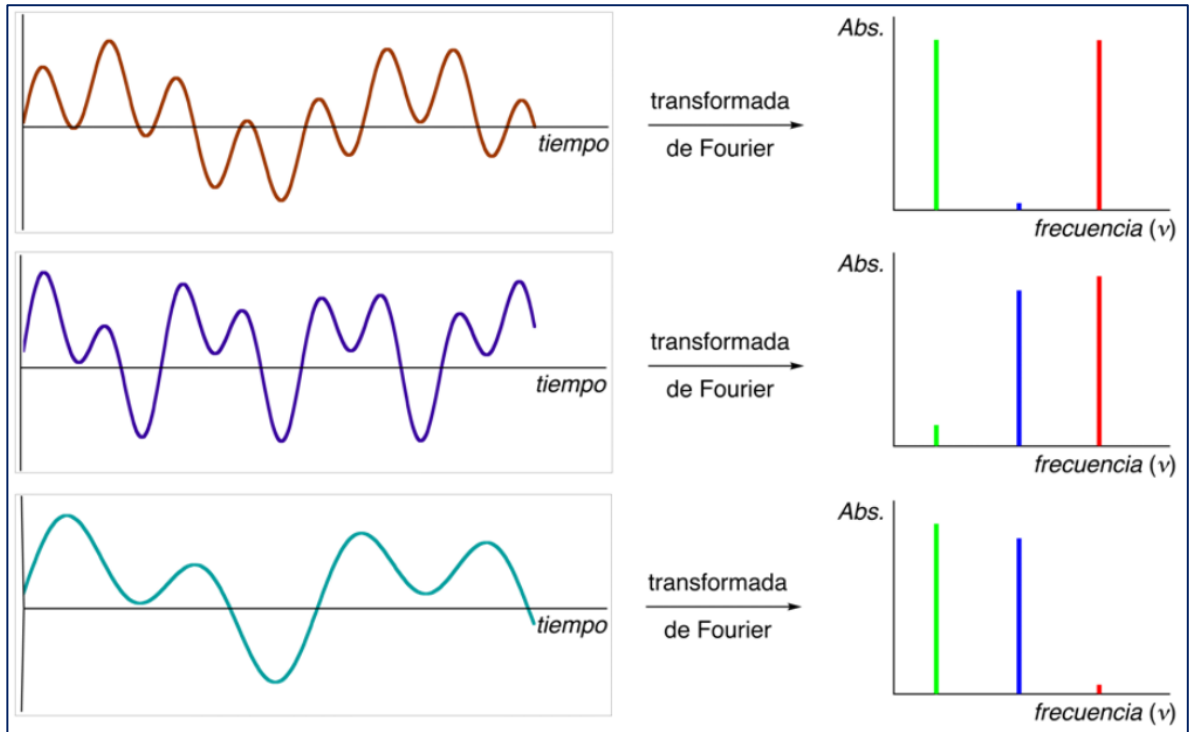
### **2.1 TRANSFORMADA DE FOURIER**

La transformada de Fourier es empleada para transformar señales del dominio del tiempo (o espacial) al dominio de la frecuencia, lo cual tiene muchas aplicaciones en la física y la ingeniería. Es reversible, siendo capaz de transformarse en cualquiera de los dominios al otro. El propio término se refiere tanto a la operación de transformación como a la función que produce.

En el caso de funciones sinusoidales, la transformada de Fourier puede simplificar el cálculo de un conjunto discreto de amplitudes complejas, en otras palabras, puede descomponer la señal recibida en diversos valores llamados coeficientes de las series de Fourier, los cuales representan el espectro de frecuencia de la señal dominio-tiempo original. La transformada no solo ayuda a detectar las frecuencias presentes en la onda compuesta del tiempo, sino que también da una idea de la severidad (amplitud) de la onda en específico (figura 9).

Para el caso específico de la aplicación para detección de vibraciones, es posible utilizar la transformada para simplificar el flujo de datos recibido de los parámetros de superficie en una gráfica prácticamente constante de torque vs frecuencia en la cual se encuentre el/los picos correspondientes a las frecuencias de las vibraciones torsionales que estén ocurriendo en fondo de pozo haciendo así que el proceso de identificación sea mucho más sencillo.

**Figura 9. Representación gráfica de la transformada de Fourier.**



Fuente: Análisis por transformada de Fourier. Glosarios - Alicante [En línea], 18 de noviembre de 2017. Disponible en internet: <https://glosarios.servidor-alicante.com/quimica/fourier-transformada-de-analisis-por>.

La transformada de Fourier se puede definir de la siguiente manera:

$$X(F) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * e^{-j2\pi Ft} dt \text{ Ecuacion 4}$$

Sin embargo, debido a que la definición anterior asume que se tiene información continua de los datos, lo cual no es cierto en el caso del torque, se hace necesario la utilización de la transformada discreta de Fourier la cual se define de la siguiente manera:

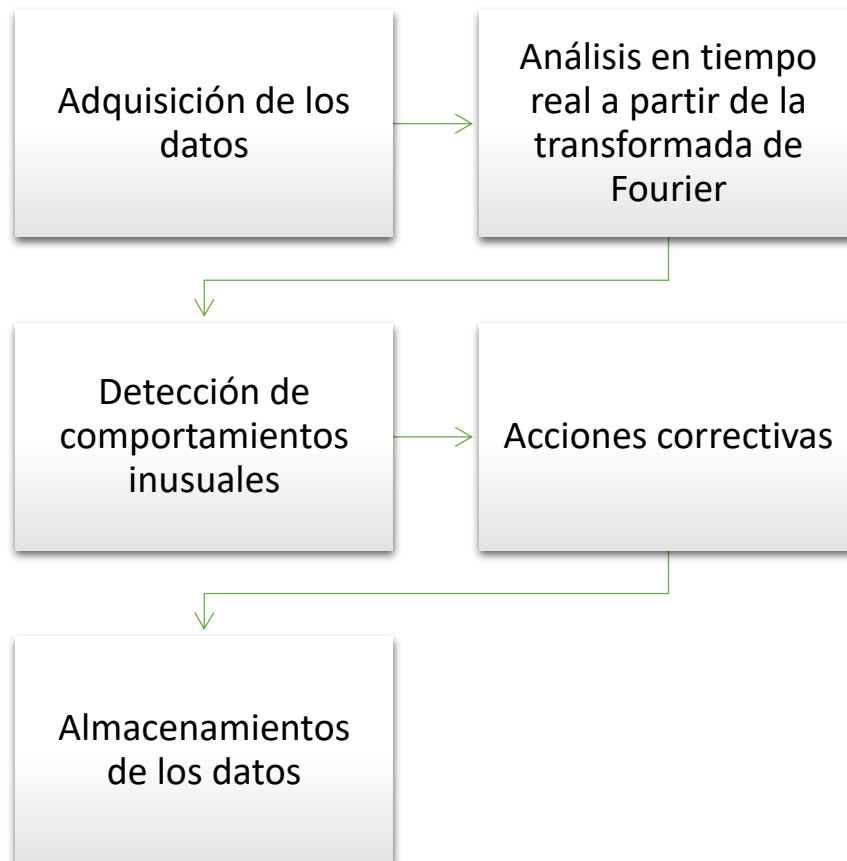
$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} \text{ Ecuación 5}$$

Donde  $k/N$  sería el equivalente a la frecuencia  $F$  en la definición continua y  $n$  sería el equivalente a  $t$ . Sin embargo, en la mayoría de los casos no se hace uso de esta definición directa si no de un algoritmo conocido como transformada rápida de Fourier, el cual permite calcular la transformada discreta de Fourier en un tiempo mucho menor y obteniendo el mismo resultado. En la actualidad, los softwares hacen uso del algoritmo de la transformada rápida de Fourier para así obtener resultados mucho más rápidos.

## 2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA DETECCIÓN DE VIBRACIONES

En la figura 10 se observa el paso a paso a seguir para la aplicación del análisis en tiempo real de los parámetros medidos en superficie.

**Figura 10. Paso a paso propuesto.**



### **a) Adquisición de los datos**

Como se mencionó anteriormente es importante que la adquisición de datos se haga con una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta para que el análisis sea lo más significativo posible, sin embargo, esto no es una limitante para detectar vibraciones de baja frecuencia, hay que tener en cuenta que la máxima frecuencia de vibración que se puede detectar es de la mitad de la frecuencia con la que se están obteniendo los datos.

### **b) Análisis en tiempo real a partir de la transformada de Fourier**

Una vez se haya considerado una tasa de adquisición lo suficientemente alta (que pueda captar varios periodos de oscilación del torque en función del tiempo en un periodo relativamente corto) es posible realizar análisis de la data en intervalos tan pequeños como un segundo, es decir, cada segundo se toman los datos de torque vs tiempo que se hayan obtenido y se hace la aplicación de la transformada rápida de Fourier a los mismos para así pasar al siguiente paso.

### **c) Detección de comportamientos inusuales**

Después de aplicar la transformada rápida de Fourier a los datos obtenidos, se obtendrá una gráfica de amplitud vs frecuencia, donde la frecuencia hace referencia a la frecuencia de los comportamientos periódicos presentes en la onda, es decir, si se observa un pico a una frecuencia de 0.2 Hz (por ejemplo, al aplicar la transformada a una onda de torque vs tiempo) quiere decir que está ocurriendo un comportamiento oscilatorio del torque con esta frecuencia, dependiendo de la frecuencia y la amplitud del pico, el perforador pasaría al siguiente paso.

#### **d) Acciones correctivas**

Dependiendo del tipo de vibración detectada se procede a modificar los valores de los parámetros operacionales relacionados con este fenómeno, de la siguiente forma:

- Vibración axial: Disminución en WOB.
- Vibración torsional: Aumento en RPM y disminución en WOB.

#### **e) Almacenamiento de los datos**

Una vez terminado el análisis de los datos obtenidos es importante almacenar los datos de manera que se pueda hacer un análisis posterior más detallado de las posibles causas de vibraciones y mejoras propuestas para perforaciones futuras.

### **2.3 APLICACIÓN**

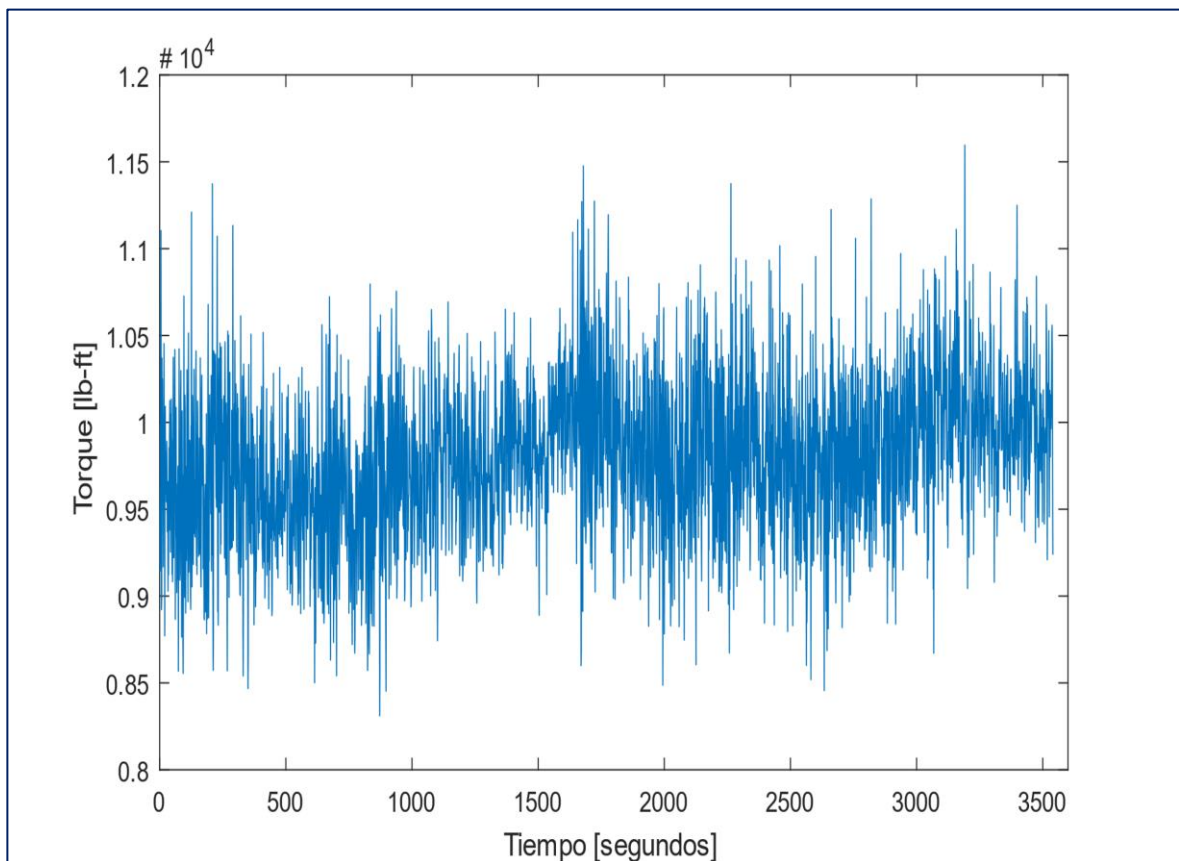
A partir de información obtenida por un periodo de 1 hora para un pozo a una profundidad de 4500 ft y con inclinación de 14°, se hizo el análisis con la transformada rápida de Fourier utilizando el software MATLAB, el cual tiene incluido un componente que permite realizar este análisis de manera automática y relativamente sencilla.

Primero se hizo un gráfico de torque vs tiempo (la onda compuesta) de toda la hora con el fin de observar si efectivamente se estaban presentando vibraciones torsionales (figura 11). Después de este primer grafico se le aplicó la transformada rápida de Fourier a los datos que se tenían con lo cual se obtuvo la figura 12. En

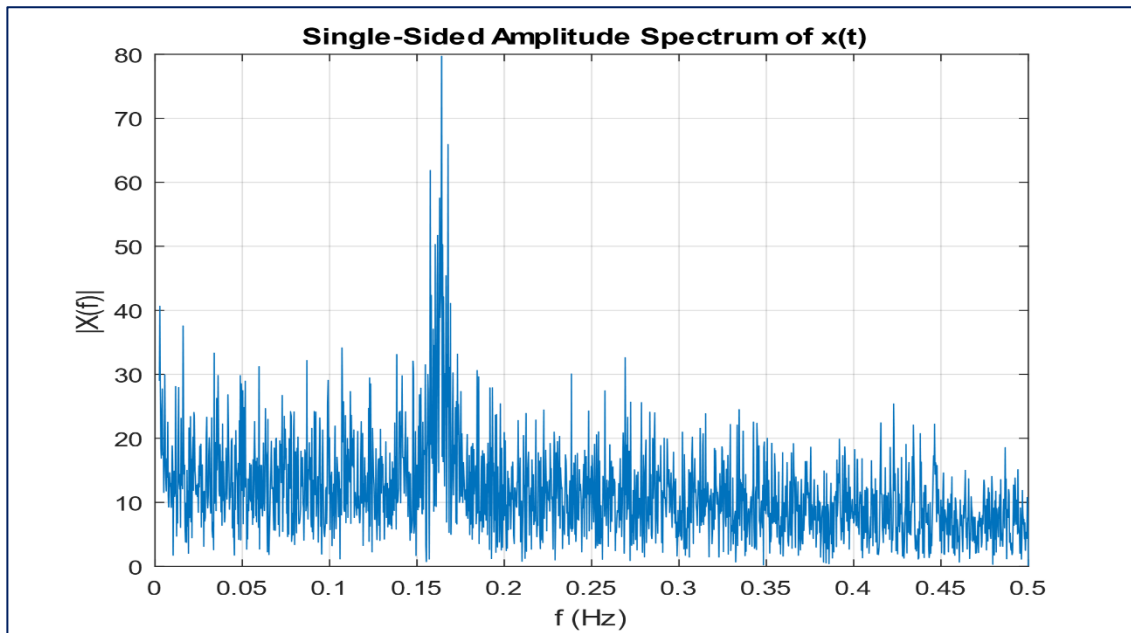
esta figura se observa claramente un pico de amplitud de entre 0.15 y 0.2 hz lo cual indicaría que se está presentando una oscilación en el torque con esta frecuencia.

El siguiente paso era saber en qué momento se estaba presentando la vibración en mención, para esto, en vez de utilizar todos los datos que se tenían (la hora completa) se dividieron en 15 intervalos de aproximadamente 4 minutos (a partir de las 3 pm), es decir, se hicieron gráficos utilizando solamente los datos de cada 4 minutos (se decidió utilizar 4 minutos ya que se necesitaba suficiente cantidad de datos por cada intervalo para poder aplicar la transformada de Fourier) y se observó que el pico de frecuencia observado se presentó principalmente durante los primeros 15 minutos aproximadamente como se observa en las figuras 13,14,15 y 16.

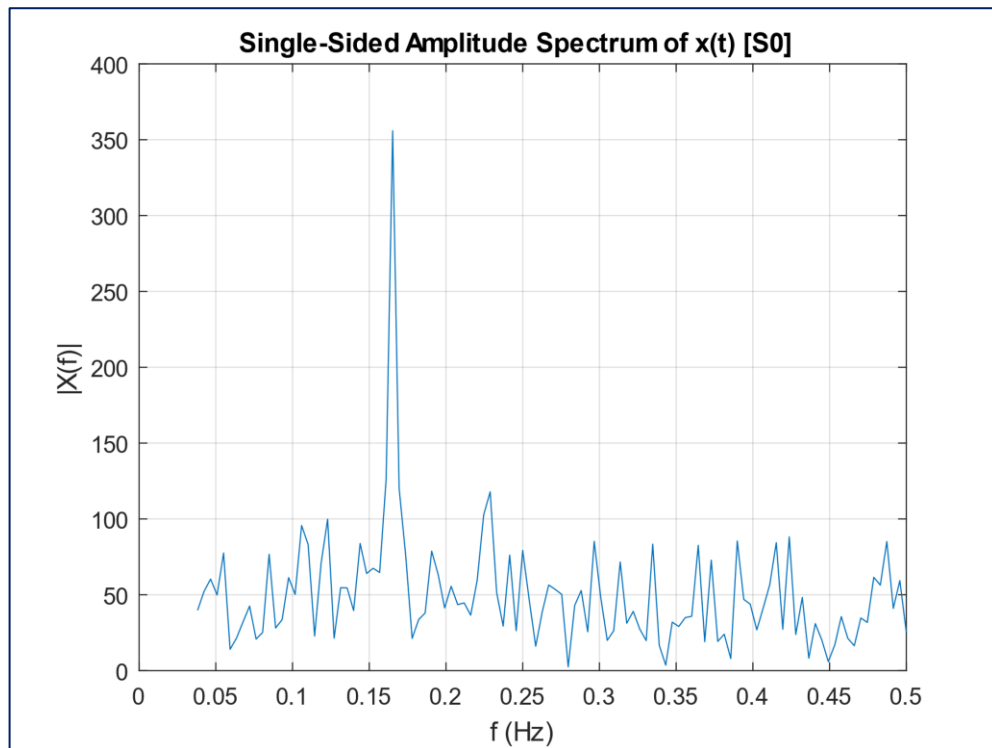
**Figura 11. Gráfica de torque vs tiempo completa (3:00:00 a 4:00:00 pm).**



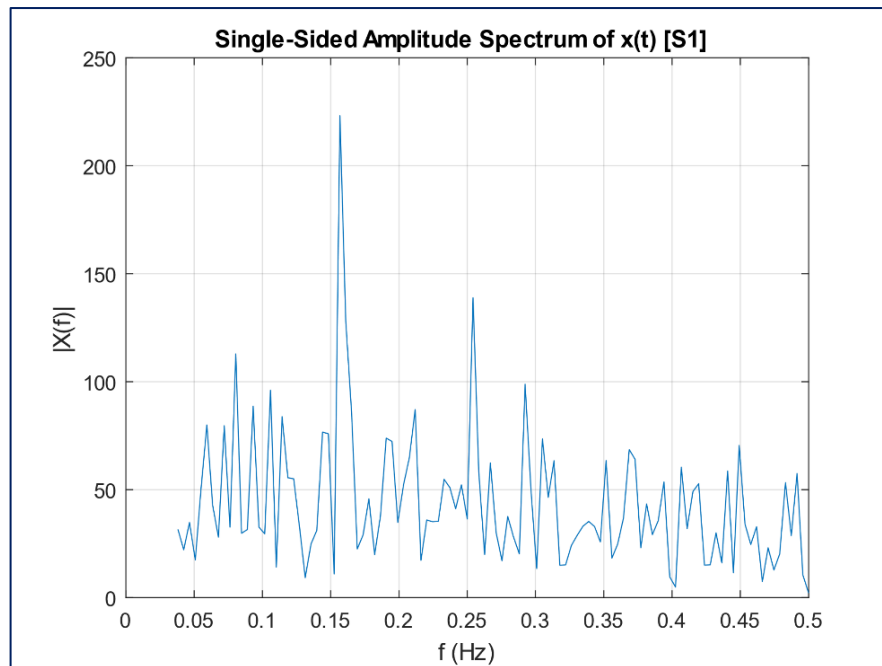
**Figura 12. Gráfica de amplitud vs frecuencia (transformada de Fourier).**



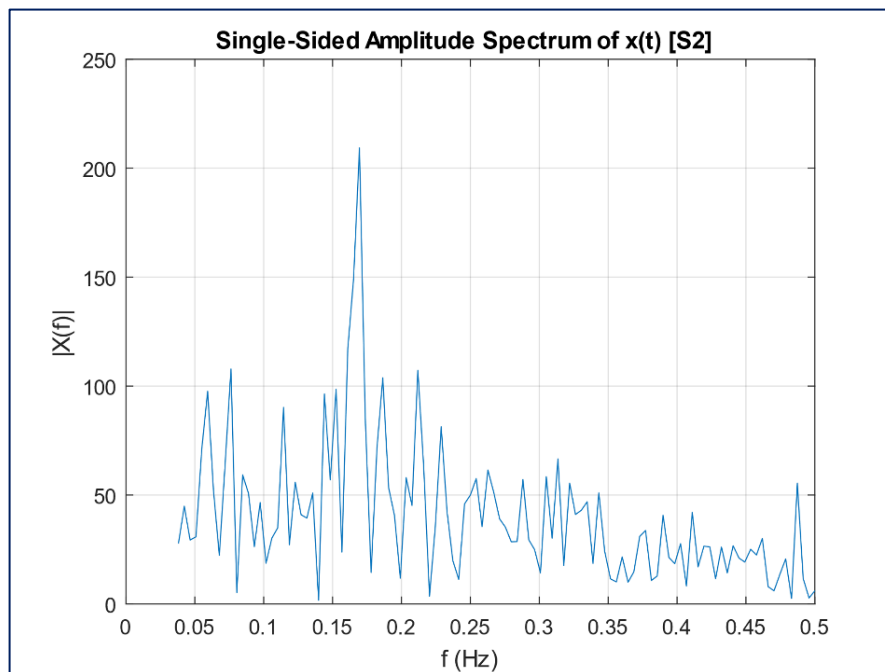
**Figura 13. Gráfica de amplitud vs frecuencia, primer intervalo (0 a 236 segundos – 3:00:00 a 3:03:55 pm).**



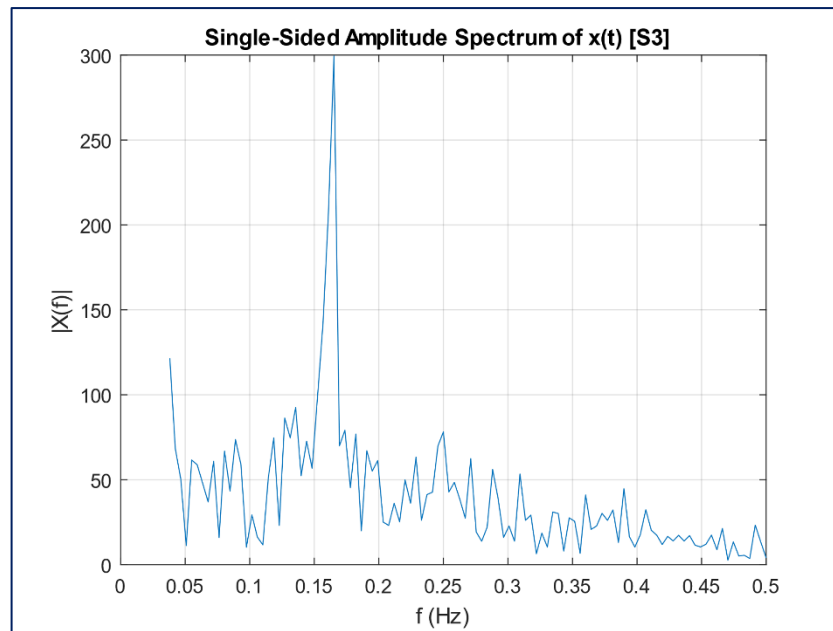
**Figura 14. Gráfica de amplitud vs frecuencia, segundo intervalo (236 a 472 segundos – 3:03:55 a 3:07:52 pm).**



**Figura 15. Gráfica de amplitud vs frecuencia, tercer intervalo (472 a 708 segundos – 3:07:52 a 3:11:47 pm).**



**Figura 16. Gráfica de amplitud vs frecuencia, cuarto intervalo (708 a 944 segundos – 3:11:47 a 3:15:02 pm).**



Como se mencionó anteriormente el fin de tener la suficiente cantidad de datos para cada análisis era necesario escoger un intervalo relativamente largo (4 minutos), esto en campo significaría un análisis cada 4 minutos, lo cual es otro punto importante de la utilización de una frecuencia de muestreo alta, ya que permite obtener análisis utilizando intervalos de tiempo tan cortos como 1 segundo.

### 3. CONCLUSIONES

- Cuando hay presencia de vibraciones torsionales o axiales, los datos en superficie de torque o carga respectivamente tienen un comportamiento sinusoidal, esto permite que puedan ser analizadas por la transformada de Fourier con el fin de detectar anomalías en los picos de frecuencia y de esta forma saber si hay presencia de alguno de los dos tipos de vibraciones. Sin embargo, no es posible hacer un análisis representativo de los datos obtenidos durante la presencia de vibraciones laterales debido a la complejidad de su comportamiento.
- Si la frecuencia de adquisición de los datos es lo suficientemente alta, la metodología propuesta permite la detección de las vibraciones prácticamente en tiempo real (1 segundo de retraso) en comparación con el uso de herramientas de fondo ya que la telemetría puede tener retrasos de 25 segundos hasta 2 minutos.
- La metodología de vibraciones que se propone puede ser utilizada en todas las situaciones en las que se tomen datos con la suficiente frecuencia, es decir, no depende del tipo de BHA utilizado, de las herramientas utilizadas o de las formaciones que están siendo perforadas, ya que esto es una de las mayores limitaciones para otros modelos ya propuestos.
- Las vibraciones de tipo torsional son las más recurrentes durante la operación de perforación debido a las condiciones dinámicas en fondo; las frecuencias a las cuales se genera inicialmente no representan un peligro para la integridad de los equipos y la calidad del hueco, sin embargo, deben monitorearse con especial cuidado debido a que suelen ser factor generador de otros tipos de fenómenos vibratorios más severos.

#### 4. RECOMENDACIONES

- Pozos muy profundos y/o con altos ángulos de inclinación propician un ambiente complejo en el cual, debido al constante contacto entre la sarta y las paredes del pozo se pierden fuerzas dinámicas generadas en fondo y por lo tanto, los datos obtenidos en superficie son de mala calidad. Se recomienda que los pozos candidatos a la aplicación de esta metodología deben tener una profundidad máxima a 10.000 ft y un máximo ángulo de inclinación de 30°.
- La frecuencia de muestreo de los parámetros operacionales debe ser dos veces mayor a la frecuencia natural de fenómeno que se desea analizar como lo indica el teorema de Nyquist-Shannon, esto permite realizar una caracterización precisa de la magnitud del fenómeno presente y de esta forma, identificar anomalías en su comportamiento.
- Es recomendable usar esta metodología en conjunto con las mediciones en fondo para realizar el monitoreo de vibraciones, ya que como se mencionó utilizando los parámetros de superficie no existe el retraso que ocurre utilizando la telemetría.

## BIBLIOGRAFÍA

- CENTALA, P. CHALLA, V. et al. Diseño de las Barrenas: Desde Arriba hasta Abajo. Schlumberger Oilfield Review.
- DUPRIEST, F. The Real Causes of Borehole Misbehavior and Operational Practices to Eliminate Them. Texas A&M University.
- EVANS, L. HAWKER, D. MEJÍA, R. Monitoreo de la Vibración en Superficie. DATALOG, Marzo 2002.
- GREENWOOD, Jeremy. Vibration Monitoring and Mitigation – An Integrated Measurement System. IADC/SPE – 178773-MS (2016).
- HUTCHINSON, M. Automated Downhole Vibration Damping. SPE/IADC-166736 (2013).
- IADC Drilling Manual. 12th Edition. Vol. 1. Drilling Practices (2014).
- LAI, S. BLOOM, M. EDDY, A. HOLT, T. Stick/Slip Detection and Friction-Factor Testing With Surface-Based Torque and Tension Measurement. SPE-170624 (2016).
- LEDGERWOOD III, L.W. HOFFMAN, O. et al. Downhole Vibration Measurement, Monitoring and Modeling Reveal Stick-Slip as a Primary Cause of PDC Bit Damage in Today's Applications. SPE-134488 (2010).

- MACHPERSON, J.D. The Science of Stick Slip. Presentación oral dada en el IADC Stick-Slip Mitigation Workshop, Houston, Julio 15, 2010.
- Manual de Selección de Barrenas en el Proceso de Selección de Pozos. Programa de Entrenamiento Acelerado para Supervisores. Schlumberger.
- MENSA-WILMOT, G. et al. Drilling Efficiency and Rate of Penetration - Definitions, Influencing Factors, Relationships and Values. IADC/SPE-128288.
- OPPENHEIM, A.V. SCHAFFER, R.W. BUCK, J.R. Discrete-Time Processing. 1999.
- REY-FABRET, I. et al. Intelligent Drilling Surveillance through Real Time Diagnosis. Rev. IFP, Vol. 59 (2004).
- WENKAI, G. XIURONG, D. HENGTIAN, J. HAO, P. Downhole and Surface Vibration Measurement. OTC-26715-MS (2016).