



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“VIBRACIÓN EN LA SARTA DE PERFORACIÓN”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

PRESENTA:

JUAN CARLOS SMITH MAC DONALD GONZALEZ

YANIAK OMAR CEDRO RESENDIZ

DIRECTOR DE TESIS:

ING. LEONARDO CRUZ ESPINOZA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F. 2010



Agradecimientos Juan Carlos

Dedico este trabajo a mis Padres

Guadalupe González Gurza y Hector Smith Mac Donald Pinedo

A Dios por darme la fuerza y la voluntad de seguir por este camino, por darme la luz en los momentos más oscuros y difíciles de mi vida. Gracias Dios.

A mis padres por brindarme todo el apoyo a lo largo de mi vida, por inculcarme valores y principios que me han hecho ser un mejor ser humano, no sería nada sin ustedes LOS AMO, gracias por todo.

A mis hermanos, Hector e Idania, por estar ahí a lo largo de mi vida, gracias por todo, en especial a mi hermano Hector por darme todo su apoyo y más, LOS AMO. Gracias.

A Yaniak que más que ser mi compañero de Tesis es mi amigo, gracias por querer compartir esta parte de nuestras carreras conmigo, gracias amigo, lo logramos.

A Juliana por ser mi compañera, mi amiga, mi novia, gracias por acompañarme en este camino un poco difícil, tu sabes lo que significas para mí, gracias por todo, TE AMO.

A todos mis amigos de la facultad, a toda la comunidad 89, Alexi, Peter, Diego, Daniel, Jonathan, Marco Antonio, Memo, Jacobo, Victor, Sergio, Leonel, a todos muchas gracias, si olvido a alguien una disculpa, a todos los llevo en mi corazón.

A mis amigos de toda la vida, los hermanos que elegí, Carlos, Oscar, Gerardo, Victor, Joao, Ricardo, gracias por su amistad a lo largo de todos estos años, los quiero amigos.

A mi alma mater la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de llegar a convertirme el ser humano que siempre soñé y darme todo de ella para llegar a este momento, gracias Máxima Casa de Estudios.

Dedicatoria y Agradecimientos

Yaniak O. Cedro R.

Dedico este trabajo a mis padres:

Ma. Isabel Reséndiz V.

Omar Cedro

Agradezco a Dios:

La entereza para terminar este proyecto en mi vida que fue la carrera de Ingeniería Petrolera.

A mis Padres:

Por nunca perder la confianza en mí y estar conmigo en los momentos difíciles, por su apoyo y guía a lo largo de mi vida, por la educación que me han dado que será el mayor legado que me dejarán, por enseñarme a valorar los aspectos no materiales de la vida.

A mi hermana:

Por siempre estar ahí cuando la necesito, por ser comprensiva y tolerante, por su apoyo incondicional y por formar parte de mi vida.

A mi familia:

Por enseñarme la importancia que tiene la unión familiar, por guiarme con sus recomendaciones y críticas constructivas, siendo algunas veces regaños y reprensiones, por esos buenos momentos que he pasado a su lado a lo largo de este tiempo en la Universidad.

A mis amigos:

por estar desde el inicio de esta aventura, la Comunidad 89, pero quiero enfatizar este agradecimiento a Daniel Hernández, Diego Flores, Jacobo Medina, Jonathan Monterrubio, Pedro Romero, Carlos Ortiz, Alexi Pastrana, Sergio Sosa, Víctor López, Mauricio Pérez, Guillermo Martínez, Juliana Núñez y Juan Smith Mac Donald y a todos los que han formado parte de mi estancia en CU.

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por darme los mejores momentos de mi vida y brindarme la mejor educación que se puede recibir.

Contenido

RELACIÓN DE FIGURAS:	4
RELACIÓN DE TABLAS	7
RESUMEN	9
1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 HISTORIA DEL ESTUDIO GENERAL DE LAS VIBRACIONES.....	11
1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE VIBRACIÓN.....	13
1.2.1 <i>Propagación de las ondas.</i>	17
1.2.2 <i>Tipos de ondas</i>	18
1.2.3 <i>Comportamiento de onda</i>	20
1.2.4 <i>Frecuencia natural.</i>	21
1.2.5 <i>Amortiguamiento.</i>	22
1.2.6 <i>Análisis de las vibraciones mecánicas.</i>	26
1.3 ESTADÍSTICAS.....	28
1.4 VIBRACIÓN EN LA SARTA DE PERFORACIÓN.....	29
1.4.1 <i>Proceso de desarrollo.</i>	30
1.4.2 <i>Descripción cualitativa de las vibraciones en la sarta de perforación</i>	32
1.4.3 <i>Vibraciones axiales.</i>	32
1.4.4 <i>Vibraciones Torsionales</i>	33
1.4.5 <i>Vibraciones laterales</i>	33
1.4.6 <i>Fenómenos Vibratorios.</i>	34
1.5 PRINCIPALES FACTORES DE LA VIBRACIÓN EN LA SARTA DE PERFORACIÓN.	38
1.5.1 <i>Interacción Barrena/Agujero.</i>	38
1.5.2 <i>Interacción Agujero/Sarta de Perforación.</i>	39
1.5.3 <i>Prácticas de Perforación:</i>	39
2 PROCESOS Y PRÁCTICAS PARA EL DISEÑO DEL APAREJO DE FONDO Y CONFIGURACIÓN DEL PERFIL DIRECCIONAL.	48
2.1 MODELOS MATEMÁTICOS EMPLEADOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA SARTA DE PERFORACIÓN.....	58
2.2 DISEÑOS DEL APAREJO DE FONDO.....	63
2.3 BARRENAS.....	67
2.3.1 <i>Barrenas tricónicas.</i>	68
2.3.2 <i>Barrenas PDC</i>	78

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

3	EFFECTOS DE LA VIBRACIÓN EN LAS OPERACIONES DE PERFORACIÓN.....	88
3.1	EFFECTOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO	88
3.2	DAÑOS EN HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN. (MWD/LWD).....	91
3.3	DAÑOS EN LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.	95
3.3.1	<i>Calculo de la Fatiga en tuberías de perforación.....</i>	<i>97</i>
3.3.2	<i>Inspección de los componentes de la sarta de perforación.....</i>	<i>100</i>
3.4	DAÑOS EN LA BARRENA.....	102
3.4.1	<i>Barrenas PDC.....</i>	<i>102</i>
3.4.2	<i>Barrenas Tricónicas.....</i>	<i>104</i>
3.5	EFICIENCIA DE LA PERFORACIÓN.....	107
4	MEDICIÓN E INTERPRETACIÓN DE LAS VIBRACIONES EN TIEMPO REAL	113
4.1	INTRODUCCIÓN	113
4.1.1	<i>Acelerómetro y Magnetómetro.....</i>	<i>116</i>
4.2	MEDICIONES EN SUPERFICIE	119
4.3	MEDICIÓN EN EL FONDO DEL AGUJERO	120
4.3.1	<i>Medición de Vibración Torsional (Stick-Slip).....</i>	<i>120</i>
4.3.2	<i>Medición de la Vibración Lateral Whirl (Giro).....</i>	<i>122</i>
4.3.3	<i>Medición del Salto de Barrena. (Bit Bouncing).....</i>	<i>125</i>
4.3.4	<i>Medición de la flexión (Bending).....</i>	<i>127</i>
4.4	MEDICIONES GRABADAS Y MEDICIONES EN TIEMPO REAL.....	129
4.4.1	<i>Medición Grabada (Post-Job).....</i>	<i>130</i>
4.4.2	<i>Mediciones en Tiempo Real</i>	<i>134</i>
4.4.3	<i>Telemetría</i>	<i>135</i>
4.4.4	<i>Mediciones en el fondo del pozo</i>	<i>136</i>
4.5	INTERPRETACIÓN	137
4.5.1	<i>Torsional (Stick-Slip)</i>	<i>137</i>
4.5.2	<i>Lateral</i>	<i>139</i>
4.5.3	<i>Axial</i>	<i>141</i>
4.5.4	<i>Tablas Comparativas de Interpretación de Mediciones de las Compañías de Servicio... ..</i>	<i>144</i>
4.6	ESTATUS DE LA MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN.	150
5	CONTROL Y REDUCCIÓN DE LA VIBRACIÓN EN TIEMPO REAL.	156
5.1	CONTROL Y REDUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES.....	158
5.1.1	<i>Axial</i>	<i>158</i>
5.1.2	<i>Lateral (Giro de la Barrena y giro del aparejo de fondo)</i>	<i>161</i>
5.1.3	<i>Torsional (Stick-Slip)</i>	<i>164</i>
5.1.4	<i>Acciones recomendada por el API RP 7G para mitigar las Vibraciones.....</i>	<i>168</i>
5.2	PARÁMETROS ADICIONALES PARA MEJORAR EL CONTROL DE LAS VIBRACIONES.	169

5.3	ACOPLAMIENTO DE LA VIBRACIONES	172
5.3.1	<i>La Zona de Condiciones Óptimas</i>	173
5.3.2	<i>Modelo Dinámico Avanzado de la Sarta de Perforación</i>	175
5.3.3	<i>Desacoplamiento del Stick-Slip y Whirl</i>	176
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	178
	BIBLIOGRAFÍA	182

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Relación de Figuras:

FIGURA 1.1 SISTEMAS VIBRATORIOS (FANCHI, 2006)	15
FIGURA 1.2 PROPAGACIÓN DE ONDA EN MATERIALES RÍGIDOS (CEDEX, 2001)	18
FIGURA 1.3 TIPOS DE ONDAS ELÁSTICAS (MODIFICADO DE FANCHI, 2006)	20
FIGURA 1.4 FENÓMENOS VIBRATORIOS EN LA SARTA DE PERFORACIÓN. (D.K. ASHLEY, 2001)	34
FIGURA 1.5 TIPOS DE GIRO (WHIRL). (D.K. ASHLEY, 2001)	37
FIGURA 2.1 DIAGRAMA DE RESPONSABILIDADES Y OBLIGACIONES.	54
FIGURA 2.2 TIPOS DE ESTABILIZADORES.....	56
FIGURA 2.3 DIFERENTES POSICIONES PARA LOS ESTABILIZADORES.	57
FIGURA 2.4 MODELADO POR ELEMENTO FINITO DEL APAREJO DE FONDO DE PERFORACIÓN.....	59
FIGURA 2.5 DIAGRAMA DEL PROCESO PARA EL DISEÑO DISEÑO DEL APAREJO APAREJO DE FONDO DE LA SARTA SARTA DE PERFORACIÓN Y LA SELECCIÓN DEL MODELO MAS OPTIMO.....	64
FIGURA 2.6 DIAGRAMA PARA MODIFICAR EL DISEÑO DEL APAREJO DE FONDO DE LA SARTA DE PERFORACIÓN.....	66
FIGURA 2.7 FUERZAS QUE SE APLICAN EN LOS INSERTOS DE UNA BARRENA TRICÓNICA.....	71
FIGURA 2.8 TIPOS DE HUELLA DE LA BARRENA TRICÓNICA DISMINUYENDO LA DUREZA DE LA FORMACION DE IZQUIERDA A DERECHA.....	74
FIGURA. 2.9 DIAGRAMA DE DISEÑO DE BARRENAS TRICONICAS	76
FIGURA 2.10 TIPOS DE BARRENAS PDC.....	78
FIGURA 2.11 DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA DE LOS INSERTOS DE DIAMANTE.	80
FIGURA 2.12 FORMA DE COMPRESIÓN DE LOS INSERTOS EN LAS BARRENAS PDC.....	81
FIGURA 2.13 DIAGRA DE DISTRIBUCION DE FUERZAS DE UNA BARRENA PDC.....	84
FIGURA 2.14 ANGULO ENTRE CORTADORES EN BARRENAS PDC.....	87
FIGURA 3.1 HERRAMIENTA MWD. (WWW.NETL.DOE.GOV)	94
FIGURA 3.2 ESFUERZOS POR CONTACTOS CON LA PARED DEL POZO. (O.VAISBERG, 2002).....	97

FIGURA 3.3 CURVA DE FATIGA DEL ACERO. (O.VAISBERG, 2002)	98
FIGURA 3.4 PROCESO DE LA FATIGA ACUMULADA.....	99
FIGURA 3.5 CARACTERISRICAS PRINCIPALES DE LA TUBERÍA. (O. VAISBERG, 2002)	102
FIGURA 3.6 DAÑOS EN LA BARRENA POR VIBRACIÓN. (GRAHAM MENSA-WILMOT, 2010)	103
FIGURA 3.7 PERDIDA DE NARIZ POR VIBRACIÓN. (M.J. FEAR, 2007)	104
FIGURA 3.8 DAÑOS EN LA ESTRUCTURA DE CORTE DEBIDO A VIBRACIONES. (BAKER HUGHES, 2007)	106
FIGURA 3.9 PERDIDA DE LA NARIZ DE LA BARRENA POR VIBRACIONES. (BAKER HUGHES, 2007).....	107
FIGURA 3.10 GRÁFICAS DE ROP VS CPF Y EFICIENCIA EN LA PERFORACIÓN VS CPF. (GRAHAM MENSA-WILMOT, 2010).....	108
FIGURA 3.11 GRÁFICAS DE ROP VS FPD Y EFICIENCIA EN LA PERFORACIÓN VS FPD. (GRAHAM MENSA-WILMOT, 2010).....	109
FIGURA 3.12 GRÁFICAS DE ROP VS MSE Y EFICIENCIA EN LA PERFORACIÓN VS MSE. (GRAHAM MENSA-WILMOT, 2010).....	109
FIGURA 3.13 DIAGRMA DEL CONTROL DE VIBRACIONES EN LA EFICIENCIA DE PERFORACIÓN. (GRAHAM MENSA-WILMOT, 2010).....	110
FIGURA 4.1 ACELERÓMETRO. (HTTP://WWW.PREDIC.COM/MEDIAWIKI).....	116
FIGURA 4.2 UMBRALES EN LAS CARGAS AXIALES PARA DETERMINAR EL SALTO DE LA BARRENA. (J.D. MACPHERSON, 2001).....	126
FIGURA 4.3 POSICIONAMIENTO DE ACELERÓMETROS. (DAVID C-K CHEN, 2003).....	130
FIGURA 4.4 HERRAMIENTA POST-CORRIDA. (PRIETO, 2009)	131
FIGURA 4.5 HERRAMIENTA POST-CORRIDA. (PRIETO, 2009)	131
FIGURA 4.6 MEDICIÓN DE MÁXIMOS MOVIMIENTOS LATERALES EN UN ACELERÓMETRO. (DANIEL PÉREZ, 2007).....	133
FIGURA 4.7 MEDICIÓN DE RANGO DE SS. (DANIEL PÉREZ, 2007)	134
FIGURA 4.8 ESPECTRO DE VIBRACIONES EN LA SARTA DE PERFORACIÓN. (MACPHERSON, 2010) ...	145

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

FIGURA 4.9 REGISTRO MWD POZO VENTURA-7 ISLAS SABLE (CANADÁ). (PRESENTACIÓN, DRILLING OPTIMIZATION & ADVANCED VIBRATION MANAGEMENT, CHRISTIAN LINKE, BAKER HUGHES INTEQ).	146
FIGURA 4.10 REGISTRO MWD POZO PERFORADO EN LOUISIANA (EUA). (D.K. ASHLEY, 2001).....	147
FIGURA 4.11 DIAGRAMAS DIAGRAMA DE SÍNTOMAS DE VIBRACION AXIAL, TORSIONAL Y LATERAL. (MEGAT, 2009).....	149
FIGURA 5.1 UBICACIÓN GLOBAL DE TECNOLOGÍAS APLICADAS A REDUCIR LAS VIBRACIONES. (J.R. BAILEY, 2010)	157
FIGURA 5.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DE VIBRACIONES AXIALES. (PRIETO, 2009).....	160
FIGURA 5.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DE VIBRACIONES LATERALES. (PRIETO, 2009).	163
FIGURA 5.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DE VIBRACIONES TORSIONALES. (PRIETO, 2009).	166
FIGURA 5.5 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DE VIBRACIONES. (SCHLUMBERGER, 2009)	167
FIGURA 5.6 DECLINACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA ZONA ÓPTIMA. (XIANPING, 2010)	174
FIGURA 5.7 DISMINUCIÓN DE LA ZONA ÓPTIMA DEBIDO A UN FUERTE ACOPLAMIENTO EN LAS VIBRACIONES. (XIANPING, 2010)	175

Relación de Tablas

TABLA 1.1 PRINCIPALES APORTACIONES EN EL TEMA DE VIBRACIONES.....	12
TABLA 1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS VIBRATORIOS	17
TABLA 1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DE EXCITACIÓN	17
TABLA 2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES MODELOS PARA DISEÑAR EL APAREJO DE FONDO DE PERFORACIÓN.	61
TABLA 2.2 TABLA DE DUREZA DE LAS FORMACIONES	73
TABLA 2.3 TABLA DE ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE BARRENAS PDC.....	83
TABLA 3.1 MÉTODOS DE INSPECCIÓN TUBULAR. (O. VAISBERG, 2002)	101
TABLA 4.1 TABLA COMPARATIVA DE MEDICIONES EN SUPERFICIE Y FONDO DEL POZO (J.D. MACPHERSON, 2001).....	128
TABLA 4.2 TABLA DE SEVERIDAD DE STICK-SLIP COMPAÑÍA BAKER HUGHES. (PRIETO, 2009).	138
TABLA 4.3 TABLA DE SEVERIDAD DE ATASCAMIENTO-DESLIZAMIENTO COMPAÑÍA SCHLUMBERGER. (SCHLUMBERGER, 2009).	138
TABLA 4.4 TABLA DE SEVERIDAD ATASCAMIENTO-DESLIZAMIENTO COMPAÑÍA HALLIBURTON. (HALLIBURTON, 2009).	139
TABLA 4.5 TABLA DE SEVERIDAD DE VIBRACIONES LATERALES COMPAÑÍA BAKER HUGHES. (PRIETO, 2009).	140
TABLA 4.6 TABLA DE SEVERIDAD DE VIBRACIONES LATERALES COMPAÑÍA SCHLUMBERGER. (SCHLUMBERGER, 2009).	140
TABLA 4.7 TABLAS DE SEVERIDAD DE VIBRACIONES LATERALES COMPAÑÍA HALLIBURTON. (HALLIBURTON, 2009).	141
TABLA 4.8 TABLA DE SEVERIDADES DE VIBRACIONES AXIALES COMPAÑÍA BAKER HUGHES. (PRIETO, 2009).	142
TABLA 4.9 TABLA DE SEVERIDADES DE VIBRACIONES AXIALES COMPAÑÍA SCHLUMBERGER. (SCHLUMBERGER, 2009).	142
TABLA 4.10 TABLA DE SEVERIDADES DE VIBRACIONES AXIALES COMPAÑÍA HALLIBURTON. (HALLIBURTON, 2009).	143

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

TABLA 4.11 TABLA COMPARATIVA DE VIBRACIONES TORSIONALES. (PRIETO, 2009).....144

TABLA 4.12 TABLA COMPARATIVA DE VIBRACIONES LATERALES Y AXIALES. (PRIETO, 2009).....144

Resumen

Durante la perforación de un pozo petrolero el éxito de la operación radica en una serie de factores, el viejo enfoque dice que un pozo perforado es mejor cuanto menos tarde en llegar a su objetivo, sin embargo este enfoque excluye los demás parámetros de evaluación de éxito como son menores costos por mantenimiento, la integridad del pozo, la tortuosidad, la direccionabilidad del pozo, etc. Todo esto en los últimos años ha tomado una gran relevancia en las operaciones, debido al incremento en la complejidad de las operaciones y la geometría de los pozos. Por esta razón se ha vuelto de vital importancia entender la dinámica de la sarta de perforación, que incluye la comprensión de los fenómenos vibratorios.

El alto costo que generan las fallas de la sarta de perforación, el aparejo de fondo y de la barrena pueden ser asociados en la mayoría de los casos a la vibración asociada a la perforación que pudiera clasificarse en axial torsional y lateral que pueden ser mínimas, normales y severas.

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, es por esto que el presente trabajo recopila la información referente a la influencia que tiene el óptimo diseño de la sarta de perforación , el aparejo de fondo, herramientas especiales y la barrena sobre las vibraciones, también se revisan los efectos que la vibración tiene sobre la integridad del pozo, sobre la eficiencia de la perforación, así como también, sobre las mediciones en tiempo real, en recientes décadas ha tomada un gran importancia, después de establecer los efectos de las vibraciones, se hace una revisión sobre las mediciones, él como se hacen, él como se miden y él como se interpretan en tiempo real es de suma importancia para determinar el impacto que tendrán en el proceso de perforación. Por último, pero no menos importante, se presentan diversas metodologías de control y reducción de vibración durante la

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

perforación, como las vibraciones son inevitables durante las operaciones de perforación una buena administración de los procesos para su control se vuelve imprescindible.

El desarrollo del presente trabajo aborda el tema de las vibraciones con un enfoque encaminado a la comprensión desde un punto de vista operativo y práctico, dando las bases teóricas suficientes para entender los principios básicos, que la experiencia ha demostrado, suficientes para poder entender la mecánica de las vibraciones, como es el tipo de ondas sus propiedades y principales métodos de propagación.

1 Introducción

En la operación es muy difícil evitar la vibración. Esto usualmente ocurre porque los efectos dinámicos de manufactura como son la tolerancia, el margen de espacio entre las piezas, rodamiento y fricción de contacto entre las piezas y las fuerzas desbalanceadas durante la rotación están presentes en todo momento. Algunas veces pequeñas e insignificantes vibraciones pueden excitar las frecuencias de resonancia de algunas partes estructurales y pueden ser amplificadas hacia mayores vibraciones y fuentes de ruido.

Algunas veces las vibraciones mecánicas pueden ser usadas para trabajos específicos, por ejemplo, se genera vibración intencional en algunos componente de aplicación específica como compactadores de concreto, perforadores de rocas, reductores de fricción, etc. En este caso las vibraciones se deben controlar, es importante mantener el nivel de energía de las vibraciones estable, y se debe examinar cuidadosamente su física y la respuesta funcional para hacer componentes resistentes al esfuerzo al que es sometido el componente.

1.1 Historia del estudio general de las vibraciones.

Las teorías fundamentales de la vibración no son nada nuevas, Saint-Venant publicó su teoría de las vibraciones de vástago en 1867, Love publicó un tratado entero de la teoría de vibración en 1926. Las matemáticas de la teoría de vibraciones incluye funciones complejas y transformadas de Fourier y su física incluye mecánica Newtoniana y análisis de esfuerzo. Recientemente, exceptuando algunos casos bajo simples circunstancias, la complejidad de

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

estas matemáticas ha restringido la aplicación de la teoría de la vibración en resolver problemas comunes, con el desarrollo de herramientas computacionales cada vez más poderosas estos cálculos complejos se pueden hacer en un tiempo razonable, lo que hace posible un desarrollo de nuevos estudios.

Tabla 1.1 Principales aportaciones en el tema de vibraciones

Personaje	Campo de las aportaciones
Galileo Galilei (1564-1612)	Medición de la frecuencia de un péndulo. Vibración cuerdas
Marín Mersenne (1588-1648)	Vibración de cuerdas
Christian Huygens (1629-1695)	Oscilaciones no lineales del péndulo
Robert Hooke(1635-1703)	Relaciones tono frecuencia; ley de Hooke de la elasticidad
Isaac Newton (1643-1727)	Leyes del movimiento y el cálculo.
Joseph Sauveur (1653-1716)	Vibración de una cuerda: acuño el nombre de “armónica fundamental” para frecuencia baja y armónica para los componentes de alta frecuencia.
Daniel Bernoulli (1700-1782)	Principio de la sobre posición lineal de armónicas vibraciones de las cuerdas y de las vigas
Leonhard Euler (1707-1783)	Principio de la cantidad de movimiento angular; numero complejo; Ecuaciones de Euler; vibraciones de vigas, placas y cascarones.
Jean D’Alembert (1717-1783)	Principio de D’Alembert; ecuaciones de movimiento; ecuación de onda.
Charles Coulomb (1736-1806)	Vibraciones Torsionales; fricción

Joseph LaGrange (1736-1813)	Ecuaciones de LaGrange; frecuencias de los tubos o cañones de los órganos abiertos y cerrados.
E. F. F. Chlandi (1756-1824)	Vibración en placas; líneas nodales
Jacob Bernoulli (1759-1789)	Vibración de vigas, placas y cascarones
Simeon Poisson (1781-1840)	Vibración de placas membranas y varillas; Efecto de Poisson
R. F. A. Clebsch (1833-1872)	Vibraciones de Medios elásticos
Gaston Floquet (1847-1920)	Estabilidad de oscilaciones periódicas: teoría de Floquet
Henri Poincaré (1854-1912)	Oscilaciones no lineales; mapa de Poincaré; estabilidad; caos
Aurel Stodola (1859-1943)	Vibraciones de vigas, placas y membranas; hojas de turbinas
C. G. P. De Laval (1845-1913)	Vibraciones de discos rotativos desbalanceados soluciones practicas
Balthasar Van Der Pool (1889-1959)	Oscilaciones no lineales; oscilador de Van der Pool.
Jacob Pieter Den Hartog (1901-1989)	Sistemas no lineales con amortiguamiento de Coulomb; vibración de maquinaria rotatoria recíprocante; libro de texto sobre vibraciones.

1.2 Conceptos básicos de vibración.

Se denomina vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio).

No debe confundirse una vibración con una oscilación. En su forma más sencilla, una oscilación se puede considerar como un movimiento repetitivo alrededor de una posición de

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

equilibrio. La posición de "equilibrio" es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de movimiento no involucra necesariamente deformaciones internas del cuerpo entero, a diferencia de una vibración. Una vibración es una fluctuación del movimiento de un sistema que se encuentra en estado de equilibrio. Existen dos tipos de vibraciones:

- Vibración determinística

La vibración determinística es un tipo de vibración que puede ser caracterizada de manera precisa, ejemplo de este tipo de vibraciones, es la vibración generada por una unidad de bombeo.

- Vibración aleatoria

Este tipo de vibración solo puede ser analizada estadísticamente, este tipo de vibración se puede ejemplificar con un atascamiento intermitente en una unidad de bombeo.

Un sistema vibratorio en general está constituido de tres elementos, elemento de inercia, elemento de rigidez y elemento de amortiguamiento o disipación, además de estos elementos se debe considerar, las fuerzas y momentos aplicados externamente y las alteraciones externas provenientes de desplazamientos iniciales prescritos, velocidades iniciales, o ambos.

El elemento de inercia almacena y libera energía cinética, el elemento de rigidez almacena y libera energía potencial y el elemento de disipación o de amortiguamiento se utiliza para expresar la pérdida de energía de un sistema. Cada uno de estos elementos tiene características diferentes de excitación y respuesta; la excitación está en la forma de una fuerza o de un momento y la respuesta correspondiente del elemento está en la forma de un desplazamiento, velocidad o aceleración. Los elementos de rigidez se caracterizan por una relación entre la fuerza aplicada (o momento) y la respuesta correspondiente de velocidad, siendo de naturaleza lineal o no lineal

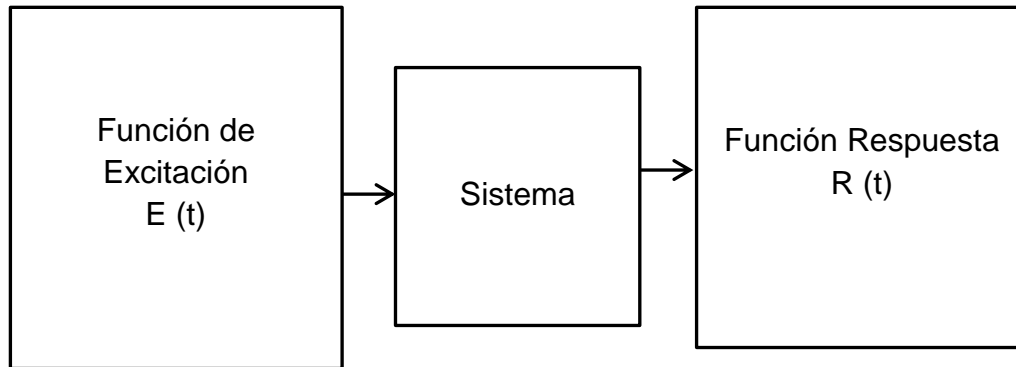


Figura 1.1 Sistemas vibratorios (Fanchi, 2006)

En los sistemas mecánicos, las vibraciones determinísticas son excitaciones que provocan una respuesta del sistema como se muestra esquemáticamente en la Figura 1.1. En teoría, siempre y cuando dos de las tres variables (excitación, sistema y respuesta) sean conocidas la tercera puede ser determinada, sin embargo los cálculos matemáticos pudieran ser desafiantes, se busca regular la función respuesta, ya que las funciones de excitación y el sistema son conocidos.

El sistema de Vibración puede ser lineal o no lineal, discreto o continuo (tabla 1.2). En todos los casos un sistema de vibración puede estar en una, dos o tres dimensiones ortogonales. Un sistema lineal es un sistema en el cual la proporcionalidad y la superposición son verdaderas y se cumplen las ecuaciones (1.1 y 1.2)

$$\text{si } E(t) \rightarrow R(t) \quad \text{entonces} \quad rE(t) \rightarrow rR(t) \quad \mathbf{1.1}$$

$$\text{si } E_1(t) \rightarrow R_1(t) \quad \text{y} \quad E_2(t) \rightarrow R_2(t)$$

$$\text{si } E_1(t) + E_2(t) \rightarrow R_1(t) + R_2(t) \quad \mathbf{1.2}$$

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

Cuando no se cumple esta proporcionalidad y superposición, puede hablarse de un sistema no-lineal.

Un sistema discreto es un sistema que tiene un numero finito de coordenadas independientes esto puede describir una respuesta del sistema. Estas coordenadas independientes son conocidas como grados de libertad (DOF's por sus siglas en inglés). Si el movimiento de la masa, rotacional o de traslación, de un sistema de vibración es una función de solo una coordenada independiente, entonces se dice que el sistema solo tiene un grado de libertad, si dos o más coordenadas independientes son requeridos para describir uno o ambos tipos de movimiento entonces el sistema tiene dos o más grados de libertad, si el sistema es un sistema continuo (un conjunto infinito de coordenadas independientes son necesarias para describir la respuesta del sistema) este tiene un infinito número de grados de libertad. La mayoría de los sistemas tienen grados de libertad dominantes, algunos sistemas incluso tiene un solo grado de libertad dominante lo interesante es que este tipo de sistema puede incluso ser caracterizado como un sistema discreto, lo que hace las matemáticas del sistemas más manejables.

Si el sistema tiene un solo grado de libertad o un conjunto de grados de libertad en una sola dirección, este es un sistema de una sola dimensión 1D, si en el sistema existen dos direcciones mutuamente ortogonales de los grados de libertad entonces se tiene un sistema en dos dimensiones 2D y si existen tres direcciones mutuamente ortogonales en el sistema de los grados de libertad entonces este es un sistema de tres dimensiones 3D.

Como se muestra en la Tabla 1.3 la función de excitación puede ser periódica o transitoria y estar presente o no. Una vibración periódica es un tipo de vibración que puede ser caracterizada matemáticamente como una indefinida repetición. Una vibración transitoria es de longitud finita y ésta compuesta de ondas que tiene un comienzo definido y que eventualmente se extingue. Estas ondas pueden ser extremadamente cortas en algunos casos.

Tabla 1.2 Clasificación de los Sistemas Vibratorios

	Lineal	No-Lineal
Discreta	Un Grado de Libertad Dos Grados de Libertad Tres Grados de Libertad	Un Grado de Libertad Dos Grados de Libertad Tres Grados de Libertad
Continua	1D, 2D, 3D	1D, 2D, 3D

Tabla 1.3 Clasificación de las Funciones de Excitación

	Ausente	Presente
Periódico	Vibración Libre	Vibración Forzada
Transitoria	Vibración Libre	Vibración Forzada

1.2.1 Propagación de las ondas.

Onda. Este término suele ser entendido intuitivamente como el transporte de perturbaciones en el espacio, no considerando el espacio como un todo sino como un medio en el que pueden producirse y propagarse dichas perturbaciones a través de él.

La forma por el cual una vibración viaja a través de un sistema es conocido como onda de propagación. Cuando una fuerza externa está afectando un cuerpo elástico en la vida real,

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

el cuerpo no reacciona instantáneamente en la totalidad de su longitud. El punto inmediato debajo de la fuerza reacciona primero y consecuentemente las secciones justo debajo a la sección previa a la reacción y así sucesivamente. Esta serie de reacciones son llamadas propagación de onda por que las reacciones se propagan a través del cuerpo por un periodo de tiempo a una velocidad específica. Si la tasa de cambio en la fuerza es baja entonces un análisis de equilibrio estático puede modelar las reacciones adecuadamente para muchas aplicaciones en ingeniería, esto es nombrado como análisis de cuerpo rígido. Si por el contrario la fuerza externa cambia rápidamente entonces un análisis de propagación de onda es necesario para modelar las reacciones efectivamente.

1.2.2 Tipos de ondas

Existe una gran variedad de ondas elásticas, algunas que son citadas en esta sección son las ondas longitudinales, laterales y flexión, algunas de las cuales son mostradas en la Figura 1.3

En ondas longitudinales (también llamadas ondas de compresión/tensión, axiales, de dilatación y no rotacionales), las partículas que constituyen el medio elástico son empujadas directamente contra y hacia fuera de ellas y la dirección del movimiento de las partículas es paralelo el movimiento de la onda. En la mayoría de aceros, las ondas longitudinales viajan aproximadamente a 5,121 m/s. las ondas longitudinales no se dispersan, esto significa que

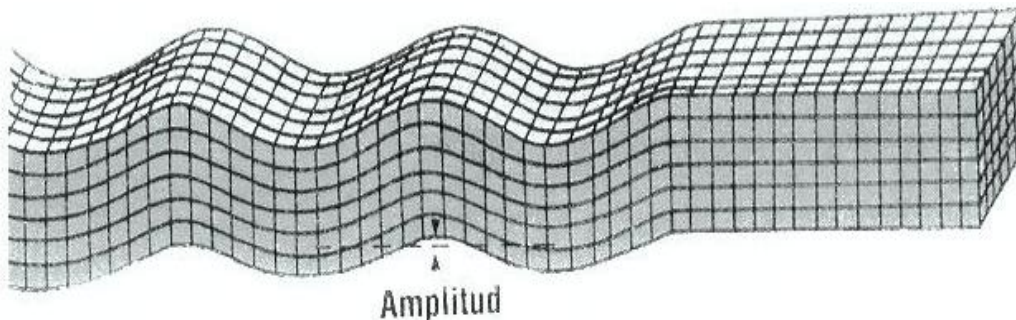


Figura 1.2 Propagación de onda en materiales rígidos (CEDEX, 2001)

todos los componentes de los que está constituida una onda longitudinal viajan a la misma velocidad y, consecuentemente, no se dispersan.

Las ondas laterales (también conocidas de diferentes maneras ondas de cizalla, torsionales, transversales, equivolumentales, y distorsionales) las partículas son deslizadas entre ellas y se mueven perpendicularmente a la dirección del movimiento de las ondas, como el deslizamiento entre partículas necesita mayor energía, las ondas laterales son más lentas, en acero estas ondas viajan a una velocidad aproximada de 3,170 m/s, un cambio rápido en la fuerza torsional en una sección de tubería causara una onda lateral que se propagara del punto de aplicación hacia todas las partes de la tubería. Esta se propagara como un torcimiento angular. Las ondas laterales no se dispersan y tienen un método de solución como el de las ondas longitudinales sin embargo, las ondas de cizalla o transversales son dispersas, sus componentes se dispersaran y “ensuciaran” el perfil de onda inicial. Esto complica significativamente su análisis.

Ondas de Flexión viajan como una flexión en una barra o plato y tiene componentes laterales y longitudinales, cizallamiento giratorio y momentos de inercia, esto complican el análisis de las ondas de flexión.

Los estudios de la propagación de onda en áreas de Ingeniería Petrolera han sido agrupadas en ondas longitudinales, torsionales y laterales, de estas las ondas longitudinales generalmente son las más fáciles de modelar. Una onda de compresión es una onda de esfuerzo en la cual el esfuerzo se propaga en forma de compresión, de la misma manera una onda de tensión es una onda de esfuerzo en la cual el esfuerzo se propaga en forma de tensión.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

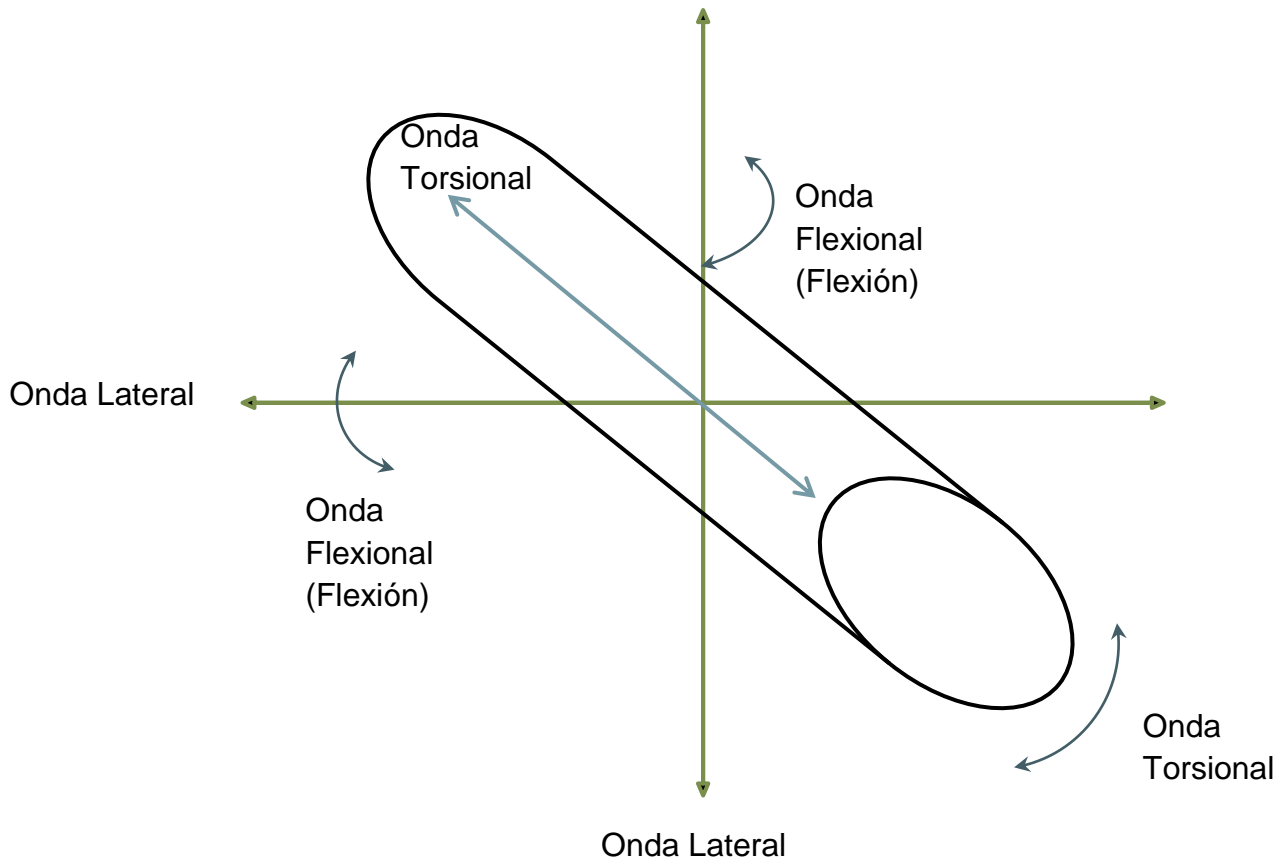


Figura 1.3 Tipos de Ondas Elásticas (Modificado de Fanchi, 2006)

1.2.3 Comportamiento de onda

En el comportamiento de onda, la velocidad de onda depende principalmente de la densidad y el módulo de elasticidad pero también es afectado por el amortiguamiento y la frecuencia, por ejemplo golpeando en el extremo de una barra larga de acero con un martillo generaremos una onda longitudinal que comprime las partículas de acero. La longitud de onda es determinada por el tiempo que el martillo está en contacto con el extremo de la barra además de que su magnitud está determinada por la fuerza con la que el martillo golpea el extremo de la barra. Como las ondas se mueven a lo largo de la barra, el acero dentro de la longitud de la onda es comprimido, después de que la onda ha pasado, el acero regresa a un

estado de relajación a un que no necesariamente en la misma ubicación antes del paso de la onda.

El retorcer una barra de acero provocara una onda de cizallamiento, una onda de cizallamiento se mueve a lo largo de la longitud de la barra más lentamente de lo que lo hacen las ondas longitudinales, y su comportamiento es muy similar a las ondas longitudinales, la longitud del efecto está en función de cuanto se retorció y la magnitud está en función de la torsión que fue aplicada para que se retorciera.

Las ondas actúan independientemente, pero el estrés que crean puede ser sumado, por ejemplo, dos ondas iguales de compresión que son generadas simultáneamente por golpes de martillo en cada uno de los extremos de una barra larga de acero se encontraran en el centro de la barra pasaran a través de ellas cada una y entonces cada onda longitudinal a lo largo de la barra cruzara la otra de manera independiente como si ninguna de las dos existiera, mientras las ondas está pasando a través de ellas la compresión en el acero será el doble que si se midiera individualmente.

1.2.4 Frecuencia natural.

Todas las cosas tienen una frecuencia natural y es la frecuencia la que un objeto vibrara al aplicarse un disturbio y continuara después de haber retirado la fuente de excitación. Todas las sargas de perforación y sarga de varillas tienen una frecuencia natural que depende de las propiedades del material y la geometría de este. Las propiedades del material determinan la velocidad de la onda y la geometría determina como las ondas se reflejan y refractan.

Durante la propagación de la onda, la onda eventualmente alcanza un extremo de la material, parte de la onda se reflejara de regreso a su fuente generadora, si la onda reflejada alcanza la fuente en el instante en el cual se genera una nueva onda, estas dos ondas se combinaran y se sincronizaran en una fase, después, si las ondas reflexión de estas dos ondas regresan a la fuente al mismo tiempo que es generada la siguiente nueva onda las tres

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

ondas se combinaran, si esto continua por el tiempo mientras más ondas son generadas bajo estas condiciones, la onda resultante incrementara su amplitud teóricamente hasta el infinito, esto es llamado Resonancia. La frecuencia a la cual la resonancia ocurre es a la frecuencia natural o un entero múltiplo de esta frecuencia (llamada Frecuencia Armónica). Si esta reforzamiento de la onda se deja continuar, el sistema eventualmente se destruirá o fatigara hasta fallar.

Un sistema continuo contiene un número infinito de frecuencias naturales, en tanto que un sistema discreto de un solo grado de libertad tiene una sola frecuencia natural de resonancia, un sistema de dos grados de libertad tienen dos frecuencias naturales, en general el número de grados de libertad de un sistema determina el número de frecuencias naturales que este tiene, lo que significa que un sistema discreto tendrá un numero finito de frecuencias naturales, sin embargo en la realidad existe un número infinito de frecuencias naturales porque todos los sistemas son continuos. Algunas frecuencias tendrán mayores amplitudes que otras, cada sistema continuo con respuestas a grandes amplitudes puede ser modelado con una metodología de un sistema discreto.

Siendo la ecuación básica de la frecuencia natural:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 1.3$$

1.2.5 Amortiguamiento.

La energía de la resonancia no alcanza un valor infinito debido al amortiguamiento, que se puede definir como la disipación de energía debida al tiempo o la distancia. Sin el amortiguamiento, o fricción, la energía de las vibraciones alcanzaría tanta energía que el sistema no lo podría soportar, lo cual causaría una falla estructural

La propagación de onda dentro del sistema agrega energía al sistema pero el amortiguamiento remueve parte de la energía, generalmente la energía dispersada de las vibraciones es convertida en calor y si el amortiguamiento no tomara parte de la energía para

sacarla, el sistema puede autodestruirse por un exceso o sobrecarga de energía. La cantidad de energía en un sistema en determinado momento se podrá apreciar en el nivel de esfuerzo o tensión del sistema, una gran cantidad de esfuerzo o tensión en el sistema refleja el alto nivel de energía del sistema. Una vez que el esfuerzo alcanza un valor más grande que el esfuerzo de cadencia del sistema, la cadencia del material fallara inmediatamente, esto quiere decir que el material excede su límite plástico y el esfuerzo producirá una deformación permanente en el material, si el esfuerzo generado es mayor al esfuerzo del sistema soporta, el sistema fallara inmediatamente.

En el agujero tres tipos diferentes de amortiguamiento pueden ocurrir, el amortiguamiento viscoso, Coulomb y Estructural (histerético). El amortiguamiento viscoso ocurre cuando la fuerza de amortiguamiento generada es proporcional a la velocidad de las partículas. Amortiguamiento de Coulomb (también llamado fricción seca) es la fuerza generada por el movimiento de material pasando de uno a otro, esto usualmente es proporcional a la fuerza normal a las superficies de los materiales. Los coeficientes de fricción estático y dinámico son proporcionalmente constantes. Amortiguamiento estructural (histerético) es la fuerza de fricción generada por el movimiento relativo de los planos internos de un material como el movimiento causado por una onda. A pesar de que esto es verdad para todos los materiales, algunos materiales son viscoelásticos esto es que muestran un efecto estructural mucho mayor del que otros lo hacen.

1.2.5.1 Amortiguamiento viscoso

Como se describió arriba, el amortiguamiento viscoso ocurre cuando la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad de las partículas, el amortiguamiento viscoso puede ser mostrado por:

$$F_d = c \frac{dx}{dt} \quad 1.4$$

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

Una manera en que se puede hacer un análisis del amortiguamiento viscoso es de la interacción de las interfaces de un sólido y un líquido.

Un método para determinar el amortiguamiento incluye notar el decremento de la aceleración en todo un ciclo de vibración. Un impulso es generado sobre la sarta de perforación para producir una onda, mientras la onda está decayendo, la aceleración es medida y grabada varias veces en una posición específica de la sarta de perforación y es tomada en la misma fase esto es cresta a cresta, el tiempo entre cada grabación es también anotado. Estos valores son usados en la ecuación 1.4 para calcular el coeficiente de amortiguamiento (c), desafortunadamente a través de este método se tiene el amortiguamiento total del sistema y no se distingue entre amortiguamiento viscoso y Coulomb.

$$c = 2 \frac{A_c E}{v_s 2t} \ln \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad 1.5$$

1.2.5.2 Amortiguamiento Coulomb.

Amortiguamiento de Coulomb es la fricción que ocurre cuando dos superficies secas deslizan entre ellas y su fuerza es un valor constante esto depende de la velocidad y el desplazamiento de las partículas, pero también depende del factor de fricción (μ) y la fuerza normal de las caras en contacto, este valor se determina con:

$$F_f = \mu F_n \quad 1.6$$

La fuerza de amortiguamiento de Coulomb siempre es de signo opuesto a la velocidad de la partícula, esto quiere decir que la fuerza de amortiguamiento es contraria cuando el signo de la velocidad de la partícula cambia, esta discontinuidad hace una fuerza de amortiguamiento no lineal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_f = \pm \left(\frac{dx}{dt} \right) \mu F_n \quad 1.7$$

La no-linealidad hace que el uso de esta ecuación de movimiento se dificulte.

1.2.5.3 Amortiguamiento estructural

El amortiguamiento estructural, es llamado así porque se origina de las fricción interna de una estructura. Una onda moviéndose a través de un material hace que la estructura atómica reaccione a una fuerza aplicada, como los átomos de una estructura se mueven, la energía es perdida a través de la interacción de estos átomos con los átomos vecinos. El amortiguamiento estructural es la energía perdida cuando los átomos se mueven relativamente entre ellos.

Si el material tiene una relación lineal perfecta entre esfuerzo/deformación, el amortiguamiento estructural no ocurriría. En realidad, aunque no existe tal cosa como un comportamiento lineal perfecto de esfuerzo/deformación, dos curvas desarrolladas en un diagrama de esfuerzo/deformación mientras un material es tensionado y liberado, el área central entre estas dos curvas representa la energía perdida por la fricción interna. Esta vibración puede ser pequeña, pero la cantidad de energía disipada puede ser muy grande acusa de las vibraciones de alta frecuencia causadas por este fenómeno que se repite muchas veces durante todo el tiempo que dura un periodo.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

El valor del amortiguamiento estructural es dependiente de un cantidad de factores, unos de los factores es la condición del material esto es, la composición química, las homogeneidades y los cambios de las propiedades causados por las historias térmica y de esfuerzo, otro es el estado de esfuerzo interno en las condiciones iniciales y la subsecuentes registros térmicos y de esfuerzo, también se deben de incluir el tipo variaciones de esfuerzos. Axiales, Torsionales y Flexión, todos estos parámetros afectan directamente el valor del amortiguamiento estructural.

Una manera de encontrar la fuerza de amortiguamiento estructural es haciéndola proporcional a la velocidad de las partículas dividida por la frecuencia natural de onda, como se muestra en la siguiente ecuación (1.7):

$$F_h = \frac{h}{\omega} \frac{dx}{dt} \quad 1.8$$

1.2.6 Análisis de las vibraciones mecánicas.

Existen tres diferentes componentes para el análisis de vibraciones mecánicas:

1. Determinación de la compatibilidad geométrica.
2. Determinación de las ecuaciones de constitución de la materia (propiedades del material).
3. Determinación de las condiciones de equilibrio.

La compatibilidad de la geometría se refiere a los restricciones y conexiones, también incluye las propiedades continuas, como el estado que el sistema no se separara en piezas individuales, las ecuaciones constitutivas representan las propiedades del material, el cual

incluye la masa, el amortiguamiento y los coeficientes de resorte, estas ecuaciones constitutivas incluyen la relación entre el esfuerzo/deformación y la Ley de Hooke.

Las condiciones de equilibrio están basadas en las condiciones estáticas y dinámicas simultáneamente, un estado de equilibrio estático que haga que la suma de las fuerzas que actúan sobre un objeto sea igual a cero.

Las condiciones dinámicas de equilibrio se basan en la segunda ley de Newton y es la base de muchos métodos de análisis de vibraciones. La suma de las fuerzas actuando sobre un objeto es igual a su masa por la aceleración del objeto. Otro análisis de equilibrio dinámico incluye métodos de trabajo virtual y métodos de balance de energía (principio de Hamilton)

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

1.3 Estadísticas

1994 Schlumberger estima que entre el 2 y 10% de los costos de la perforación pueden ser asociados con problemas de vibración durante la perforación. (S. Jardine, 1994)

2009 BP (conocido como British Petroleum) estima que alrededor del mundo los costos de las fallas relacionadas a las vibraciones se encuentran en el orden de 300 millones de dólares por año. (Baker INTEQ, 2007)

Instituto Francés del Petróleo (IFP) las fallas en la sarta de perforación ocurre en 14% de los equipos de perforación resultando en pérdidas por inactividad del equipo de 106,000 dólares aproximadamente por evento.

A. Chi (2006) la vibración de la sarta de perforación fue encontrada como la responsable del daño severo y fallas prematuras de la sarta de perforación durante la perforación, la vibración significativamente acorta la vida útil de la sarta de perforación y tiene un gran impacto en el rendimiento de la perforación. Sus estudios concluyeron que los efectos combinados de las vibraciones axiales y torsionales pueden ser modelados para predecir la fatiga que sufre la sarta de perforación provocadas por las vibraciones axiales laterales y torsionales.

Hill (1992) al realizar el análisis de 76 fallas individuales de la sarta de perforación que ocurrieron en una variedad de condiciones de perforación en diferentes locaciones, Estados Unidos, Mar del Norte, Este de África y América Central, estas 76 fallas fueron analizadas por el alto costo que generaron para los operadores, en su estudio encontró que, 13% de las fallas se asociaban con Torsión y/o Tensión, la fatiga fue la principal causa, 50 de 76 fallas lo que representa el 65% y además contribuyo a otras 10 fallas más, la fatiga de la herramienta causo el 43% de las desconexiones.

Halliburton, los costos de perforación son un factor crítico en la determinación del retorno de la inversión en la industria Petrolera, la cantidad de Tiempo No Productivo es aproximadamente el 20% del tiempo del equipo de perforación y puede deberse a los grandes

obstáculos que se pueden encontrar en los campos, gran parte de este tiempo se deben a fallas asociadas en los elementos de la sarta de perforación.

Lehman Brothers (2005) presenta un informe donde los costos asociados a el tiempo no productivo dentro de la industria a nivel mundial es de 31,000 MM USD, un porcentaje significativo es debido a las fallas de las herramientas de perforación donde un factor importante para que ocurran estas fallas son los Impactos y vibraciones, asociadas a esta fallas pueden presentarse Reparaciones en el equipo de perforación y problemas del agujero lo cual aumenta el tiempo no productivo, incrementando así los efectos que tienen las vibraciones sobre los costos en las operaciones de perforación.

1.4 Vibración en la Sarta de perforación.

Las Vibraciones de la sarta de perforación son reconocidas con mayor frecuencia como un costo operativo muy alto para la industria. Muchas de las causas son entendidas y muchas metodologías de remediación se encuentran disponibles, el paso vital es implementar efectivamente el conocimiento y la tecnología para recortar los costos de perforación.

Puede definirse la vibración en la sarta de perforación como la energía liberada en forma mecánica debido al desbalance de energía existente en un sistema de perforación, constituido por la interfaz con la roca perforada, la sarta de perforación, barrena y lodo de perforación, la energía libera es debida a la relación $E_s < E_{ts}$ donde E_s es la energía necesaria para perforar la roca y E_{ts} es la energía total del sistema. E_{ts} es la suma de diversos factores entre los más importantes y cuantificables de manera precisa son el peso sobre la Barrena, la velocidad de rotación, el gasto de lodo, fricción contra las paredes del agujero, etc. El sistema tendera a permanecer en equilibrio, es ahí cuando las vibraciones aparecen qué harán que el sistema regrese a un estado de equilibrio liberando energía en forma de vibraciones y ocurriendo impactos cuando la amplitud de las vibraciones excede la amplitud del radio del pozo

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

Los síntomas de las vibraciones en la sarta de perforación son diversos, algunas veces cuando la cuadrilla observa fenómenos de vibración en el equipo de perforación, están muy conscientes de que algo está mal.

1.4.1 Proceso de desarrollo.

La industria de perforación tiene un problema común de intensas vibraciones durante la perforación. La sarta de perforación consiste en varias tuberías de perforación, lastra barrenas, estabilizadores, conexiones especiales, herramientas de medición, motores de fondo/RSS, etc., sometidos a ciertas cargas dinámicas complejas causadas por diferentes fuentes, debido a que la barrena y la sarta de perforación se encuentran en constante interacción

La investigación que abarca el problema de las vibraciones en la sarta de perforación data de principios de los 60's principalmente dirigidos por Bailey & Finnie (1960), ellos usaron una aproximación gráfica para calcular las frecuencias naturales de la sarta de perforación. Desde entonces se ha originado un incremento respecto al interés en el modelado del comportamiento dinámico de la sarta de perforación utilizando técnicas tanto analíticas como numéricas. La aproximación analítica ha sido la base de los primeros modelados (Aarrestand et al., 1986; Jansen, 1991). Yigit and Christoforou (1996, 1998) modelaron la sarta de perforación utilizando el método anterior. Estos modelos asumen el acoplamiento entre las vibraciones axiales y transversales (Yigit and Christoforou, 1996) y entre las vibraciones torsionales y transversales (Yigit and Christoforou, 1998). Navarro y Cortes (2007) usaron un conjunto de parámetros del modelo para analizar la vibración torsional y el fenómeno de Stick-slip en sartas de perforación para pozos verticales.

La complejidad del problema y desarrollo de computadoras con prestaciones de hardware mejoradas ha abierto la puerta a una versatilidad de técnicas numéricas. La mayoría de las investigaciones han empleado efectivamente modelos numéricos como el método de diferencias finitas (MDF) y el método de elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés) para tratar el problema. Khan (1986) uso el método de diferencias finitas para resolver

las vibraciones axiales y torsionales en la sarta de perforación mientras se despreciaba la adición de masas y el efecto de amortiguamiento. Rey (1983) derivó una ecuación diferencial del movimiento de las vibraciones laterales en el aparejo de fondo de la sarta de perforación entre la barrena y los estabilizadores, resolviéndola mediante el método de diferencias finitas, examinaron los efectos del torque y el peso en la barrena y los estabilizadores, el amortiguamiento del lodo y la desviación del aparejo de fondo desde el eje del pozo. Shyu (1989) estudio el acoplamiento entre las vibraciones laterales y axiales y el efecto del giro excéntrico de la sarta de perforación usando el método de Diferencias Finitas. Baird et al. (1985) uso el método de elemento Finito (FEM) para encontrar la respuesta transitoria de la rotación del aparejo de fondo bajo la interacción con la formación. Burgess et al. (1987) Uso el método de Elemento Finito para modelar la vibración lateral de la sarta de perforación, ellos realizaron un análisis estático no lineal para encontrar la ubicación donde la tubería por encima del ultimo estabilizador toca la pared del pozo, entonces usando la longitud de la sarta de perforación desde la barrena hasta el punto donde la tubería toca la pared del pozo evaluaron la respuesta de la sarta por medio de un análisis armónico. Apostol et al. (1990) desarrollo un modelo de elemento finito tridimensional para investigar la respuesta armónica del aparejo de fondo de la sarta de perforación. El amortiguamiento, Coulomb, Estructural y viscoso, fueron incluidas en su modelo. Khulief and Al-Naser (2005) uso la aproximación de LaGrange para formular un modelo de elemento finito para la rotación vertical de la sarta de perforación.

Bellman and Casti (1971) y Bellman et al. (1972) introdujeron el método de cuadratura diferencial a principios de los 70's desde entonces, muchas investigaciones han aplicado este método para resolver varios problemas en las diferentes áreas de ciencia y tecnología. El método ha sido mostrado como un poderoso contendiente en la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales. Por lo tanto se ha convertido en una alternativa viable para los métodos numéricos existentes, como el Método de diferencias Finitas y el Método de Elemento Finito, para el modelado y simulación del aparejo de fondo

Se puede mencionar dos grande ventajas sobre el método elemento finito.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

1. El uso de algoritmos más simples que conllevan a una implementación más fácil del método mencionado.
2. Soluciones más eficientes a partir de menos puntos de discretización de la ecuación.

Debido a estas ventajas la popularidad de este método se ha incrementado para la resolución de diferentes tipos de problemas en la ingeniería en años recientes.

Bert y Malik (1996); Moradi y Taheri (1999) los autores con el mejor conocimiento, dicen que la validez de método en el tratamiento de las vibraciones de la sarta de perforación aún no ha sido ampliamente explorado.

1.4.2 Descripción cualitativa de las vibraciones en la sarta de perforación

Las razones principales por la que la sarta perforación vibra son debidas al contacto de la barrena con la formación y el contacto entre la sarta de perforación y la pared del agujero. Además otras causas como la flexión de la tubería y el desalineamiento de la sarta de perforación pueden causar o incrementar la severidad en las vibraciones de la sarta de perforación. Esas vibraciones pueden generar movimientos axiales, laterales y torsionales en la barrena y en la sarta de perforación.

1.4.3 Vibraciones axiales

Este tipo de vibración puede causar saltos de la sarta de perforación y disminuir la tasa de penetración (ROP), Además que las fluctuaciones del peso efectivo en el fondo del agujero también pueden dañar la barrena y al aparejo de fondo de la sarta de perforación. Las vibraciones axiales son más comunes cuando se está perforando con barrenas triconicas. En el caso de pozos verticales someros estas vibraciones puede ser detectadas en superficie por las variaciones en la carga del gancho y saltos en el top drive o en el Kelly, a grandes profundidades y/o en pozos direccionales la vibración pueden ser atenuadas, y un

sistema de detección de vibración será necesario para identificar el problema en superficie, sin embargo el daño en la barrena y en el aparejo de fondo seguirá siendo el mismo.

1.4.4 Vibraciones Torsionales

Estas vibraciones provocan que la rotación en la barrena sea irregular, lo cual puede causar daños en las conexiones de las tuberías y en la misma barrena reduciendo así el rendimiento de la perforación, el fenómeno de vibración torsional es conocido como Stick/slip. En este caso la velocidad de rotación disminuye en la barrena y en los estabilizadores, mientras que la velocidad en la mesa rotaria y el top drive. Este proceso hace que la barrena y el estabilizador acumulen una gran cantidad de energía que al liberarse provoca un incremento drástico y peligroso en la velocidad de rotación. Estas ondas torsionales viajan en la sarta de perforación desde el fondo del pozo hasta la superficie y de regreso a la barrena. Este comportamiento puede continuar a menos que se cambien los parámetros de perforación o la operación de perforación se detenga.

1.4.5 Vibraciones laterales

Estas vibraciones ocurren cuando la barrena o los estabilizadores giran alrededor de un eje no coincidente con el eje del agujero lo cual provoca una ampliación no deseada en el diámetro del agujero. Este tipo de rotación puede no ser identificada en superficie lo cual puede causar reducción en la vida del aparejo de fondo de la sarta de perforación debido a los ciclos de tensión de alta frecuencia en la sarta de perforación.

La sarta de perforación requiere energía. En la perforación la energía se obtiene de tres parámetros básicamente, peso en la barrena (WOB por sus siglas en inglés), velocidad de rotación, y el fluido de perforación. En la perforación siempre se presentan vibraciones, éstas varían en magnitud y provocan que la energía requerida en la perforación no se transmita en su totalidad para hacer el agujero. La meta principal en estos casos es la detección y minimización de las vibraciones a favor del aumento de la ROP. Otro objetivo

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

principal se basa en evitar la destrucción por este fenómeno del aparejo de fondo de la sarta de perforación y de sus principales componentes.

Para extender la vida del aparejo de fondo de la sarta de perforación, es crítico comprender el mecanismo que se encuentra trabajando en su contra y ser capaces de cuantificar su magnitud. Con este conocimiento podemos alterar la construcción del aparejo de fondo de la sarta de perforación y del pozo utilizando parámetros de perforación en superficie para controlar este fenómeno mediante la aplicación de un dispositivo que pueda detectar vibraciones multiaxiales, podemos identificar los diferentes tipos que existen, medir su magnitud, y determinar qué tan efectivo puede ser el diseño para soportar estos efectos.

1.4.6 Fenómenos Vibratorios.

Una de los principales conceptos es la identificación de los movimientos mecánicos que se llevan a cabo en el pozo. Estos mecanismos pueden estar acoplados causando otro

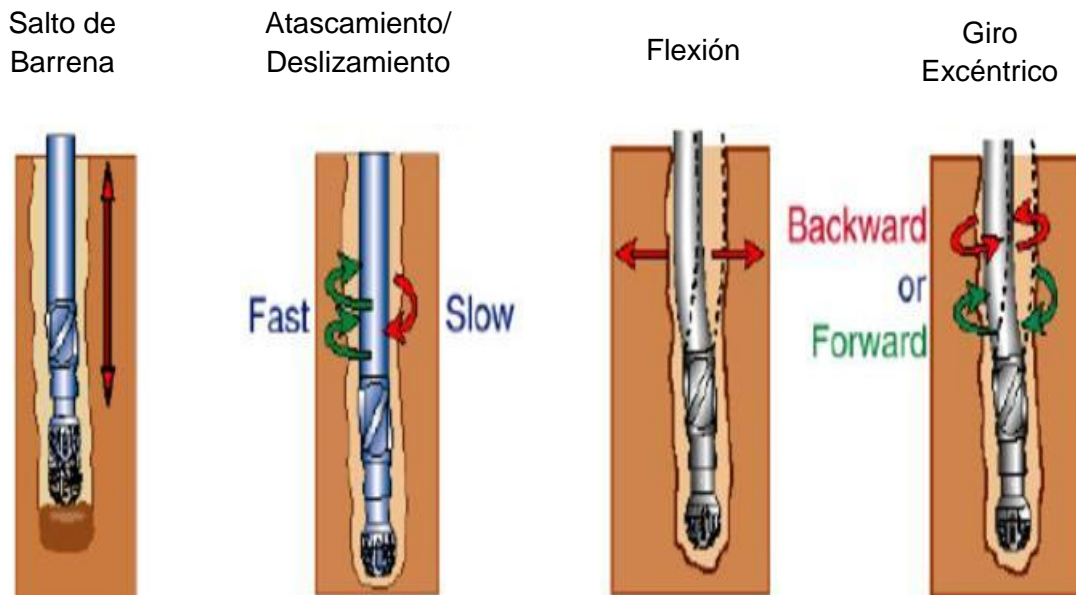


Figura 1.4 Fenómenos Vibratorios en la Sarta de Perforación. (D.K. Ashley, 2001)

movimiento resultante que normalmente es llamado respuesta paramétrica. Figura 1.4

1.4.6.1 Salto de la Barrena (Bit Bouncing)

Esta se define como un movimiento axial en el aparejo de fondo la sarta de perforación. La barrena golpea en repetidas ocasiones el fondo del pozo (formación). Este fenómeno ocurre principalmente en agujeros verticales cuando se utilizan barrenas triconicas, cuando se perfora fuera del camino de la zapata o en formaciones muy duras. También puede ser el resultado de otros mecanismos de movimiento como son el Stick-Slip o el Whirl. Los indicadores en superficie donde se pueden apreciar estos movimientos son el top drive, el movimiento del Kelly o la fluctuación en el WOB (Peso sobre la Barrena). Este movimiento puede resultar en una falla temprana de la barrena y del aparejo de fondo de la sarta de perforación y una reducción de la ROP. Algunos métodos para evitarla incluyen la reducción del WOB y el incremento de las RPM, cambio del diseño de la barrena o la utilización de herramientas de amortiguación en el fondo (Shock Subs).

1.4.6.2 Atascamiento/Deslizamiento de la Sarta (Stick/slip)

Se define como un movimiento alternado que va de lento a rápido en el momento de rotación del aparejo de fondo de la sarta de perforación. A causa de la rotación la barrena por algunos periodos se detiene causando un torque sobre la sarta de Perforación y por consecuencia un giro de esta. Generalmente ocurre en pozos con ángulos muy elevados, cuando la barrena PDC es agresiva y el aparejo de fondo de la sarta de perforación sufre de fuertes fricciones con la pared del pozo. Los indicadores en superficie son variaciones en el torque y en las RPM. Este movimiento puede resultar en un sobre torque y daño en las conexiones. El incremento en la velocidad de la barrena y en las fuerzas de los impactos puede remover los recortes de la barrena y los dientes de las barrenas de conos. La solución para este problema puede ser la reducción del WOB y de las RPM. La reducción de la fricción puede ser alcanzada si utilizamos escariadores, si suavizamos los perfiles del pozo y aumentamos la lubricidad del lodo de perforación.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

1.4.6.3 Rotación no-concéntrica de la Barrena (Bit Whirl)

Se define como una rotación excéntrica de la barrena. La barrena en vez de rotar alrededor de un centro geométrico, la barrena rota de manera excéntrica provocando contacto con la pared del pozo. Esto generalmente ocurre en pozos verticales, en formaciones intermedias y duras, y en barrenas PDC con cortadores laterales muy agresivos. La detección en superficie es casi imposible pero la barrena tiene características notables al final de cada viaje, como el estar fuera de medida del agujero o fuera de round. La detección en el fondo del pozo es más sencilla, debido a la presencia de vibraciones laterales de alto impacto. Estos impactos altos inducen al movimiento Whirl en la barrena provocando fallas prematuras en el aparejo de fondo de la sarta de perforación, falla en la barrena, y reducción de la ROP. Para su reducción se pueden utilizar barrenas anti-Whirl, además de mejores prácticas en la perforación.

1.4.6.4 Rotación no-concéntrica del aparejo de fondo (BHA Whirl)

Se define como el movimiento excéntrico del aparejo de fondo de la sarta de perforación en el pozo. Este movimiento también puede ser en la misma dirección de la rotación de la tubería, en reversa o en movimientos caóticos. El aparejo de fondo de la sarta de perforación “camina” en el pozo debido la forma de engranaje que tienen los estabilizadores y de las juntas de las herramientas cuando golpean las paredes del pozo. Esto generalmente ocurre en pozos verticales, en secciones inestables del aparejo de fondo de la sarta de perforación, en los ensambles de péndulo, y cuando la lubricidad del lodo no es la adecuada. La detección en superficie puede ser alcanzada indirectamente cuando este movimiento induce al bit Bouncing o la revisión de los componentes de la sarta de Perforación después de las corridas. El desgaste de un solo lado de los estabilizadores y de las uniones especiales de las herramientas son señales típicas del BHA Whirl.

La combinación de fuertes movimientos laterales y de torsión en el fondo del pozo es evidente en los dispositivos de detección de movimientos multiaxiales. Estos fuertes impactos pueden resultar fácilmente en la falla de los componentes del aparejo de fondo de la sarta de perforación como de la barrena. Los componentes de la sarta de Perforación están igualados a un solo lado y sometidos a fatiga extrema. Algunas formas de reducir este movimiento incluyen la utilización de escariadores y del incremento de la lubricidad del lodo, así como el rediseño del aparejo de fondo de la sarta de perforación y de mejores prácticas en la perforación. Cualquier intento de reducción de este tipo de movimiento mientras se está perforando debe empezar con el paro en la perforación para eliminar la resonancia que existe para después cambiar las RPM y el WOB en la superficie.

Está claramente demostrado en muchos estudios y publicaciones que la resonancia que causa el Whirl en el aparejo de fondo de la sarta de perforación contribuye a la falla prematura de sus componentes.

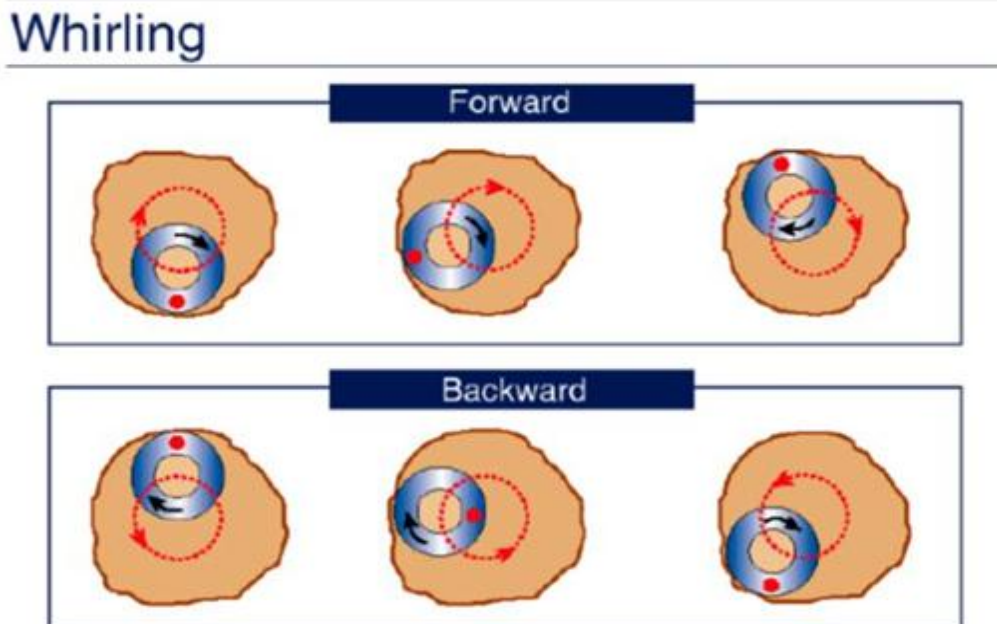


Figura 1.5 Tipos de Giro (Whirl). (D.K. Ashley, 2001)

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

1.5 Principales factores de la vibración en la sarta de Perforación.

Durante el transcurso de las operaciones de perforación el movimiento de la sarta de perforación dentro del agujero y la interacción de la barrena con la formación genera vibraciones en el fondo del agujero no deseadas y dañinas. Comenzando desde que la perforación de un pozo es un proceso dinámico, las vibraciones son inevitables, las vibraciones de la sarta de perforación son una importante causa de fallas prematuras de los componentes de la sarta de perforación y la ineficiencia en la perforación.

El manejo adecuado (administración) de la dinámica de las vibraciones en la perforación es una parte esencial del proceso de perforación, esta gestión facilitara la reducción del riesgo en todos los actuales y futuros desarrollos de campos y dispondrá de avances de la tecnología en las aplicaciones más demandantes como son las aguas profundas y la perforación de alcance extendido.

Las vibraciones en la sarta de perforación son causadas debido a todo cambio en las condiciones de perforación. Las condiciones en el fondo del agujero cambian debido a los siguientes factores:

1.5.1 Interacción Barrena/Agujero.

Las condiciones en la interface formación barrena como son la velocidad de la barrena y la dureza de la roca son los factores más importantes en la integración de la respuesta dinámica. Debido a la variante e incierta naturaleza de estas condiciones, una simple metodología operacional no es suficiente para eliminar las vibraciones y los daños consecuentes a la q se enfrenta el personal.

1.5.2 Interacción Agujero/Sarta de Perforación.

La eficiencia de las operaciones de perforación puede mejorarse mediante el conocimiento de los estados críticos de la sarta de perforación y desarrollo de las mediciones que reduzcan sus efectos adversos en el proceso de perforación. Muchos estados pueden estar acompañados por pandeo y vibraciones extremas de la sarta de perforación cuando sus frecuencias naturales igualan la velocidad angular de rotación. Es importante no únicamente establecer las velocidades críticas de rotación de las barrenas de perforación, si no también identificar los estados de Flexión o pandeo, el cual permitirá encontrar regiones de interacción entre la sarta y la pared del agujero y calcular la reacción de tales interacciones.

1.5.3 Prácticas de Perforación:

Una pared de pozo inestable se puede atribuir a bastantes causas. Unas de las que podemos pensar que son las más importantes: la interacción química entre el fluido de perforación, Esfuerzos tectónicos, e insuficiente peso en el lodo. La vibración de la barrena, aunque no lo consideramos como una causa potencial, podría afectar la estabilidad del pozo perforado en formaciones específicas. Existe la evidencia de una fuerte correlación entre las vibraciones severas y la inestabilidad del agujero, que se ha hecho referencia en la literatura. Sin embargo, se carece aún de la comprensión total de fenómeno.

Se podrían definir una metodología de diez puntos para intentar reducir las vibraciones que se presentan en el proceso de perforación.

1. Inicie correctamente la Barrena durante el periodo interrupción de las operaciones y después de cada conexión.

El punto más importante para evitar los problemas dinámicos de perforación, mientras la perforación allá sido propiamente diseñada con aparejo de fondo de la sarta de perforación, es tener el correcto inicio de la barrena en el fondo durante el periodo de descanso y después de cada conexión es importante recordar que si se permite que debemos permitirle a la

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

barrena crear un nuevo patrón de corte en cada momento que la barrena comienza a perforar nuevamente en el fondo.

2. Conservación de las propiedades de lubricación de lodo:

Ha sido una práctica antañá la mejora de la calidad de lubricación del lodo utilizado en pozos desviados para reducir los efectos adversos de la vibración. Probablemente el tratamiento más simple es formar una emulsión añadiendo aceite o diésel mientras se agitan los lodos. Algunos beneficios que se demuestran con el empleo de esta técnica son, el incremento en las tasas de penetración, menos empuje, reducción de la pérdida de agua del lodo y generalmente mejora las condiciones del agujero. Los lodos base aceite son mejores lubricantes comparados con los lodos base agua, estos primeros reducen los problemas de torsión. El lodo puede afectar el amortiguamiento de la vibración de la sarta de perforación. Los lodos más viscosos y pesados son mejores para el efecto de amortiguamiento.

3. Uso de Escariadores

Los escariadores disminuyen el torque de la barrena comparados con los estabilizadores convencionales, se ha notado que el repetido emboquillamiento es el decremento de los momentos de flexión en el fondo del agujero. El emboquillamiento hace al agujero más liso, de este modo evita la interacción de la sarta de perforación con la pared del agujero el cual es un factor crítico para evitar vibraciones.

4. Evitar la resonancia.

La resonancia ocurre cuando frecuencia de excitación coincide con una frecuencia natural de la sarta de perforación. Las frecuencias en las cuales las secciones de la sarta de perforación exhiben su máximo desplazamiento bajo vibraciones no forzadas son llamadas frecuencias naturales. Con referencia a la velocidad de rotación, las frecuencias naturales son llamadas velocidades críticas. Cada modo de vibración tiene frecuencias naturales distintas. Las frecuencias de excitación son aquellas a las cuales la energía es suministrada por medio

de la sarta de perforación. Las fuentes pueden ser, la sarta de perforación rotaria, la interacción de la barrena/formación, el movimiento del motor de lodo, etc.

5. Manteniendo la tortuosidad del agujero en un rango reducido.

Alto torque y vibraciones pueden ser atribuidas a la alta tortuosidad en el agujero debida al diseño del pozo y los requerimientos del objetivo. El riesgo de vibraciones laterales y axiales es alto a bajos ángulos de pozo, la sarta no descansara sobre el lado bajo del agujero y no amortiguara las vibraciones. En altos ángulos el aparejo de fondo y al tubería tendera a recostarse sobre el lado bajo del agujero, en altas inclinaciones, como la tubería se recostara contra el agujero, la fricción se incrementa y puede causar exceso en el torque y el fenómeno de vibración conocido como Stick/Slip. La calidad del Agujero es también una cuestión, la vibración tiene como resultado una pobre calidad en el agujero, especialmente durante la perforación de agujeros direccionales, como algunos ejemplos que se pueden mencionar encontramos los agujeros de tipo espiral o muy “deslizado” y el atoramiento de los estabilizadores puede ocurrir. Impactos axiales y vibración lateral resulta de estas carencia o baja calidad del agujero, vibraciones laterales causaran aún menor calidad en el agujero y el ciclo continuara así durante toda la perforación.

6. Tener la configuración correcta de la sarta de Perforación.

El diseño de la aparejo de fondo de la sarta de perforación tiene una gran importancia en gran medida en la reducción de la vibración por ejemplo teniendo la correcta configuración y numero de estabilizadores, espaciamiento, tener la configuración correcta del aparejo de fondo es muy importante, dependiendo de la desviación requerida y la tendencia de la formación un aparejo de fondo empacado o un aparejo de fondo de configuración del tipo péndulo debería ser usada como ejemplo. Los aparejos de fondo empacados o muy estabilizados y estabilizados muy cercano ayuda en la reducción al movimiento excéntrico de la barrena y el parejo del fondo, agregando estabilizadores generaremos una cantidad importante y significativa de mayor torque, lo cual podrá inducir el Stick/Slip de la sarta, el uso

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

de Ampliadores en lugar de estabilizadores comunes reducirá el torque ayudando a incrementar el alcance del agujero.

7. Evitando altas severidades en la desviación. (dog legs).

El perfil de agujero juega un papel importante. Se ha notado que si los valores de severidad en la desviación de la trayectoria planeada del pozo difieren de los valores existentes en la trayectoria actual del pozo, los problemas dinámicos en la perforación son muy propensos a presentarse. Con el incremento en la severidad el momento de flexión incrementa la tendencia de las vibraciones, altos valores de incremento en el ángulo presentan un incremento significativo en la tensión dentro del sistema de perforación que puede incrementar rápidamente la velocidad con la que los elementos del parejo de fondo se fatigan así como también las conexiones entre ellos. En operaciones en campo esto puede ser muy difícil de reducir y controlar pero a pesar de todo es posible.

8. Administración de los parámetros de perforación en Tiempo Real.

Una excelente administración de los parámetros de perforación puede ayudar en el control de las vibraciones. Este tipo de técnica incluye rigurosos cambios en los parámetros de perforación para vencer los problemas dinámicos de perforación como son el Stick/Slip y Whirl de la barrena y/o aparejo de fondo. Exitosas combinaciones de peso sobre la barrena (WOB) y Velocidad de Rotación (RPM) pueden ser usadas para evitar o reducir las vibraciones. Una administración de los parámetros de perforación activa ayuda a la reducción significativa de las vibraciones en una etapa temprana en la que se presentan. El perforador tiene que tomar los pasos correctos tan pronto la vibración se ha iniciado. Alto Peso sobre la barrena y bajas velocidades de rotación inducen a las vibraciones torsionales las cuales después pueden desarrollarse hasta el fenómeno de Stick/Slip, en estos casos algunas opciones podrían ser, la reducción gradual del peso sobre la barrena un incremento en la velocidad de rotación de la barrena o del aparejo de fondo de la sarta de perforación o ambos según lo que sea posible, los cambios de estos dos parámetros repetidos hasta que el

sistema de diagnóstico en el fondo del agujero indique que el fenómeno de Stick/Slip ha desaparecido

9. Uso de sistemas suavizadores de torque.

Este sistema puede ayudar a mitigar el fenómeno de Stick/Slip, se ha observado que los suavizadores de torque trabajan muy bien evitando la propagación de la vibración torsional a lo largo de la sarta de Perforación, este sistema es un sistema de amortiguamiento activo de control de las vibraciones torsionales más dañinas el Stick /Slip. Muchos de los Top Drives o mesas rotarias son rígidos, el concepto de rígido hace referencia a que muchos de estos no pueden disminuir su velocidad cuando los requerimientos de torque lo requieran. El sistema de suavizador de torque analiza el torque en superficie y reduce la potencia eléctrica (voltaje) suministrada al equipo (Top Drive o Mesa Rotaria) para reducir la ocurrencia de picos muy altos en el torque. En este sistema las vibraciones torsionales pueden ser reducidas y controladas con el uso de un control especial que puede hacer variaciones en la energía suministrada a la unidad de rotación interrumpiendo la nueva alimentación de torque al sistema que permita un incrementó en las oscilaciones torsionales.

10. Uso de amortiguadores en el fondo.

Mediante la colocación amortiguadores de fondo por encima de la barrena, las vibraciones observadas por la herramienta MWD han sido amortiguadas, esta herramienta solo será efectiva para eliminar del sistema las vibraciones axiales, sin embargo aunque la perforación se observe como un proceso más suave en superficie por encima del amortiguador de fondo, esta no deberá implicar que se ha suavizado la perforación en el fondo. La utilización de los amortiguadores de fondo deberá estar basada en un minucioso y cuidadoso análisis de la configuración de los elementos que componen la sarta de perforación para evitar disfrazar las verdaderas condiciones de perforación en el fondo del agujero.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

Frecuencia natural de un drill collar.

Estas ecuaciones asumen que el drill collar es de acero, es uniforme en su sección transversal y no tiene herramientas de fondo.

Frecuencia Natural en modo axial ecuaciones:

$$f_{na} = \frac{i}{4L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, i = 1, 3, 5 \quad 1.9$$

Ó

$$f_{na} = \frac{iv_a}{4L} \quad 1.10$$

Donde i es el modo de vibración natural, E es el modulo de elasticidad en $[N/m^2]$, L es la longitud en [pies], v_a es la velocidad de la onda de compresión en [pies/seg].

Se sabe que la velocidad de la onda de compresión en el acero es de 16,850 pies/sec.

Por lo cual se obtiene:

$$f_{na} = \frac{4,212}{L} \text{ ciclos/seg.} \quad 1.11$$

Frecuencia natural en modo Torsional ecuaciones:

$$f_{n\theta} = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad 1.12$$

Ó

$$f_{n\theta} = \frac{v_{\theta}}{4L} \quad 1.13$$

Donde G es el modulo de deformación en [N/m²].

Se sabe que la velocidad de la onda de deformación en el acero es de 10,650 pies/sec.

Por lo cual se obtiene:

$$f_{n\theta} = \frac{2,662}{L} \text{ ciclos/seg.} \quad 1.14$$

Ejemplo:

Obtener la frecuencia natural (modo torsional y modo axial) de un drill collar de acero con una longitud de 700 pies.

Utilizando la ecuación para la frecuencia natural en el modo axial:

$$f_{na} = \frac{4,212}{L} \text{ ciclos/seg.}$$

Y sustituyendo la longitud en pies:

$$f_{na} = \frac{4,212}{700} \text{ ciclos/seg.}$$

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Introducción

Obtenemos:

$$f_{na} = 6.017 \text{ ciclos/seg.}$$

Utilizando la ecuación para la frecuencia natural en modo torsional:

$$f_{n\theta} = \frac{2,662}{L} \text{ ciclos/seg.}$$

Y sustituyendo la longitud en pies:

$$f_{n\theta} = \frac{2,662}{700} \text{ ciclos/seg.}$$

Obtenemos:

$$f_{n\theta} = 3.8 \text{ ciclos/seg.}$$

Las frecuencias obtenidas, son las frecuencias naturales (modo axial y torsional) de una drill collar de acero de 700 pies de longitud. Podemos observar como la frecuencia natural en el modo axial es mayor debido a que la velocidad de la onda de compresión es mayor que la velocidad de onda de deformación, esto nos ayudará a determinar en la parte del diseño del

aparejo de fondo las frecuencias a las que será mejor operar, así como controlar las fuentes de excitación que provocan frecuencias, que si se igualan a las frecuencias naturales en sus diferentes modos de oscilación del material pueden ocasionar una resonancia, la cual resultara en una posible falla en el material.

2 Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

La vibración en la sarta de perforación y los aparejos de fondo ha contribuido a los problemas operacionales desde el inicio de la perforación rotatoria que fue implementada en 1930. Las fallas de los componentes de la sarta de perforación como son los RSS (Rotary Steerable System), herramientas LWD y MWD tiene como resultado Tiempo No Productivo (NPT, por sus siglas en inglés) debido a los viajes necesarios para reemplazar el equipo dañado. En algunas ocasiones el equipo dañado puede resultar en el abandono del pozo, debido a que las operaciones de pesca o desviación han fallado previamente a la toma de decisión de abandonar el pozo. En adición a estos eventos no programados la vibración puede causar la considerable disminución de la Tasa de Penetración (ROP, por sus siglas en inglés), factor importante para la evaluación de la perforación.

El incremento de la complejidad de los aparejos de fondo y las configuraciones direccionales de los pozos han creado la necesidad del desarrollo de software específico de diseño en la ingeniería de perforación, así como de modelos matemáticos del comportamiento mecánico y dinámico de los aparejos de fondo sometidos a diferentes condiciones de operación en el fondo del agujero como son, las diferentes curvaturas del pozo, direcciones y configuraciones las cuales han llegado a ser tan comunes debido a la complejidad de las ubicaciones.

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

La importancia en la predicción del comportamiento de la sarta de perforación en condiciones estáticas y dinámicas se ha acrecentado en los últimos años debido a la importancia que ha tomado, tanto en los proyectos, como en la eficiencia de las operaciones y el cumplimiento de los tiempos establecidos de cada operación, lo que puede hacer la diferencia entre un proyecto rentable y no rentable.

Los beneficios de la aplicación de modelos matemáticos para analizar el comportamiento mecánico de los aparejos de fondo de la sarta de perforación en la fase de diseño es prioritaria y se debe tomar como una práctica común en cualquier circunstancia, haciendo énfasis en aquellas donde los tiempos no productivos tengan un impacto considerable en la rentabilidad del proyecto. Una gran gama de escenarios pueden ser investigados, comparados y analizados, esta amplia cantidad de escenarios conducirán a una optimización del diseño del aparejo de fondo, el cual tendrá como principio de diseño el no ser susceptible a fallas mecánicas relacionadas a excesos en las fuerzas estáticas y dinámicas las cuales excedan las especificaciones del equipo del que está constituido.

Sin embargo este enfoque solo será exitoso si el modelo puede ser confiable y sus predicciones son exactas, o aceptables dentro de un rango de certidumbre preestablecido. Para considerar que un modelo matemático es confiable, la comparación de los resultados que se obtengan a partir del modelo dinámico deberá ser validada con las mediciones y observaciones de campo, esto es la clave para la validación del modelo.

En el pasado, las mediciones dinámicas en superficie eran usadas para verificar las predicciones de los modelos, sin embargo el problema con este tipo de mediciones, particularmente en el caso de las vibraciones laterales, es que las mediciones son tomadas a una gran distancia de donde son generadas o donde realmente están ocurriendo, por lo tanto la exactitud y aplicación de estas mediciones para propósitos de verificación del modelo son limitadas principalmente en los problemas de las vibraciones axiales y torsionales.

Hoy en día los elementos dinámicos de medición en el fondo se están volviendo cada vez más usados en las operaciones de perforación, estas herramientas de fondo miden la

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

fuerza actual en el fondo incluyendo las cargas de flexión en el fondo del agujero y son una fuente ideal de datos para la verificación de los modelos matemáticos.

Los modelos dinámicos de perforación juegan un papel importante en la optimización del proceso de perforación. Estos modelos pueden ser clasificados como Herramientas de ingeniería y herramientas de búsqueda, dependiendo de su funcionalidad.

Las herramientas de ingeniería son diseñadas para su uso diario, proveen estimaciones de parámetros importantes para propósitos de planeación y diseño, tal como frecuencias naturales y cargas de flexión. Las herramientas de búsqueda describen la física del problema y son más poderosas. Estas herramientas permiten estudiar fenómenos complejos a gran detalle, pero requieren una gran inversión de tiempo y esfuerzo. Ambos tipos de modelo requieren de validación, pruebas de laboratorio así como también pruebas controladas de campo.

Una vez que los modelos han sido establecidos pueden ser utilizados de diferentes maneras, incluyendo el diseño de componentes, el diseño de aparejos de fondo y la investigación de las contribuciones de cada componente sobre el sistema de perforación.

La aplicación de los modelos dinámicos muy complejos han aportado buenas lecciones y algunos ejemplos que se pueden incluir son: diseño de barrenas PDC, las cuales pueden ser ajustadas para minimizar el impacto del daño a los cortadores, los diseños de las barrenas triconicas pueden ser ajustados para reducir la tendencia de su giro excéntrico; la estabilización del aparejo de fondo de la Sarta de perforación puede ser optimizada protegiendo la sensibilidad del equipo de fondo; los diseños del aparejo de fondo que son inestables pueden causar una rápida destrucción de la barrena; los parámetros de operación pueden ser ajustados para mejorar el comportamiento sub-óptimo de los sistemas de perforación.

La fase de planeación deberá claramente definir las mejores combinaciones entre el aparejo de fondo y la barrena para cada sección planeada del pozo y los parámetros de perforación deberán reducir o eliminar la ocurrencia de impactos y vibraciones; para validar el

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

plan esta fase tendría que utilizar una combinación de software de modelado y la experiencia de perforaciones en pozos adyacentes.

Se podrían definir seis pasos de la fase de planeación de la siguiente manera:

1. Reunir y evaluar los datos de pozos adyacentes para identificar cualquier área de problema y definir los elementos importantes para un mejor análisis. La optimización de la barrena es uno de los factores críticos en cuanto a impactos. Un experto en barrenas deberá incluirse en esta etapa para determinar el comportamiento anterior de la barrena y recomendar áreas donde se pueda mejorar. La comunicación adecuada con el fabricante de dichas herramientas es esencial para asegurar que el comportamiento y especificaciones de las herramientas han sido totalmente comprendidas. Los fabricantes de las barrenas han desarrollado software de asistencia en el proceso de planeación de sus barrenas.

La evaluación del comportamiento de la barrena deberá incluir:

- a. Análisis de la estructura de corte (densidad/tamaño del cortador, profundidad de corte, ángulos de inclinación de los cortadores, etc.).
- b. Geometría de las aletas.
- c. Hidráulica de la barrena (geometría de las toberas y número de toberas por aleta).
- d. Dureza de la roca.
- e. Naturaleza geológica de la formación (laminación, intercalación de formaciones e interfaces de formación duras/suaves).
- f. Optimo peso de la barrena en la superficie. (SWOB por sus siglas en ingles)
- g. Optima velocidad de perforación. (RPM)

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

2. El segundo paso es la evaluación de la estabilización del aparejo de fondo. Un análisis se realiza con el propósito de evaluar los aparejos de fondo y finalmente ubicar de la mejor manera los estabilizadores y establecer los principales parámetros de perforación para evitar impactos de gran magnitud. Esta fase de planeación tal vez requerirá un enfoque de colaboración, incorporando la participación de los fabricantes de las barrenas y los ampliadores, ensamblando todos los datos iniciales para un análisis exitoso.

Datos de perforaciones previas deberían ser empleados al comienzo de la etapa de planeación para mejorar los modelos y asegurar la exactitud de los resultados, la información de perforación y vibraciones de perforaciones previas en la zona son empleadas para determinar las causas de diversos incidentes de desconexión que ocurrieron mientras se perforaba los pozos previos. La identificación de las causas relacionadas con el problema de las vibraciones y el modelado de diversos aparejos de fondo para minimizar los anteriores problemas mencionados, permitiendo al operador del equipo de perforación la creación de un plan detallado de control para las vibraciones. En adición al análisis de vibración, el modelado también es empleado para ayudar en la optimización de la Tasa de penetración (ROP) mediante la evaluación de un amplio rango de los parámetros de perforación para cada configuración de aparejo de fondo propuesto. Basándose en estos análisis, un conjunto de lineamientos de la dinámica de la sarta de perforación son establecidos para los diferentes niveles de vibración que se presentaran.

3. Establecer una adecuada comunicación con el equipo de campo antes de comenzar con las operación de perforación para determinar con exactitud los puntos donde se transmitirá la información a superficie y la frecuencia en la que serán transmitidos; el objetivo de este punto es adquirir la suficiente información para un efectivo análisis de las vibraciones sin sacrificar la calidad de la información típica de las herramientas LWD (registros durante la perforación). Para algunos pozos se deberá planear con anticipación la configuración del paquete de datos que será transmitido

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

a superficie, esta configuración debería reemplazar parte de la información de la evaluación de la formación con una mayor cantidad de información de las vibraciones e impactos que ocurren en el fondo del pozo; si una situación de vibración sucediera, el equipo MWD tendría la opción de contar con la transmisión de los datos de vibración, lo cual servirá para una mejor comprensión de la dinámica en el fondo. Esta configuración alternativa de los paquetes de datos deberá ser usada solo bajo el consentimiento de la compañía operadora porque esta nueva configuración de los paquetes de información afectara la calidad de los registros en tiempo real en la sección donde se emplea dicha configuración.

4. Si una ampliación del agujero mientras se perfora (HEWD, Hole Enlargement While Driling) se planea tendrá que incluirse la configuración de la herramienta de ampliación y su disposición en la sarta de perforación con base en las experiencias y los resultados del modelado, el uso de los estabilizadores por encima y por debajo de los ampliadores, para mantener al mínimo posible el desplazamiento lateral, es una recomendación muy buena para esta operación.
5. Los ingenieros deberán entender los conceptos físicos detrás de los impactos y vibraciones, así como también los métodos de interpretación de las mediciones provenientes de las herramientas MWD y LWD, se deberán entrenar en la identificación de los tipos y fuentes de las vibraciones esto con la finalidad de que puedan proveer una solución adecuada para las vibraciones antes de que ocurra un daño significativo. Es de vital importancia la capacitación adecuada del personal responsable de la perforación (CompanyMen, Perforador, Asistente de perforación y personal del equipo responsable de las herramientas MWD/LWD) sobre las técnicas de detección y reducción de las vibraciones, su entrenamiento puede incluir talleres previos de perforación, diseñados para apoyar en establecimiento de mejores líneas de comunicación, dotándolos de conocimiento especializado en la detección de las vibraciones y conocimiento sobre la reducción y control de las vibraciones, haciendo énfasis en la importancia de tomar medidas rápidas y apropiadas.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

6. Establecer los límites máximos y aceptables de los niveles de vibración en cada proyecto; antes de la fase de ejecución de cada proyecto, se deberá emplear un análisis de riesgo para establecer que niveles de vibración requerirán atención y que niveles de vibración se consideraran como niveles aceptables. Estos niveles no se pretenderá que sean rígidos debido a que son establecidos mediante la experiencia ingenieril.

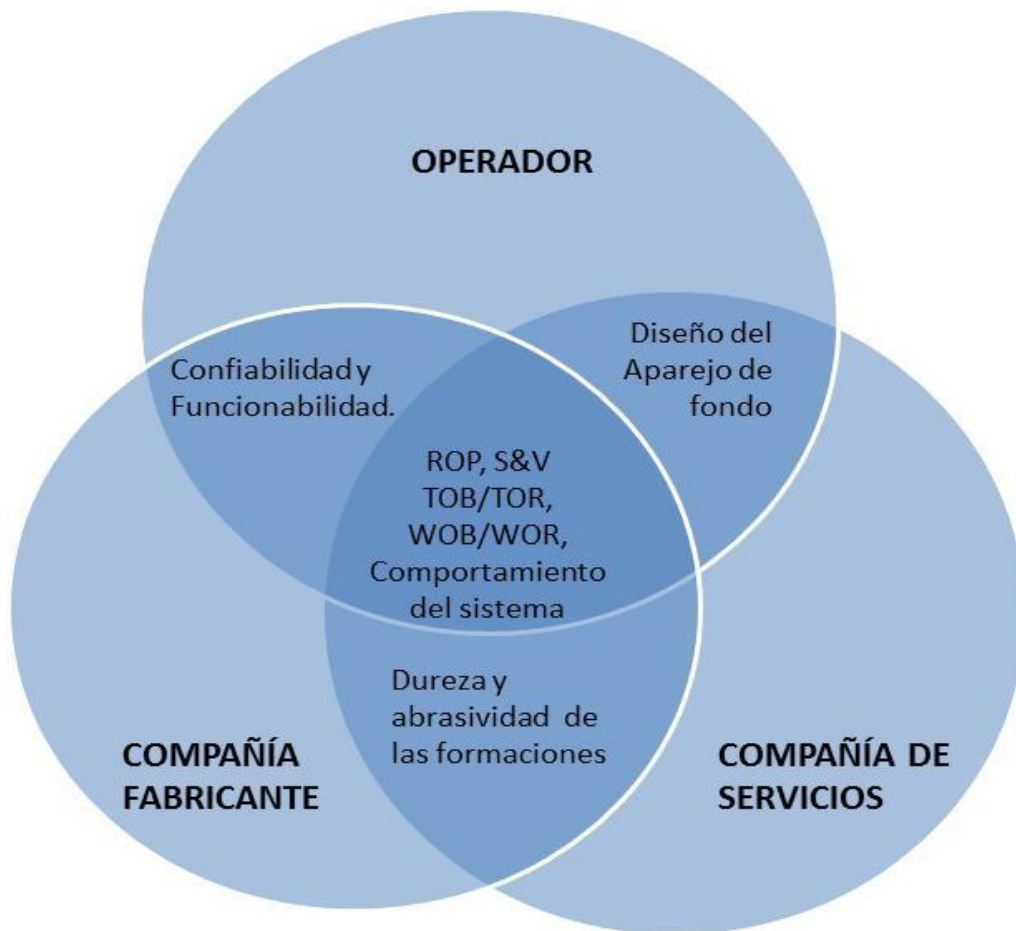


Figura 2.1 Diagrama de Responsabilidades y Obligaciones.

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

Criterios de diseño.

Una sarta de perforación debe ser diseñada de acuerdo con el siguiente criterio en todas las operaciones de perforación:

1. Cargas estáticas (tensión, torsión y cargas por presión).
2. Torque y arrastre.
3. Alabeo.
4. Fatiga.

Cargas estáticas. Las cargas estáticas que actúan en la sarta de perforación son la tensión, compresión, torsión, colapso, presión interna. Las cargas estáticas cambian con la posición con la sarta de perforación así como en diferentes operaciones de perforación. Existen 7 casos de cargas estáticas que se deben considerar durante las operaciones de perforación:

1. Modo rotativo de perforación
2. Modo de deslizamiento.
3. Viajes dentro del agujero.
4. Viajes de salida del agujero.
5. Rotación fuera del fondo.
6. Limpieza del agujero mecánicamente.
7. Repaso del agujero.

Ensamblajes Rotativos. Los ensamblajes rotativos son diseñados para construir, mantener y disminuir el ángulo. El comportamiento de cualquier ensamble rotativo está gobernado por el tamaño y posición de los estabilizadores entre los primeros 40 metros (120 pies) medidos desde la barrena, los estabilizadores colocados por encima de esta longitud tiene un efecto

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

limitado sobre el desempeño de la sarta de perforación. Los aparejos Rotativos no son direccionales por dos razones.

1. El comportamiento del Azimut en los aparejos rotativos es casi o imposible de controlar.
2. Cada aparejo rotativo tiene una tendencia única de construcción y de disminución del ángulo por lo cual no se puede ajustar en superficie.

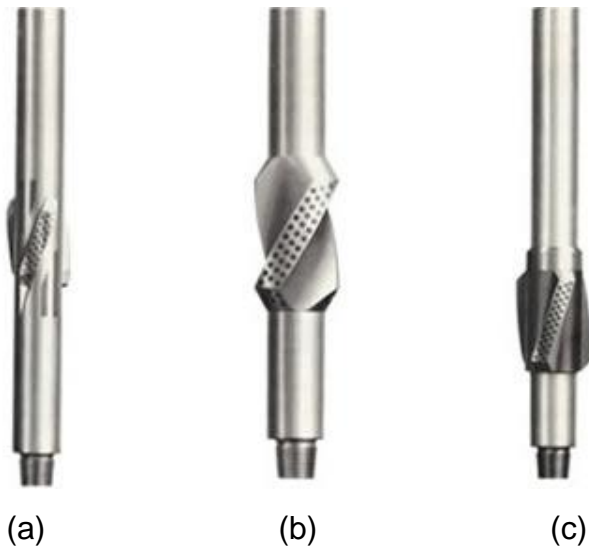


Figura 2.2 Tipos de Estabilizadores.

(a) de Aletas Soldadas.

(b) Integrales.

(c) de Camisa Deslizable

Los estabilizadores empleados en la operación son del tipo de manga deslizante, de aletas soldadas y estabilizadores de aletas integradas. La geología es una consideración importante para la incrementar la vida y uso de los estabilizadores. Los estabilizadores con mangas deslizables son los más económicos pero su rigidez en algunas ocasiones provoca problemas. Los

estabilizadores soldados son el mejor conjunto para agujeros amplios en formaciones suaves. Los estabilizadores integrales son los más caros pero muy fuertes, lo cual los convierte en la mejor opción para formaciones muy abrasivas y

duras.

Algunas veces los escariadores son usados a lo largo de los estabilizadores para abrir el agujero a su diámetro total, extendiendo así la vida de la barrena y previniendo posibles problemas de atascamiento.

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

Es importante mencionar que para los ensambles rotativos se manejan 3 principios conocidos de su comportamiento según la disposición de los elementos de flexión y los estabilizadores en el aparejo de fondo de la sarta de perforación. Por esta razón cada ensamble rotativo tendrá características muy particulares bajo las cuales tenderá a generar impactos y vibraciones dañinas, ya que cada configuración tendrá su propio rango de frecuencia natural característico.

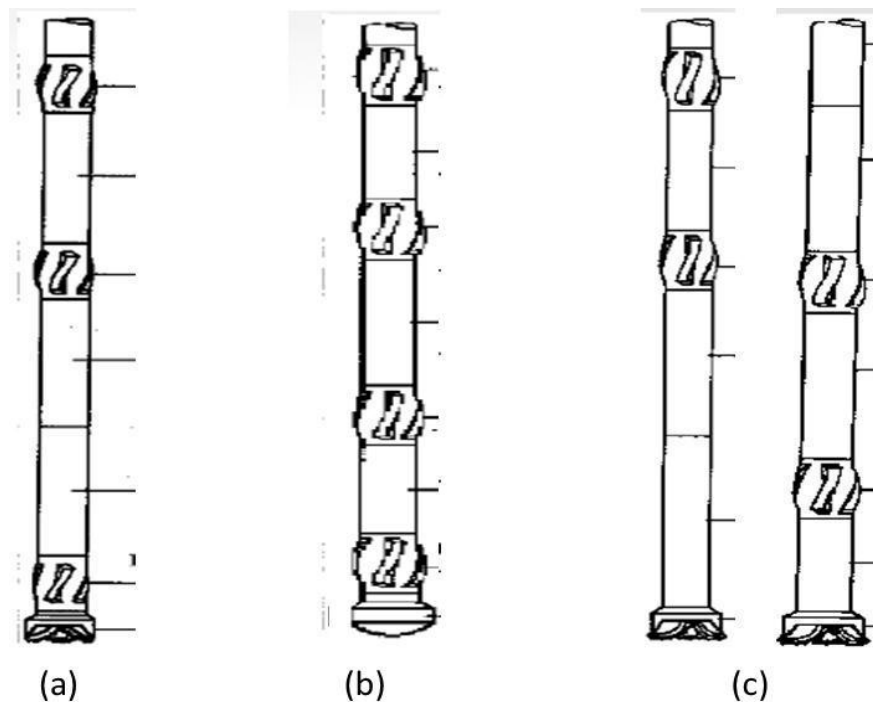


Figura 2.3 Diferentes Posiciones para los Estabilizadores.

- (a) Tipo Fulcro
- (b) Tipo Empacado
- (c) Tipo Péndulo

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

Ensamblajes direccionales:

Como se sabe existen diversas maneras para la desviación de un pozo, pero su diseño y tratamiento quedan fuera del alcance del presente trabajo, sin embargo es importante mencionar que el empleo de los diversos métodos aplicados para los métodos convencionales de perforación se aplican de igual manera para este tipo de arreglos aunque sean más sofisticados

2.1 Modelos Matemáticos empleados para la simulación de la dinámica de la Sarta de Perforación.

El modelado del aparejo de fondo es una parte esencial en la perforación, en las actuales operaciones direccionales, entiéndase como operaciones direccionales aquellas operaciones donde se busca poder controlar el ángulo de dirección del pozo.

Los modelos lineales son resueltos en el dominio de frecuencias y no proveen las frecuencias naturales ni el modo de configuración del aparejo de fondo de la sarta de perforación o la frecuencia de respuesta del aparejo de fondo a una fuente de excitación armónica en el modelo. Los modelos lineales son aplicados hoy en día en los procedimientos fundamentales de la perforación de pozos verticales y desviados. Estas se han usado para calcular las frecuencias naturales para estabilizar las secciones del aparejo de fondo cerca de la barrena y predecir los límites seguros de la velocidad de perforación.

Los modelos no lineales son resueltos por integración numérica en el dominio de tiempo y proveen una simulación del comportamiento dinámico del aparejo de fondo en el fondo del agujero. Los parámetros estudiados con modelos no lineales sin duda han contribuido en la actualidad para el mejor entendimiento de la dinámica lateral de la sarta de perforación. Sin embargo la complejidad de estos modelos y los grandes tiempos de cálculo que estos necesitan limitan su aplicación y su mayor investigación.

En casi todos los modelos descritos en la literatura solo se utiliza desde el aparejo de fondo hasta el llamado punto de tangencia para un análisis dinámico, solo dos modelos en la

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

literatura incluyen el contacto con la pared de forma continua. Sin embargo estos dos modelos se enfocan en la excitación paramétrica de las vibraciones laterales debido a la fluctuación del peso sobre la barrena. El punto de tangencia se basa en el supuesto de que una porción del aparejo de fondo en contacto con la pared del pozo podría provocar vibraciones laterales en valores de inclinación altos. Esta suposición probablemente es válida para aparejos de fondo convencionales con lastra barrenas en pozos verticales. Los aparejos de fondo utilizados en pozos inclinados u horizontales consisten en pequeños estabilizadores en la sarta de perforación seguidos por una larga sección de tubería de perforación que descansa sobre la pared del pozo. La tubería de perforación está a compresión y gira a un velocidad superior de 200 [rpm] con la finalidad de mantener una óptima limpieza del agujero en condiciones de alta inclinación, pudiera provocar vibraciones laterales de alto impacto.

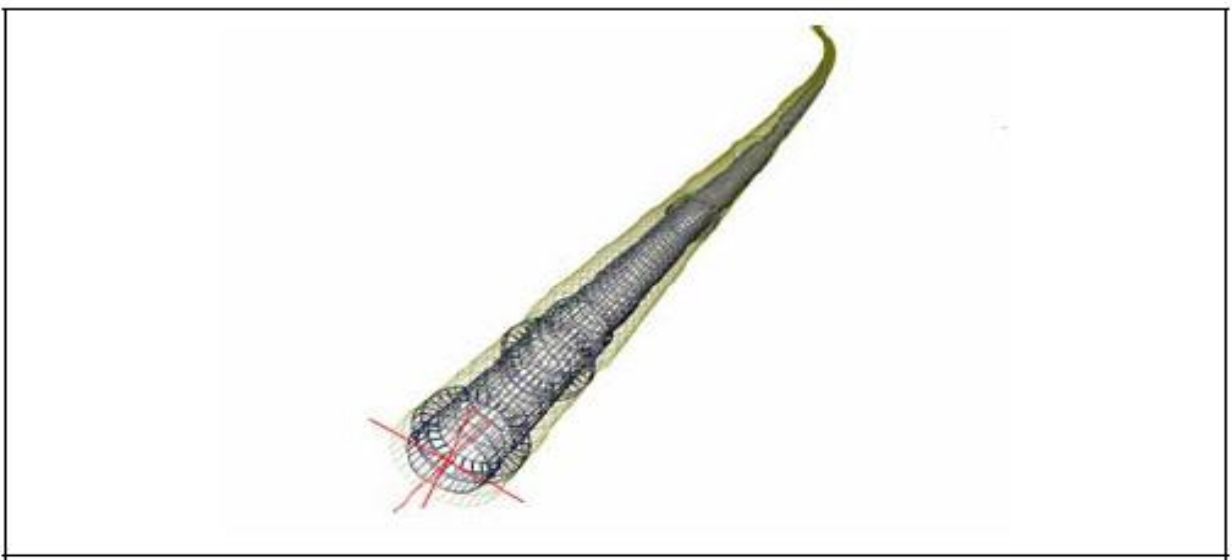


Figura 2.4 Modelado por Elemento Finito del Aparejo de fondo de Perforación

Probablemente el método más utilizado para el modelado del aparejo de fondo, sea el método de elemento finito. El uso del método de elemento finito ha tenido sus inicios por los

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

años 40's cuando fue empleado por Richard Courant quien uso el Método de Ritz del cálculo de variaciones (máximos y mínimos de una función) para analizar un sistema vibratorio, muchos artículos y publicaciones técnicas fueron presentados a mediados de los 50's sobre el tema, en los años 70's el método de elemento finito (FEM por sus siglas en inglés) fue ganando terreno pero solo en el conjunto de los usuarios de supercomputadoras, principalmente en la industria aeroespacial, nuclear y defensa, esto hizo que el tomara tiempo el refinamiento y mejora del algoritmo, el rápido avance del poder de cálculo y la sorprendente reducción en los costos de la computación dejaron que el método de FEM se volviera más popular.

Recientemente, las soluciones de modelado no lineal y en el dominio de tiempo han llegado a ser posibles, esto es crucial para lograr el nivel requerido de precisión haciendo significativas las contribuciones a la predicción del comportamiento del sistema de perforación. Mientras el método del elemento finito ha sido usado durante una cantidad de años considerable, se ha limitado el uso a secciones de la sarta de perforación o componentes discretizados. Las soluciones para el sistemas de perforación son excepcionalmente complejas y consumen una gran cantidad de tiempo, esto factores son considerados cuando se planea la longitud de los intervalos de perforación que serán incluidos

Tabla 2.1 Características de los Diferentes Modelos para Diseñar el aparejo de fondo de Perforación.

Modelo	Suposiciones y características del modelo	Presentación de los resultados.
Modelo Analítico	<ul style="list-style-type: none"> • Sección transversal y propiedades del material constantes en la totalidad de la longitud de la sarta. • Agujeros verticales y horizontales • Contacto continuo entre la sarta de perforación y el agujero durante la vibración. • Suposición de desplazamientos pequeños (linearización). • No existe fricción entre la sarta y el agujero. • La fuerza axial es tomada en cuenta, mientras que el torque es despreciado. • Condiciones de frontera constantes en los dos extremos. • Consideraciones másicas de debidas a las fuerzas hidrodinámicas, no se considera la viscosidad del lodo. 	<p>Forma aproximada para la solución de las frecuencias naturales y los perfiles de los modos de vibración laterales.</p>
Modelo de elemento finito lineal	<ul style="list-style-type: none"> • Sección transversal y propiedades del material constantes en segmentos de la longitud de la sarta. • Agujero Verticales y horizontales. • Contacto continuo durante la vibración de la pared del pozo y los puntos de la sarta de perforación establecidos por un algoritmo estático no lineal previos a la linearización • Suposición de desplazamientos pequeños (linearización). 	<p>Frecuencias naturales y los perfiles de los modos de vibración en forma numérica</p>

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

	<ul style="list-style-type: none"> • No existe fricción entre la sarta y el agujero. • Las fuerzas axiales y el torque son tomados en cuenta. • La barrena en uno de los extremos forzara que el eje del agujero sea paralelo al otro extremo. • Consideraciones másicas de debidas a las fuerzas hidrodinámicas, no se considera la viscosidad del lodo. 	
<p>Modelo del elemento finito no lineal</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sección transversal y propiedades del material constantes en segmentos de la longitud de la sarta. • Agujero Verticales y horizontales. • La sarta puede despegarse de los puntos de contacto. • No hay linearización, el movimiento de la sarta es libre dentro del agujero, existe fricción entre la sarta y la pared del pozo. • Las fuerzas y axiales son tomadas en cuenta. • La barrena en uno de los extremos forzara que el eje del agujero sea paralelo al otro extremo. • Rotar con la velocidad de rotación preestablecida en el extremo superior de la sarta de perforación. • Consideraciones másicas de debidas a las fuerzas hidrodinámicas, no se considera la viscosidad del lodo. • Fuerzas de excitación debido al desbalance de masas en la sección del motor y tubería de perforación. • La forma del amortiguamiento. 	<p>Series tiempo para cada variable y cada nodo del modelo para utilizarlo en los modelos de simulación.</p>

2.2 Diseños del aparejo de fondo.

Como las operaciones de perforación son muy costosas, el proceso de optimización de las operaciones de perforación están basadas en la eliminación o reducción de limitantes operacionales, como son las vibraciones. Los aparejos de fondo utilizados en operaciones de perforación típicamente están basados en los diseños de las compañías de servicio, practicas operativas locales y/o métodos históricos, que a menudo guiaran a resultados aleatorios del comportamiento de la perforación; porque las vibraciones pueden impactar en la durabilidad del equipo, las fallas en el fondo del pozo de un aparejo de fondo (BHA) pueden llegar a ser muy costosas e incrementar significativamente los costos de perforación del pozo. Ciertamente los costos de las fallas del aparejo de fondo pueden incluir el reemplazo de equipo y adicionalmente tiempo para un viaje completo de la sarta de perforación ejemplo de esto durante una desconexión (perdida de presión de lodo, debido a una fuga) sin que exista una rotura completa de la tubería, etc.

Las herramientas de diseño pueden ser utilizadas para examinar el efecto de las vibraciones en la perforación del pozo. Por ejemplo los programas de modelado pueden representar la interacción de las fuerzas estáticas en un aparejo de fondo, como una función de la ubicación de los estabilizadores.

La necesidad existente en la actualidad requiere de una herramienta de diseño que caracterice el comportamiento de las vibraciones de diseños alternativos de aparejos y presente estos resultados con el propósito de comparación de diseños y selección de una configuración específica.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

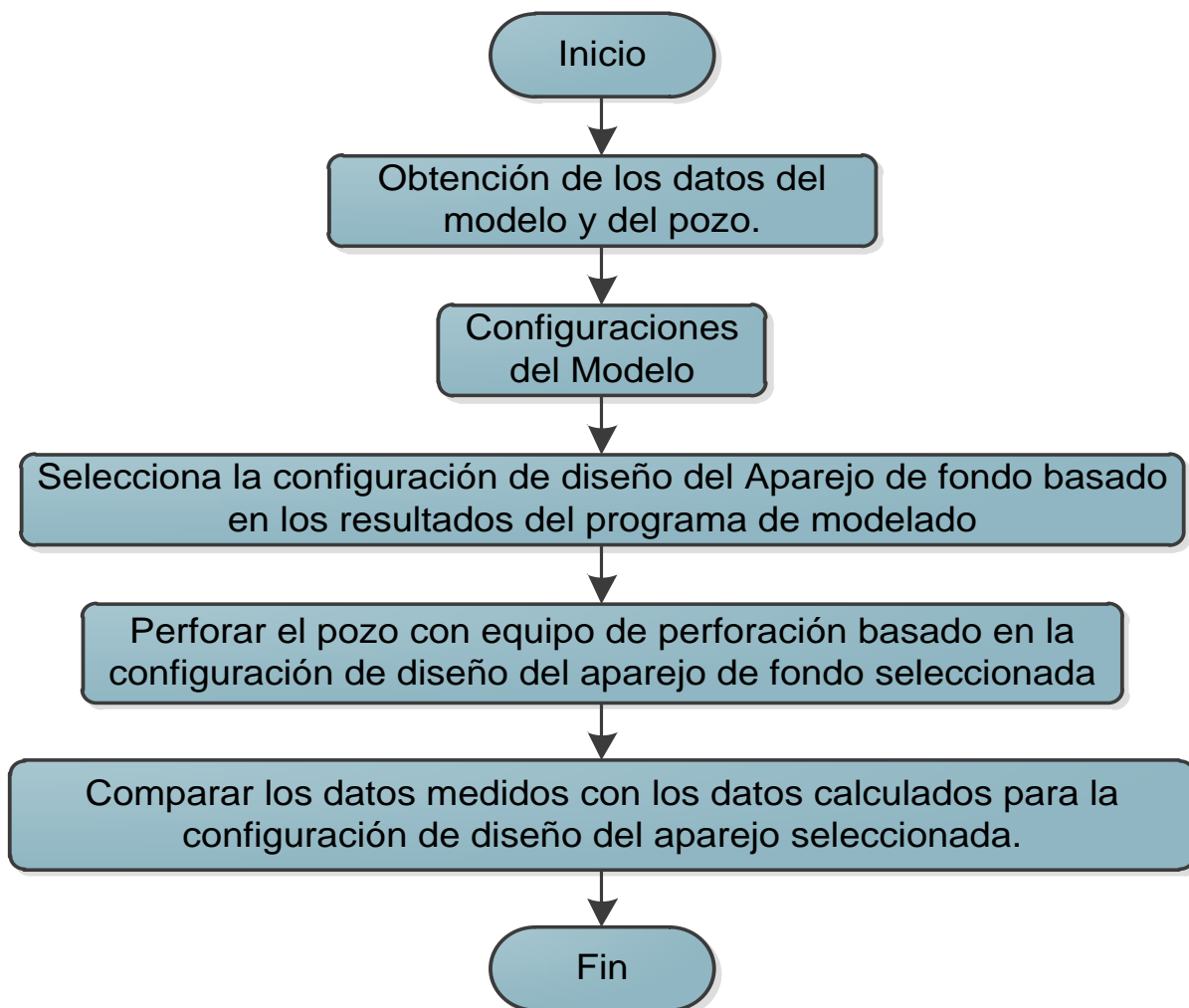


Figura 2.5 Diagrama del Proceso para el Diseñodiseño del Aparejoaparejo de fondo de la Sartasarta de perforación y la selección del modelo mas optimo.

En esta sección se describa el proceso más práctico de la selección del mejor diseño comparando simultáneamente dos o tres candidatos de configuraciones de aparejo de fondo. Figura 2.5. El aparejo de fondo usado en un sistema de perforación podrá ser seleccionado en base al índice de comportamiento e índices de diferentes configuraciones de diseño de parejos de fondo. Estos índices pudieran contener, los datos del punto final de curvatura, los datos de la energía de tensión del aparejo de fondo, los datos de la energía transmitida promedio, los datos de la energía de tensión transmitida, los datos laterales del RMS del

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

aparejo de fondo, los datos de RMS del torque en el aparejo de fondo, los datos totales laterales del aparejo de fondo, y los datos de torque del aparejo de fondo, adicional específicamente los objetivos del diseño estático para las respectivas configuraciones de aparejos de fondo.

Se empieza con el método, las configuraciones de diseño de aparejo de fondo candidatas son modeladas entre ellas para tener con una clara comparación entre los diferentes modelos. Cada configuración es un modelo representativo de un aparejo de fondo que podría ser utilizado como parte de las operaciones de perforación para un pozo en específico.

El proceso comienza en los tres primeros bloques, de la figura los datos pueden ser obtenidos del modelo inicial, lo datos pueden incluir parámetros operacionales (el rango de peso sobre la barrena, el rango de la velocidad de perforación, el diámetro nominal del agujero, la ampliación del agujero, el ángulo del agujero, la densidad del fluido de perforación, profundidad, etc.) y los parámetros de diseño (dimensiones del lastra barrenas y propiedades mecánicas, dimensiones de los estabilizadores así como su ubicación en el aparejo de fondo, dimensiones de la tubería de perforación, longitud, etc.). Algunos parámetros relacionados con el modelo pueden ser utilizados, como son los modos de excitación de vibraciones (especificados como múltiplos de la velocidad critica de rotación), longitud de los elementos, condiciones de frontera, las configuraciones de los aparejos de fondo pueden ser modeladas como se muestra en el siguiente diagrama, el modelado de las configuraciones puede incluir consideraciones de la solución estática (modelo estático) seguida por un investigación del comportamiento dinámico mediante una análisis de la simulación y revisión de resultados, este proceso puede verse en la Figura 2.6. Un ingeniero de diseño evaluara el balance de los diseños y mediante la comparación de resultados de diferentes diseños, desarrollará diseños de aparejo de fondo con mejoras en el comportamiento operativo.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

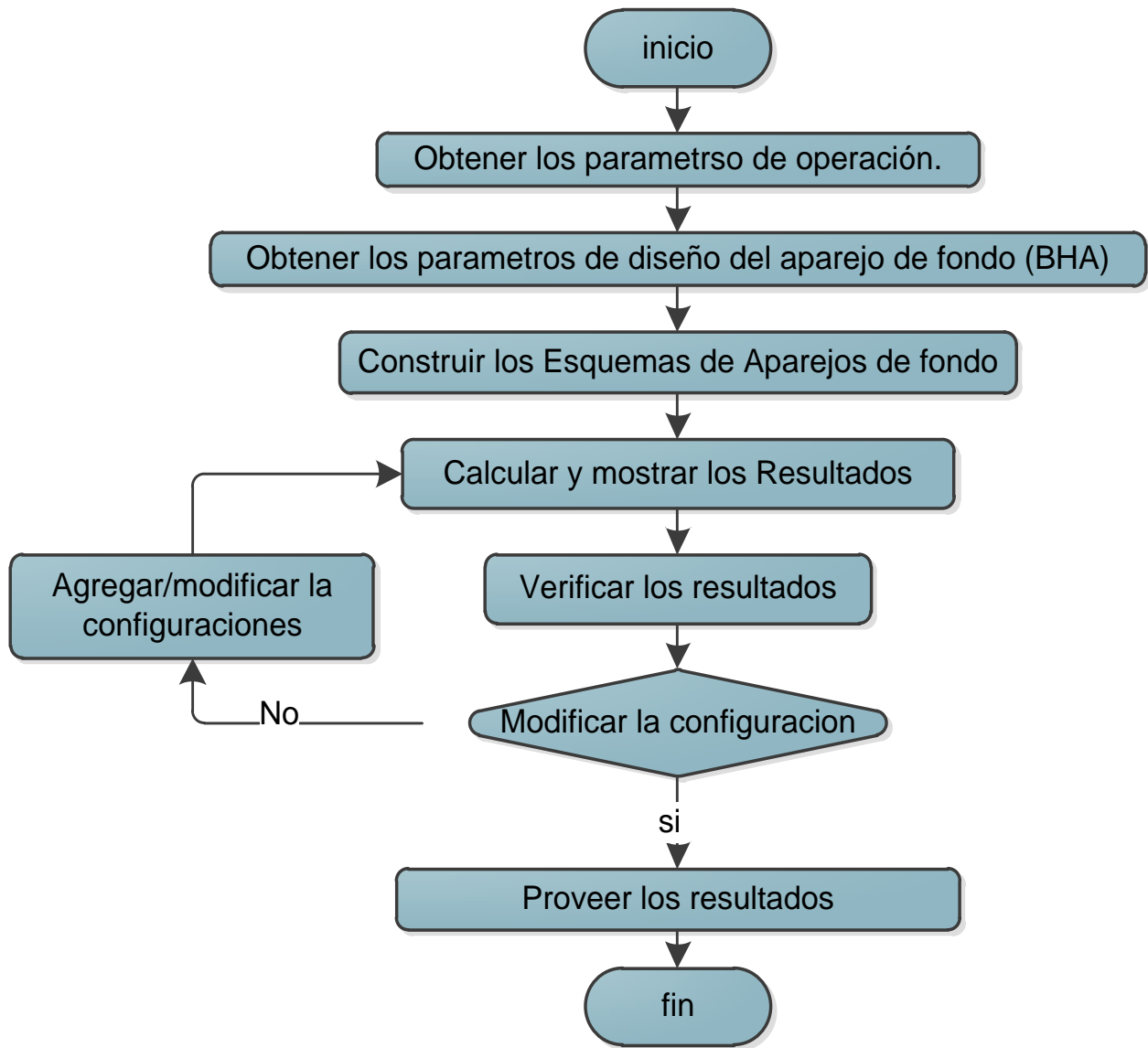


Figura 2.6 Diagrama para Modificar el Diseño del Aparejo de fondo de la Sarta de perforación.

Una vez modelado, una de las configuraciones es seleccionada, la selección puede hacerse basándose en una comparación de varias configuraciones que pueden incluir diferentes proyección de los vectores (desplazamiento, inclinación, momento de flexión, esfuerzo laterales de cizalla, fuerzas de contacto entre el aparejo de fondo y la pared del agujero, y los torques) como una función de los parámetros de operación (RPM, WOB, etc.)

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

distancia de la barrena, la configuración del aparejo de fondo. Después se intentara ilustrar las tendencias de vibración de cada una de las configuraciones.

El proceso de selección también deberá incluir consideraciones de los resultados estáticos proporcionados por un sistema de modelo, las consideraciones estáticas incluyen la proporción apropiada del ángulo de inclinación estático de la barrena y los valores de las fuerzas de cizalla, en adición a estos datos, los mínimos de las fuerzas en las que el sarta este en contacto con el pared del agujero, con la comprensión, las cargas laterales estáticas y dinámicas generan torque cuando el aparejo de fondo de la sarta de perforación gira, ya q esto funciona como mecanismos de perdida de energía de perforación. Las consideraciones dinámicas y estáticas pueden ser usadas en la selección de la configuración óptima del aparejo de fondo.

Como se muestra en siguiente paso, el pozo deberá ser perforado con el equipo de perforación diseñado para la configuración elegida del aparejo de fondo. La perforación del pozo deberá incluir la forma en que el pozo accederá al intervalo de interés con el equipo de perforación disponible. Los datos medidos entonces podrían ser comparados con los datos calculados para las configuración seleccionadas, los datos serán enviados y/o almacenados en la herramienta MWD con la finalidad de poder ser analizados posterior mente o durante la operación, esto ayudar a validar y mejorar la herramienta de simulación del comportamiento de los aparejos de fondo.

2.3 Barrenas

La perforación rotativa usa dos tipos de barrenas de perforación, barrena de conos y barrenas de cortadores fijos. Las barrenas de conos son generalmente empleadas para perforar una gran variedad de formaciones, desde formaciones muy suaves hasta formaciones muy duras. Las barrenas de dientes de acero son típicamente empleadas para perforar formaciones relativamente suaves. Las barrenas de insertos de carburo de tungsteno

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

(TCI) son usadas en un amplio rango de formaciones incluyendo las formaciones más duras y abrasivas.

Las barrenas de cortadores fijos en las que se incluyen las barrenas compactas de diamante policristalino (PDC por sus siglas en inglés), barrenas impregnadas y barrenas de diamante, pueden perforar un extenso conjunto de formaciones a varias profundidades.

Las características y peculiaridades de cada una de los tipos de barrenas, hace que cada barrena tenga un comportamiento específico bajo diversas condiciones de perforación en cada formación donde se encuentre operando, esto genera una amplia gama de opciones para el ingeniero de diseño, el cual deberá contar con las mejores herramientas de simulación y evaluación para poder seleccionar la o las barrenas que mejor comportamiento exhiban para las condiciones de perforación, posteriormente se hará un análisis de los efectos que tiene la vibraciones en las principales barrenas comúnmente empleadas en el proceso de perforación.

2.3.1 Barrenas tricónicas.

Una gran variedad de diseños de barrenas tricónicas se encuentran en el mercado, esta gran variedad de barrenas provee un óptimo comportamiento en formaciones específicas y/o en ambientes de perforación particulares. Los fabricantes de las barrenas recolectan meticulosamente información durante la operación de sus barrenas para incrementar en un futuro la eficiencia de sus productos, las barrenas actuales de perforación incorporan significativamente un amplio rango de diferentes tipos de estructuras de corte y usan una gran variedad de materiales para su fabricación. Como resultado de esta diversificación la eficiencia de las barrenas se ha incrementado a través de los últimos años, variaciones en las prácticas comunes de perforación, tipo de equipo usado y condiciones del agujero comúnmente requieren ajuste al diseño inicial, por lo que los fabricantes de barrenas usualmente trabajan en conjunto con la compañía de perforación para asegurarse que las oportunidades para mejorar el diseño sean identificadas e implementadas.

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

2.3.1.1 *Diseño de las Barrenas Tricónicas*

El diseño de las barrenas tricónicas tiene como objetivo proveer a la barrena de las siguientes funciones adecuadamente:

1. Funcionalidad de bajo costo por pie perforado.
2. Proveerla una larga vida en el fondo del agujero que minimice los viajes requeridos, para el cambio de barrena.
3. Proveerla de una operación estable y libre de vibraciones a la velocidad de rotación y peso sobre la barrena deseados.
4. El calibre de corte de la barrena se mantenga permanente durante la vida de la barrena

Para alcanzar estos objetivos, los diseñadores de barrenas consideran una gran cantidad de factores, algunos de ellos son la formación y ambiente de perforación, velocidad de rotación esperada, peso sobre la barrena esperada, configuración hidráulica y tasas de desgaste anticipadas debido a la abrasión y los impactos. El cuerpo de la barrena, configuración de los conos y estructuras de corte son diseñadas enfocándose en diferentes puntos, los cuales son la metalurgia, la tribología e hidráulica.

Los principios básicos de diseño de una barrena o los que se pueden considerar como los de mayor influencia son el peso que se le aplicara, la velocidad y la configuración dinámica. Los factores del ambiente de perforación como son la naturaleza de la formación que se perfora, la profundidad y dirección del agujero, las características de los fluidos de perforación, la manera en que el equipo de perforación es operado son también de importancia crítica en el diseño y comportamiento de la barrena los ingenieros deben también considerar estos factores para todos los diseños y todo diseño deberá comenzar con la cercana cooperación entre el diseñador y la compañía de perforación para asegurar que todas los datos de entrada aplicados contribuye en el diseño.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

Las actividades de diseño se enfocan principalmente en cuatro áreas generales, la selección del material del cuerpo de la barrena y conos, geometría y tipo de estructura de corte que se usara, requerimientos mecánicos de operación y requerimientos hidráulicos. El diseño se enfoca en gran medida para obtener la tasa de penetración más alta con los requerimientos de peso sobre la barrena y velocidad de rotación de la barrena. Los esfuerzos en los últimos años, para entender la manera de reducir la energía que se pierde en los impactos y vibraciones de la barrena, este esfuerzo ha llevado a que se investigue más a fondo mediante experimentos de laboratorio y mediciones de campo los efectos que tienen las vibraciones sobre el comportamiento de las barrenas de conos, pretendiendo alcanzar un amplio entendimiento de las vibraciones, el cual ayude a los ingenieros de diseño a predecir con exactitud los factores que pueden disminuir las vibraciones y daños en la barrena.

Es ilógico tratar a la barrena como un componente aislado de la sarta de perforación, es muy notorio que la interacción de la sarta de perforación y el aparejo de fondo es de suma relevancia en el comportamiento de la barrena en el fondo del agujero, sin embargo es muy útil conocer a detalle cómo se comporta la barrena bajo ciertas condiciones controladas del medio en las que se encuentra perforando.

El análisis individual de los elementos de una sarta de perforación provoca que se le reste la flexibilidad necesaria para determinar las frecuencias reales de las oscilaciones asociadas a la velocidad de rotación. En realidad muchos modos diferentes de vibración pueden estar presentes, la sarta de perforación realmente es un sistema mucho más complejo que una "cuerda colgada" y puede oscilar de diversas y muy variadas maneras.

Estas oscilaciones son amortiguadas por el lodo de perforación o por la fricción donde la tubería de perforación fricciona contra la pared del agujero o por la energía absorbida en fracturar la formación, pero algunas de estas fuentes de amortiguamiento no son suficientes para prevenir las oscilaciones, desde que estas oscilaciones ocurren en el fondo del agujero, pueden ser difícilmente detectadas y además generalmente son indeseadas. Las oscilaciones de la sarta de perforación cambian instantáneamente la fuerza sobre la barrena y esto significara que la barrena no operara como fue diseñada

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

Existe una gran cantidad de factores que afectan la facilidad para perforar una formación, estas incluyen el esfuerzo compresivo, dureza y/o abrasividad, elasticidad, contenido mineral, permeabilidad, porosidad, contenido de fluidos, presión intersticial y el estado del esfuerzo de confinamiento.

2.3.1.2 Método de Diseño

Para entender correctamente el diseño, es importante primero definir la manera en que los dientes e insertos perforan. Existen dos tipos de acciones de perforación que toma la barrena. Figura 2.7

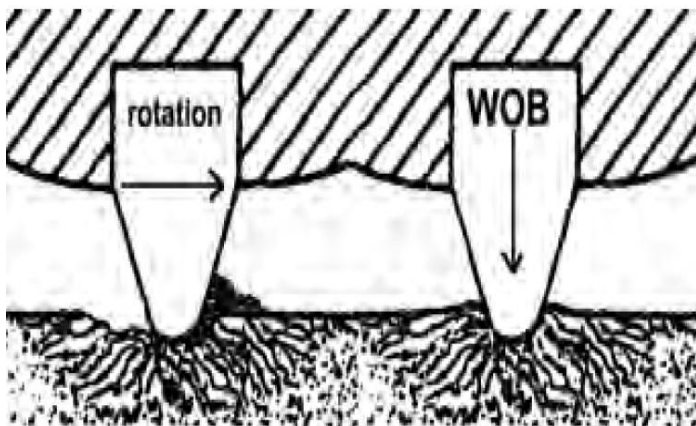


Figura 2.7 Fuerzas que se aplican en los Insertos de una Barrena Tricónica.

- Trituración. Toma lugar cuando el peso es aplicado a los insertos de la barrena fuerzan los insertos entrar en la formación comenzando a perforar.

- Arrastre. Este tipo de corte resulta de la acción en parte porque el diseño axial de la rotación del cono es ligeramente desviado del eje axial de rotación de la barrena, el arrastre también toma lugar porque el movimiento giratorio de la barrena no permite al inserto penetrado rotar hacia afuera de la zona destrozada que ha sido creada sin causarle un aplicación de una fuerza lateral en la zona perimetral ambas acciones contribuyen a la acción de corte.

Las barrenas de conos diseñadas para perforar formaciones suaves están diseñadas para maximizar la acción de arrastre, de acuerdo a esto provocan falla compresiva y cizallamiento, para complementar esto, los conos están colocados para inducir la desviación más grande posible de giro de sus verdaderos ejes de giro (Offset Alto). Los dientes son

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

largos, filosos, espaciados para alcanzar la penetración más profunda posible, la perforación en formaciones suaves está caracterizada por bajo peso sobre la barrena y altas velocidades de rotación.

Las formaciones duras son perforadas mediante la aplicación de altos pesos sobre la barrena y destrozando la formación por la falla compresiva, la roca que fallara cuando la carga aplicada exceda el esfuerzo que la roca soporta. Las barrenas de conos diseñadas para la perforación de formaciones duras son diseñadas para girar tan cerca como sea posible de su centro verdadero (Offset bajo), con la intención de que la diferencia tan pequeña del eje verdadero y el eje concéntrico sirva para crear un pequeño efecto de arrastre. Los dientes serán cortos y estarán cercanos para prevenir la rotura por la aplicación de grandes cargas. La perforación en formaciones duras es caracterizada por alto peso sobre la barrena y bajas velocidades de rotación.

Las formaciones medias son perforadas con la combinación de las características de las barrenas para formaciones duras y suaves. La roca es fallada por la combinación de las fuerzas compresivas con la limitación del cizallamiento y arrastre esta acción es lograda mediante el diseño de la barrena con un moderado valor de la desviación entre el eje verdadero de los conos y el eje concéntrico (Offset Medio). La longitud de los dientes es diseñada de media longitud. Perforar en formaciones medias es casi siempre hecha con pesos y velocidades con valores intermedios entre los valores ubicados de las formaciones suaves y formaciones duras.

Tabla 2.2 Tabla de Dureza de las Formaciones

Dureza	UCS (psi)	Ejemplos
Ultra-suave	<1000	Arcilla, Gumbo
Muy suave	1000 – 4000	Arenas no consolidadas, Creta, Sal, Arcilla arcillita
Suave	4000 – 8000	Carbón mineral, limolita, esquisto, arenas,
Media	8000 – 17000	areniscas, pizarra, lutita, dolomía
Dura	17000 – 27000	Cuarcita, basalto, gabro, lutita, dolomía.
Muy dura	>27000	Mármol, granito, gneis

El diseño de los elementos de una barrena de perforación están interrelacionados (siendo el principal de las limitaciones el tamaño impuesta por el diámetro total de la barrena) y algunos de los parámetros de diseño son manejados por las condiciones donde estará operando. Por ejemplo el ángulo de inclinación del cono y la desviación del eje axial del cono pueden ser modificados para incrementar o disminuir la cantidad de cizallamiento en el fondo del agujero. Muchos otros parámetros de diseño son limitados ya que un incremento en un parámetro tal vez necesariamente signifique el decremento de algún otro. Por ejemplo el incremento en la longitud de los dientes causara interferencia con los conos adyacentes.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.



Figura 2.8 Tipos de Huella de la Barrena Tricónica disminuyendo la dureza de la formación de izquierda a derecha.

La eficiencia de la perforación está ligada en gran medida con tasa de penetración, por eso ha sido deseado predecir el comportamiento de los patrones en el fondo del agujero basándose en parámetros geométricos controlables usados para el diseño de la barrena. Para cumplir esto es necesario entender primero la relación que existe entre los dientes y la roca y segundo, la relación entre el diseño de la barrena y el movimiento de los dientes en relación a la roca, es bien conocido entre los diseñadores de barrenas que estos mecanismos son independientes.

Actualmente el diseño de barrenas es el resultado de modificaciones hechas de los modelos originales, estas modificaciones están basadas en años de experiencia en la evaluación de los datos obtenidos de las perforaciones y las condiciones de la barrena. Desde que las barrenas han sido empleadas en ambientes más hostiles, más profundos y más destructivos ha dificultado la determinación de las causas de su falla.

Sin embargo un diseño óptimo de barrenas de conos debe incluir un análisis del comportamiento de las vibraciones. Sabemos que las vibraciones son originadas por un desbalance en la energía suministrada a la barrena y la sarta de perforación. Por esa razón

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

los diseñadores de barrenas se han enfocado en analizar de manera integral el comportamiento de la energía suministrada a la barrena. Por eso se han diseñado metodologías para las barrenas bajo el concepto de balance de fuerzas, el cual es un método no trivial sin consideración de diseño especial. El peso en la barrena es la principal fuente de energía para que la barrena haga su trabajo.

Las principales razones que normalmente se tienen, para que la barrena se encuentre en desbalance son:

- **Estructura de corte asimétrica**, usualmente las líneas sobre los conos están entrelazadas ordenadas para cubrir la totalidad del fondo del agujero y tener los efectos de auto tolerancia. Sin embargo aunque la forma de los conos podría ser similar en los tres conos, las distribuciones de las líneas de insertos o dientes sobre los conos son diferentes de cono a cono, el número de dientes sobre cada cono usualmente es diferente para cada uno de ellos, el cono que tenga más líneas y más dientes que los otros dos conos probablemente removerá mayor cantidad de roca y como resultado de esto se espera un mayor gasto de energía (Desbalance de Energía) un desbalance de energía usualmente lleva a la barrena a un desbalance de fuerza, que es la principal causa de la ineficiencia en la perforación, que da como resultado la fluctuaciones periódicas en el movimiento de la barrena.
- **La orientación diseñada de los ejes axiales de los conos, que no intersectan el centro de la barrena (offset)**, este concepto de las barrenas triconicas previene el libre giro de los conos e incrementa el efecto de cizallamiento de la barrena. Este concepto influye sobre el balance de fuerzas porque como se explicó, este concepto induce la acción de cizallamiento de la barrena, este movimiento es diferente en para cada línea de dientes de la barrena como resultado de esta diferencia, el esfuerzo de cizallamiento (esfuerzo tangencial) actuando sobre cada una de las líneas es diferente lo que generara un desbalance de fuerzas sobre la barrena.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

- **Seguimiento de las huellas**, este efecto se debe a que uno de los conos cae en las huellas que previamente han sido construidas, lo que provoca que este cono entre en contacto con el fondo del pozo sin penetrar, la roca no removida por este cono será parcialmente removida por cualquiera de los otros dos conos, como resultado la barrena entra en desbalance de fuerzas.

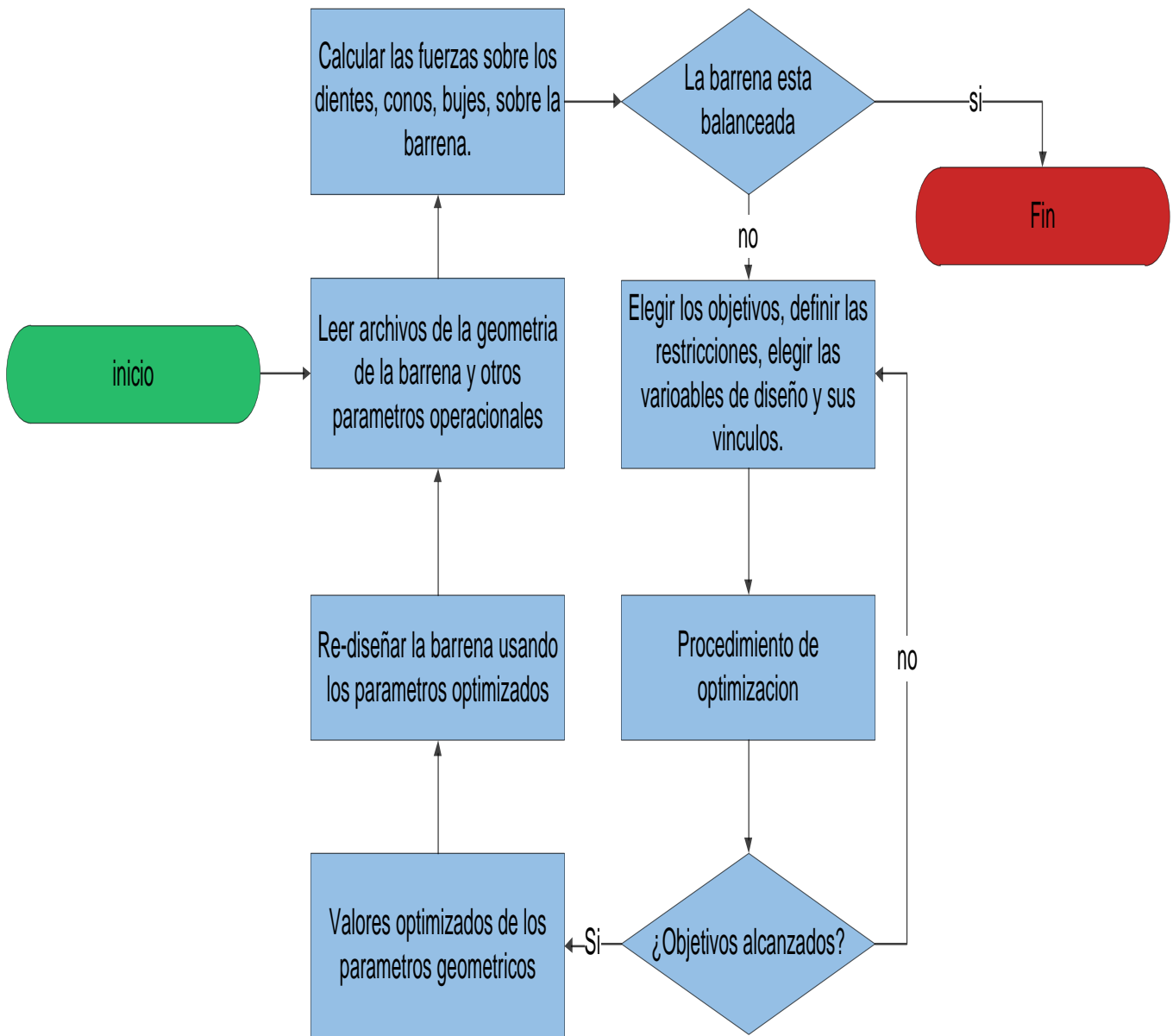


Figura. 2.9 Diagrama de Diseño de Barrenas Triconicas

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

La metodología de optimización del balance de fuerzas sigue una serie de pasos:

- a) La elección de las variables de diseño, el ángulo del mecanismo de sujeción de los conos, el ángulo entre el eje axial de los conos y la línea entre la base del cono y el centro de la barrena y el perfil del cono, sin embargo las únicas variables de diseño de una línea son la longitud de cresta, la posición radial del centro de la longitud de cresta y el ángulo de los dientes, sin embargo el número de variables de diseño es 4 veces del número total de líneas sobre una barrena.
- b) La definición de los objetivos y expresar matemáticamente los objetivos como función de las variables de diseño, de acuerdo a la ecuación (2.1) la fuerza que actúa sobre un elemento es proporcional a él volumen de roca removido por este elemento, este principio se aplica a cualquier de los dientes, el objetivo de que se cumpla esta relación para cada uno de los elementos, y que cada cono remueva la misma cantidad de roca por cada revolución de la barrena, esto también es llamado balance de volumen y cumplirá con el principio de balance de energía

$$F_{ze} = K_e * \sigma * S_e \quad 2.1$$

F_{ze} = Fuerza normal.

σ = Esfuerzo Compresivo

S_e = profundidad de corte

k_e = Coeficiente la formación (Lab)

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

2.3.2 Barrenas PDC

PDC es uno de los más importantes avances en materiales de la industria petrolera en años recientes, desde su aparición en 1976 la popularidad de estas barrenas se ha visto incrementada siendo ahora de uso tan común como el que tiene las barrenas de conos en diferentes aplicaciones de perforación.



Figura 2.10 Tipos de Barrenas PDC.

Las barrenas PDC son diseñadas y fabricadas en dos estructuras diferentes, barrenas de cuerpo de matriz y barrenas de cuerpo de acero. Los dos tipos proveen capacidades significativamente diferentes por lo que tienen específicas ventajas, una buena elección entre los diferentes tipos deberá ser tomada por las necesidades y requerimientos de cada uno de las aplicaciones.

2.3.2.1 Diseño de barrenas PDC

EL diseño de las barrenas PDC combina la disposición de los cortadores, el balance de cargas, aletas no simétricas y cojinetes de diámetro, las aletas espiradas han ayudado a reducir el problema de las vibraciones pero limitan la eficiencia de la perforación.

La estabilización incrementa la eficiencia de perforación y también mejora las características menos importantes de las barrenas PDC. Algunos diseños de barrenas se enfocan a mitigar algunos modos de vibración como es el caso de los diseños enfocados a mitigar el giro excéntrico de la barrena, esto a través de la manipulación de parámetros de perforación pero aun esto causa algún otro modo de vibración, como la aparición de Stick-slip. El diseño basado en la reducción de la vibración no deberá imponer limitaciones en la barrena y no deberá tampoco limitar a un rango de parámetros de operación a la barrena, peso sobre barrena, velocidad de rotación, hidráulica, etc.)

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

La identificación de las vibraciones como la principal forma de que una barrena PDC falla ha tenido una influencia significativa sobre el diseño de las barrenas y su desarrollo. A pesar de que las vibraciones axiales, torsionales y laterales fueron las primeras en ser reconocidas, la identificación y reconocimiento del Bit Whirl ha drásticamente influido en el desempeño de las barrenas PDC de la misma manera que las vibraciones antes mencionadas.

Para prevenir o mitigar las vibraciones de las barrenas PDC, muchos métodos han sido probados por los fabricantes de barrenas. Algunos de estos incluyen los conceptos y características de la reducción en la vibración, sin embargo dan lugar a la aparición de limitaciones de diseño y operacionales a la barrena, el resultado en el uso ineficiente de la energía mecánica disponible de la barrena. Estas limitaciones también afectan la facilidad con la cual las vibraciones son controladas y reducidas una vez que se presentan u ocurren.

Un concepto alternativo y de gran uso en la reducción de la vibración el cual no da lugar a limitaciones operacionales de las barrenas PDC ha sido desarrollado para asegurar la optimización de las barrenas es la energía mecánica disponible.

La estabilización de las barrenas PDC mejora el comportamiento a través del uso eficiente de la energía mecánica disponible. La energía total disponible en una barrena puede ser dividida en dos componentes, en términos de perforación y vibración. Con respecto a la eficiencia de perforación, la menor porción de la parte de la energía de vibración de la energía total disponible se obtendrá la mayor parte en la componente de energía en la perforación y se cumplirá en forma inversa. Las barrenas con componentes altos de energía de perforación usa la energía disponible mejor y tiene las más altas eficiencias de perforación.

El comportamiento de la barrena puede ser presentado por la ecuación X.3 como una función de la tasa de penetración

Las características vibratorias de las barrenas PDC son establecidas por sus diseños, sin embargo las cargas debidas a los impactos asociadas con estas vibraciones son dependientes de los esfuerzos de la formación que se perfora. Las barrenas estabilizadas han

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

minimizado el componente vibratorio ($E_{sub v}$), así se logra reducir el potencial de los elementos de corte de experimentar fallas prematuras. Las características menos importantes de la barrena son así mejoradas, permite que los elementos de corte se mantengan afilados y con sus propiedades de cizalla por más tiempo. En realidad el comportamiento de la barrena y Dull Grading muestran una relación inversa entre ellos.

Para combatir las vibraciones de las barrenas PDC, un gran esfuerzo se ha puesto en el diseño y desarrollo de barrenas estables, se ha implementado un término a la barrenas "anti-Whirl" lo que se ha empleado como sinónimo de cojines de diámetro de la barrena de baja fricción. Las barrenas con esta tecnología son diseñadas con una alta fuerza de desbalance que tiene como resultante la posición donde se encuentran los cojinetes de baja fricción de la barrena. Durante la rotación en el fondo el desbalance en las fuerzas en la barrena empuja el cojinete de la barrena contra la pared del agujero, esta acción previene a la barrena de hacer pivote en un punto rotar alrededor de este punto e incrementar el diámetro lo cual resultar en el Whirl de la barrena.

Este concepto ha sido exitoso en la reducción de la aparición del Whirl de la barrena, ha sido difícil extender el desarrollo de la aplicación en las barrenas PDC, debidas a las limitaciones que genera este concepto en el diseño de barrenas que ha resultado en barrenas con hombros débiles. La efectividad de este concepto requiere una restricción en los parámetros operativos de la barrena como son el peso sobre la barrena, velocidad de rotación, etc., que muy comúnmente no representan las condiciones óptimas de la barrena o de la aplicación de perforación.

Otras características conocidas de la reducción de la vibración incluye el balance de fuerzas, largas y amplios pads de diámetro de la barrena, perfiles planos, ángulos profundos de los conos, geometría

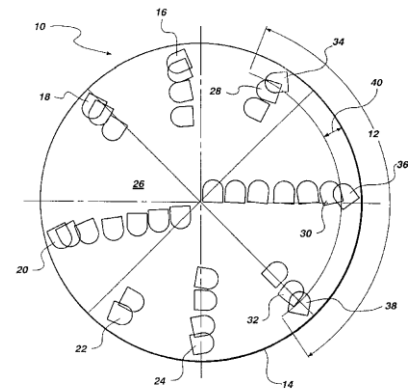


Figura 2.11 Distribución Geométrica de los Insertos de Diamante.

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

de corte de los cortadores y estabilización de la barrena. Estas características han tenido cantidades medidas de éxito sin un serio tratamiento en el amplio tema de las vibraciones en las barrenas PDC.

El entendimiento de las vibraciones en las barrenas PDC ha resultado en el reconocimiento de algunas generalizaciones que han sido pasadas por alto durante mucho tiempo por la industria:

- Bit Whirl es solo uno de los cuatro tipos de vibraciones que puede experimentar una barrena sin embargo esta es la más severa.
- Los diferentes tipos de vibración requieren diferentes medios para que se inicien y se propaguen.
- Las condiciones para la mitigación de un tipo de vibraciones fácilmente pueden establecer las condiciones en las cuales otra forma de vibración puede aparecer. Ha sido probado en el laboratorio y en el campo que las condiciones requeridas para la mitigación del Whirl de la barrena son idénticas a esas, en las cuales la barrena induce vibraciones torsionales, Stick-slip.

Un enfoque distinto de la prevención o mitigación de las vibraciones de las barrenas PDC no requiere de parámetros operacionales, esta nueva tecnología asegura de tal manera el establecimiento de un régimen de parámetros operacionales óptimo para una barrena PDC sin comprometer la eficiencia de la

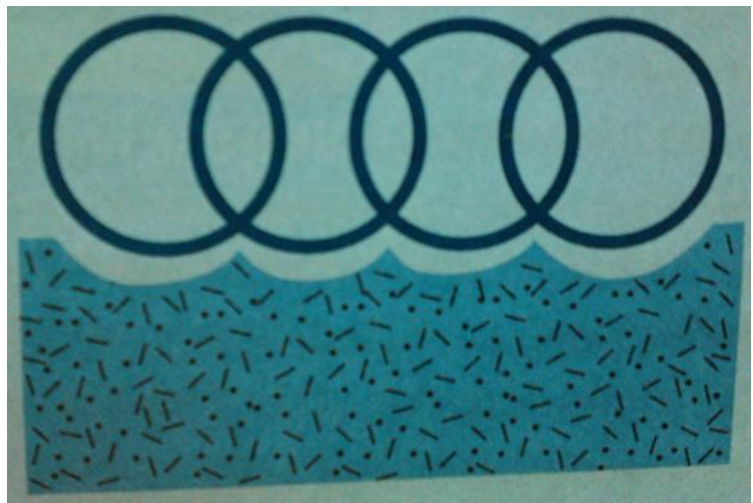


Figura 2.12 Forma de Compresión de los Insertos en las Barrenas PDC.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

reducción de la vibración de la barrena.

Este nuevo concepto de reducción de las vibraciones en las barrenas involucra el uso integral del arreglo de cortadores, el balance de fuerzas, la disposición asimétrica de las aletas, aletas con forma espiral y el diseño del diámetro externo de la barrena de la barrena, estas características conjuntamente ayudan a prevenir el inicio de las vibraciones o a mitigar los efectos dañinos de estas vibraciones, una vez que inician.

El arreglo de cortadores distribuidos en grupos de elementos de corte en anillos concéntricos a una posición radial específica en la cara de barrena. Esta disposición establece un desigual patrón en el fondo del agujero, lo cual crea crestas de formación entre los anillos concéntricos adyacentes.

Los cortadores en una posición radial idéntica crean relieves entres ellos. Al iniciarse la rotación excéntrica, los elementos de corte se introducen dentro de los relieves de la formación, esta acción crea una fuerza de estabilización en la dirección opuesta a esta en la cual la barrena ésta siendo compensada, con lo cual se restablece su verdadero centro de rotación.

El balance de fuerzas o balance de cargas es el método más popular de todos los métodos que ha sido probado para eliminar o reducir las vibraciones de las barrenas PDC, sin embargo es generalmente aceptado que las barrenas PDC deberían ser forzadas al balance, esta no es una definición uniforme sobre que constituye un balance de fuerzas en una barrena ni tampoco como el balance debe ser logrado.

En su acción de cizallamiento, los elementos de corte generan fuerzas que actúan en un plano paralelo y a un plano perpendicular al eje axial de la barrena. Las magnitudes y direcciones de estas fuerzas depende del esfuerzo de la formación que se perfora y sobre los parámetros operacionales de la barrena, la dependencia de estas fuerzas sobre los parámetros de diseño de la barrena pueden ser representados por la ecuación (8).

Tabla 2.3 Tabla de Ecuaciones para el Diseño de Barrenas PDC.

ECUACIONES	
$E_t = E_v + E_d$	1
$DE = \frac{E_d}{E_f}$	2
$BP = f(DG, ROP)$	3
$ROP = \frac{K_1}{DG}$	4
$BP = f(DG)$	5
$BP = \frac{K_2}{DG}$	6
$FS = f(DOC, CS, L_s, R_h, R_c)$	7
$F_i = f(Bo, BR, SR, L_p, \beta, C_e)$	8
<p>Nomenclatura:</p> <p>E_t = Energía mecánica total disponible en la barrena.</p> <p>E_d = Componente de perforación de la energía total de la barrena.</p> <p>E_v = Componente de vibración de la energía total de la barrena.</p> <p>DE = Eficiencia de perforación.</p> <p>BP = Comportamiento de la barrena.</p> <p>DG = Grado de desgaste.</p> <p>ROP = Tasa de Penetración.</p> <p>K_1, K_2 = Constantes de proporcionalidad.</p> <p>DOC = Profundidad de corte.</p> <p>CS = Esfuerzo Compresivo.</p> <p>L_s = Esfuerzo de cizalla.</p> <p>R_h = Altura de la Cresta.</p> <p>R_c = Anchura de la Cresta.</p> <p>F_i = Fuerzas inducidas por la acción de corte sobre la barrena.</p>	

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

- F_s = Fuerza de estabilización creada por el arreglo de los cortadores.
- B_o = Perfil de la Barrena.
- BR = inclinación trasera de los cortadores.
- SR = Inclinación lateral de los cortadores.
- L_p = Posición longitudinal de los elementos de corte.
- B = Posición angular de los elementos de corte.
- C_e = Área de acoplamiento de los elementos de corte.
- r = Distancia de offset.

El vector resultante de las fuerzas encontrado en el plano de interés corresponde a una fuerza desequilibrada. Este desequilibrio de fuerza depende en gran medida de su magnitud y

el proceso mediante el cual es alcanzado este desequilibrio. Un proceso especial de balanceo es usado en este nuevo concepto de reducción de vibración que reduce las magnitudes de las fuerzas sobre la barrena, el cual reduce las vibraciones inducidas por la acción de corte.

Una filosofía del diseño de barrenas PDC caracteriza los tipos de vibración encontradas, en

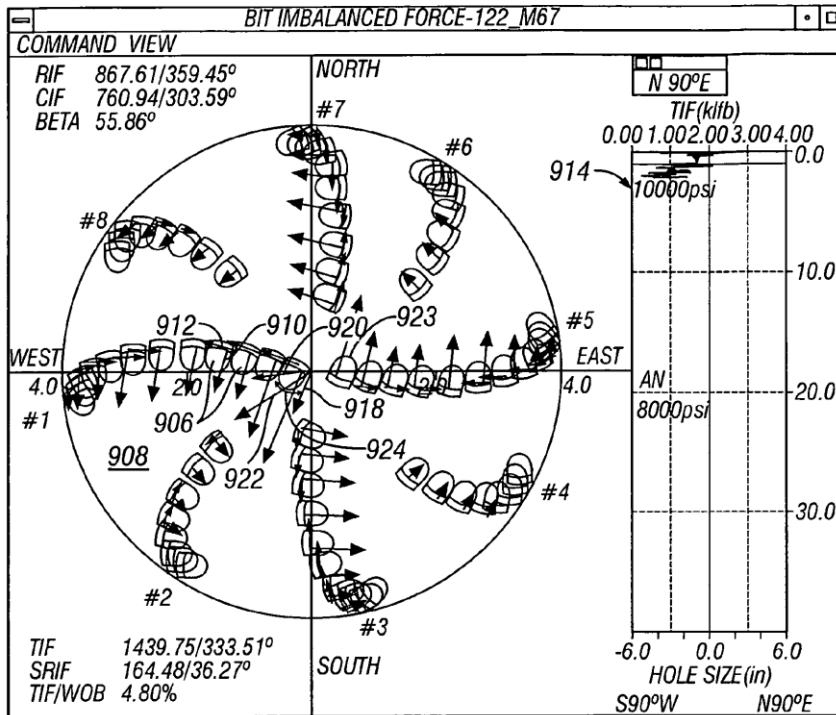


Figura 2.13 Diagrama de distribución de fuerzas de una Barrena PDC.

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

un ambiente adecuado estas vibraciones aumenta los niveles de energía de tal manera que tiende a sostener y amplificar sus frecuencias y magnitudes respectivamente. Aunque el intento es prevenir el inicio de estas vibraciones este objetivo es algunas veces muy difícil de alcanzar el concepto de la estabilización de la barrena requiere diseños de amortiguamiento de las vibraciones si estas ocurren.

Una disposición asimétrica de las aletas es un diseño para la disminución de las vibraciones que rompe la periodicidad requerida para mantener y amplificar las vibraciones en las barrenas PDC. En este arreglo los ángulos entre las aletas de la barrena y la cara de la barrena se hacen diferentes.

Aletas en espiral. Por definición, el Whirl de la barrena ocurre cuando la barrena rota alrededor de un punto ubicado sobre su cara o el diámetro diferente al verdadero centro geométrico. Esta definición matemáticamente establece un grado de severidad de este modo de vibración, esta severidad depende básicamente de la distancia entre el punto alrededor del cual la barrena gira y el centro geométrico de la barrena, una distancia grande, definida por las características de la barrena, proporcionara las vibraciones más dañinas. El peor escenario ocurre cuando la barrena rota alrededor de un punto ubicado sobre cualquier punto de su diámetro.

La magnitud de las fuerzas conferidas por las barrenas en espiral en una dirección perpendicular a la pared del agujero son más bajas que las comparadas con las barrenas de aletas rectas. Estas bajas fuerzas reducen el esfuerzo en el diámetro de la barrena en la interface barrena pared del agujero, por consecuencia minimiza el potencial de la barrena de pivotar y rotar alrededor de puntos ubicados sobre su diámetro.

Los pads del diámetro de las barrenas en espiral presentan un contacto circunferencial más largo entre la barrena y el agujero. Este contacto más grande incrementa el tiempo durante el cual el diámetro de la barrena, aquel que es establecido por su centro geométrico, permanece en contacto con el agujero, para fuerzas en el diámetro idénticas y velocidades de rotación durante este gran periodo de tiempo disminuye el esfuerzo en el diámetro de la

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Procesos y Prácticas para el Diseño del aparejo de Fondo y Configuración del Perfil Direccional.

barrena. Menores esfuerzos reducen el potencial de la barrena de pivotar en un punto sobre su diámetro.

El concepto de la reducción de las vibraciones es más efectivo cuando los cuatro diseños son usado en conjunto. La particularidad del proceso de balance de fuerzas, su metodología y los requerimientos impuestos sobre las fuerzas que actúan en la barrena reducen el potencial de la barrena a estar fuera de su centro geométrico de rotación. En casos donde la barrena con estos conceptos de reducción de las vibraciones experimentan un desbalance de su centro verdadero, las fuerzas de estabilización provocadas por el múltiple arreglo de cortadores restablece el centro verdadero de rotación de la barrena, estos dos diseños trabajan previniendo el inicio de las vibraciones en las barrenas PDC.

Las aletas y diámetros en forma de espiral reducen el esfuerzo requerido para establecer puntos de pivote que se encuentren sobre la cara y diámetro de la barrena. Esta condición llega a ser el mayor requerimiento en situaciones donde las características de la prevención de las vibraciones no puedan ser restablecidas al verdadero centro de rotación de la barrena. La disposición no-simétrica de las aletas perjudica las condiciones requeridas para mantener algún modo de vibración que la barrena pueda experimentar. Estas dos características del concepto mitigan el potencial de la barrena PDC a incrementar sus vibraciones inducidas por el efecto de corte.

Estos conceptos de la reducción de las vibraciones no presentan limitación para el óptimo diseño de las barrenas, lo cual permite que el desarrollo de la barrenas sea vinculado a la aplicación de perforación específica y las condiciones operacionales óptimas. En adición, el concepto no presenta restricción en los parámetros operacionales. Los intentos por contralar y reducir un modo específico de vibración durante la operación mediante la variación del peso sobre la barrena (WOB) y la velocidad de rotación (RPM) no causaran que la barrena se excite en otro modo de vibración (acoplamiento de vibraciones).

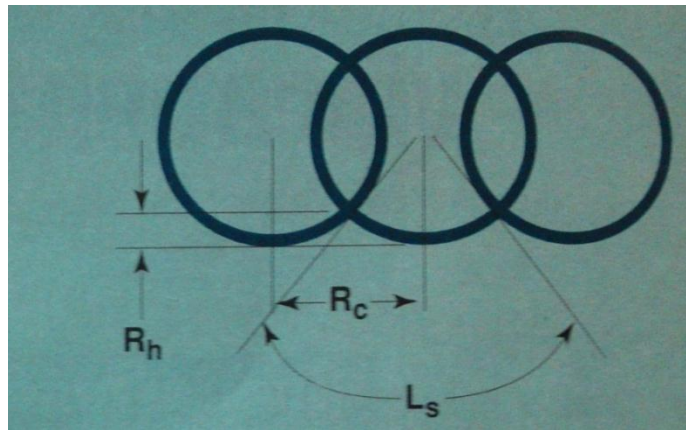


Figura 2.14 Angulo entre Cortadores en Barrenas PDC.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

3 Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

En la perforación el tiempo es invaluable, ya que cada día los costos por operación son más elevados, por lo cual la relación tiempo-costos es de vital importancia, las vibraciones es uno de los muchos problemas que se presentan en la perforación, pero a diferencia de otros problemas las vibraciones afectan a gran parte del equipo involucrado en la perforación, como son a las herramientas MWD/LWD, aparejo de fondo de Perforación, barrena, equipo especial y el mismo pozo. En la actualidad el estudio de este fenómeno se ha incrementado debido a la información de numerosas fallas en los elementos antes mencionado alrededor del mundo, provocando un interés particular en evitarlos o disminuirlos. Conocer cómo se comportan y como se miden es parte del problema así como los efectos, para solucionar el problema relacionado con los efectos provocados por fenómenos vibratorios, las compañías de servicios en el mundo realizan pruebas constantes para poder conocer los efectos que los fenómenos vibratorios tienen en la herramientas, y así conociendo los efectos que esto puede causar, prevenir y evitar fallas tempranas en los equipos lo cual representara tiempo y dinero.

3.1 Efectos en la construcción del pozo

Históricamente, los problemas relacionados con la inestabilidad en el pozo son atribuidos a la interacción físico-química de la roca con el fluido de perforación, especialmente cuando este fluido es Newtoniano. Sin embargo, en años recientes estudios han mostrado que los efectos químicos se vuelven irrelevantes en comparación con los eventos donde la energía de la perforación afecta al pozo. El excesivo nivel en las vibraciones en el interior del

pozo han sido identificadas como una de las causas de mayor daño al pozo, por lo cual varios estudios han demostrado que la reducción de las vibraciones en la sarta de perforación contribuye en gran medida en mejorar los problemas de inestabilidad en el pozo, además de reducir la fatiga en la misma sarta.

Uno de los principales problemas que provocan las vibraciones en los pozo es el agrandamiento del diámetro original, lo cual no es óptimo para la operación de perforación, por ejemplo cuando se está perforando en una roca dura las vibraciones pueden presentarse en cualquiera de sus modalidades, afectando a los componentes del aparejo de fondo de Perforación y provocando agrandamientos del agujero. Estas vibraciones pueden guiar a grandes pérdidas de tiempo en la operación provocando en los pozos de las áreas afectadas un impacto económico negativo, además de provocar un control de dirección no adecuado del pozo.

Las vibraciones en la perforación se ven acrecentadas cuando operamos cerca de las frecuencias de resonancia de los materiales, causando la destrucción de los componentes de la sarta con mayor velocidad, se conoce que cuando se opera con velocidades de rotación críticas, o muy cercanas a las velocidades necesarias para llegar a las frecuencias armónicas, se pueden generar un gran esfuerzo en la sarta alcanzando aproximadamente los 80,000 psi. , acortando drásticamente la vida de la herramienta, ya que gran parte de las fallas puede ser atribuidas a las vibraciones y movimientos armónicos en la sarta.

Aunque el efecto de alargamiento del agujero del pozo por vibraciones ha sido identificado, las consecuencias de este con la integridad del pozo aun nos son muy comprendidas.

- Análisis de Estabilidad a través de la Energía

Los problemas de inestabilidad del pozo en el campo son como mencionamos anteriormente atribuidos a la interacción química de los fluidos y la roca de la formación. Sin embargo trabajos realizados han demostrado que ciertas en arenas las propiedades de las mismas permanecen sin cambio cuando reaccionan con el fluido de perforación.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

Basado en la conservación de la energía, este análisis se integra a partir de los principios de energía de los fenómenos que actúan sobre la pared del pozo. Se trata de cuantificar la energía a través de un modelo sencillo, el cual podrá asociar los efectos de la energía en diferentes eventos que ocurren en la perforación.

La energía puede ser almacenada en un objeto sometido a esfuerzos continuos, si la energía excede el límite interno del material este puede soportarlo unos momentos, esto hasta que encuentre un mecanismo de alivio, lo cual podrá restablecer los niveles de energía hasta límites más tolerables, estos mecanismos de alivio puede ser pequeñas micro-fracturas en el material, el cual con el paso del tiempo se convertirá en una falla en el mismo. La teoría de Griffith dice que la energía potencial elástica es participe durante el fracturamiento de la roca. Este tipo de micro-fracturas derivadas de las vibraciones, provocan que la energía vaya decreciendo.

El cambio de energía asociada a este fenómeno que ocurre en el agujero del pozo está dada por:

$$\Delta U = E_m + E_s + E_t + E_c - E_f \quad 3.1$$

Donde E_m, E_s, E_t y E_c , representan la energía mecánica, la energía de la sarta, la energía térmica y E_f es la energía de fractura, la cual está dada por:

$$E_f = \gamma F_s \quad 3.2$$

Donde γ es la energía específica de fractura y F_s es el área de la fractura.

Por lo tanto sabremos que la presencia de resonancia o de un comportamiento dinámico complejo iría unido de la transferencia de energía de la superficie al fondo del pozo, la energía cinética de la sarta de perforación se puede ver disipada por los impactos de la sarta con las paredes del pozo, este tipo de comportamiento es el responsable de una gran cantidad de daño.

3.2 Daños en Herramientas de Medición. (MWD/LWD).

En años recientes ha crecido el interés en el mundo por parte de las compañías de servicios y operadores, poder cuantificar los daños y la durabilidad de las herramientas especiales que en la actualidad constituyen el aparejo. En la actualidad el aparejo de fondo de Perforación se ha vuelto cada vez más complejo y sofisticado con la adición de nuevas y novedosas herramientas MWD y LWD, por lo que el análisis del desgaste que sufren después de la operación o durante ha cobrado mucha importancia. Las fallas de estas herramientas relacionadas con las vibraciones que ocurren dentro del pozo podrían provocar desconexiones, daño en la electrónica o el escenario indeseable de la pérdida de la herramienta que representaría un impacto económico importante debido al alto costo de las herramientas en la actualidad. Esto es debido a las fuertes cargas dinámicas que recibe la herramienta durante su uso, estas herramientas están sujetas a fuertes cargas laterales, las cuales causan gran daño a la herramienta debido a la gran energía con la que se impactan contra la pared del pozo. En la actualidad se ha considerado el fenómeno vibratorio Stick-Slip y Whirl de la barrena y aparejo de fondo en el monitoreo de las condiciones de la herramienta, porque se ha analizado recientemente que estos dos fenómenos vibratorios llegan a ser los más dañinos para las herramientas especiales.

Sabemos que las herramientas de perforación se encuentran expuestas a ambientes hostiles. Los procesos de perforación sujetan a las herramientas a varios tipos de vibraciones y temperaturas elevadas. Los componentes más sensibles de estas herramientas, como los son los MWD y LWD debido a su electrónica, son más propensos a las fallas por vibración, las vibraciones no provocan daños inmediatos o fáciles de detectar debido a que la fatiga del equipo

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

es un proceso acumulativo, las fallas ocurren cuando el daño acumulativo en la herramienta alcanza el punto máximo de la resistencia.

En la actualidad los métodos más comunes para medir este tipo de fenómenos vibratorios es a través de las mediciones en el fondo del pozo, los límites de vibración son establecidos a partir de la experiencia en operaciones en el pasado y sobre todo con el diseño de la herramienta y el aparejo de fondo. La mayoría de los métodos incluyen la severidad de cada tipo de vibración, incluyendo el daño que se puede ocasionar en la herramienta.

Una de las formas para determinar el efecto que han tenido las vibraciones en este tipo de herramientas es conocida como HALT (Highly Accelerated Life Testing). Este método modela y obtiene el daño acumulado y el umbral de falla como función de las vibraciones, el nivel de los impactos, la cantidad de impactos y la temperatura de operación. Está basado en métodos empleados en otras industrias, especialmente en la aeroespacial. Los beneficios de este método son que su mejor exactitud en la predicción del daño acumulativo

- Prueba de Aceleración

Esta prueba es ampliamente utilizada para cuantificar aproximadamente el tiempo y las condiciones de operación de los componentes de la herramienta basados en el esfuerzo a las que son sujetos los componentes en tiempos exageradamente cortos.

Las Herramientas MWD y LWD, están diseñadas principalmente para operar en condiciones óptimas cerca de 1,000 horas o más antes de recibir algún tipo de mantenimiento, para cuantificar el daño en esta prueba se utilizan niveles aleatorios de severidad de la vibración, acordes a niveles reales operativos y los niveles de esfuerzos previstos para los periodos de tiempo acelerados.

- Efectos por vibración acumulada

El postulado básico de este concepto, es decir que las vibraciones producen daños por fatiga y que el daño es permanente, cuando los daños por la vibración alcanzan niveles donde la resistencia del material se ve comprometida es cuando las fallas ocurren. Durante la

perforación, la herramienta es sometida a varios tipos de vibración a diferentes niveles de severidad. Este método se basa en la fatiga por esfuerzo, sin embargo también se puede utilizar para el daño por la vibración ya que la amplitud de la vibración es directamente proporcional al daño. En la operación de perforación la herramienta vibra lo cual nos referirá un factor de daño D_i para cada nivel de vibración, teniendo así que la falla ocurrirá cuando:

$$D_1 + D_2 + \dots + D_{i-1} + D_i \geq 1 \quad 3.3$$

Donde D_i y los niveles de vibración serán proporcionales a la fracción de tiempo n_i que se requiera para ocasionar la falla en la herramienta en el tiempo total N_i :

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad 3.4$$

Los efectos de temperatura afectan mucho más a los componentes electrónicos que a los componentes mecánicos, las condiciones de funcionamiento de este tipo de componentes se verá afectado cuando la temperatura alcance los 85°C o más, el siguiente modelo reduce los niveles permitidos de vibración causados por efectos de temperatura:

$$D_t = \left(\frac{T}{T_s}\right)^m \quad 3.5$$

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

Este tipo de métodos muestra como las vibraciones, su cuantificación y medición se han vuelto de gran importancia en la actualidad, y como existe la forma de poder cuantificar el daño en forma precisa.

Además otro problema que envuelve a las vibraciones y las herramientas MWD, es la interferencia o ruido que las vibraciones en la sarta de perforación producen en él envío de pulsos a la superficie a través del lodo, ya que las vibraciones axiales producen variaciones de presión en la columna del fluido de perforación. Estas variaciones de presión en la columna del lodo, provoca que los pulsos de señales de MWD presenten ruido. El nivel de ruido que presenten las señales en el MWD varían dependiendo la frecuencia de la vibración y otros parámetros operativos, haciendo la interpretación de los registros más difícil.

Estudios han mostrado que las vibraciones axiales provocan altas frecuencias por lo que las válvulas de cierre de algunos equipos MWD, las cuales generan un ruido excesivo en el pulso de la señal provocando dificultades en las lecturas de las mismas, por lo cual podemos decir que cuando se presenta la vibración axial, la válvula del MWD genera altas frecuencia y cambios en la presión del lodo.

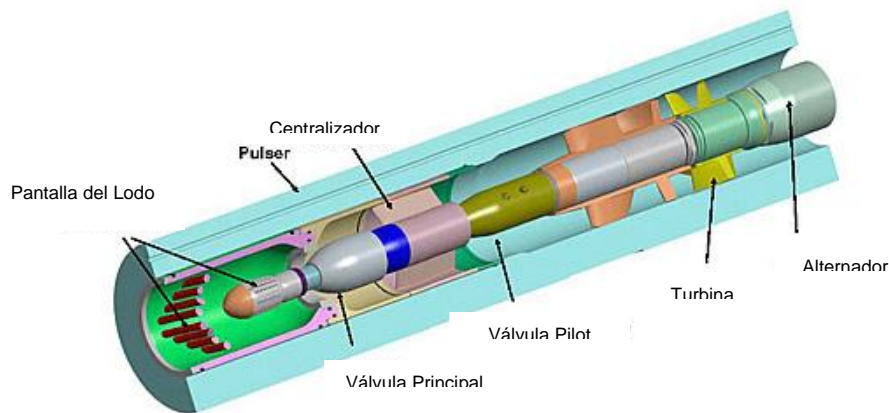


Figura 3.1 Herramienta MWD. (www.netl.doe.gov)

Además podemos decir que las variaciones de presiones en el lodo causadas por la vibración en la sarta son directamente proporcionales a la frecuencia de la vibración. Sin

embargo estas ondas de presión, pueden refractarse del equipo superficial a la herramienta MWD, provocando una interferencia caótica en la presión del pulso de señales. El gasto de flujo es también de gran importancia ya que el nivel de ruido que se pueda generar por vibraciones depende de él. La Figura 3.1 muestra la configuración interna de un MWD.

3.3 Daños en la Tubería de Perforación.

La mayor parte de la sarta de perforación está compuesta de tubería de perforación, las especificaciones dimensionales y metalúrgicas de la tubería de perforación mínimas requeridas se defienden por el *American Petroleum Institute (API)* y están publicadas en el *API Spec 7 Specifications for Drill Stem Elements* y *API Spec 5D Specifications for Drill Pipe*. Las características de desempeño, lineamientos del uso de la tubería de perforación y estándares de inspección están en *API 7RP7G Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits*.

Mucha tubería de perforación falla como resultado de la fatiga, el daño por fatiga es causado por cargas de flexión cíclicas inducidas en la tubería de perforación durante la perforación, este ciclo de esfuerzo tendrá como resultado una fisura, las cuales son la primera etapa de la fatiga por falla. La fisura o grieta crece hasta el punto donde la restante sección transversal no es lo suficientemente grande para soportar las cargas y la tubería de perforación consecuentemente se separa, esta es la segunda etapa de la falla.

Las fallas de la tubería de perforación pueden ser clasificadas en cuatro tipos diferentes, desconexión causada por el exceso de torque, rotura causada por la excesiva tensión, estallamiento o colapso por una excesiva presión interna o presión externa respectivamente y por último la fatiga como resultado de cargas mecánicas cíclicas con o sin corrosión.

- Desconexión

Las fallas de la tubería como un resultado de las desconexiones ocurren cuando el esfuerzo transversal inducido causado por un alto torque excede el valor máximo del esfuerzo del material de la tubería. En agujeros verticales excesivos esfuerzos de torque no son

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

generalmente encontrados en condiciones normales de operación sin embargo torques que excedan los 80,000 lbt-ft son comunes y fácilmente pueden causar la desconexión de particulares secciones de la sarta de perforación.

- Rotura.

La falla por rotura de la tubería de perforación ocurre cuando el esfuerzo de tensión inducida excede el esfuerzo máximo de tensión del material de la tubería, esta condición podría alcanzarse cuando la tubería se atora y una esfuerzo hacia arriba es aplicado adicionalmente a esto el punto neutro se encuentra muy cercano al punto neutro.

- Colapso y estallamiento.

El fallamiento de la tubería por colapso o estallamiento es raro, sin embargo bajo condiciones extremas de alto peso de lodo o perdida completa de circulación, el estallamiento de la tubería pudiera ocurrir.

- Fatiga.

La fatiga es un fenómeno dinámico que puede ser definido con el inicio de microfisuras y su propagación hacia macro fisuras, como el resultado de las repetidas aplicaciones del esfuerzo. Es un proceso progresivo localizado en la fracturas estructurales en el material bajo la acción de un esfuerzo dinámico, si bien se puede establecer que esta parte estructural pudiera no fallar bajo una sola aplicación de la carga estática muy probablemente si fallara bajo la misma carga si esta es aplicada repetidamente, la falla bajo estas repetidas cargas es llamada falla por fatiga.

La falla por fatiga de la sarta de perforación es el más común y costo tipo de falla en las operaciones de perforación sea de gas aceite o geotérmicas. La acción combinada de los recurrentes esfuerzos y las corrosión pueden acortar la expectativa de vida de la tubería de perforación, los esfuerzo cíclicos son inducidos por cargas dinámicas causadas por la vibración de la sarta de perforación y las cargas de flexión que ocurren en la secciones de curvatura del agujero y dog legs que son causadas por la rotación. La corrosión de la tubería

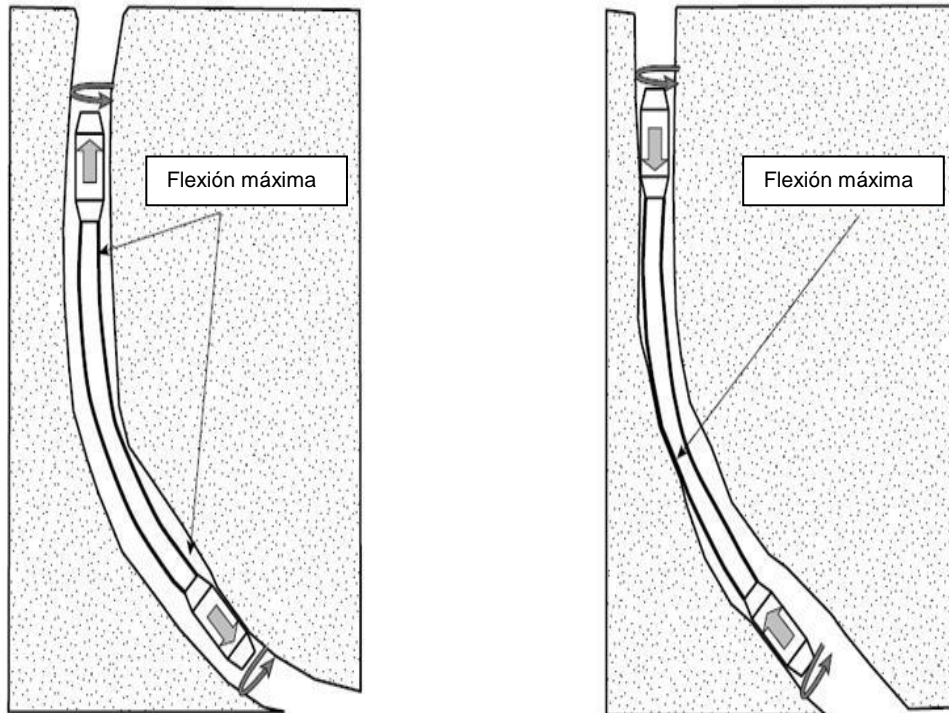


Figura 3.2 Esfuerzos por Contactos con la Pared del Pozo.
(O.Vaisberg, 2002)

ocurre durante la presencia de O₂, CO₂, cloruros, y/o H₂S. H₂S es el más elemento más corrosivo y severo de las tuberías de perforación de acero y es mortal para los humanos.

3.3.1 Cálculo de la Fatiga en tuberías de perforación

La fatiga es un proceso acumulativo, debido que es un proceso irreversible ya que no existe una regeneración del material, esta premisa deberá ser incluida en cualquier cálculo de fatiga. El API recomienda utilizar el método de Hardford y Lubinski para determinar la fatiga en un tubular. Cabe mencionar que este método de cálculo de fatiga solo incluye la fatiga de la tubería debida a la flexión y rotación de la sarta al mismo tiempo. En el desarrollo del

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

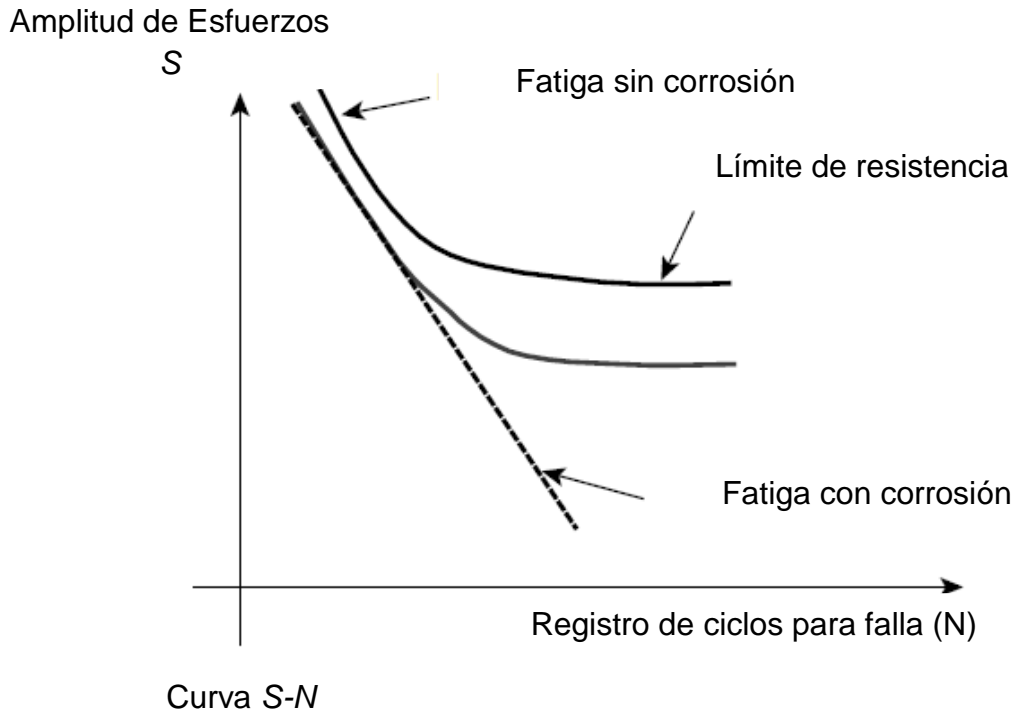


Figura 3.3 Curva de Fatiga del Acero. (O.Vaisberg, 2002)

concepto de fatiga es muy notorio que ninguna de la ecuación del cálculo de fatiga se considera la vibración.

Lubinski en su fórmula propone el uso de Figura 3.3, adicionalmente emplea la fórmula para determinar el valor S la cual se calcula de la siguiente manera:

$$S = \frac{TS}{N^x} \quad 3.6$$

Dónde:

S = El esfuerzo límite de flexión, psi

TS = Resistencia a la tensión de la tubería

N = Revoluciones de falla.

x = Exponente de fracción para el grado específico de la tubería

Este método (Figura 3.4) es un proceso acumulativo y por lo tanto se debe seguir el siguiente esquema para determinar la fatiga

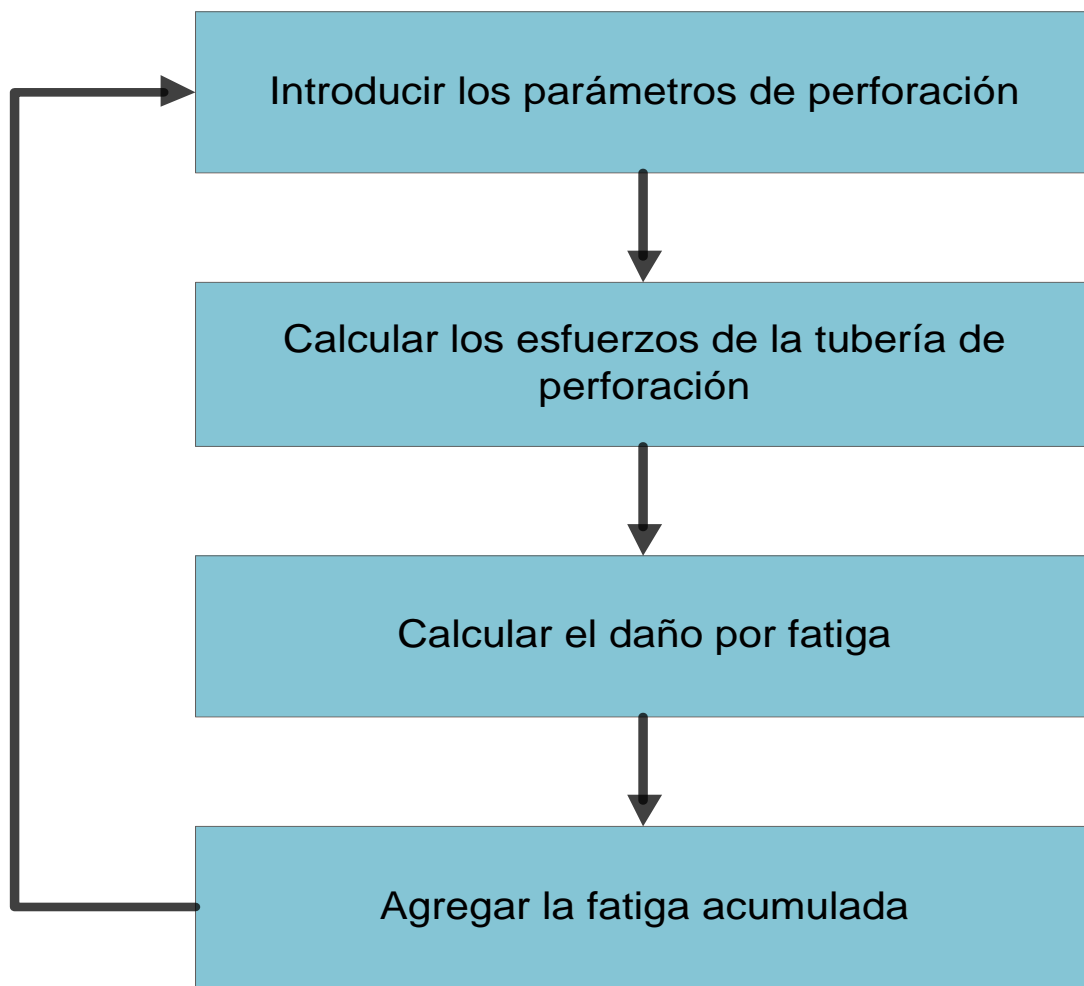


Figura 3.4 Proceso de la Fatiga Acumulada

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

3.3.2 Inspección de los componentes de la sarta de perforación

La tubería de perforación y elementos de la sarta de perforación deberán ser inspeccionados periódicamente para determina como mínimo lo siguiente:

- Reducción del grosor de la pared del cuerpo de la tubería que reducirá su resistencia.
- Reducción del diámetro exterior de la junta que reducirá la resistencia de la junta.
- Fisuras en el cuerpo de la tubería o en la rosca de la junta que llevara a fugas en la tubería o la separación de la sarta.
- Daño en la rosca de la tubería y hombros que podría causar fugas u roturas.
- La extensión del daño por corrosión que puede reducir la resistencia de la tubería y producir fugas en la tubería.
- Daño excesivo por deslizamiento que pueda llevar a fugas.
- Condición del recubrimiento plástico interno, buscar fisuras, específicamente bajo la cuerda de las juntas donde la corrosión puede incrementarse. Para evitar fugas.
- Condiciones de la Banda dura de la tubería
- Cambio en las mediciones causadas por cargas excesivas de trabajo que pueden adelgazar la tubería el piñón y la caja de la tubería.

Para la inspección de tubulares y componentes diversos de la sarta de perforación se pueden aplicar los métodos de la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Métodos de Inspección Tubular. (O. Vaisberg, 2002)

Componentes de la sarta de perforación	Métodos de inspección
Lastrabarrenas y tubería extra-pesada	Partículas magnéticas fluorescentes. Visual Dimensional
Lastrabarrenas y tubería extrapesada (No Ferromagnéticos)	Líquido Penetrante Visual Dimensional
Otras Herramientas del ensamblaje	Partículas magnéticas fluorescentes. Visual Dimensional
Tuberías API Conexiones (pin y caja). Áreas de deslizamiento	Partículas magnéticas fluorescentes. Visual Dimensional
Tuberías API Cuerpo de la tubería Áreas de deslizamiento y	Dimensional Ultrasonido del espesor de las paredes Visual Electromagnético del cuerpo de la tubería Ultrasónico en las áreas dañadas. Pruebas no destructivas de cualquier tipo.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

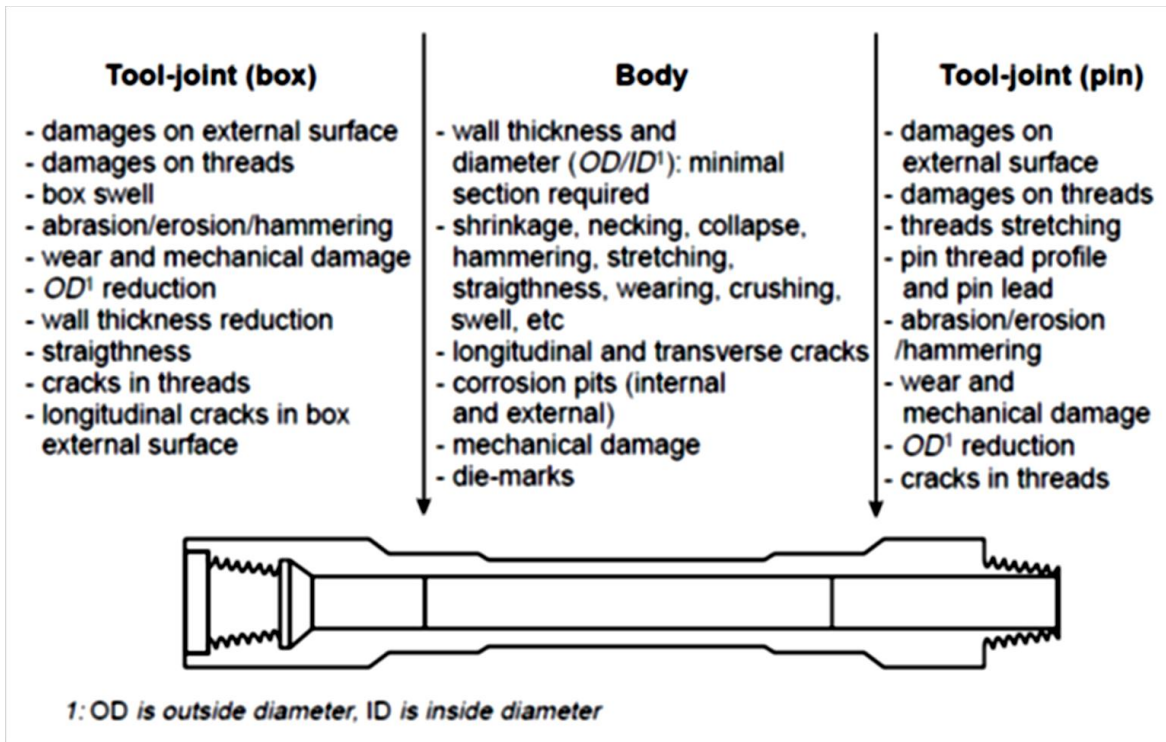


Figura 3.5 Características principales de la Tubería. (O. Vaisberg, 2002)

Las principales características a revisarse en una tubería (Figura 3.5).

3.4 Daños en la Barrena.

3.4.1 Barrenas PDC.

Los efectos de las vibraciones en las barrenas han sido discutidas en la actualidad debido a la gran importancia de estas en la perforación, sabemos que existen tres tipos de vibraciones que afectan este componente del aparejo de fondo de Perforación, las cuales son: Axiales, Laterales y Torsionales. Aunque en estudios recientes se ha notado que las vibraciones o fenómenos vibratorios que más afectan a la barrena son el Atascamiento-Deslizamiento (Stick-Slip) y Giro (Whirl) en barrenas PDC y salto de barrena en Triconicas.



Figura 3.6 Daños en la Barrena por Vibración. (Graham Mensa-Wilmot, 2010)

En las barrenas PDC los fenómenos vibratorios más dañinos que se presentan son el Stick-Slip y Giro excéntrico (Whirl), estos tienen un impacto negativo muy significativo en muchos aspectos, como pueden ser el rendimiento y durabilidad de la barrena, la Tasa de Perforación y la vida de la barrena. También se ha encontrado que cuando se presenta el fenómeno vibratorio de Giro (Whirl), las estructuras de corte de la barrena juegan un rol importante en la aparición así de igual manera en la reducción de este fenómeno, por lo que el diseño de estas es de vital importancia para la prevención de estos fenómenos.

Sabemos que las barrenas PDC en condiciones de perforación normales son muy eficientes y tienen altas tasas de perforación, sin embargo cuando estas barrenas entran en formaciones más duras las estructuras de corte se ven afectadas por lo cual la Tasa de Perforación disminuye, esto debido a que cuando la barrena PDC entra en estas formaciones el peso sobre la barrena (WOB) aumenta para que la Tasa de Perforación no se vea comprometida, este aumento del WOB provoca en la barrena el fenómeno vibratorio conocido como Stick-Slip el cual provoca un gran daño en la barrena, ya que la barrena sufre de un

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

mayor torque causado por el fenómeno, provocando una repentina liberación la cual genera una velocidad de rotación muy grande que compromete la vida de la barrena, por lo cual su control o reducción es importante, y como se mencionó anteriormente los efectos principales que sufre la barrena son las rupturas de los insertos de diamantes o cortadores, los cuales acortan la vida de la misma, y en otros caso fallas tempranas de la barrena causando tiempos de espera y tiempos no productivos.

En las Figura 3.6 y 3.7 se muestran el daño causado por las vibraciones en las barrenas PDC, se puede observar como las estructuras están gravemente dañadas.



Figura 3.7 Perdida de Nariz por Vibración. (M.J. Fear, 2007)

3.4.2 Barrenas Tricónicas.

En las barrenas tricónicas el estudio en la actualidad se enfoca en vibraciones axiales las cuales provocan un fenómeno conocido como salto de barrena, los otros dos fenómenos que se presentan en las barrenas PDC han sido observados recientemente en pruebas de

laboratorio, estos efectos como se comenta anteriormente son los que pueden comprometer tanto la vida como las estructuras de corte de las barrenas lo cual disminuirá su eficiencia y por lo tanto la operación de perforación no será óptima.

Por ejemplo, sabemos que las barrenas tricónicas puede sufrir de vibraciones torsionales, generando así el fenómeno de Atascamiento-Deslizamiento (Stick-Slip), se ha observado en varias pruebas que este fenómeno actúa de una manera ciertamente independiente, ya que cuando la barrena se encuentra “atascada” las variaciones de los parámetros, en este caso el WOB (Peso sobre la Barrena) y TOB (Torque sobre la Barrena) son menores en contraparte que cuando se encuentra “deslizándose”, esto se debe a que cuando la barrena se atasca, la perforación se detiene, pero ambos parámetros antes mencionados se siguen aplicando en la perforación y durante el periodo donde se desliza la barrena estos parámetros cambian, por ejemplo estudios revelan[ref. 76811], que las RPM pueden ir de 0 a 146 en un instante, mientras que el WOB puede ir de 8,000 lb a 21,000 lb aproximadamente y el TOB puede ir de 200 lb-ft a 800 lb-ft, estas fluctuaciones tan significativas en estos parámetros pueden ser la mayor causa de las rupturas en los insertos de la barrena y posiblemente responsables de fallas prematuras en la misma.

Otro ejemplo sería cuando la barrena presente un Giro (Whirl), aquí los parámetros WOB y TOB medidos sobre la barrena en fondo del pozo son menores a los medidos en superficie, esto debido a que cuando se está presentando este fenómeno vibratorio, algunos componentes del aparejo de fondo de Perforación está en constante contacto con las paredes del pozo, estos contactos con la pared del pozo, generan movimientos axiales y torsionales a lo largo del aparejo de fondo provocados por la fricción. Como resultado de esto, las fuerzas efectivas aplicadas a la barrenas se ven reducidas por lo cual la Tasa de Perforación se ve afectada, además de provocar efectos de destrucción en la barrena.

Las características de las estructuras de corte de las barrenas tricónicas, tienen una influencia significativa en la dinámica de la barrena y por ende en su desempeño. Por lo tanto el estudio de crear estructuras de corte más balanceadas en este tipo de barrenas, mejorara el desempeño de estas y reducirá en cierto grado la posible presencia de vibraciones severas.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

En las Figura 3.8 y 3. Se ve el efecto devastador que tienen las vibraciones en las estructuras de corte de la barrenas tricónicas, en este caso específico de Giro (Whirl) podemos observar como el desgaste es alto en ambas barrenas, en una imagen se puede ver como se afectan los insertos de la barrena lo cual afecta de manera directa la perforación, y en la segunda imagen podemos observar la pérdida de la nariz de la barrena debido a los fuertes fenómenos vibratorios que sufrió la barrena.

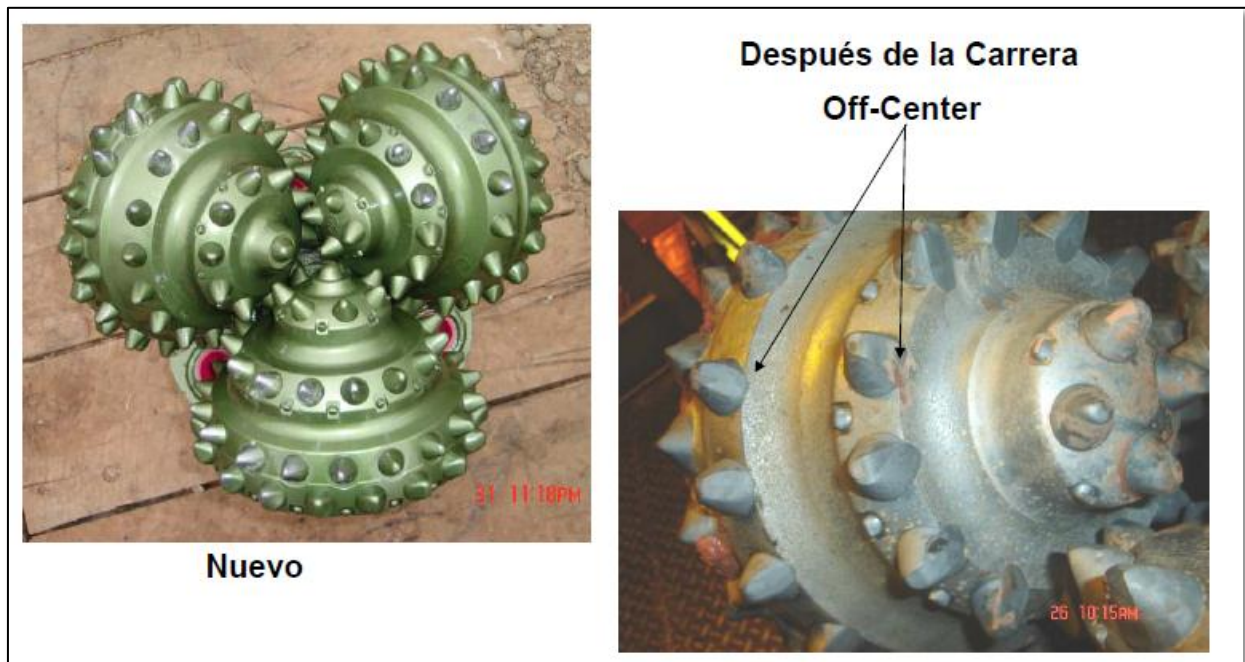


Figura 3.8 Daños en la estructura de corte debido a vibraciones. (Baker Hughes, 2007)

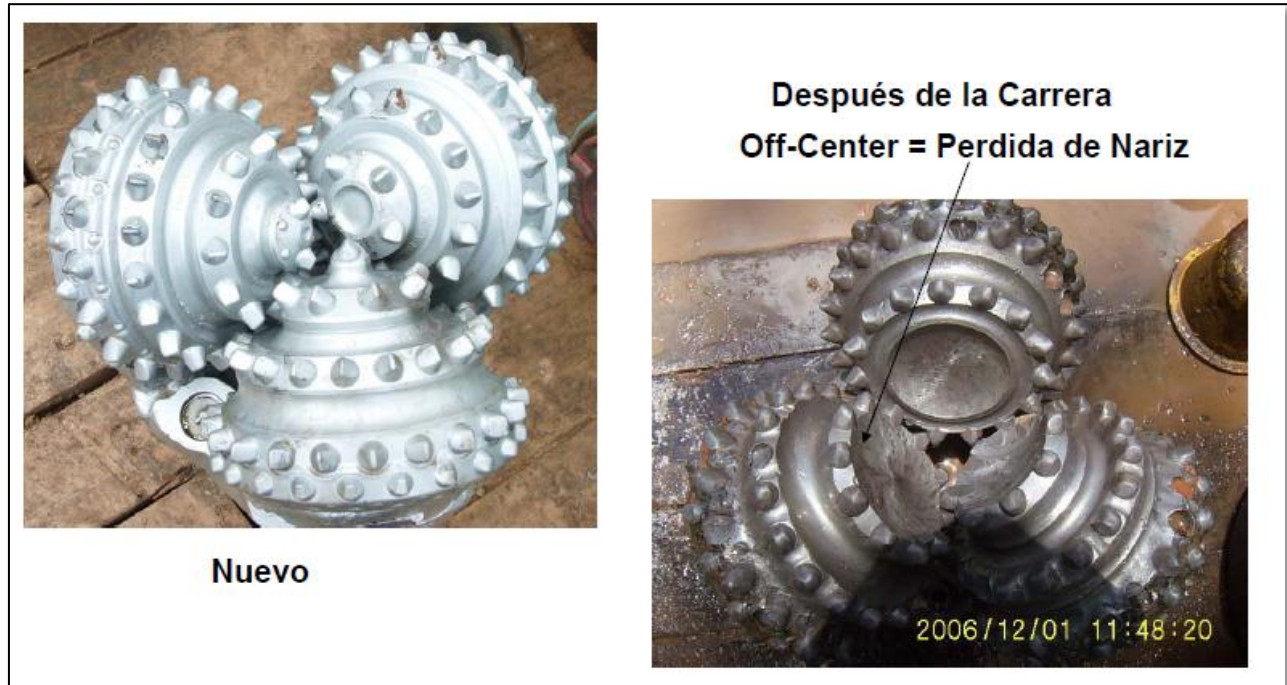


Figura 3.9 Perdida de la nariz de la barrena por vibraciones. (Baker Hughes, 2007)

3.5 Eficiencia de la Perforación.

La eficiencia de perforación es uno de los conceptos claves en la industria petrolera para la viabilidad económica de un proyecto, para alcanzar la eficiencia de perforación se deben conocer ciertas condiciones básicas. El objetivo primario se basa en buscar el menor costo por pie perforado en el pozo, en este punto existen fuentes que provocan que este concepto se incremente como son, los tiempos no productivos (NPT), los tiempos perdidos visibles (VLT) y los tiempos perdidos invisibles (ILT), los cuales tienen que ser analizados con detenimiento, y que es donde las vibraciones entran en juego.

La eficiencia de perforación puede contener varios parámetros que la afecten de manera negativa, algunos de ellos son, el costo por pie (CPF), la energía mecánica específica

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

(MSE) y los costos de pie por día (FPD). A continuación presentaremos las ecuaciones que determinan dichos parámetros.

$$CPF = \frac{1}{ROP} * \left[\left(\frac{BC}{t} \right) + RR * \left(1 + \frac{Tt}{t} \right) \right] \quad 3.7$$

$$MSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * RPM * T}{A_B * ROP} \quad 3.8$$

$$FDP = ROP_i * 24 \quad 3.9$$

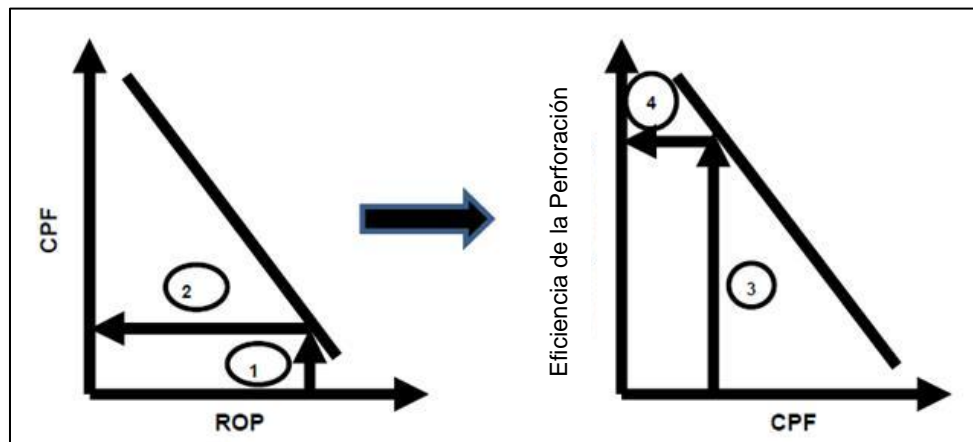


Figura 3.10 Gráficas de ROP vs CPF y Eficiencia en la Perforación vs CPF. (Graham Mensa-Wilmot, 2010)

Estas ecuaciones dependen fuertemente del ROP, a continuación se muestran gráficamente las relaciones de los parámetros mencionados con la eficiencia de perforación.

Las cuales muestran claramente la importancia de estos parámetros para la optimización de la eficiencia de perforación.

Gráficas de los diferentes parámetros en la Eficiencia de Perforación.

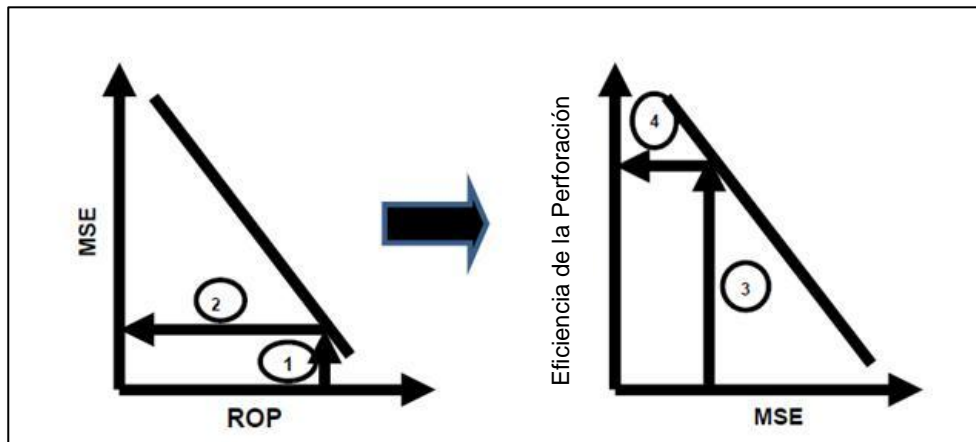


Figura 3.12 Gráficas de ROP vs MSE y Eficiencia en la Perforación vs MSE. (Graham Mensa-Wilmot, 2010)

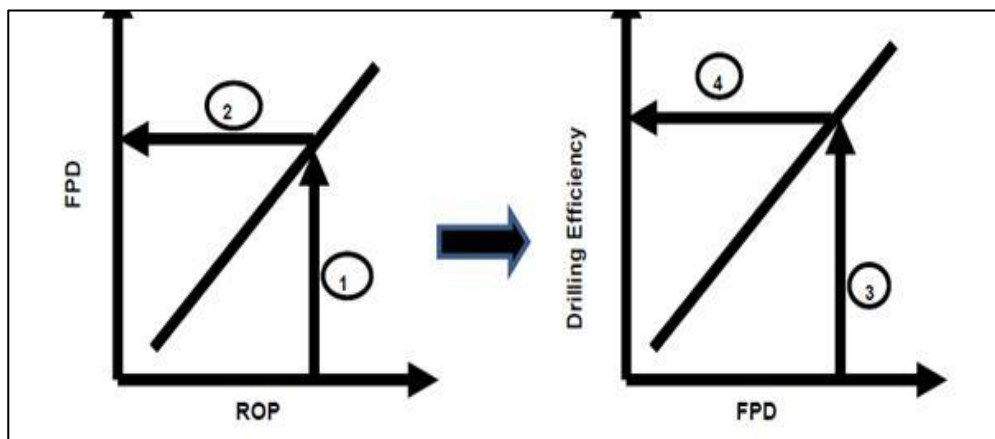


Figura 3.11 Gráficas de ROP vs FPD y Eficiencia en la Perforación vs FPD. (Graham Mensa-Wilmot, 2010)

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

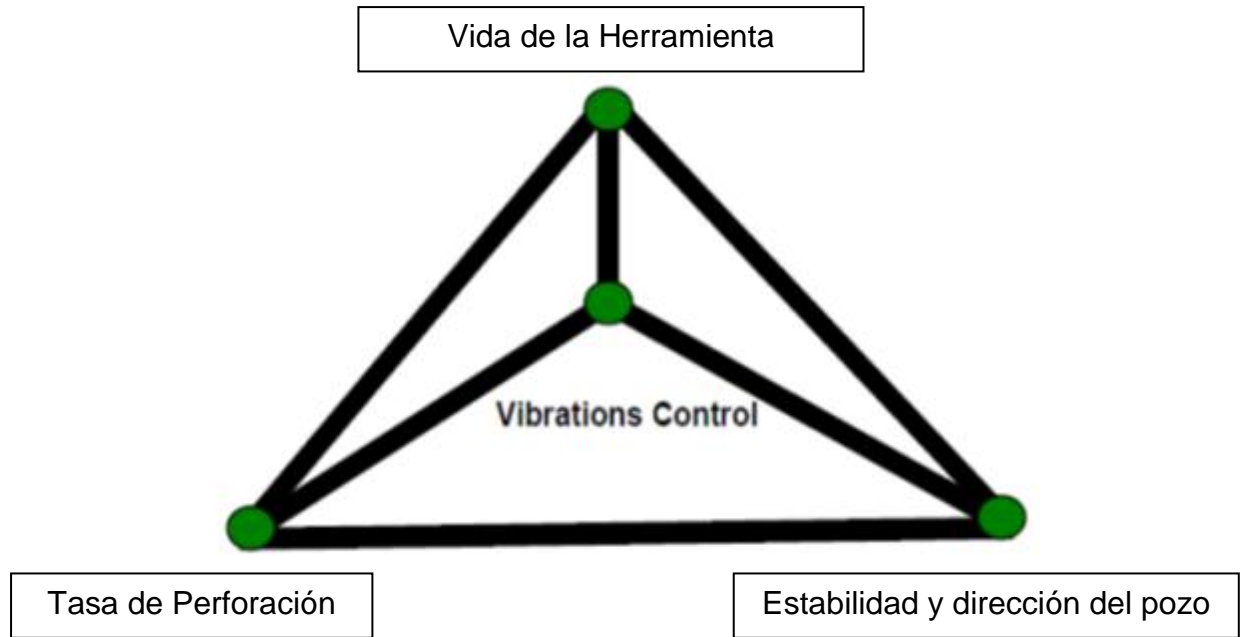


Figura 3.13 Diagrama del Control de Vibraciones en la Eficiencia de Perforación. (Graham Mensa-Wilmot, 2010)

Para el alcance de esta tesis, mencionamos los factores anteriores, ya que los problemas causados por vibraciones están estrechamente relacionados a ellos, y un mejor control de las vibraciones a partir de los parámetros anteriores resultara en una optimización de la eficiencia de perforación. Figura 3.13, como se muestra en la siguiente figura, donde se aprecia la importancia del control de vibraciones para la mejora de la perforación, ya que su inter-relación con los demás parámetros es de suma importancia para la perforación.

Es un elemento de vital importancia en la eficiencia de perforación y es un parámetro que se utiliza para la mitigación y el control de las vibraciones. La ROP se define como la unidad de avance en el tiempo por la perforación de la barrena en el fondo. Los factores que pueden afectar a este parámetro pueden influenciar a toda la operación de perforación, estos factores se pueden agrupar en las siguientes categorías.

a) Planeación:

- Tamaño de agujero.
- Perfil del pozo.
- Profundidades de las tuberías de revestimiento.
- Barrenas.
- aparejos de fondo de Perforación.
- Tipos de fluido.
- Propiedades Reológicas.
- Gasto de fluido.
- Limpieza en el pozo.

b) Ambiente:

- Tipo de litología.
- Propiedades de la Formación. (dureza, abrasión).
- Condiciones de presión.
- Tendencias a la Desviación.

c) Ejecución (Vibración):

- WOB (Peso en la Barrena).
- RPM (Revoluciones por minuto).
- Dinámica de la Perforación.

Existen 2 tipos de ROP, la ROP instantánea y la ROP promedio. Como su nombre lo dice la ROP instantánea es medida sobre un tiempo finito y una distancia, mientras la perforación se realiza. Esto ofrece datos específicos y una perspectiva de la formación en la que nos encontramos perforando, lo cual nos permite definir nuevos parámetros dependiendo

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Efectos de la Vibración en las Operaciones de Perforación.

de la formación o seguir con el plan previamente establecido. En cambio la ROP promedio se mide a partir del total perforado en un intervalo con respecto al aparejo de fondo de Perforación, viajes dentro y fuera del pozo.

4 Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Las vibraciones en la sarta de perforación han existido desde el comienzo de la industria, en la actualidad estos fenómenos se han convertido en un parámetro o condición para obtener una mejor eficiencia en la perforación. Con las necesidades actuales de la industria y el avance de la tecnología estos fenómenos pueden ser detectados y medidos, para su posterior control y reducción, por lo tanto el estudio y entendimiento de las metodologías actuales son de gran importancia para mejorar y optimizar las prácticas de perforación.

4.1 Introducción

Desde que las mediciones de vibraciones en el fondo del pozo fueron introducidas a principios de los años 90, este tipo de mediciones han sido de gran ayuda para mejorar la eficiencia de la perforación alrededor del mundo.

Usualmente el personal encargado de las herramientas de medición MWD (Measurement While Drilling) programa, configura y en ocasiones arma la herramienta en el piso de perforación, para enviar a la superficie los valores obtenidos en el fondo del agujero de las vibraciones axiales, torsionales y laterales. Estos valores se muestran en superficie en pantallas ubicadas en el piso de perforación o centros remotos de operación. Los valores son analizados en el mismo piso para obtener la severidad de las vibraciones y así poder determinar un mecanismo de impacto en particular o alguno que afecte al aparejo de fondo de perforación.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Como se ha mencionado anteriormente, las vibraciones axiales que se caracterizan por la inestabilidad en la barrena se despliegan en la pantalla del monitor como fluctuaciones en los ejes de medición. Mediciones recientes han arrojado que si se presenta un movimiento lateral severo, se puede observar una elevación en los indicadores de torsión y una mayor interacción del aparejo de fondo de perforación con la pared del pozo. En algunas ocasiones fuertes movimientos laterales se ven acompañados en algunos tipos de movimientos axiales por lo cual se presenta un giro en la barrena.

Las vibraciones torsionales se observan cuando se presenta el fenómeno Atascamiento-Deslizamiento. Es decir, cuando los movimientos torsionales son fuertes, están acompañados de movimientos laterales los cuales provocan un giro en el aparejo de fondo de perforación. Una alta amplitud y una permanencia en los movimientos torsionales y laterales es una manera de identificar el nivel de giro que se presenta en el aparejo de fondo de perforación. Una gran amplitud y un patrón consistente usualmente se refieren a un movimiento de giro en dirección a la rotación, y cuando se presentan movimientos eventuales que representan alguna elevación en la medición de las vibraciones laterales refiere a un giro en dirección contraria a la de rotación, elevaciones masivas en ambos casos representan un movimiento caótico en la sarta de perforación

El movimiento en el aparejo de fondo de perforación es monitoreado por un conjunto determinado de acelerómetros en la herramienta MWD. Usualmente tres acelerómetros son montados en forma ortogonal, uno medirá los movimientos axiales y los otros dos los movimientos transversales.

Se pueden colocar acelerómetros extras en conjunto con el uso de magnetómetros, para obtener el rango total de rotación, tomando el eje "Z" a lo largo del agujero y el eje "X" y "Y" en forma transversal a este se pueden medir la aceleraciones axiales en Z y las aceleraciones transversales de los componentes "X" y "Y" en diferentes tiempos. Esta información es transmitida a la superficie en tiempo real y un registro complejo se puede obtener con el análisis posterior de la herramienta MWD. Un punto importante es, que durante la perforación los instrumentos sufren de rotación, por lo tanto las mediciones de las

aceleraciones transversales serán tomadas en referencia a un fragmento de la rotación. Esto es lo más lejos que se han llegado a reflejar las fuerzas mecánicas que sufre el equipo, pero aún es complicado la visualización y el análisis del movimiento en la sarta de perforación.

Los choques axiales interfieren directamente con las operaciones de perforación (barrena, salto, jarring), y en profundidades someras este fenómeno es detectado por el perforador. Estas vibraciones generalmente se producen por la interacción entre la barrena tricónicas y la formación, este problema se presenta rara vez en barrenas PDC. Elementos de amortiguamiento pueden ser incluidos en el diseño del aparejo de fondo de perforación, los cuales pueden reducir daños potenciales. Debido a las grandes masas que se encuentran en movimiento, la grabación de aceleraciones axiales es menor que la grabación de las mediciones torsionales. Por otra parte, los equipos utilizados en la operación de perforación contienen limitantes más exigentes para las vibraciones axiales comparada con las transversales.

Las Vibraciones torsionales causadas principalmente por el Stick-Slip durante la perforación, son amortiguadas, ambas por la rigidez torsional de la sarta de perforación y la fricción en contra de la pared del pozo y el revestimiento del mismo. El amortiguamiento no es tan fuerte para los movimientos axiales, y por lo tanto el Stick-Slip puede ser detectado en superficie aún en pozos altamente desviados y estos pueden ser reducidos o removidos con la intervención del perforador. Las vibraciones torsionales no pueden ser leídas directamente a partir de los datos del acelerómetro, sin embargo la diferencia que se observan en la variación de $\Delta x(t)$ y $\Delta y(t)$ pueden ser un buen indicador de la severidad del problema. La información adicional se puede obtener a partir de las mediciones directas en la rotación de la sarta de perforación o en el uso de sensores magnéticos.

Las aceleraciones más fuertes que se presentan en la sarta de perforación son generalmente grabadas en la dirección transversal. Los choques provocados por estas aceleraciones pueden causar un movimiento excéntrico del aparejo de fondo alrededor del pozo. Esto forma un patrón de vibración helicoidal en la sarta de perforación. Sin embargo, la geometría del pozo puede causar patrones de vibración transversal. Debido a que las

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

vibraciones pueden acoplarse una con otra, otro tipo de movimientos pueden resultar en una aceleración lateral, y puede provocar un patrón de vibración caótico.

4.1.1 Acelerómetro y Magnetómetro

El acelerómetro del tipo compresión como fue el primer tipo a ser desarrollado. Por lo general se prefiere el acelerómetro de cizallamiento, configurado como se observa en la Figura 4.1, de tal manera que el elemento activo este sujeto a fuerzas de cizallamiento.

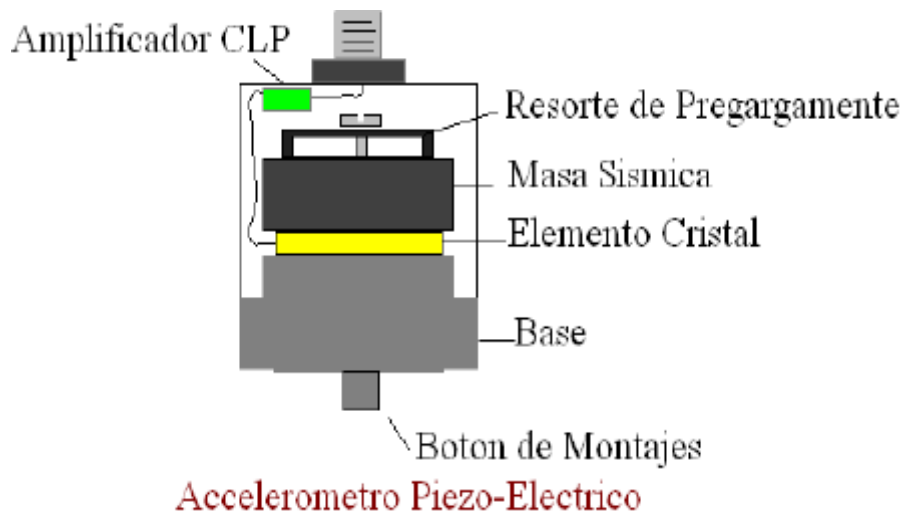


Figura 4.1 Acelerómetro. (<http://www.predic.com/mediawiki>).

También hay otros tipos de diseños para acelerómetros. Se puede considerar al acelerómetro piezo-eléctrico como el transductor estándar para la medición de vibración en máquinas. Se produce en varias configuraciones, pero la imagen mostrada sirve para la comprensión del principio de la operación de este dispositivo. La masa sísmica está sujeta a la base con un perno axial, que se apoya en un resorte circular. El elemento piezo-eléctrico está ajustado entre la base y la masa. Cuando una masa está sujeta a una fuerza, se genera

una carga eléctrica entre sus superficies. Hay muchas materias de este tipo. El cuarzo es el que más se utiliza. También hay materiales piezo- eléctricos sintéticos que funcionan bien y en algunos casos son capaces de funcionar a temperaturas más altas de lo que el cuarzo lo puede hacer. Si se incrementa la temperatura de un material piezo-eléctrico, se va llegar al llamado "punto Curie" o " temperatura Curie" donde se perderá la propiedad piezo-eléctrica. Una vez que esto pasa, el transductor está defectuoso y no se puede reparar.

Cuando se mueve el acelerómetro hacia arriba y hacia abajo, la fuerza que se requiere para mover la masa sísmica esta soportada por el elemento activo. Según la segunda ley de Newton, esa fuerza es proporcional a la aceleración de la masa. La fuerza sobre el cristal produce la señal de salida, que por consecuente es proporcional a la aceleración del transductor. Los acelerómetros son lineales en el sentido de la amplitud, lo que quiere decir que tienen un rango dinámico muy largo. Los niveles más bajos de aceleración que puede detectar son determinados únicamente por el ruido electrónico del sistema, y el límite de los niveles más altos es la destrucción del elemento piezo-eléctrico. Este rango de niveles de aceleración puede abarcar un rango de amplitudes de alrededor de 160 dB (Desibeles) y ningún otro transductor puede igualar esto.

El acelerómetro piezo-eléctrico es muy estable en periodos largos. Mantendrá su calibración si no se le maltrata. Las dos maneras de que se puede dañar un acelerómetro son la exposición a un calor excesivo y la caída en una superficie dura. Si se cae de una altura de más de un par de pies, en un piso de concreto, o en una cubierta de acero, se debe volver a calibrar el acelerómetro para asegurarse que el cristal no se cuarteó. Una pequeña cuarteadura causará una reducción en la sensibilidad y también afectará de manera importante a la resonancia y a la respuesta de frecuencia. Es una buena idea calibrar los acelerómetros una vez al año, si están en servicio con colectores de datos portátiles.

El rango de frecuencias del acelerómetro es muy ancho y se extiende desde frecuencias muy bajas en algunas unidades hasta varias decenas de kilohertzios. La respuesta de alta frecuencia está limitada por la resonancia de la masa sísmica, junto con la elasticidad del piezo-elemento. Esa resonancia produce un pico importante en la respuesta de

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

la frecuencia natural del transductor, y eso se sitúa normalmente alrededor de 30 kHz para los acelerómetros que se usan normalmente. Una regla general es que un acelerómetro se puede usar alrededor de 1/3 de su frecuencia natural.

La mayoría de los acelerómetros que hoy en día se usan en la industria son del tipo "PCI", lo que quiere decir que tienen un preamplificador interno de circuito integrado. Este preamplificador recibe su energía de la polarización de la corriente directa por el alambre de la misma señal, así que no se necesita alambrado suplementario. El conductor debe tener su fuerza de corriente directa disponible para este tipo de transductor. El acelerómetro PCI tendrá un límite de baja frecuencia, debido al mismo amplificador y este se sitúa generalmente a 1 Hz para la mayoría de las unidades disponibles comercialmente. Algunas unidades fueron diseñadas especialmente para ir hasta 0, 1 Hz si se necesita datos de muy baja frecuencia.

Cuando se conecta un acelerómetro PCI a la fuente de energía, el amplificador necesita unos segundos para estabilizarse. Durante este tiempo cualquier dato que la unidad recogerá será contaminado por las lentas variaciones del voltaje. Por esa razón, los recopiladores de datos deben de tener un retraso integrado, para asegurar que la unidad está en condición estable. Si el retraso es demasiado breve, la forma de onda de tiempo tendrá una rampa de voltaje en forma exponencial superpuesta sobre los datos y en el espectro se verá una característica creciente de muy baja frecuencia. Esto se debe evitar, ya que compromete el rango dinámico de la medición.

Cuando se coloca un acelerómetro es importante que la ruta de vibración desde la fuente hacia el acelerómetro sea la más corta posible, especialmente si se está midiendo la vibración en rodamientos con elementos rodantes.

Los magnetómetros se pueden dividir en dos tipos básicos:

Magnetómetros escalares mida la fuerza total del campo magnético en el que se encuentran

Magnetómetros del vector tenga la capacidad para medir el componente del campo magnético en una dirección particular.

El uso de tres magnetómetros ortogonales al vector permite medir la fuerza, la inclinación y la declinación del campo magnético definido.

El magnetómetro mide la magnitud de las tres componentes del campo magnético de la Tierra y sus valores son usados junto con los del acelerómetro para obtener el azimut.

4.2 Mediciones en superficie

Las mediciones en superficie son una parte importante en la detección de las vibraciones que se pueden presentar en el aparejo de fondo de perforación, son sistemas utilizados a partir de la limitante que algunas veces existe en los datos adquiridos a través de una herramienta MWD, por ende la utilización de equipo de medición en la superficie es necesario.

El principio de este tipo de sistemas se basa en sensores instalados por encima de la flecha o sarta de perforación, estos sensores pueden medir fuerzas axiales y dinámicas torsionales en la sarta de perforación, además de medir el torque y el peso de la sarta. Los acelerómetros utilizados en la superficie son para medir las cargas axiales y torsionales sobre la sarta. Una medición de movimientos laterales debe ser detectada por los canales en los sensores axiales ya que este tipo de movimiento es difícil que se propague hasta la superficie.

Otros sensores también son utilizados en superficie, como magnetómetros para medir la velocidad de rotación o transductores de presión para las bombas, así como sensores de temperatura.

La adquisición de datos en este tipo de sistemas se obtienen comúnmente a partir de las muestras tomadas por los sensores, su depuración puede ser a partir de 2000 tomas por segundo de cada canal aproximadamente con filtros con un ancho de banda cercanos a los 500 Hz. Adicionalmente se introducen en filtros de ancho de banda que van de 0 a 150 Hz, de

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

0 a 50 Hz y de 0 a 12.5 Hz, los filtros con menor ancho de banda son los utilizados para el estudio del daño de las vibraciones. Esto permite seleccionar la información necesaria que utiliza cada algoritmo para determinar la severidad de los movimientos.

4.3 Medición en el fondo del agujero

Las mediciones en el fondo del agujero son de vital importancia para la detección de las vibraciones, ya que debido a que es ahí donde se encuentra el punto de interés, además de ser el lugar donde se presentan las vibraciones, esta práctica se implementó a partir de que se sabía que algunos movimientos dañinos para el aparejo de fondo no se propagan hasta la superficie teniendo así grandes limitantes para su detección.

Aquí se muestran las diferentes formas para medir las vibraciones en el pozo. A continuación podremos observar la metodología y parámetros que se utilizan para la medición de los fenómenos de las vibraciones más dañinas.

4.3.1 Medición de Vibración Torsional (Stick-Slip)

Para la medición de este fenómeno de vibración en el fondo del pozo se utilizan herramientas especiales, estas herramientas pueden contener acelerómetros y magnetómetros, en este caso se puede utilizar un magnetómetro de salida el cual tomara valores en periodos de medición de 200muestras/sec. Cada 10 muestras el valor se guardara en la memoria de la herramienta, posteriormente se crearán 20muestras/sec. Esto en un periodo de tiempo de medición aproximado de 7.5 sec. De ahí se crean 150muestras/7.5sec y la toma número 5 será usada para el cálculo de la obtención de 30 muestras suavizadas. Las cuales podrán ser procesadas de tal forma que se puedan obtener datos representativos del fenómeno vibratorio.

Lo siguiente es determinado por las 30 muestras representativas.

- SSRPMNM (Stick-Slip, mínimo)

- SSRPMXM (Stick-Slip, máximo)
- SSRPMAM (Stick-Slip, promedio)

Para determinar la severidad del Stick-Slip, se necesita calcular S1, donde S1 es la medición de la separación de dos curvas representadas por la cantidad máxima de RPM y la cantidad mínima de RPM.

$$S1 = \frac{Max\ RPM - Min\ RPM}{2 * Prom\ RPM} \quad 4.1$$

Cabe mencionar que esta metodología es una de muchas que existen para medir este fenómeno.

Otra metodología mide las variaciones de las Revoluciones por Minuto en el fondo del Pozo. El Stick-Slip son los picos que se presentan a causa de la fluctuación de las RPM sobre un intervalo de tiempo. La frecuencia que se presenta es de 72Hz (especificación de la compañía prestadora del servicio), en un promedio de 0.5seg. A partir de esto se calcula el rango con las variaciones de las RPM en el fondo del pozo y en la superficie.

La severidad de las vibraciones se determina con el rango anterior, entre mayor sea el rango la severidad será mayor el fenómeno vibratorio.

Otra forma de medición es con la utilización del sistema RSS (Rotary Steerable System) el cual se encuentra muy cerca de la barrena, a través de la siguiente ecuación que mide la eficiencia torsional:

$$Eficiencia\ Torsional = \left(1 - \frac{MaxRPM - MinRPM}{2 * RPMPrincipales}\right) * 100\% \quad 4.2$$

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Cuando la ecuación resulta en un 100% no existe variación en las RPM y cuando el porcentaje es 0% existe el fenómeno Stick-Slip, los rangos intermedios hacen referencia a los niveles de vibración.

La relación entre la variación de las RPM y $2 \cdot \text{PROM RPM}$ determina la eficiencia torsional. También se utiliza un porcentaje de la fluctuación de las RPM y un sensor dinámico a base de acelerómetros en la sarta de perforación el cual ayudan a determinar los choques en la sarta.

Como podemos observar todas las compañías cuentan con diferentes parámetros de medición para este fenómeno por lo cual una comparación entre ellos sería inútil, ya que no existe un estándar de referencia que se pueda tomar en cuenta. Aunque el principio de medición utilizado para la medición en los 3 casos es similar no hay forma de compararlo debido a los parámetros que son utilizados.

4.3.2 Medición de la Vibración Lateral Whirl (Giro)

En este fenómeno vibratorio se pueden utilizar sensores anteriormente mencionados que midan las vibraciones axiales y laterales, las cuales son cuantificadas a través de la Raíz Cuadrada que es una técnica estadística para procesar señales con contenido dinámico.

La RMS (Root Mean Square) se representa como la energía que contiene las vibraciones. El valor obtenido a través del método RMS es la medición de amplitud más importante, ya que toma valores de tiempo de las ondas y da un valor de amplitud que se relaciona directamente con la energía contenida y por lo tanto da un valor de la capacidad de destrucción de la vibración.

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

4.3

4.3.2.1 Ventajas de la RMS

Se considera utilizar este método ya que las mediciones procesadas con el RMS tienen ventajas sobre las mediciones de picos y esto es aplicable para el daño en las herramientas.

Las señales procesadas por el método RMS son capaces de mostrar la energía detectada por la herramienta y así en cualquier segundo de la toma de datos el valor resultante por el método RMS es más preciso.

Las herramientas MWD también fallan debido a un impacto aislado de alto nivel (Excesiva energía a una baja frecuencia). La energía que se deriva debido al impacto también es contenida en los datos.

Las herramientas de MWD también pueden fallar debido a las continuas exposiciones a altos niveles de vibración o impacto.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Ejemplo:

Tenemos dos conjuntos de valores medidos con un acelerómetro en un segundo a una frecuencia de 5 Hz.

Caso A	Caso B
0	0
3	0
3	4
3	5
7	7

Valores

Caso	Rango	Prm	Dev Est	RMS
Caso A	0-7	3.2	2.5	3.9
Caso B	0-7	3.2	3.1	4.24

Utilizando el método de RMS donde observamos que el resultado será la raíz cuadrada de la suma de las aceleraciones entre el número de aceleraciones, obtenemos que los valores medidos que el caso B presentaran un mayor efecto vibratorio.

Las vibraciones laterales y sus efectos se pueden presentar de la siguiente forma:

- Vibraciones transversales al eje de la sarta de perforación
- Existencia de un movimiento lateral hacia la izquierda o la derecha.
- Existencia de una rotación fuera del centro de la misma / GIRO (Whirl).
- Tipos de Giro (Whirl).
 - 1) Hacia adelante o en dirección de la rotación.
 - 2) Hacia atrás o en dirección contraria de la rotación.

El giro excéntrico es el efecto de vibración más dañino que existe, un control inmediato de la misma puede prevenir una falla catastrófica, no se detecta directamente en superficie, y un gran problema es que este tipo de vibración se comporta como un fenómeno estable por lo cual su eliminación o reducción es muy complicada.

4.3.3 Medición del Salto de Barrena. (Bit Bouncing)

La detección del salto de la barrena en el fondo del pozo es algo ambiguo, ya que con una medición del WOB (Peso sobre la Barrena) donde se presente un valor de 0 podría ser suficiente para decir que estamos en presencia de este fenómeno. Sin embargo el promedio de las cargas axiales en el agujero pueden causar cambios tanto en la temperatura como en la hidráulica del pozo, por ende se necesita un análisis mayor. Para predecir el salto de la barrena, podría ser beneficiosa la utilización de algoritmos alternativos basados en la dinámica de las cargas axiales.

Estos algoritmos pueden predecir la variación en las cargas axiales por la amplitud dada por el patrón del fondo y así determinar si existe un salto en la barrena. Esencialmente si el nivel medido de las cargas axiales se encuentra fuera de rango del arreglo esto puede significar la presencia de un salto en la barrena.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

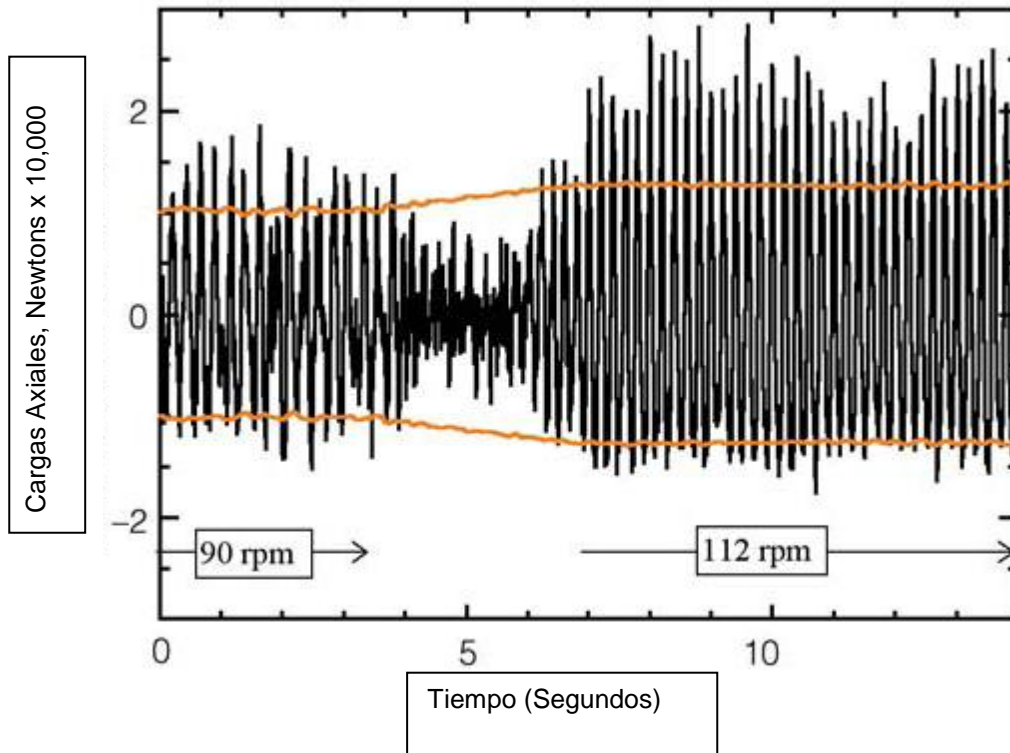


Figura 4.2 Umbrales en las cargas axiales para determinar el salto de la barrena. (J.D. Macpherson, 2001).

Para determinar si hay presencia de un salto en la barrena se puede observar los datos obtenidos a partir de los acelerómetros de cargas axiales. En los datos arrojados se podrán observar desplazamientos que pueden ir de 2.5 mm a 15 mm (el cual es un rango de desplazamiento referenciado en la literatura). El desplazamiento mínimo ocurre durante el cambio que existe en la velocidad de rotación en un periodo de tiempo.

Un valor representativo puede ser seleccionado como la carga axial normal, en este caso ese valor puede ser 5mm. En la siguiente figura se muestra los umbrales positivos y negativos de las cargas axiales para la presencia de un salto de la barrena. Si los valores se van por debajo del umbral negativo o por encima del positivo podemos estar en presencia de un salto en la barrena, en la Figura 4.2 se indica que con este método el salto de la barrena puede ocurrir en un intervalo de 90 a 120 rpm.

4.3.4 Medición de la flexión (Bending)

Para detectar o medir este fenómeno de vibración en el aparejo de fondo de perforación es necesario la utilización de una herramienta MWD, esta herramienta es capaz de medir el momento de flexión en el aparejo de fondo de Perforación generado por gravedad, esfuerzos laterales, además de los diferentes puntos de contacto que sufre el aparejo con las paredes del pozo, lo cual facilitara la determinación de los puntos de contacto del aparejo con el pozo.

El momento de flexión en la herramienta es medido a partir de la aplicación de 2 medidores de tensión en lados opuestos en el fondo, y estos a su vez conectados a un puente de medición de la herramienta. Los medidores de tensión cambian de una manera pequeña su resistencia cuando se sujetan a esfuerzos de deformación elástica, resultando en una pequeña señal de salida que captura el puente de medición. Posteriormente la conversión de la señal de análoga a digital se determina a partir de la utilización de un factor de calibración específico en la herramienta para diferentes ciclos de flexión.

Esta herramienta presenta dos puntos de medición perpendiculares para la medición del momento de flexión cuando el aparejo de fondo se encuentra en rotación. El momento de flexión total es determinado a través de una suma de vectores de las lecturas individuales de los dos ejes M_x y M_y

$$M_{total} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad 4.4$$

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Tabla 4.1 Tabla Comparativa de Mediciones en Superficie y fondo del Pozo (J.D. Macpherson, 2001).

MEDICIONES DINÁMICAS	
Sensores	
fondo del Pozo	Superficie
Cargas axiales.	Cargas axiales.
Torque.	Torque
Flexión en el eje X.	-----
Flexión en el eje Y.	-----
Aceleración Axial.	Aceleración Axial.
	Aceleración Torsional.
Magnetómetro en el eje X.	Magnetómetro en el eje X.
Magnetómetro en el eje Y.	-----
Presión interna.	-----
Presión Anular.	-----

4.4 Mediciones Grabadas y Mediciones en Tiempo Real

La resolución de los datos provenientes de la telemetría son significativamente más pobres que los datos almacenados en memoria para su posterior análisis, aunque esto no refiere que uno sea mejor que otro, ya que en la actualidad la importancia de la toma de datos en tiempo real se ha convertido en una prioridad para la pronta toma de decisiones.

Cuando el equipo MWD (Measurement While Drilling) se corre en el aparejo de fondo, es común la práctica de medir las aceleraciones en un grado limitado. Más común es que en esta práctica las mediciones que se realizan sean de los movimientos laterales y axiales o los choques en varios periodos de tiempo. Adicionalmente, una forma alternativa de medir los choques y aceleraciones torsionales es a través de magnetómetros usados directamente para medir en el fondo del pozo las RPM (Revoluciones por Minuto), y los acelerómetros son utilizados para medir movimientos tangenciales y radiales.

Las vibraciones generalmente son identificadas en periodos de tiempo pequeño lo cual hace que los datos arrojados para las mediciones sean bastos y útiles.

Los sensores para la vibración que son utilizados específicamente en el fondo del pozo son colocados en una forma perpendicular y en un conjunto de 3 acelerómetros como se observa en la Figura 4.3. Un acelerómetro es colocado en dirección del eje Z esto para medir los movimientos a lo largo del aparejo de fondo de perforación, los otros 2 acelerómetros son colocados en los dos ejes restantes y miden los movimientos laterales y perpendiculares a los ejes X y Y. El conjunto de 3 acelerómetros mide una cantidad de movimiento promedio y las graba. Los picos y choques también son grabados y medidos por estas herramientas, los 2 acelerómetros laterales también son capaces de medir cambios de velocidad en forma radial y tangencial que son útiles para la determinación de aceleraciones torsionales

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

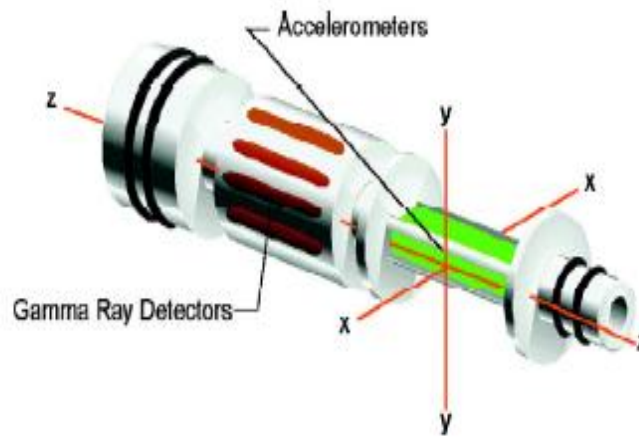


Figura 4.3 Posicionamiento de Acelerómetros. (David C-K Chen, 2003)

4.4.1 Medición Grabada (Post-Job)

4.4.1.1 Principio de Herramienta

Es una herramienta no invasiva Figura 4.4 y 4.5, maneja de manera independiente la medición de las vibraciones y el los análisis para mejorar los sistemas de perforación. La creación de esta herramienta fue a partir de evitar las fallas prematuras en la barrena las cuales comprometen el rendimiento de perforación y provoca una baja ROP (Rate of Penetration).

Los sensores de vibración en la herramienta de grabación se encuentran lejos de la barrena debido al daño que se produce, aunque poder medir datos muy cerca de la barrena podría ser una mejor forma para detectar los problemas, ya que al encontrarse a una distancia mínima del fondo puede ser de una utilidad mayor que si encontrara a una gran distancia de la barrena.

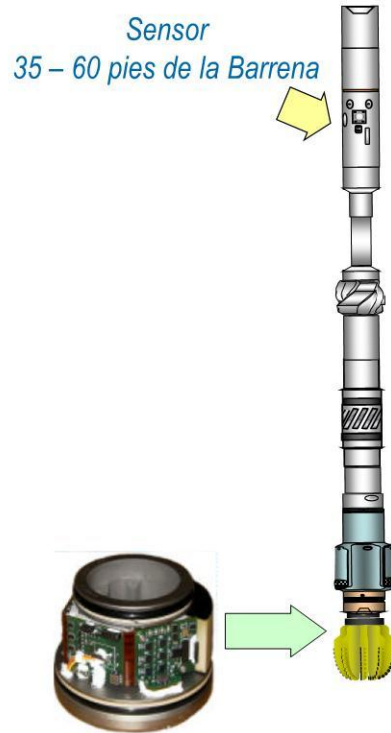


Figura 4.4 Herramienta Post-Corrida. (Prieto, 2009)



Figura 4.5 Herramienta Post-Corrida. (Prieto, 2009)

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

La herramienta que se muestra en la Figura 4.4 contiene un módulo dinámico que puede:

- Evaluar el diseño del aparejo de fondo y de la barrena.
- Mejorar los parámetros operativos.
- Contener puntos de referencia para laboratorio y campo.

Contiene un módulo de memoria para análisis post-corrída, además de contar con acelerómetros, magnetómetros y sensores de temperatura. El tiempo de operación de este tipo de herramientas puede ser de 200 horas aproximadamente.

Está herramienta cuenta con un conjunto de acelerómetros, los cuales medirán los 3 tipos de vibración que conocemos, además de medir la velocidad angular. La herramienta es capaz de almacenar muestras de alta frecuencia de hasta 5 segundos en periodos regulares, llamados “ráfaga de datos”. También es capaz de almacenar y calcular velocidades de rotación máximas y mínimas, además de contar con la posibilidad de controlar la frecuencia de la “ráfaga de datos”.

Sus parámetros operativos pueden ser los siguientes: Puede operar a una temperatura máxima de hasta 150°C, con una presión máxima de 20,000 psi, y una medición de 20 G en RMS. Se puede activar automáticamente con la presión y puede ser colocada en barrenas con diámetro variables.

En la Figura 4.6 podemos observar las aceleraciones máximas laterales tomadas por las herramientas de grabación. Vemos que la construcción de la gráfica es la siguiente en el eje de las ordenadas se mide las G's y en el eje de la abscisas se mide el tiempo en horas. Se pueden ver los grandes picos que se generan en el tiempo de medición, estos representan los rangos laterales, que como se había comentado anteriormente se miden en G's, sabemos que esto es la cantidad de energía en un impacto que recibirá en este caso el aparejo de fondo de Perforación y todos sus componentes.

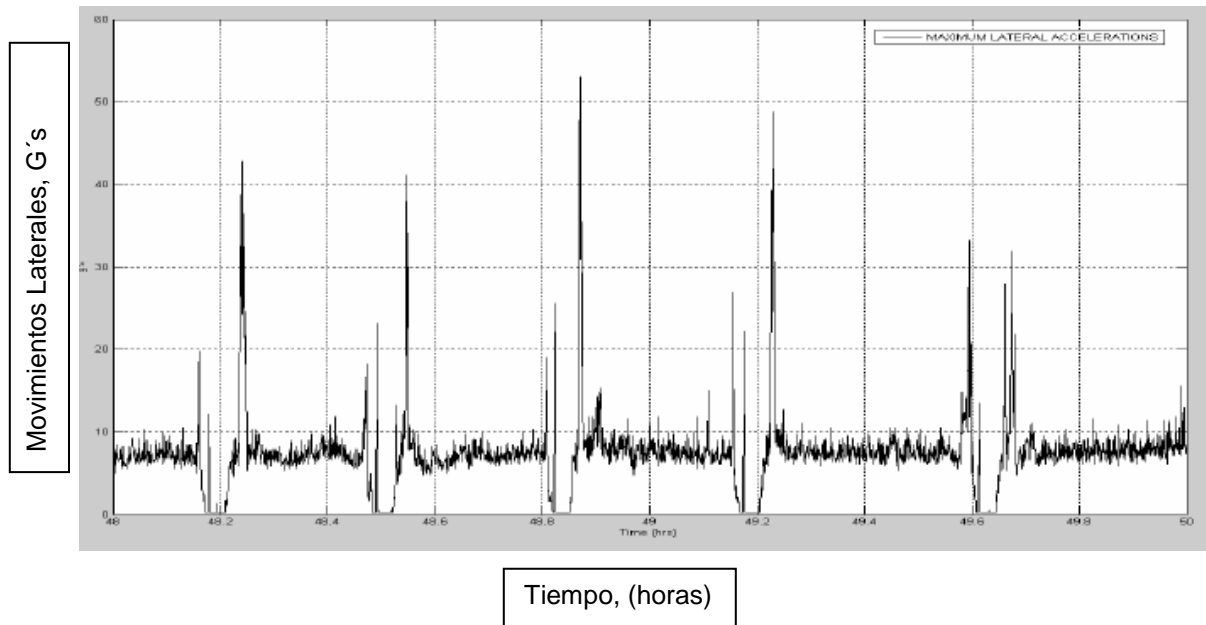


Figura 4.6 Medición de Máximos Movimientos Laterales en un Acelerómetro. (Daniel Pérez, 2007)

En la Figura 4.7 se puede observar la severidad medida de Stick-Slip por la herramienta de grabación, se puede observar que en el eje de las ordenadas se mide la relación SS mientras que el eje de las abscisas se mide el tiempo. El rango SS (Stick-Slip) es aquel que medirá la severidad del fenómeno vibratorio, aquí podemos observar como este fenómeno se presenta de manera constante a determinados tiempos, esta es una representación de lo que los acelerómetros graban durante la operación, cabe mencionar que este tipo de datos son analizados posteriormente a la operación y no en tiempo real, lo cual es una limitante para este tipo de mediciones, ya que el control inmediato de las mismas puede reducir y prevenir fallas prematuras en los componentes del aparejo de fondo de Perforación.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

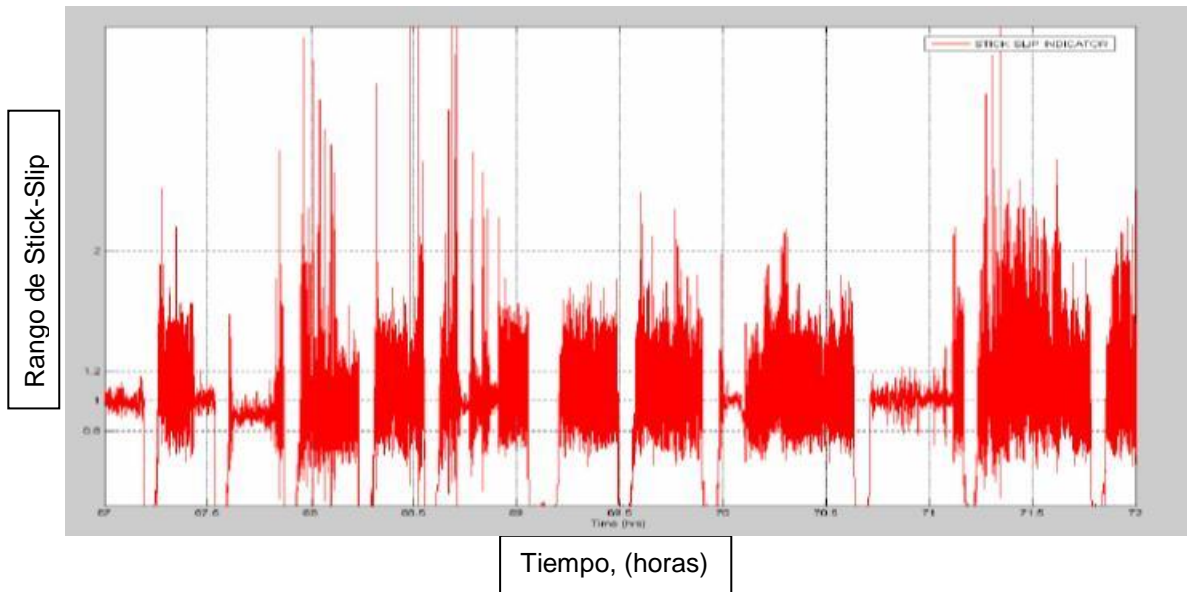


Figura 4.7 Medición de Rango de SS. (Daniel Pérez, 2007)

4.4.2 Mediciones en Tiempo Real

En la perforación direccional, la tecnología de Medición Durante la Perforación MWD es aplicada para transmitir datos direccionales de pozo y de ayuda a la perforación. En combinación con herramientas modernas de perforación direccional, tales como los sistemas de rotación dirigidos, la tecnología MWD ha permitido la perforación de pozos complejos mediante perfiles 3D, ubicados de forma precisa en el yacimiento. Sin embargo, incluso en pozos de alta tecnología el proceso de perforación por sí mismo, sigue siendo controlado en su mayoría por los datos tradicionales adquiridos en superficie como el gancho de carga, tasa de penetración (ROP), revoluciones por minuto (RPM), etc.

Algunos ejemplos de los datos de pozo del proceso de perforación que podemos obtener son, la presión anular, el peso en la barrena, flexión de la sarta de perforación, RPM, torque de la barrena y diagnósticos dinámicos. Es posible también, obtener información adicional del proceso de perforación de la hidráulica de la perforación o de la fricción de la

sarta de perforación mediante algoritmos de ingeniería de la perforación con los datos adquiridos en pozo y en superficie.

4.4.3 Telemetría

El propósito de las señales de MWD es transmitir los datos medidos en el fondo del pozo a la superficie para procesarlos. La telemetría es el proceso que permite transmitir datos de un lugar a otro.

Se utiliza una variedad de tipos de señales para transmisión de datos, ondas electromagnéticas, pulsos de presión del lodo; es decir pulsos negativos, pulsos positivos y ondas continuas.

4.4.3.1 Ondas electromagnéticas

Algunas herramientas de LWD utilizan este tipo de ondas para enviar su información a la herramienta MWD, sobre todo cuando están demasiado lejos sobre el aparejo de fondo de perforación para utilizar los suplementos en tiempo real para la comunicación. Estas ondas no son lo bastante fuertes como para distancias grandes tales como la transmisión a la superficie.

4.4.3.2 Pulsos negativos

Las herramientas de MWD no utilizan pulsos negativos para enviar datos a la superficie. Estos pulsos son generados momentáneamente reduciendo la presión en la columna de alimentación. Esto se completa cuando el fluido dentro de la sarta se desvía al espacio anular con una válvula de descarga. Abrir esta válvula reduce la presión en la columna de alimentación en 100 psi aproximadamente, el cierre de la válvula vuelve la presión en la columna de alimentación a su estado original.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

4.4.3.3 Pulsos positivos

Las herramientas más antiguas utilizan este tipo de pulsos de presión para transmitir los datos a superficie. Estos se generan en la columna del fluido por bloqueo momentáneo y parcial del flujo del lodo a través de la sarta. Cuando se bloquea el fluido, la presión dentro del aparejo aumenta y al desbloquearse vuelve a su estado original.

4.4.3.4 Pulsos continuos

Las nuevas herramientas ocupan este tipo de transmisión para enviar los datos a la superficie. Son un tipo de pulso positivo. Son generadas en la columna de fluido por un bloqueo y desbloqueo continuo del flujo de fluido a través del aparejo. La presión del fluido aumenta dentro del aparejo y al desbloquearse regresa a su estado original.

4.4.4 Mediciones en el fondo del pozo

Durante la perforación utilizamos las herramientas MWD y LWD para hacer mediciones en tiempo real del fondo del pozo, estas mediciones son una parte importante, ya que permite la evaluación de la formación, colocación del pozo y su dirección.

4.4.4.1 Conversión de datos

El procesamiento de datos adquiridos a través de la herramienta MWD permite que la evaluación continúe. En este caso se tratara el procesamiento de datos con el sistema DSP (Digital Signal Processor), este sistema procesa líneas de datos a lo largo de un segmento de 5 segundos mientras que el siguiente segmento de datos adquiridos es almacenado. Entre cada segmento de 5 segundos en una fila de cerca de 60,000 datos (con 12 canales x 1,000 Hz x 5 segundos) la información se convierte en información de diagnóstico estática.

La información estática se entiende a partir de los valores promedio de los sensores en cada canal, las RPM promedio en el fondo del pozo, el momento estático de cada RMS para

cada uno de los canales y el valor máximo y mínimo de cada canal elegido. A partir de esto se definen valores de severidad del fenómeno que se presenta.

El proceso inicia con un filtro digital con un ancho de banda de 70 Hz. Los datos son filtrados y eliminados a través de diferentes niveles para seleccionarlos para introducirlos a los algoritmos requeridos. Las señales del magnetómetro son procesadas y determinan la velocidad de rotación instantánea promedio. Un algoritmo parecido es utilizado para los canales que detectan la flexión. La combinación de estos datos provee la entrada para el diagnóstico del giro. Los componentes de la herramienta que manejan altas frecuencias son los encargados de determinar la eficiencia de corte de la barrena.

4.5 Interpretación

Debido a la falta de una estandarización en las mediciones de este fenómeno en el mundo por parte de las compañías prestadoras de este servicio la interpretación y los niveles de severidad son diferentes, aunque los fenómenos se presenten de igual forma en el pozo.

A continuación se presentan tablas utilizadas por las compañías prestadoras de servicios donde se podrá observar los diferentes niveles de severidad que presentan.

4.5.1 Torsional (Stick-Slip)

En la tabla 4.2 de la Compañía Baker Hughes, se pueden observar los diferentes niveles de severidad que se pueden presentar de Stick-Slip según la compañía, esta compañía utiliza 8 niveles de severidad que van de 0 a 7 que se pueden visualizar en la primera columna, en la segunda se puede ver los valores calculados de S1, estos varían de 0 a 1.2, en los niveles de severidad que van del 0 al 5 no existe un límite de tiempo para su tolerancia, en el nivel 6 el tiempo máximo permisivo debe ser de 5 horas y para el nivel 7 el tiempo máximo debe ser de 1 hora, si no la herramienta según sus especificaciones puede fallar

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Tabla 4.2 Tabla de Severidad de Stick-Slip Compañía Baker Hughes. (Prieto, 2009).

ATASCAMIENTO-DESLIZAMIENTO (STICK-SLIP)		
Nivel	Rango SS	Criterio
0	$0.0 < s \leq 0.2$	No hay límite de tiempo
1	$0.2 < s \leq 0.4$	
2	$0.4 < s \leq 0.6$	
3	$0.6 < s \leq 0.8$	
4	$0.8 < s \leq 1.0$	
5	$1.0 < s \leq 1.2$	No hay limite
6	$1.2 < s \leq 1$	> 5 horas
7	$s \geq 0.1$	> 1 hora

En la tabla 4.3 de la Compañía Schlumberger lo primero que se observa es la escala de registro que va de las 0 a las 200 RPM, las columnas referentes a los niveles de severidad de la vibración incluyen un rango de Stick-Slip Ratio que va de 0 a 1.5, además de los tiempos máximos permisivos para cada nivel de severidad detectados.

Tabla 4.3 Tabla de Severidad de Atascamiento-Deslizamiento Compañía Schulmberger. (Schlumberger, 2009).

ATASCAMIENTO-DESLIZAMIENTO (STICK-SLIP) (Escala de medición: 0 a 200 RPM)		
SS	Nivel	Criterio
0 a 0.5	Bajo	No hay problema con el tiempo
0.5 a 1.0	Medio	Más de 25 horas, riesgo medio de falla
1.0 a 1.5	Alto	Más de 12 horas, riesgo alto de falla
> 1.5	Severo	Más de 30 minutos, riesgo severo de falla

En esta tabla 4.4 presentada por la Compañía Halliburton la lectura es un poco más complicada, observando que en la primera columna se encuentran los niveles de severidad de las vibraciones, en la segunda se muestra la eficiencia torsional antes mencionada, en la tercera columna se observa la fluctuación de las RPM y por último se muestra los tiempos máximos permisivos para cada uno de los niveles de severidad.

Tabla 4.4 Tabla de Severidad Atascamiento-Deslizamiento Compañía Halliburton. (Halliburton, 2009).

Límites de Eficiencia Torsional			
Riesgo	Eficiencia Torsional	Fluctuación de las RPM al % de las RPM principales	Límite
Bajo	100 - 50%	0 - 100%	No hay límite
Medio	50 - 25 %	100 - 150%	12 Hrs
Alto	25 - 0%	150 - 200%	30 Mins
Atascamiento	-ve %	200% +	Detienes la Perforación reinicias con diferentes parametros

4.5.2 Lateral

Se utilizan igual que en la tabla de Stick-Slip 8 niveles de severidad en vibraciones Laterales siendo 0 el menor y 7 el mayor como se observa en la tabla 4.5, en la segunda columna se puede observar el valor obtenido a través del método de RMS que va de un mínimo de 0 a un máximo de 15. Para los primeros 3 niveles no hay un tiempo límite, para los niveles comprendidos entre el 3 y el 5 el tiempo máximo permisivo debe ser de 3 horas, mientras que para los niveles 5, 6 y 7 el tiempo máximo permisivo debe ser de 20 min. Recordando que este tipo de vibración es la más dañina que existe.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Tabla 4.5 Tabla de Severidad de Vibraciones Laterales Compañía Baker Hughes. (Prieto, 2009).

LATERAL		
Nivel	g de RMS	Criterio
0	$0.0 < x < 0.5$	No hay límite de tiempo
1	$0.5 < x < 1.0$	
2	$1.0 < x < 2.0$	
3	$2.0 < x < 3.0$	
4	$3.0 < x < 5.0$	> 3 Horas
5	$5.0 < x < 8.0$	> 20 minutos
6	$8.0 < x < 15.0$	> 20 minutos
7	$15.0 < x$	> 20 minutos

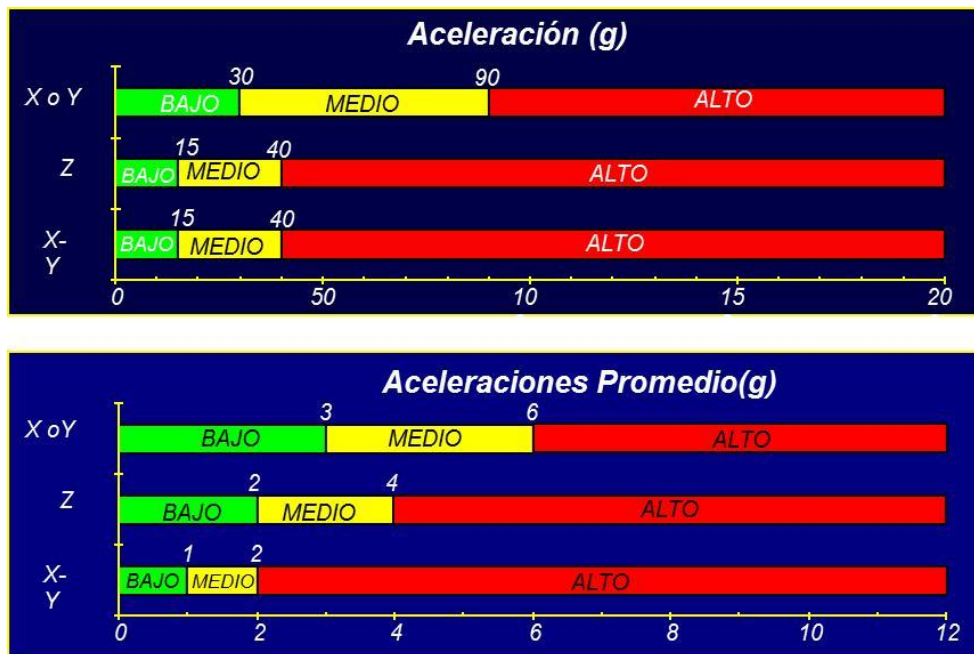
En la Tabla 4.6 presentada por la Compañía Schlumberger para las vibraciones laterales se observa que la escala de registro es de 0 a 6 gn-RMS, al igual que en las tablas anteriores de esta compañía se muestran los niveles de severidad por colores así como los valores de gn-RMS para cada uno de ellos además de los tiempos máximos permisivos en cada una de ellas.

Tabla 4.6 Tabla de Severidad de Vibraciones Laterales Compañía Schlumberger. (Schlumberger, 2009).

Vibración Lateral, g de RMS (Escala de medición: 0 a 6)		
g de RMS	Nivel	Criterio
0 a 1	Bajo	No hay problema con el tiempo
1 a 3	Medio	Más de 25 horas, riesgo medio de falla
3 < 6	Alto	Más de 12 horas, riesgo alto de falla
> 6	Severo	Más de 30 minutos, riesgo severo de falla

En esta tabla 4.7 presentada por la Compañía Halliburton, que tiene una forma más complicada de leerse debido a que manejan como anteriormente se menciona diferentes especificaciones para cada herramienta además de considerar dos factores diferentes, los picos y los promedios, se presenta en una forma cartesiana, en el eje horizontal para este caso particular presentado en la tabla la escala del eje va de 0 a 200g's, y en el eje vertical se encuentran 3 valores: "X" o "Y", "Z" y "X - Y". La barra que cruza muestra la severidad para cada eje.

Tabla 4.7 Tablas de Severidad de Vibraciones Laterales Compañía Halliburton. (Halliburton, 2009).



4.5.3 Axial

En esta tabla 4.8 se puede observar el mismo estándar utilizado para las mediciones laterales, por lo que la variación en su interpretación no existe para fines de la determinación de la severidad en la sarta de perforación y el aparejo de fondo.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Tabla 4.8 Tabla de Severidades de Vibraciones Axiales Compañía Baker Hughes. (Prieto, 2009).

Axial		
	g de RMS	Criterio
0	$0.0 < x < 0.5$	No hay límite de tiempo
1	$0.5 < x < 1.0$	
2	$1.0 < x < 2.0$	
3	$2.0 < x < 3.0$	
4	$3.0 < x < 5.0$	> 3 Horas
5	$5.0 < x < 8.0$	> 20 minutos
6	$8.0 < x < 15.0$	> 20 minutos
7	$15.0 < x$	> 20 minutos

En esta tabla 4.9 presentada por la Compañía Schulberger para las vibraciones axiales, se utiliza el mismo principio de las tablas anteriores de la Compañía B mostrando los niveles de severidad y los tiempos máximos permisivos para cada nivel, con la única diferencia de la escala de registro que va de 0 a 4 gn-RMS.

Tabla 4.9 Tabla de Severidades de Vibraciones Axiales Compañía Schlumberger. (Schlumberger, 2009).

Vibración Axial, g de RMS (Escala de medición: 0 a 4)		
g de RMS	Nivel	Criterio
0 a 1	Bajo	No hay problema con el tiempo
1 < 2	Medio	Más de 25 horas, riesgo medio de falla
2 < 3	Alto	Más de 12 horas, riesgo alto de falla
> 4	Severo	Más de 30 minutos, riesgo severo de falla

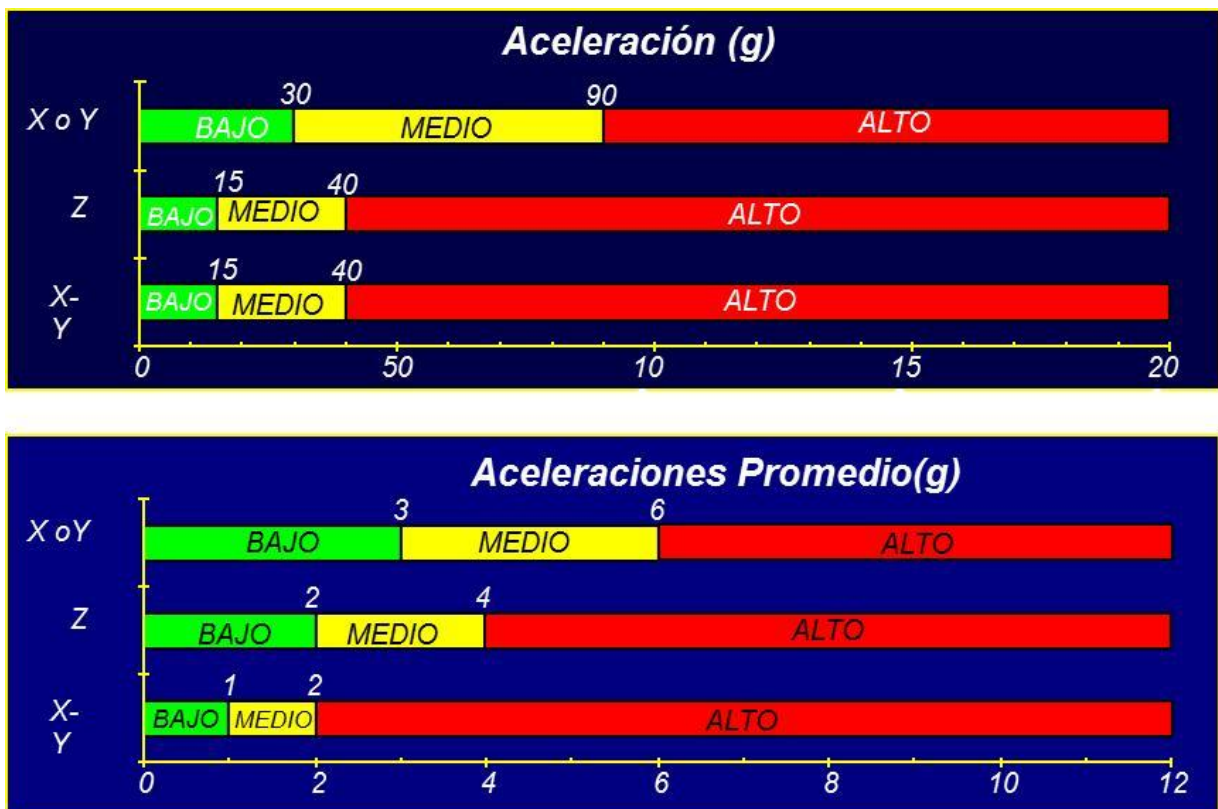
Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

En la tabla 4.10 mostrada por la Compañía Halliburton, utiliza el mismo principio que en su tabla para las vibraciones laterales, tanto en los factores que utiliza como en los parámetros para cada eje, cabe mencionar que existen varias tablas debido a que se basan en el tamaño de cada herramienta. Aquí solo mostraremos una de las muchas tablas que existen en para la interpretación de los datos obtenidos.

Tabla 4.10 Tabla de Severidades de Vibraciones Axiales Compañía Halliburton. (Halliburton, 2009).



Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

4.5.4 Tablas Comparativas de Interpretación de Mediciones de las Compañías de Servicio.

Vibración Torsional

Tabla 4.11 Tabla Comparativa de Vibraciones Torsionales. (Prieto, 2009).

	Nivel Medio	Nivel Alto	Nivel Severo
Compañía A	Nivel Amarillo (Nivel 3&4) 0.6 ≤ S1 ≤ 1.0 No hay tiempo límite	Nivel Rojo (Nivel 5&6) No hay tiempo límite 1 ≤ S1 < 1.2 5hr si S1 ≥ 1.2	S2 > 0.1, 1hr
Compañía B	Nivel Amarillo SS R 0.5 – 1.0 25 hr	Nivel Naranja SS R 1.0 – 1.5 12hr	Nivel Rojo SS R > 1.5 30 min
Compañía C	Nivel Naranja E.T. 25-50% 12 hr	Nivel Rojo E.T. 25-0% 30 min	Nivel Rojo E.T. es negativa Detener Perforación

Vibraciones Laterales y Torsionales

Tabla 4.12 Tabla Comparativa de Vibraciones Laterales y Axiales. (Prieto, 2009)

	Nivel Medio	Nivel Alto	Riesgo Severo
Compañía A	Nivel Amarillo (Niveles 3&4) Nivel sin límite 3 (2-3gRMS) 3hr nivel 4 (3-5gRMS)	Nivel Rojo (Niveles 5, 6 & 7) 20 min (5-15 gRMS)	N/A
Compañía B	Nivel Amarillo 25hr (1-3 gRMS)	Nivel Naranja 12hr (3-6 gRMS)	Nivel en Rojo 30 min (>6 gRMS)
Compañía C	Nivel Amarillo Nivel sin límite Picos: 30-90g Promedio: 3-6 g	Nivel Rojo 18 min o 150 eventos Pico X o Y > 90g Prom X o Y > 6 g	N/A

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

En la Figura 4.8 se muestra un espectro de las vibraciones que se pueden presentar en la perforación, se puede observar las fuentes de excitación con sus respectivas frecuencias y la respuesta que se verá en forma de vibración de en la sarta de perforación y todos sus componentes. Además se muestran las frecuencias mínimas y máximas donde se pueden presentar las vibraciones así como las RPM que se necesitan para alcanzar esas frecuencias.

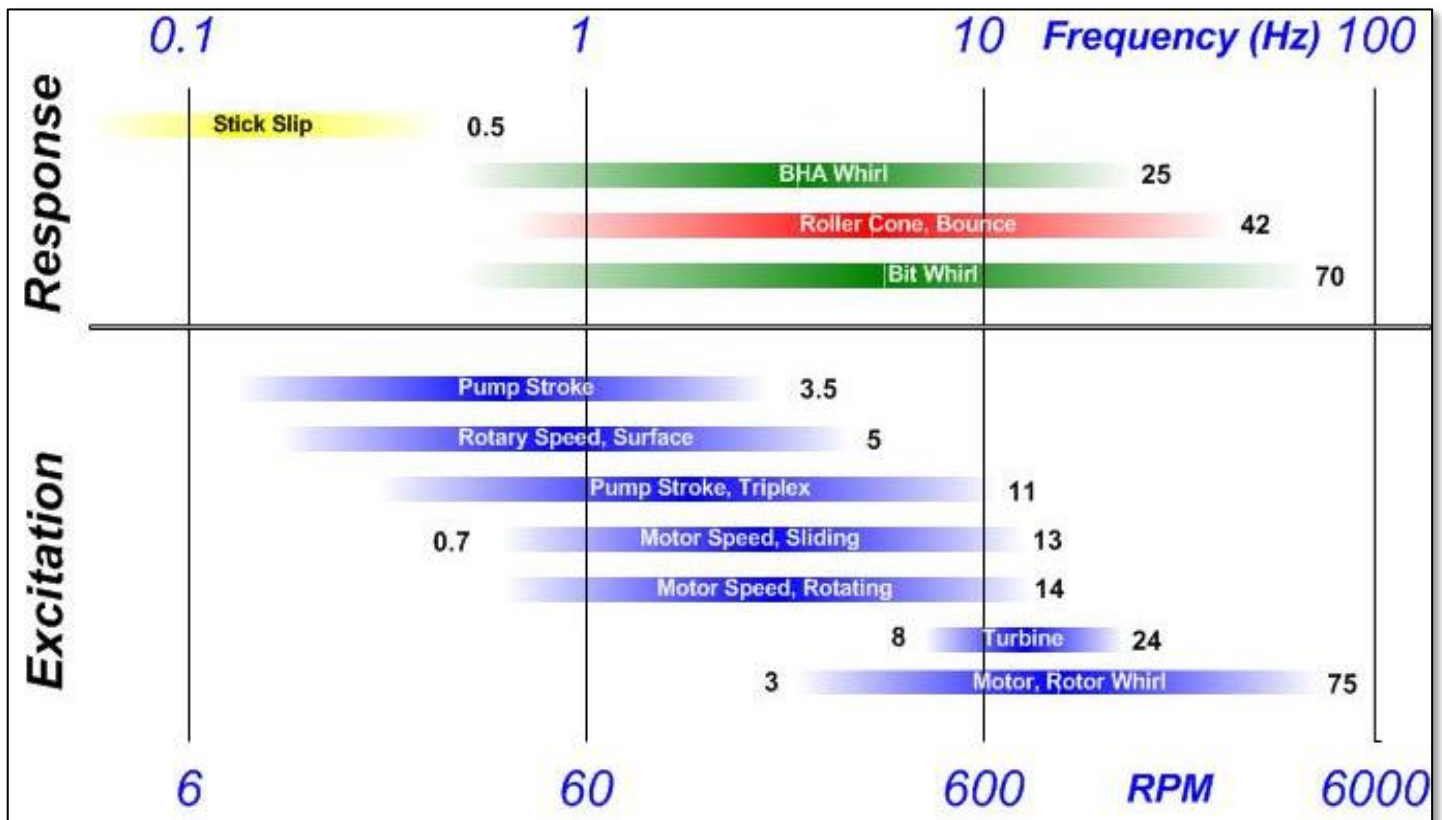


Figura 4.8 Espectro de Vibraciones en la Sarta de Perforación.
(Macpherson, 2010)

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

En los registros también se pueden observar los movimientos que se presentan en el aparejo de fondo en tiempo real como se muestra en la Figura 4.9.

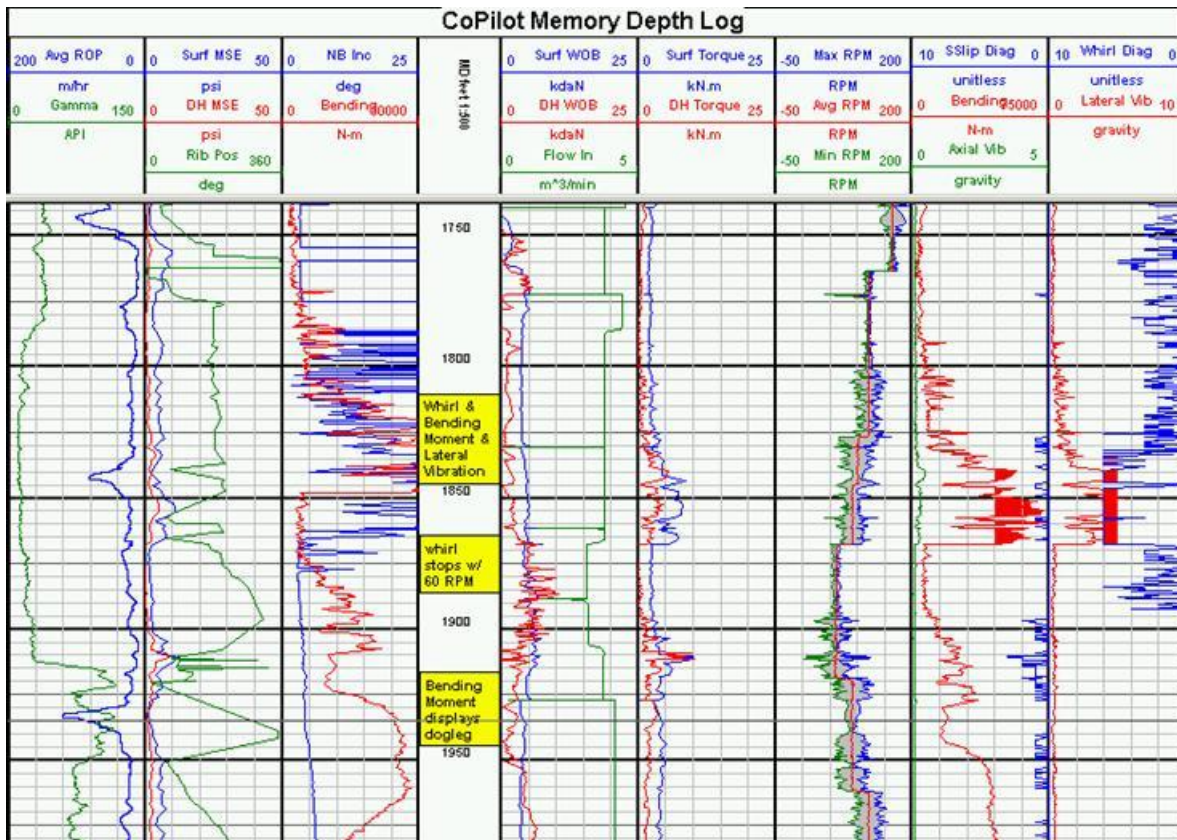


Figura 4.9 Registro MWD Pozo Ventura-7 Islas Sable (Canadá). (Presentación, Drilling Optimization & Advanced Vibration Management, Christian Linke, Baker Hughes INTEQ).

En este registro se pueden observar las lecturas tomadas por la herramienta MWD, podemos ver que a la profundidad de 1,755 pies ocurre una inestabilidad en el aparejo de fondo. Con el fin de corregir cierta inestabilidad se redujo las RPM y el gasto en el fondo del pozo. También a los 1,833 pies se presenta de forma potente el efecto de Giro (Whirl Backward), la perforación se detuvo y se reanuda en los 1,845 pies pero el efecto de Giro (Whirl) regreso rápidamente.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Por último se observa como el Whirl se detiene en los 1,867 pies solo después de haber reducido las RPM y el gasto de lodo. Además de que se observa un incremento en las vibraciones laterales, y un momento de flexión durante el evento del fenómeno de Giro (Whirl).

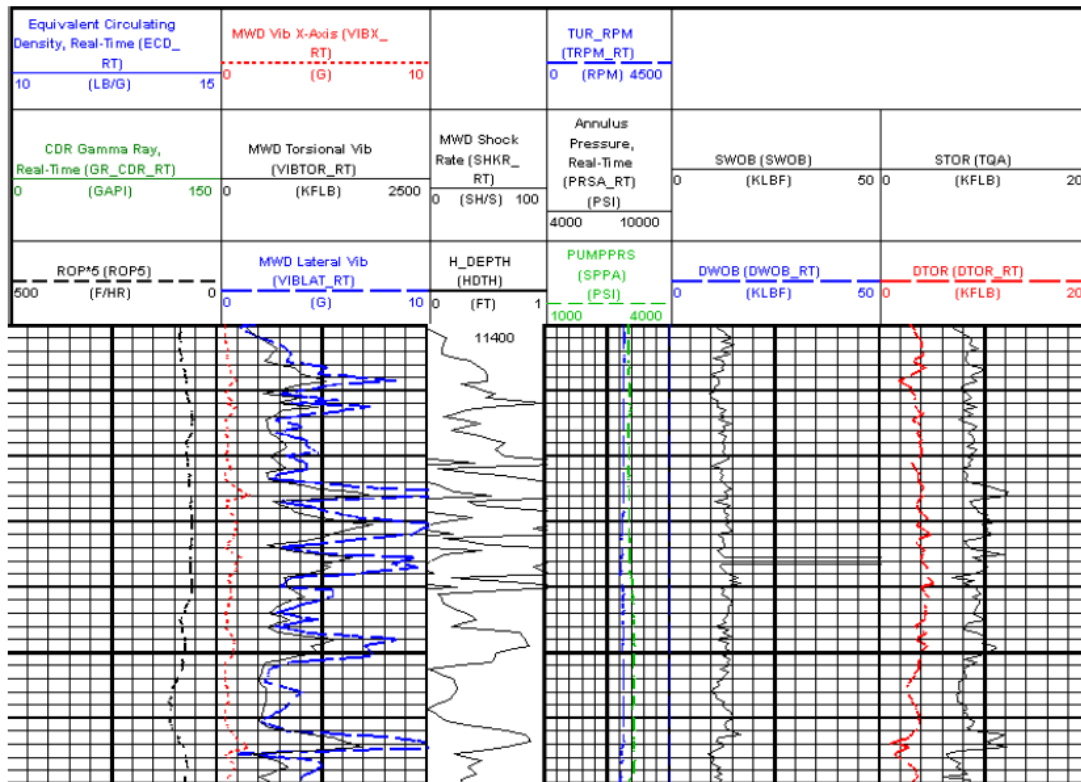


Figura 4.10 Registro MWD Pozo Perforado en Louisiana (EUA). (D.K. Ashley, 2001)

En la Figura 4.10 se puede observar una combinación de impactos laterales y torsionales lo cual provoca un giro en el aparejo de fondo de Perforación. Estos mecanismos de impactos son tan severos que incluso se puede vislumbrar un leve movimiento axial. La magnitud de la frecuencia de los impactos laterales y torsionales claramente muestra que el

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

aparejo de fondo de Perforación se mueve en una forma resonante en el pozo provocando así un estado de movimiento caótico. En un intento de corregir este mecanismo la barrena fue levantada del fondo y la perforación se detuvo por 30 segundos para eliminar la resonancia. Cuando se inició la perforación de nuevo las RPM y el WOB se fueron incrementando paulatinamente.

VIBRACIÓN TORSIONAL

Superficie:

- Pérdida de velocidad del top drive e incremento en el comportamiento errático del torque.
- Problemas en el ciclo de RPM/torque
- Problemas en la herramienta de dirección de ser el caso.
- Reducción e inconsistencias de la ROP.

Fondo del pozo:

- Incremento en el torque de fondo y un comportamiento errático.
- Incremento en las vibraciones torsionales del MWD.
- Incremento del Atascamiento-Deslizamiento.
- Las RPM del collar son mayores a las RPM en superficie.
- Señales del MWD débiles o intermitentes.

Post-run:

- Daño visible en la barrena.
- Daño en las conexiones debido al troque excesivo que se sufrió.
- Daños en la sarta de perforación, desconexiones y washouts.
- Daños en las herramientas MWD y LWD.

VIBRACIÓN LATERAL

Superficie:

- Incremento en el torque en superficie.
- Problemas en la herramienta de dirección de ser el caso.
- Reducción e inconsistencias de la ROP.

Fondo del pozo:

- Incremento en el torque del fondo del pozo.
- Choques de alta frecuencia detectadas (10-50 Hz).
- Incremento en las vibraciones laterales.
- Incrementos en las vibraciones torsionales y choques.
- Señales del MWD débiles o intermitentes.

Post-run:

- Daño grave en la barrena PDC.
- Fallas en las herramientas MWD y LWD.
- Herramientas gastadas en un solo lado, por ejemplo los estabilizadores y componentes del Aparejo de Fondo de Perforación.
- Aumento en el diámetro del agujero.

VIBRACIÓN AXIAL

Superficie:

- Grandes fluctuaciones en el WOB.
- Movimiento en el Top-Drive.
- Problemas en la herramienta de dirección de ser el caso.
- Reducción e inconsistencias de la ROP.

Fondo del Pozo:

- Incremento en las vibraciones axiales.
- Incremento en los choques.
- Señales del MWD débiles o intermitentes.

Post-run:

- Daño en la barrena, especialmente en los cortadores e insertos.
- Falla en las herramientas MWD y LWD.

Figura 4.11 Diagrama de Síntomas de Vibración Axial, Torsional y Lateral. (Megat, 2009)

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

4.6 Estatus de la Medición de la Vibración.

Hasta el momento no existe un estándar en la medición de las vibraciones en la industria petrolera, esto afecta principalmente a los 3 factores que se mencionan a continuación:

- Toma de lecturas.
- Procesamiento de las mismas.
- Presentación de la Información Interpretada.

En la industria petrolera se realiza el monitoreo de los mismos movimientos en el aparejo de fondo.

- Lateral, Axial, Torsional y Whirl.

Los datos que se arrojan en estas prácticas de medición no pueden compararse debido a los diferentes parámetros utilizados alrededor del mundo. Aunque los principios de medición son los mismos.

A diferencia de otras mediciones en el fondo del pozo, no hay un estándar industrial para el proceso y la interpretación de las vibraciones. Algunos de los problemas que se generan por la falta de un estándar son las siguientes:

- Las mediciones de vibraciones entre los diferentes lugares en el mundo que se ofrecen no se pueden comparar y no se sabe si las diferentes herramientas utilizadas detectan el mismo mecanismo de vibración o severidad de las mismas. Aunque es sabido que se miden los mismos movimientos.
- Las especificaciones de cada herramienta en el MWD no pueden ser comparadas ya que estas se basan en las definiciones de vibraciones que cada prestadora de servicio utiliza.

Todo esto nos lleva a decir que una estandarización en los sistemas de medición y de interpretación es necesaria para poder lograr una sinergia de los conocimientos adquiridos por las compañías de servicios en el mundo, y que el beneficiado en esto sea la industria y de manera especial el área de perforación donde la relación tiempo-costos es el punto clave para la viabilidad económica de un proyecto.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

Ejemplo:

Utilizando el registro de la figura se calcularán los niveles de vibración para cada una de las compañías mencionadas a lo largo del capítulo.

Fenómeno Vibratorio Torsional. (Stick/Slip)

En este caso se calcularán las severidades para el rango en el registro de tiempo de 13.7 a 13.9 horas (12 minutos) en los que es sometida a la herramienta a un rango de RPM máximos y mínimos amplio. Como se describió con anterioridad el fenómeno de Stick/Slip se caracteriza por fluctuaciones en las RPM's y el torque sobre la barrena.

Baker Hughes

$$S1 = \frac{Max\ RPM - Min\ RPM}{2 * Prom\ RPM}$$

Solución:

En el rango de 13.7 - 13.9 [hrs] se tendrá.

Max RPM = 400 [rpm]
Min RPM = 120 [rpm]
Prom RPM = 245 [rpm]

Sustituyendo:

$$S1 = \frac{Max\ RPM - Min\ RPM}{2 * Prom\ RPM} = \frac{400 - 120}{2 * 160} = \frac{280}{320} = 0.875$$

El valor 0.875 en tabla se encuentra que la severidad será de: **3**

Level	g_RMS.	Criteria
0	$0.0 \leq s_1 < 0.2$	No Limit
1	$0.2 \leq s_1 < 0.4$	
2	$0.4 \leq s_1 < 0.6$	
3	$0.6 \leq s_1 < 0.8$	No Limit
4	$0.8 \leq s_1 < 1.0$	
5	$1.0 \leq s_1 < 1.2$	> 5 hrs *
6	$1.2 \leq s_1$	> 1 hr.*
7	$s_2 > 0.1$	

Para Schlumberger la severidad será:

Se calcula con los picos máximos y mínimos de las vibraciones que en el rango 13.7 a 13.9 min serán

RPM máxima = 400

RPM mínima = 80

RPM promedio = 120

$$Severidad = \frac{(RPM_{max} - RPM_{min})}{2 * RPM_{Promedio}} = \frac{320}{2 * 120} = 1.33$$

Buscando el valor en la tabla de la compañía Schlumberger.

ATASCAMIENTO-DESLIZAMIENTO (STICK-SLIP) (Escala de medición: 0 a 200 RPM)		
SS	Nivel	Criterio
0 a 0.5	Bajo	No hay problema con el tiempo
0.5 a 1.0	Medio	Más de 25 horas, riesgo medio de falla
1.0 a 1.5	Alto	Más de 12 horas, riesgo alto de falla
> 1.5	Severo	Más de 30 minutos, riesgo severo de falla

Para la compañía Halliburton se utiliza el concepto definido por ellos de eficiencia torsional:

$$Eficiencia\ Torsional = \left(1 - \frac{(MaxRPM - MinRPM)}{2 * RPM_{Principales}}\right) * 100\%$$

Para el cual se utilizara la siguiente información:

RPM máxima = 400

RPM mínima = 80

RPM promedio = 120

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real

$$\begin{aligned}
 \text{Eficiencia Torsional} &= \left(1 - \frac{\text{MaxRPM} - \text{MinRPM}}{2 * \text{RPMPrincipales}}\right) * 100\% = \left(1 - \frac{400 - 80}{2 * 120}\right) * 100\% \\
 &= \left(1 - \frac{320}{240}\right) * 100\% = (1 - 1.33) * 100\% = -33.3\%
 \end{aligned}$$

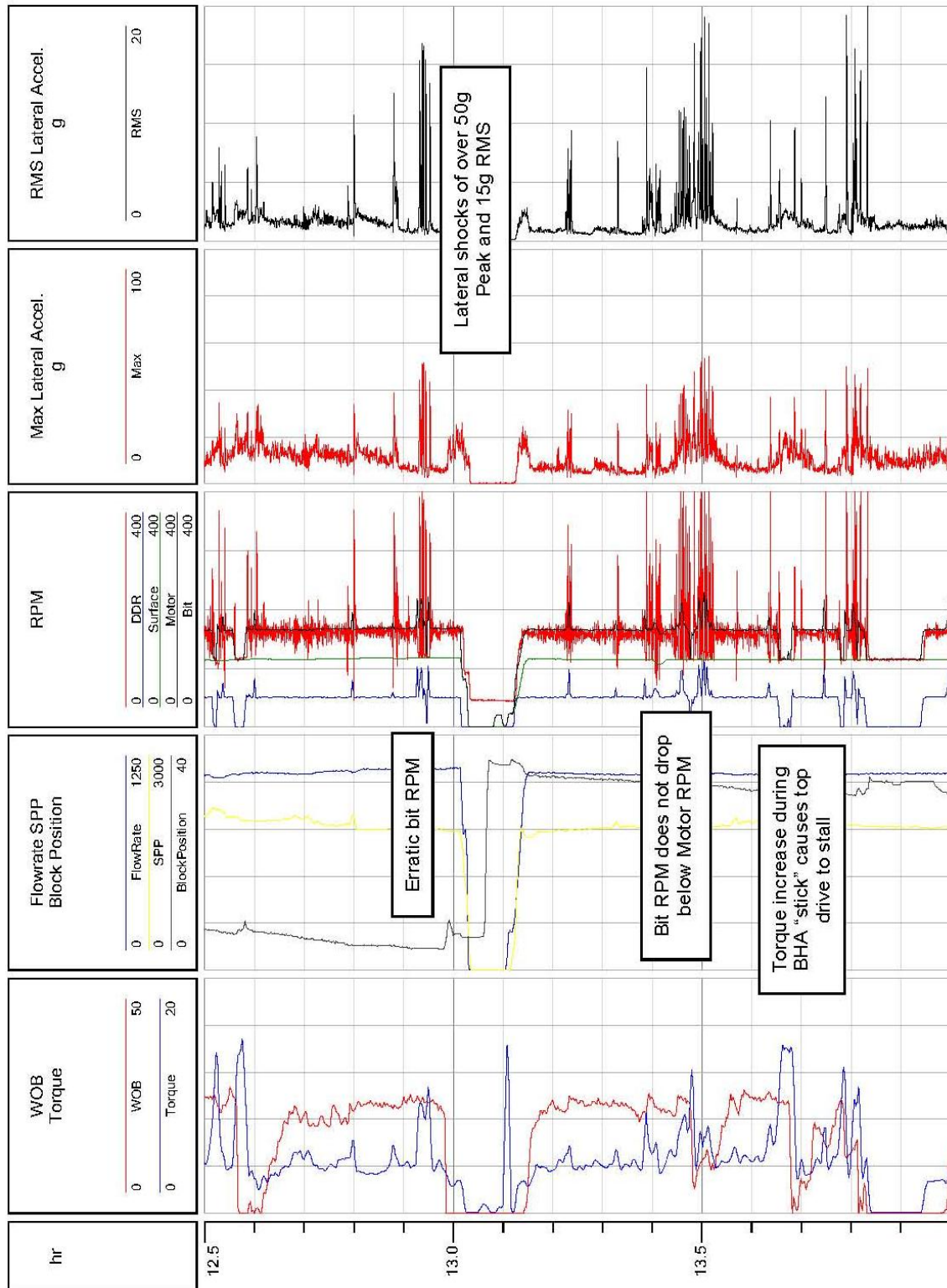
Limites de Eficiencia Torsional			
Riesgo	Eficiencia Torsional	Fluctuación de las RPM al % de las RPM principales	Limite
Bajo	100 - 50%	0 - 100%	No hay limite
Medio	50 - 25 %	100 - 150%	12 Hrs
Alto	25 - 0%	150 - 200%	30 Mins
Atascamiento	-ve %	200% +	Detienes la Perforación reinicias con diferentes parametros

Como se observa, el nivel de vibraciones al que se somete el equipo en el ejemplo, nos muestra que estos niveles de vibración se pueden definir como peligrosos para la sarta y sus componentes, también se observa como las diferentes compañías tienen diferentes criterios para medir las vibraciones, observando que para la compañía Halliburton lo mejor es detener la perforación y reiniciar con nuevos parámetros y que para la compañía Schlumberger estos niveles de vibración pueden ser soportados por 12 horas antes de que se presente una falla, esto nos indica los diferentes criterios que tiene cada una de las compañías y como cada una de ellas utiliza diferentes parámetros para definir los niveles de severidad de la vibración que se presenta en la sarta. Cabe señalar, que en este ejemplo se utilizaron las ecuaciones que cada compañía contempla para el cálculo del nivel de severidad de vibración en la sarta.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Medición e Interpretación de las Vibraciones en Tiempo Real



5 Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

Las vibraciones en la sarta de perforación y aparejo de fondo es algo con lo que la industria tiene que lidiar inevitablemente ya que estas se presentan en el 100% de los casos siendo dañinas en un gran número de ocasiones. El ideal en la industria es que en la parte del diseño del pozo y de los aparejos de fondo se pueda reducir al mínimo las vibraciones por no siempre es así por lo que el control de las vibraciones en tiempo real se ha vuelto parte fundamental en las operaciones de perforación, y su aplicación es de gran importancia.

El proceso de mitigación de las vibraciones para disminuir al máximo las fallas depende de varios factores a considerarse:

- Una planeación adecuada y un buen modelado.
- Monitoreo eficiente y mitigación.
- Análisis posterior a la perforación.
- Un entendimiento de los fenómenos analizados y un aprendizaje significativo de las experiencias observadas.

Todos estos pasos pueden ser seguidos o no, dependiendo de cada compañía de servicio y de los operadores responsables en turno; Un buen equipo de monitoreo en tiempo real es vital y juega un papel importante en la implementación de planes para la mitigación de vibraciones.

El diseño de herramientas para la mitigación de las vibraciones ha incrementado su desarrollo en los últimos años, el principal motivo de todo esto es poder controlar las frecuencias que provocan los fenómenos vibratorios en el aparejo de fondo de Perforación. El control de las vibraciones a través de la modificación del aparejo de fondo, de la elección de los parámetros operativos una constante vigilancia a estos tipos de fenómenos han contribuido a ser más eficiente la perforación y así poder optimizar costos operativos. Las aplicaciones de este tipo de métodos para controlar las mediciones se han incrementado a lo largo del planeta como lo muestra la siguiente figura.



**Figura 5.1 Ubicación global de Tecnologías Aplicadas a Reducir las Vibraciones.
(J.R. Bailey, 2010)**

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

5.1 Control y Reducción de las Vibraciones.

Diversas compañías de servicios en el mundo cuentan con programas de control y reducción (mitigación) de las vibraciones en tiempo real, en el desarrollo de esta sección se mostrarán algunos de los lineamientos y protocolos que siguen algunas prestadoras de servicio para el control de estos fenómenos vibratorios.

5.1.1 Axial

Cuando la severidad de la vibración axial se encuentra en niveles normales y aceptables los cuales no causan daño al aparejo de fondo de perforación ni al equipo electrónico; se le puede considerar con una severidad de nivel bajo lo cual no requiere acción alguna para mitigarla.

El siguiente nivel de severidad se puede presentar y después de 15 minutos continuos perforando en el nivel de severidad alcanzado, se tratará como una severidad mayor lo cual ya requerirá de un proceso de mitigación.

Procesos de Mitigación en niveles altos de severidad en vibraciones axiales.

- Paso 1

Opción 1: Permanecer en el fondo, incrementar el WOB 4-10 Klb (2-5 ton.) y disminuir las RPM en un rango de 10 a 50.

Opción 2: Permanecer en el fondo, disminuir el WOB 4-10 Klb (2-5 ton.) e incrementar las RPM en un rango de 10 a 50.

- Paso 2

Repetir el paso 1 (una sola vez). Si los límites del WOB y las RPM para el aparejo de fondo de la sarta de perforación y la Barrena se conocen, ir al paso 3.

- Paso 3

Levantar del fondo y detener la rotación del equipo. Reiniciar la perforación con la mitad de las RPM originales e incrementar el WOB de 2 a 5 Klb (1 a 2 ton) por encima del original.

Regresar a los parámetros originales de perforación con las RPM y WOB establecidas.

Notas:

Las vibraciones axiales con barrenas PDC pueden indicar un daño en la barrena o un severo desgaste en la estructura de corte. Por el incremento del WOB y/o la disminución de las RPM, las oscilaciones torsionales pueden ocurrir con una buena barrena PDC.

Las vibraciones axiales comúnmente son causadas por cambios en la litología o fracturas cuando la barrena empieza a cortar en un nuevo patrón. Las Vibraciones axiales con barrenas tricónicas pueden provocar problemas en la barrena.

La opción 1 se utiliza preferentemente cuando se usa barrenas tricónicas para eliminar el giro (whirl) de la barrena.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

Vibraciones Axiales

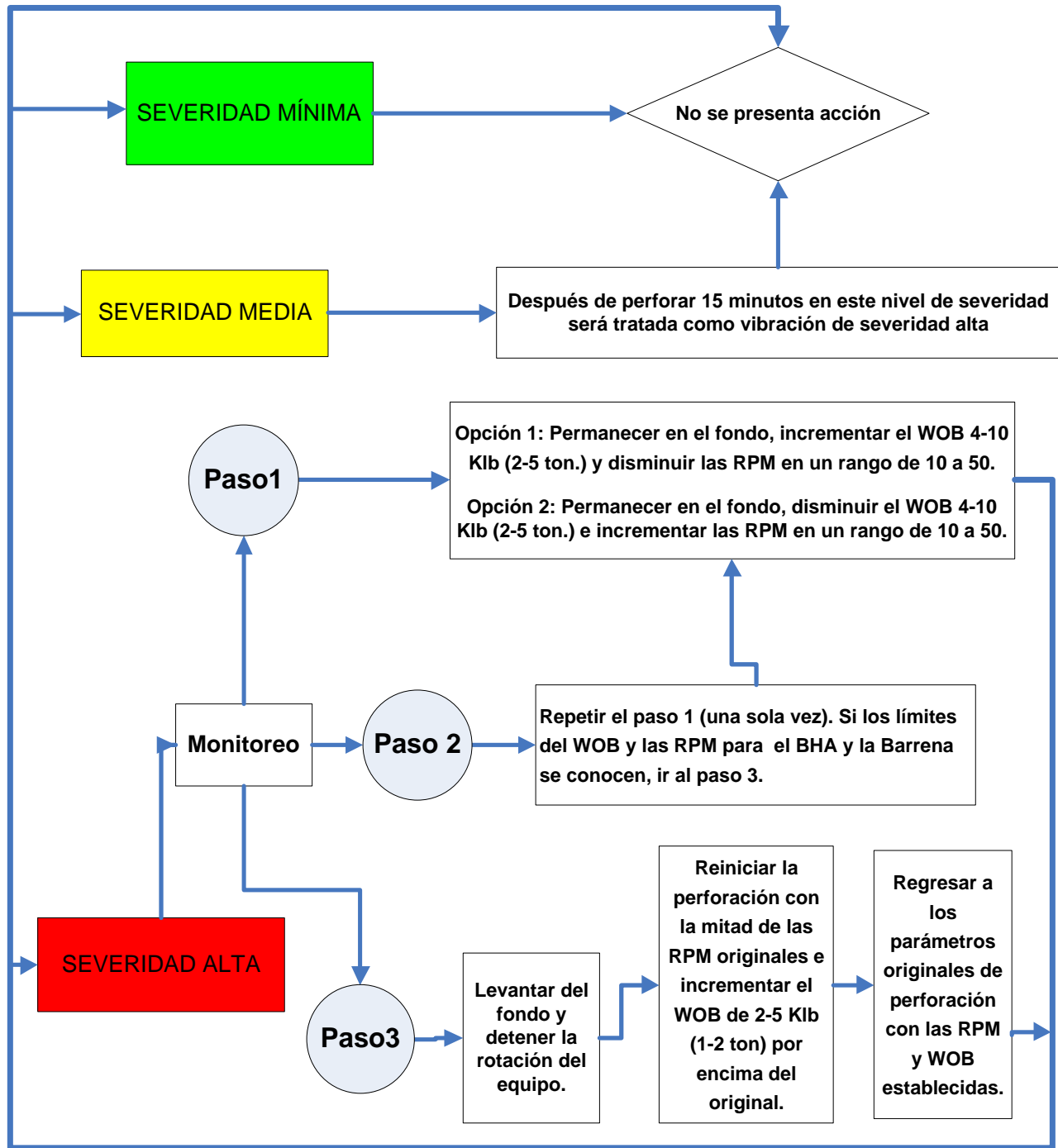


Figura 5.2 Diagrama de Flujo del Control de Vibraciones Axiales. (Prieto, 2009).

5.1.2 Lateral (Giro de la Barrena y giro del aparejo de fondo)

Cuando la severidad de la vibración lateral se encuentra en niveles normales y aceptables los cuales no causan daño al aparejo de fondo de perforación y al equipo electrónico; se le puede considerar con una severidad de nivel bajo lo cual no requiere acción alguna para mitigarla.

En el momento en que las vibraciones laterales alcanzan un nivel de severidad intermedio y continúan por 15 minutos se les puede considerar de una vibración de severidad mayor sin ser alta aún.

Procesos de Mitigación en niveles de severidad dañinos en vibraciones laterales.

- Paso 1

Se tiene que permanecer en el fondo y reducir las Revoluciones por Minuto (RPM) por intervalos de 10-50, esta es la mejor opción especialmente cuando se perfora en pozos con altos ángulos, donde la presencia del giro (Whirl) es menos estable. Seguir monitoreando la actividad, hasta llegar a niveles bajos.

- Paso2

Levantar del fondo y detener la rotación. Reiniciar la perforación con RPM's oscilantes de entre 40-70 ciclos por minuto. Regresar la barrena al fondo e incrementar paulatinamente el peso sobre la barrena (WOB) hasta llegar al intervalo de interés, (eliminando el atascamiento-resbalamiento (Stick-Slip) y Buckling). Posteriormente incrementas las revoluciones por minuto hasta maximizar la ROP, este es el mejor paso para detener el giro (Whirl) en pozos con bajos ángulos, donde la presencia del giro (Whirl) es más estable.

Nota:

La vibraciones laterales puedes ser muy dañinas e incluso destructiva para el aparejo de fondo de Perforación por lo cual requieren de atención inmediata.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

Las vibraciones laterales están asociadas con el giro (Whirl) y el momento de flexión en la sarta de perforación y también con el comportamiento de la resonancia en la sarta y la velocidad crítica de rotación.

El giro (Whirl) es un fenómeno que se presenta de manera muy estable y puede ser identificado cuando se está en presencia de un decremento en el ROP y un incremento en las vibraciones, un torque en niveles altos y mantenidos, y con la ausencia del atascamiento-deslizamiento (Stick-Slip).

Hay que tener precaución cuando se esté perforando en formaciones que se deslavan. Ya que cuando se crea un agujero de mayor diámetro al establecido este puede causar la pérdida de estabilización en el pozo, resultando en la creación de vibraciones laterales muy fuertes. *Práctica* (Disminuyendo las RPM a 50 y controlando la ROP).

Vibraciones Laterales

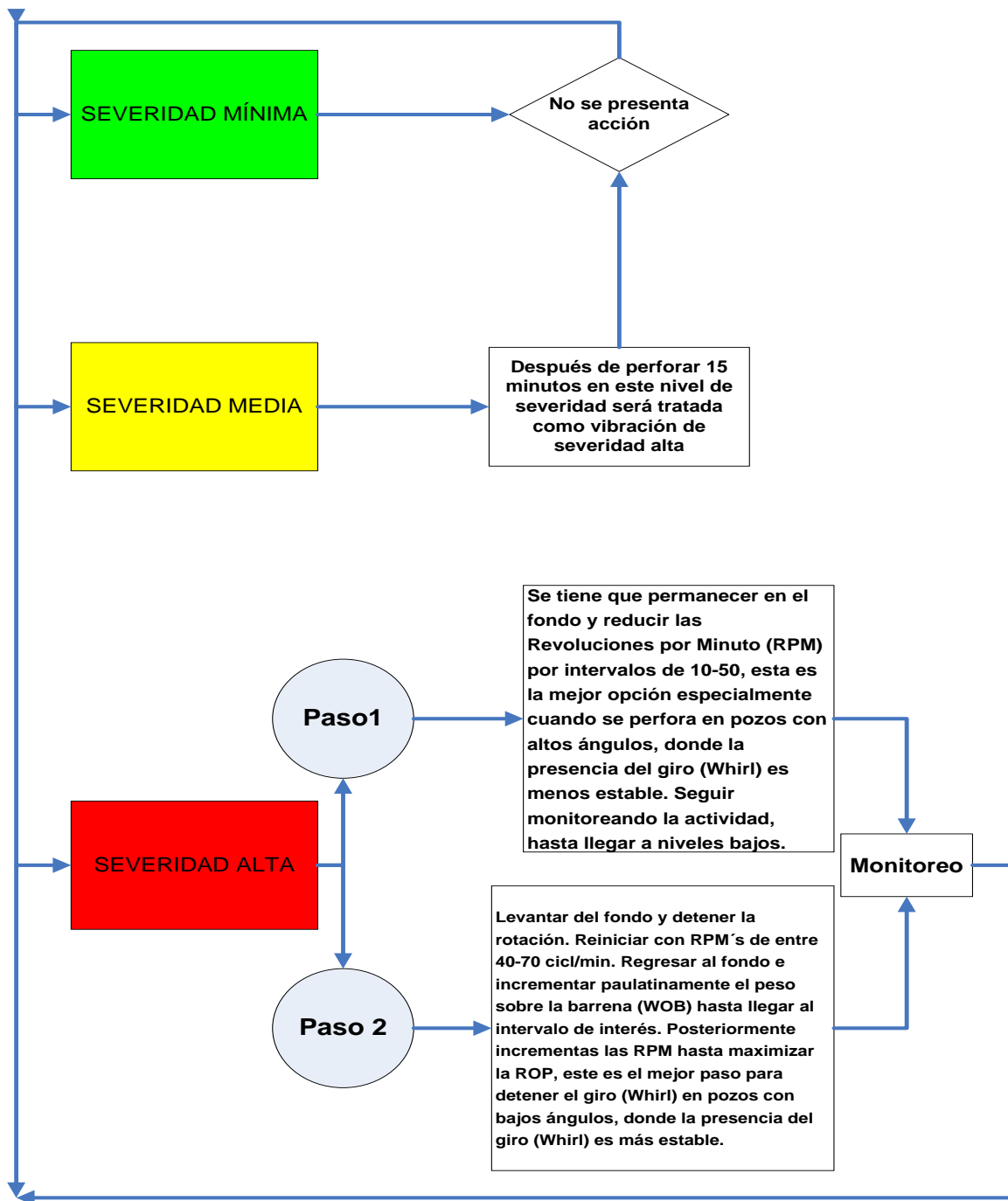


Figura 5.3 Diagrama de Flujo del Control de Vibraciones Laterales. (Prieto, 2009).

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

5.1.3 Torsional (Stick-Slip)

Cuando la severidad de la vibración de Stick-Slip se encuentra en niveles bajos no se debe tomar acción en contra de este fenómeno, de hecho aunque el nivel de vibraciones sea un poco elevado esto no significa que se deba de controlar por que se ha demostrado que niveles moderados de vibración torsional son deseables para optimizar el ROP en barrenas PDC mientras se perforan formaciones duras, como la calcita y carbonatos duros.

Cuando el nivel aumenta y ya no es beneficioso para la operación de perforación se deben tomar acciones inmediatas como las siguientes.

Procesos de Mitigación en niveles de severidad dañinos en vibraciones torsionales.

- Paso 1:

Incrementar las RPM en un rango de 10 a 50 y el WOB (Peso sobre la Barrena) en un rango de 2 a 5 Klb (1 o 2 ton.).

- Paso 2:

Repetir el paso anterior a menos que se conozcan los límites de WOB y RPM para la barrena y el aparejo de fondo. Levantar del fondo y limpiar la sección del agujero y reiniciar la perforación con menos RPM y WOB.

Notas: Perforar en niveles muy altos de este fenómeno puede indicar la presencia de una rotación en dirección contraria lo cual daña de manera intensa a los componentes de la sarta de perforación, por lo tanto nunca hay que seguir perforando en niveles altos de Stick-Slip.

Cuando el fenómeno de Stick-Slip se presenta mientras perforamos con una barrena triconica se comúnmente se debe al contacto que existe con las paredes del pozo, escariar el agujero puede ser de gran ayuda para mejorar las condiciones de perforación y este fenómeno también puede ser indicador de fallas en la barrena.

Para evitar el sacrificio del ROP con barrenas PDC muy agresivas, la perforación puede continuar en niveles medianamente altos de vibración pero en intervalos de tiempo cortos. Hay que disminuir las RPM si el Stick-Slip está causando contactos con la pared del pozo, por lo tanto es mejor perforar con bajos niveles de Stick-Slip y bajas RPM.

El Stick-Slip provocado por el torque que proporciona los motores de lodo parecen ser menos dañinos para los componentes de la sarta de perforación, las condiciones del fondo y la ROP pueden ser mejoradas aumentando las RPM en el fondo de la sarta de perforación y del motor, hay que tener cuidado con el flexión de los motores ya que cuando se manejan RPM altas en la sarta de perforación puede que cause vibraciones laterales indeseables.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

Vibraciones Torsionales

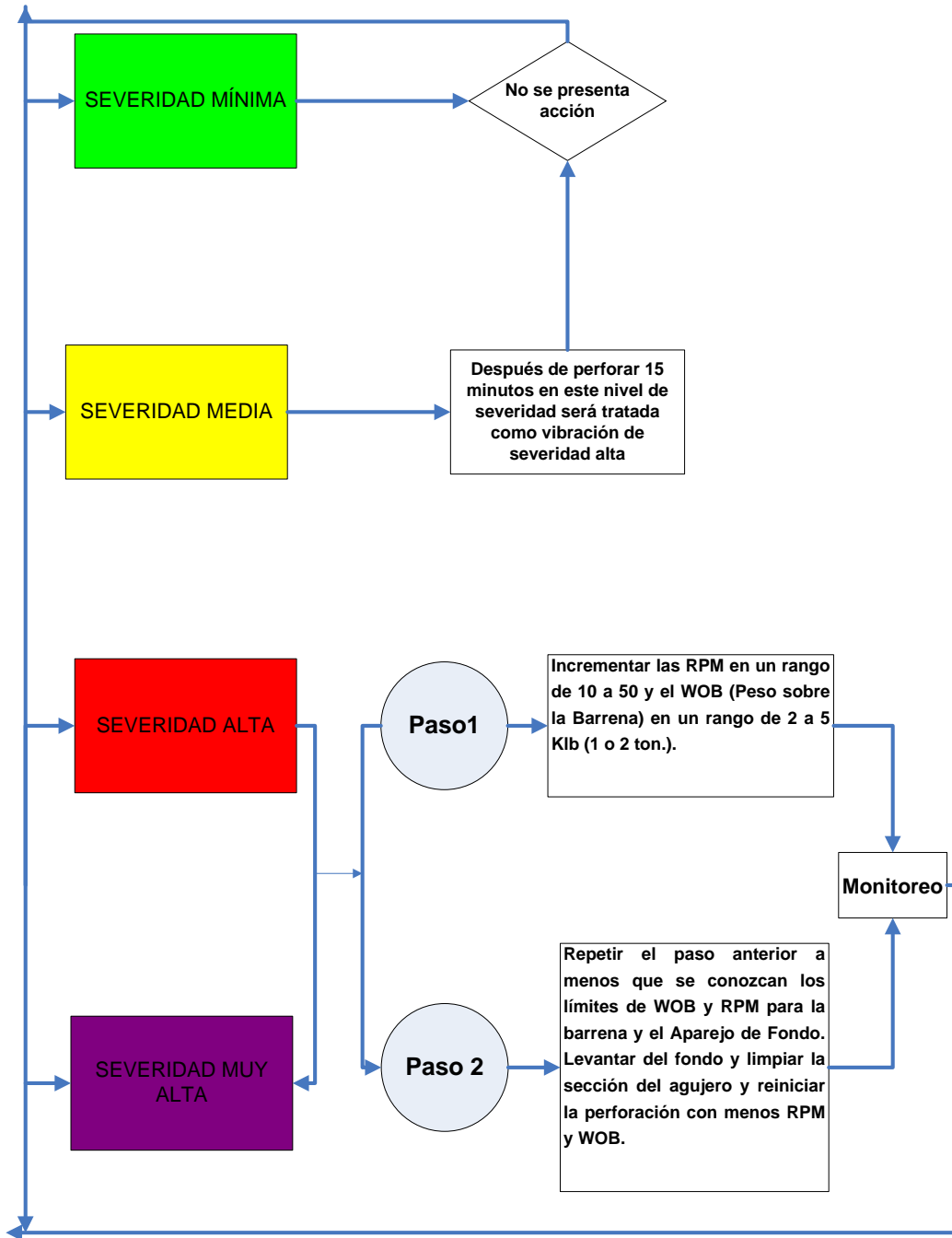


Figura 5.4 Diagrama de Flujo del Control de Vibraciones Torsionales. (Prieto, 2009).

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

Aquí podemos observar como otra compañía de servicios realiza el control y reducción de las vibraciones.

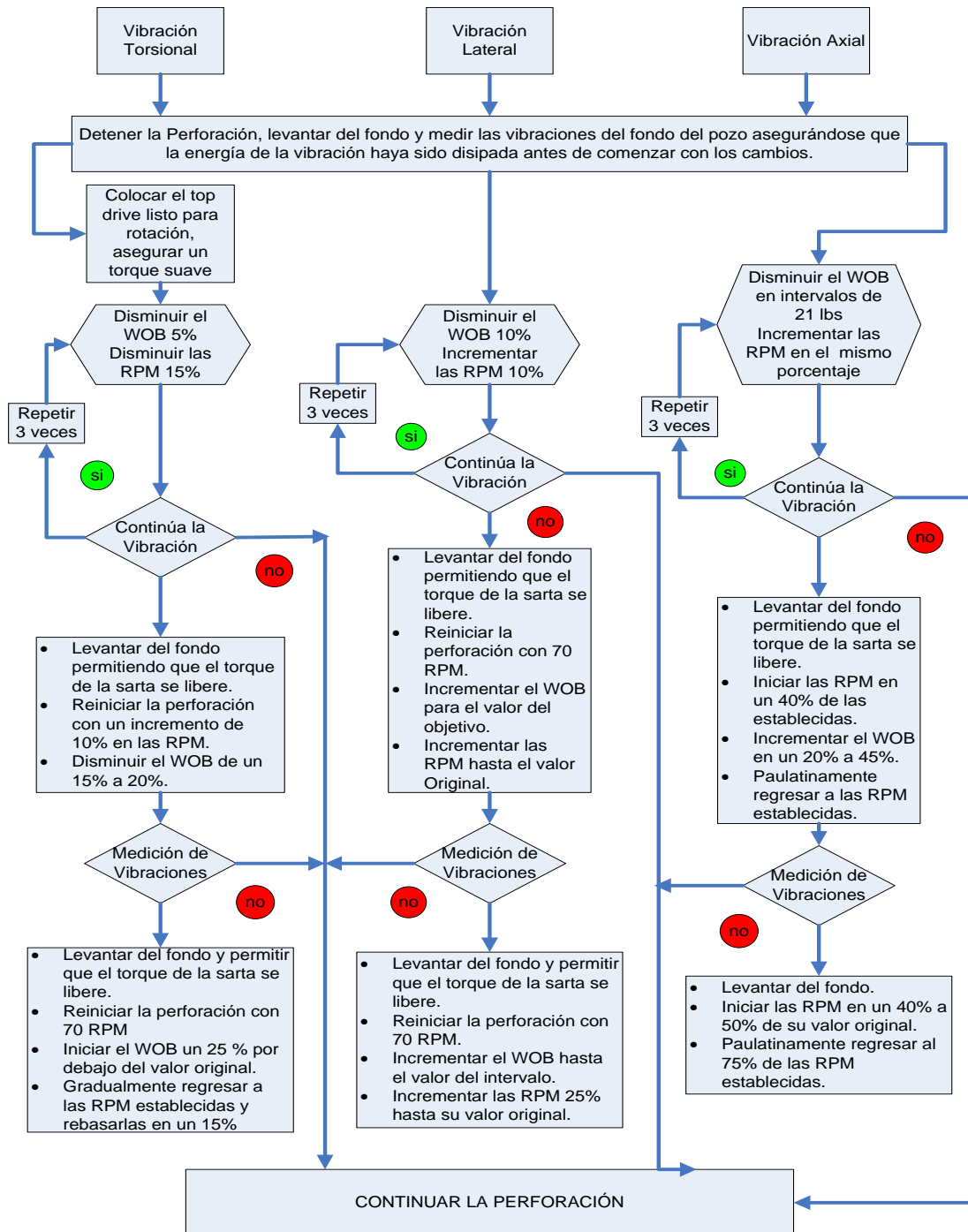


Figura 5.5 Diagrama de Flujo del Control de Vibraciones. (Schlumberger, 2009)

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

Podemos observar como cada una de estas compañías tienen metodologías diferentes para el control de las vibraciones, aunque los parámetros a controlar y monitorear son los mismos, el manejo de estos es diferente en cada compañía, podemos observar como en los primeros diagramas de flujo, la compañía maneja incrementos y decrementos puntuales para el control de la vibración, mientras que en la compañía siguiente en sus diagramas, manejan la posibilidad de manejar los incrementos y decrementos en manera porcentual de valores previamente definidos, además de que las severidades en cada compañía se maneja de forma diferente, por lo tanto la implementación de cada uno de estos programas será dependiendo de las situación y por obvias razones de que compañía este operando en el pozo.

5.1.4 Acciones recomendada por el API RP 7G para mitigar las Vibraciones.

- Stick-Slip:

Se debe reducir el WOB e incrementar las RPM, tratar de considerar una barrena menos agresiva, modificar la lubricidad del lodo, reducción del arrastre de los estabilizadores (cambiar de diseño y numero de aletas, uso de escariadores), ajustar la posición de los estabilizadores y adicionar sistema de rotación con retroalimentación.

- Giro de la sarta de Perforación (Whirl):

Levantar la barrena del fondo y detener la rotación, después reducir la RPM, evitar el exceso de peso en los Drill Collar 1.15 del peso de WOB a 1.25 del WOB, usar un aparejo empaquetado, reducir el arrastre de los estabilizadores, ajustar la posición de los estabilizadores, modificar las propiedades del fluido de perforación y pensar en la utilización de un motor de fondo para continuar perforando.

- Giro en la Barrena (Whirl):

Levantar la barrena del fondo y detener la perforación, después reducir las RPM e incrementar el WOB, considerar un cambio de barrena (anti-whirl), usar RPM lentas cuando

se escarea, utilizar estabilizadores en el aparejo de fondo con medida completa de diámetro cerca de la barrena o del escariador.

- Salto de Barrena:

Ajustar el WOB y las RPM, considerar cambio del estilo de barrena, cambiar longitud del aparejo de fondo.

5.2 Parámetros Adicionales para mejorar el control de las vibraciones.

La primera acción de defensa para evitar el daño que es producido por las vibraciones en el aparejo de fondo de la sarta de perforación incluye los límites técnicos y el éxito de la excelencia operacional dentro de las consideraciones durante la planeación. Sin embargo el proceso de control de la vibración actual en la fase de planeación es limitado, ya que solo un método es utilizado, este método tradicional no permite mucha libertad en el diseño, se limita a la consideración de muchas variables que pudieran ser útiles en el tratamiento sobre de vibraciones y no permite más opciones por parte de los diseñadores del pozo. El método tradicional también elimina la idea de conseguir una Tasa de perforación deseada con el sistema actual o preliminar sistema. El enfoque tradicional emplea los siguientes pasos:

- Análisis del comportamiento del sistema de vibración sobre rangos específicos de velocidad de rotación y peso sobre la barrena.
- Determina las regiones de velocidad crítica (CSR) del sistema.
- Optimiza los parámetros de peso sobre la barrena y la velocidad de rotación, dependiendo de la función objetivo.
- Desarrollo de lineamientos de control de la vibración para evitar trabajar en las regiones de velocidad crítica (CRS).

Mediante el análisis de parámetros específicos que afectan la vibración en la sarta de perforación, aislando sus efectos y separándolos de otros parámetros del sistema de

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

perforación, estableciendo los parámetros completos del sistema como una constante excepto por el parámetro a ser analizado; y el efecto del parámetro analizado en el proceso de control de la vibración puede ser observado. Esta metodología provee alternativas al enfoque tradicional de optimización del peso sobre la barrena y la velocidad de rotación o el cambio en la estructura del aparejo de fondo de la sarta de perforación. La influencia de la densidad del fluido de perforación, el ángulo de inclinación del agujero y el modelo reológico del fluido de perforación sobre la vibración de la sarta de perforación pueden ser considerados como parámetros potenciales para ser analizados.

- Los cambios sugeridos para esta metodología de control de la vibración son:
- Un pequeño cambio en la densidad del fluido de perforación (± 0.2 ppg).
- Un cambio importante en la densidad del fluido de perforación.
- Un cambio en las propiedades del fluido de perforación, buscando el cambio de la Viscosidad Plástica (VP) y el punto de cedencia (YP).
- Un cambio en el modelo que gobierna la reología usado en el fluido de perforación.
- Un cambio en el valor del troque sobre la barrena.
- Un cambio en la inclinación del agujero por el cambio en Índice de dificultad Direccional (DDI).

En esta metodología se consideran diferentes premisas:

Las simulaciones de este modelo se realizaron analizando el modelo dinámico de la sarta de perforación en un estudio de respuesta de frecuencia forzada, el cual es una técnica de análisis ingenieril usada para resolver las frecuencias de resonancia de la sarta de perforación (Samuel et al 2006).

También se considera que el torque creado es resultado de la fricción de la sarta de perforación con el fluido de perforación y la pared del agujero.

Este método usa una solución no lineal de elemento finito el que incluye contacto-fricción intermitente, desplazamiento finito, flotación y otros efectos que ocurren mientras se perfora.

- Reconfiguración del aparejo de fondo.

Este es otro método de mitigar las vibraciones en tiempo real, su principio se basa en la utilización de “Índices de Vibración” los cuales son calculados y mostrados en una pantalla a partir de una frecuencia de respuesta a base de vectores. Comparando los valores obtenidos a través de los índices de vibración del aparejo de fondo seleccionado, se podrá obtener una configuración óptima la cual muestre valores bajos de este índice de vibración, por lo cual se determinara que el aparejo de fondo con los valores más bajos, será el menos propenso a las vibraciones sobre los rangos operativos previamente estudiados y los cuales causaban vibración.

Los “Índices de Vibración” son utilizados para evaluar y desplegar los resultados de modelos dinámicos, para cada patrón de vibración existen varios valores, mediante los cuales podemos representar el nivel de vibración que existe en el aparejo de fondo.

Este método puede ser aplicado para la mitigación de vibraciones que sufre un pozo durante su vida de operación. Por ejemplo, la perforación de un pozo se puede volver lenta e ineficiente, esto surge a partir de altas vibraciones, en este caso un estudio de la mitigación de la vibración mientras se perfora, puede conducir a una mejor selección del aparejo de fondo en el siguiente viaje, en este tipo de casos los beneficios son inmediatos ya que la reducción en la vibración es tangible y casi inmediata. Estas modificaciones en el aparejo de fondo, pueden darse en la selección de estabilizadores para el nuevo viaje o en su defecto el cambio de componentes del aparejo de fondo, cabe mencionar que este tipo de metodologías se aplican en campos o pozos con estudios y análisis previos de este fenómeno, ya que es necesario conocer las condiciones a las que se enfrentara el aparejo de fondo.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

5.3 Acoplamiento de la Vibraciones

El Stick-Slip y Whirl son fenómenos vibratorios causantes de numerosos problemas durante la perforación, por ejemplo:

- Baja Velocidad de perforación (ROP).
- Fallas en de la Herramientas.
- Inestabilidad.

Produce fallas en los componentes de la sarta de perforación, como son los sistemas Rotativos RSS y las herramientas de medición durante la perforación (MWD), pueden resultar en importantes horas de tiempo no productivo (NPT) durante el viaje de salida y entrada de la sarta de perforación para reemplazar el equipo dañado. En aplicaciones de alto riesgo y alto costo, como son las Aguas Profundas o Perforación de Alcance Extendido, el tiempo no productivo asociado con las vibraciones en el fondo pueden ser un factor clave en determinar si el desarrollo de un campo será económicamente exitoso. Aunque un mejoramiento significativo fue logrado en décadas pasadas en la reducción de las vibraciones en el fondo, la industria de aceite y gas está constantemente combatiendo para lograr un desarrollo consistente en todo tipo de aplicaciones.

Podemos definir nuevamente que, Stick-Slip se refiere a la fluctuación de la velocidad de rotación del aparejo de fondo de la sarta de Perforación (BHA), esto se caracteriza por un periodo sucesivo de una fase de atascamiento donde la barrena se detiene y una fase de deslizamiento donde la velocidad de rotación se incrementa mucho más que la velocidad angular de la barrena y que del resto de la sarta de perforación. El Whirl (Giro) es un fenómeno vibratorio caracterizado por una severa vibración lateral que puede ocurrir en la barrena y/o en el aparejo de fondo. En base a la experiencia de campo, excesivos efectos de Stick-slip o Whirl puede dañar los componentes del aparejo de fondo en cuestión de minutos o segundos, si no se atiende rápidamente. El problema del perforador aparece cuando incrementando el peso sobre la barrena (WOB) induce el efecto de Stick-Slip mientras que incrementando en las (RPM) induce el Whirl. Si se mantiene el peso sobre la barrena y la

velocidad de rotación dentro de perfiles bajos se reduce la vibración pero esto impacta negativamente en la Velocidad de perforación. Como resultado de esto las operaciones de perforación sufren de cualquiera de los dos casos, baja tasa de perforación (ROP) o experimenta altas tasas de perforación pero con presencia vibración severa, este ultimo puede causar enormes problemas incluyendo daño a la barrena, fallas en las herramientas RSS, MWD y LWD, inestabilidad y pobre calidad en el agujero, el dilema es más evidente cuando se perfora través de formaciones duras y/o abrasivas.

5.3.1 La Zona de Condiciones Óptimas.

El desafío que se presenta es como maximizar la Tasa de Perforación (ROP) mientras se mantiene estable la barrena y el aparejo de fondo de la sarta de Perforación (BHA). Una nueva búsqueda propone fuertemente que la relación inversa del problema está relacionada con la tendencia de la Sarta de Perforación en acoplar los fenómenos de Stick-Slip y Whirl. Este acoplamiento es inducido por una inapropiada selección de la barrena y las interacciones adversas entre la Barrena y el aparejo de fondo de la Sarta de Perforación. Para una determinada barrena y roca, los valores críticos de Peso sobre la barrena y velocidad de rotación causantes del Stick-Slip y Whirl pueden ser determinados asumiendo que otras condiciones de perforación son conocidas y ajustadas. Graficados en un plano cartesiano (Figura 5.6), en el eje de las abscisas encontramos a la Velocidad de Rotación y en las ordenadas el peso sobre la barrena (WOB), estos valores críticos representan los límites de los parámetros estables de perforación. Otros límites importantes que se incluyen en la gráfica son:

- Torque máximo, limitado por la capacidad del equipo de perforación.
- Tasa de penetración mínima, establecida por el operador.
- Peso sobre la barrena máximo, limitado por el efecto de pandeo y el control direccional.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro; J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

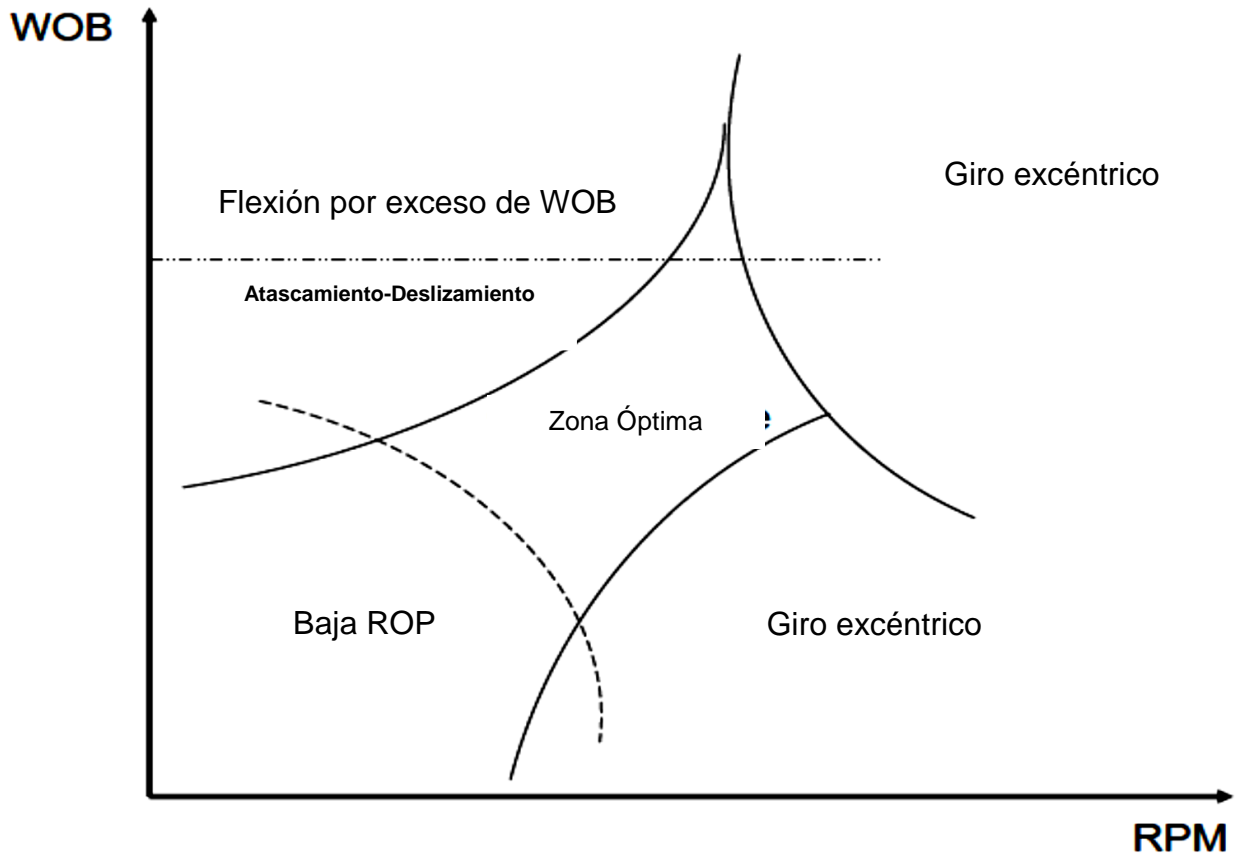


Figura 5.6 Declinación esquemática de la Zona Óptima. (Xianping, 2010)

Estos límites en conjunto definen un dominio cerrado en la gráfica de peso sobre la barrena y RPM. Este espacio se ha denominado como la “Zona de Condiciones óptimas”. Los parámetros de perforación en la Zona de condiciones óptimas teóricamente garantizan estabilidad en el pozo. La amplitud de la Zona de condiciones óptimas depende de la barrena y las propiedades mecánicas de las rocas que se perfora. Sin embargo la dinámica de la Sarta de perforación reduce la zona de condiciones óptimas significativamente por la creación de las interacciones entre la barrena y el aparejo de fondo de la sarta de perforación, en casos extremos, estas interacciones pueden empujar los límites de Stick-Slip y Whirl a cruzarse, eliminando completamente la zona de condiciones óptimas (Figura 5.7). En esta situación,

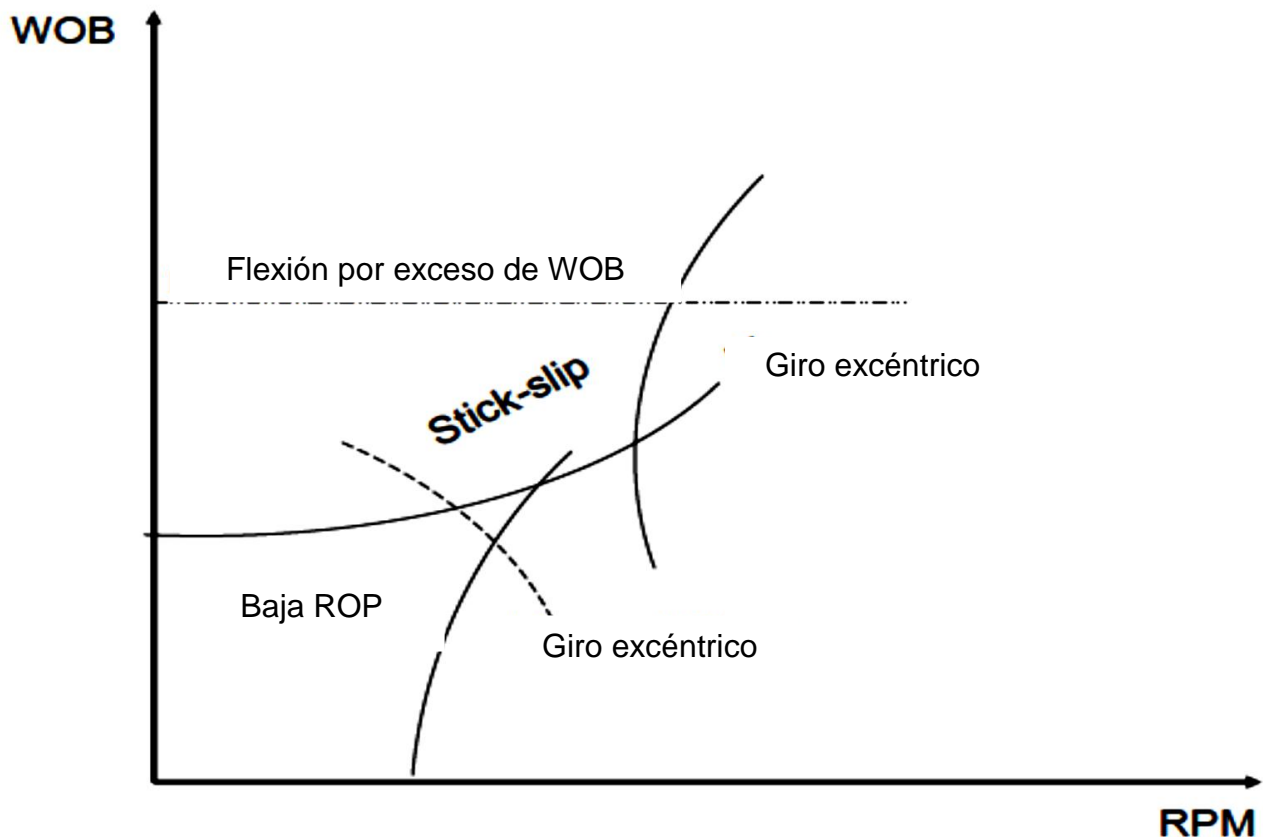


Figura 5.7 Disminución de la Zona Óptima debido a un fuerte acoplamiento en las vibraciones. (Xianping, 2010)

ningún intento de control y reducción de las vibraciones mediante la variación de parámetros de perforación será efectiva por las condiciones antes mencionadas.

5.3.2 Modelo Dinámico Avanzado de la Sarta de Perforación.

Si los efectos de la barrena y el aparejo de fondo de la sarta de perforación pueden ser cuantificados, el concepto de zona óptima es una poderosa herramienta en el incremento de la eficiencia de perforación del sistema completo de perforación. Los riesgos potenciales de un uso inapropiado de la barrena o de un componente del arreglo de fondo de la sarta de perforación pueden ser fácilmente identificados mediante la evaluación de la zona óptima.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Control y Reducción de la Vibración en Tiempo Real.

Además, la posible combinación del peso sobre la barrena y la velocidad de rotación pueden ser estimadas a través del conocimiento de los límites de la zona óptima. Sin embargo la parte desafiante es poder predecir la magnitud de la vibración (Stick-Slip) en forma precisa.

Para resolver este desafío, los ingenieros emplean un Modelo dinámico avanzado de la sarta de perforación que incorpora la siguiente información crítica.

- Propiedades mecánicas de la roca
- Diseño de la barrena incluyendo cortadores, cuerpo y el perfil.
- Características físicas de los componentes del arreglo de fondo de la sarta de perforación.
- Características de la formación (heterogeneidad, anisotropía, interestratificación)
- Trayectoria del pozo y la geometría del agujero.

5.3.3 Desacoplamiento del Stick-Slip y Whirl.

Usando el modelo dinámico avanzado de la Sarta de perforación, es posible teóricamente predecir la posible presencia de Stick-Slip o Whirl teniendo los detalles de la barrena, arreglo de fondo de la sarta de perforación, la pared del agujero y litología. Lo más importante, es que la zona óptima del sistema de perforación dada, puede ser descrita en el espacio comprendido entre el peso sobre barrena (WOB) y velocidad de rotación (RPM), como resultado, los fenómenos de Stick-Slip y Whirl pueden ser teóricamente desacoplados mediante la maximización de la zona óptima. Las ventajas de la aplicación del concepto de Zona Óptima revuelve los complicados desafíos del acoplamiento de las vibraciones y que pueden ser resumidos en de la siguiente manera:

El acoplamiento del Stick-Slip y Whirl pueden ser fácilmente visualizados y mejora el entendimiento por parte de los Ingenieros de Perforación en una gráfica concisa con respecto al peso sobre barrena (WOB) y velocidad de perforación (RPM)

1. Los efectos de cualquier cambio en la dinámica de la sarta de perforación pueden ser cuantificados y posteriormente obtener una mejor predicción de:
 - a. Barrena y aparejo de fondo de la sarta de perforación.
 - b. Peso sobre la barrena y velocidad de rotación.
 - c. Propiedades de la formación, trayectoria del pozo y geometría del agujero.

2. La comparación de varias soluciones puede ser sencilla y clara porque en el sistema de perforación de máximo rendimiento de la zona óptima es más probablemente alcanzar la estabilidad sin la disminución de la Tasa de Penetración.

3. La forma y la posición de la zona óptima en el espacio de peso sobre la barrena y la velocidad de rotación provee una importante guía de datos para los perforadores afinando los parámetros de perforación.

6 Conclusiones y Recomendaciones

Se muestra la teoría básica necesaria para comprender desde un marco teórico simple el comportamiento y naturaleza de las vibraciones, ubicándolo en el proceso de la perforación de pozos para conocer los modos de vibración, axial, torsional, lateral, y cómo influyen estas a la sarta de perforación.

Además de describe como se presentan los fenómenos vibratorios más importantes como son: Atascamiento-Deslizamiento (Stick-Slip), Salto de la Barrena (Bit Bouncing), Giro de la Barrena (Bit Whirl), Giro del aparejo de fondo de Perforación (BHA Whirl), y sus modos acoplados de vibración siendo de vital importancia su comprensión y su descripción cualitativa de sus características.

El diseño de la sarta de perforación debe permitir la flexibilidad en cambios de los parámetros de perforación dependiendo de las condiciones necesarias en el fondo del agujero como son RPM y WOB, que son las principales fuentes de energía empleada para la creación del agujero, para obtener la ROP óptima, la flexibilidad en los parámetros se deben a que las formaciones que se atraviesan no se considera totalmente homogéneas.

La administración del proceso de perforación, que incluye el adecuado u óptimo manejo de la tasa de penetración, deberá asegurar la identificación de las limitantes o ventajas que cada uno de los elementos de la sarta de perforación adiciona o disminuye en el comportamiento de la totalidad de la sarta.

Se sabe que las vibraciones afectan en gran medida a los equipos que se ven sometidos a ellas, el empleo de metodologías para calcular su daño son usadas en la actualidad para prevenir fallas prematuras. Esto provoca un mayor entendimiento en los límites de las herramientas y en que circunstancias pueden ser mejor empleadas y así optimizar al máximo los beneficios de las mismas.

Los efectos que provocan las vibraciones son principalmente la fatiga del material, desconexiones, falla o ruptura prematura a lo largo de la sarta de perforación. La administración adecuada de los procesos de cálculo y supervisión física de la fatiga y daño de los elementos constituyentes de la sarta de perforación se vuelve crucial para que un proyecto de perforación en condiciones extremas se vuelva rentable.

Un control escaso o nulo de las vibraciones afecta gravemente a la estabilidad del pozo provocando derrumbes o fractura de la formación donde se esté perforando lo cual llevara a la dificultad en las operaciones subsecuentes a la perforación del agujero.

En equipos más sofisticados como lo son las herramientas MWD, LWD, PWD, RSS (Rotary Steerable System), etc, al someterlos a altos niveles de vibración, los componentes eléctrico/mecánicos de alta tecnología de las herramientas se ven altamente comprometidos, causando interferencia en la señales de la herramienta, datos erróneos del MWD/LWD/PWD y en casos extremos destrucción de la herramienta, lo cual impacta de gran media a la compañía dueña del equipo y al cliente de forma económica al provocarle su incremento en costos de mantenimiento y en el aumento de las horas productivas (NPT).

Por eso el entendimiento del fenómeno y su estudio más profundo tendrá como resultado un mejor desarrollo en las prácticas de perforación, que coadyuva a una mejor planeación y optimización de las operaciones de perforación logrando que las fallas por este fenómeno sean las mínimas.

Se analizan los diferentes métodos que existen para medir los diferentes fenómenos vibratorios en el fondo del pozo con equipo especializado, así como también su detección en superficie con sensores en el piso de perforación, volviéndose importante el procesamiento de

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Conclusiones y Recomendaciones

estos datos para la validación de los modelos aplicados en la fase de diseño y un óptimo desarrollo de los proceso de control y mitigación de las vibraciones, estos datos pueden proveer a la compañía de servicios y a la Operadora una mejor experiencia para los proyectos de perforación que cada día se vuelven más demandantes.

Las mediciones efectuadas por los equipos MWD, dan al operador un mejor entendimiento de los problemas que pueden surgir en el pozo por los fenómenos vibratorios, además de dar la capacidad de actuar de forma inmediata ante el problema.

Las herramientas de grabación, mostraron ser eficaces en sus mediciones, tanto así que la información a veces mostrada era más clara que la arrojada por los MWD, pero desgraciadamente tiene la desventaja de que el operador no puede actuar ante la presencia del fenómeno, ya que el análisis de datos de estas herramientas es posterior a la perforación.

Las vibraciones y los efectos que causan estas en las herramientas y aparejo de fondo de Perforación son muy severas, como una conclusión de este apartado se puede decir, que las mediciones carecen de un estándar internacional el cual permita una interpretación e identificación de este fenómeno de un forma más global, ya que las diferentes compañías en el mundo dedicadas a prestar este servicio tienen sus propios procedimientos y protocolos para realización de las mediciones, obteniendo resultados diferentes entre sí, y por lo tanto la implementación de programas de reducción y control de las vibraciones se pueden ver limitados en muchos sentidos.

Aunque aún sin esta estandarización, se conoce que el fenómeno vibratorio de Giro (Whirl) es el más dañino de todos los que se pueden presentar en la sarta de perforación.

La estandarización a nivel global de las mediciones de las vibraciones es necesaria en la industria, ya que de esa manera las compañías de servicios podrán adquirir la experiencia previa realizada por otra compañía y las operadoras podrán desarrollar una mejor curva de aprendizaje en el proceso de perforación y poder juzgar con mayor criterio que tecnología es la mejor para el pozo. Actualmente no existe una estandarización de las mediciones abriendo una ventana de oportunidad para el desarrollo de un trabajo enfocado a estandarizar,

considerando que las herramientas miden el mismo fenómeno pero los resultados son diferentes para cada una de las compañías que ofrece ese tipo de servicio en el mercado. Clasificar y reportar la información durante los procesos de perforación y crear un estándar de esta clasificación será de gran ayuda, porque así el desarrollo de nuevas herramientas estaría sujeto a este estándar internacional, el cual provocara la creación de software más eficientes y un mayor entendimiento de este fenómeno.

El control de las vibraciones en tiempo real es de vital importancia cuando el diseño no ha sido suficiente para mitigarlas, ya que solo así se podrá reducir el daño o los efectos que pueden causar a la sarta de perforación y a la perforación misma.

Con lo anterior los programas de reducción y control de vibraciones dependen de las compañías que estén prestando el servicio, provocando ciertas diferencias operacionales que no permiten visualizar cual podría ser el más eficiente para el operador del pozo.

Se puede señalar que aunque no existan ciertos estándares en la medición y por lo tanto en los programas de reducción de las vibraciones, estos tienen efectos positivos en el control del fenómeno sin dejar a un lado la necesidad imperante de un estudio más profundo de este fenómeno.

Hoy en día se puede observar el incremento de la investigación y estudio de estos fenómenos vibratorios en la sarta de perforación y en el mismo pozo, ya que existen numerosos estudios de cómo se comporta de forma dinámica la sarta en el pozo y las implicaciones de sus movimientos, para la optimización de la perforación.

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Bibliografía

Bibliografía

1. A.J. Mansure "Interpretation of Diagnostics-While-Drilling Data" SPE 84244 SPE International 2003
2. Aerretad, T. V. "An Experimental and Theoretical Study of Coupled Boundary Conditions for Vibrations in Drillstring" SPE 15563 SPE International 1986
3. Andrew D. Craig "High Frequency Downhole Dynamic Measurements Provide Greater Understanding of Drilling Vibration in Performance Motor Assemblies IADC/SPE 128211 2010
4. Anil Jaggi and Sunil Upadhaya "Successful PDC/RSS Vibration Management Using Innovative Depth-of-Cut Control Technology: Panna Field, Offshore India" SPE/IADC 104388 2007
5. Balachandran, Balakumar. "Vibrations" Edit. Thomson 2006
6. Cheser, Steven W. "Operator/Service Company Research Collaboration Leads to Reduced Downhole Vibration Levels and Improved Drilling Performance" SPE 133801 SPE International 2010
7. D. C.-K. Chen "Real-Time Downhole Torsional Vibration Monitor for Improving Tool Performance and Bit Design" IADC/SPE 99193 2006
8. D.K. Ashley "Extending BHA Life with Multi-Axis Vibration Measurements" SPE/IADC 67696 2001
9. Daniel Perez "Application of Small Vibration Logging Tool Yields Improved Dynamic Drilling Performance" SPE 105898 2007
10. Daniel Perez "Application of Small Vibration Logging Tool Yields Improved Dynamic Drilling Performance" SPE/IADC 105898 2007

11. David C.-K. Chen "Maximizing Drilling Performance with State-of-the-Art BHA Program" SPE 104502 2007
12. David C.-K. Chen "Integrated BHA Modeling Delivers Optimal BHA Design" SPE/IADC 106935 2007
13. David C-K Chen "Integrated Drilling Dynamics System Closes the Model-Measure-Optimize Loop in Real Time" SPE 79888 SPE International 2003
14. David C-K Chen "Developing and Field Implementation of a State-of-the-Art BHA Program" SPE 107238 2007
15. Don W. Dareing "Drill Collar Length is a Major Factor in Vibration Control" SPE 11228 1984
16. F.E. Dupriest "Maximizing ROP With Real-Time Analysis of Digital Data and MSE" IPTC 10607 IPTC 2005
17. Fanchi, John R. "Petroleum Engineering Handbook" Vol. 1 SPE SPE International 2006
18. G. Heisig "Lateral Drillstring Vibrations in Extended-Reach Wells" IADC/SPE 59235 2000
19. Gabriel P. "Drill String Vibration How to Identify and Supress" SPE 39002 SPE International 1997
20. Goke Akinniranye "Implementation of a Shock and Vibration Mitigation Process: Achieving Real-Time Solutions and Savings" SPE-107903 2009
21. Graham Mensa-Wilmot "Drilling Efficiency and Rate of Penetration: Definitions, Influencing Factors, Relationships, and Value" SPE 128288 2010
22. Graham Mensa-Wilmot "The Effects of Formation Hardness, Abrasiveness, Heterogeneity and Hole Size on PDC Bit Performance" SPE/IADC 67698 IADC 2002

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Bibliografía

23. Graham Mensa-Wilmot "PDC Bit Durability – Defining the Requirements, Vibration Effects, Optimization Medium, Drilling Efficiencies and Influences of Formation Drillability" SPE 63249 SPE International 2000
24. Halsey, G. W. "Drillstring Torsional Vibrations: Comparison Between Theory and Experiment on a Full-Scale Research Drilling Rig" SPE 15564 1986
25. Hanno Reckmann "MWD Failure Rates Due to Drilling Dynamics" SPE 127413 2010
26. Heisig, G "Downhole Diagnosis of Drilling Dynamics Data Provides New Level Drilling Process Control to Driller" SPE 49206 1998
27. <http://www.cedex.es/lg/geofis> 2010
28. J. R. Bailey "Managing Drilling Vibrations through BHA Design Optimization" IPTC 13349 IPTC 2009
29. J. R. Cromb "Cost Savings through an Integrated Approach to Drillstring Vibration Control" IADC/SPE 59197 2000
30. J.D. Macpherson "Application and Analysis of Simultaneous Near Bit and Surface Dynamics Measurements" SPE 74718 2001
31. J.P. McCarthy "A Step Change in Drilling Efficiency: Quantifying the Effects of Adding an Axial Oscillation Tool Within Challenging Wellbore Environments" SPE/IADC 119958 2009
32. J.R. Bailey "Design Tools and Workflows To Mitigate Drilling Vibrations" SPE 135439 SPE International 2010
33. J.R. Bailey "Drilling Vibrations Modeling and Field Validation" IADC/SPE 112650 2008
34. Jerome J. Rajnauth "Reduce Torsional Vibration and Improve Drilling Operations" SPE 81174 SPE International 2003

35. John Clegg "Improved Optimisation of Bit Selection Using Mathematically Modelled Bit Performance Indices" SPE 102287 2006
36. Junichi Sugiura "The Use of the Near-bit Vibration Sensor While Drilling Leads to Optimized Rotary-Steerable Drilling in Push- and Point-the-Bit Configurations" SPE 115572 2008
37. Kenneth R. Newman "Vibration and Rotation Considerations in Extending Coiled-Tubing Reach" SPE 106979 2007
38. L.A. Jacobsen Plutt "Achieving Improved Performance Through Drilling Optimization and Vibration Management at a GoM Development Project" SPE/IADC 119299 2009
39. L.W. Ledgerwood III "Downhole Vibration Measurement, Monitoring, and Modeling Reveal Stick/Slip as a Primary Cause of PDC-Bit Damage in Today" SPE 134488 SPE International 2010
40. Leine, R.L. "Literature Survey On Torsional Drillstring Vibration" WFW 97.069 Eindhoven University of Technology sep-97
41. M. Wu "A Generic Solution to BHA (Bottomhole-Assembly) Modeling" SPE 101186 2006
42. M.J. Fear "The Destruction of PDC Bits by Severe Slip-Stick Vibration" SPE/IADC 37639 SPE International 1997
43. M.R. Niznik "A New Approach to Stick-Slip Management Integrating Bit Design and Rotary-Steerable-System Characteristics" SPE 98962 2006
44. Mark Wassell "Method of Establishing Vibration Limits and Determining Accumulative Vibration Damage in Drilling Tools" SPE 135410 SPE International 2010
45. Mohammad M. Eltrissi "Additional Parameters for Better Vibration Control" SPE/IADC 125457 2009

Vibración en la Sarta de Perforación

Y. Cedro;J. Smith Mac Donald

Capítulo: Bibliografía

46. Mokhtar Yaveri "Solutions to the Down Hole Vibrations During Drilling" SPE 136956 2010
47. N. Challamel "A Stick-slip Analysis Based on Rock/Bit Interaction: Theoretical and Experimental Contribution" IADC/SPE 59230 2002
48. O. Vincké "A New Drillstring Fatigue Supervision System" SPE 105842 2007
49. S. Jardine, D. Malone, M. Sheppard "PUTTING A DAMPER ON DRILLING'S BAD VIBRATION" v.6 I.1 oilfield Review Schlumberger ene-94
50. S.L. Chen "Field Investigation of the Effects of Stick-Slip, Lateral, and Whirl Vibrations on Roller Cone Bit Performance" SPE 56439 1999
51. S.L. Chen "Field Investigation of the Effects of Stick-Slip, Lateral, and Whirl Vibrations on Roller-Cone Bit Performance" 76811-PA 2002
52. Sean Xianping Wu "Decoupling Stick-slip and Whirl to Achieve Break through in Drilling Performance" IADC/SPE 128767 AIDC 2010
53. Stefano Mancini "Drill String Vibration Mitigation During Simultaneous Drilling and Hole Enlargement" SPE/IADC 119260 2009
54. Steven F. Sowers "Roller Reamers Improve Drilling Performance in Wells Limited by Bit and Bottomhole Assembly Vibrations" SPE/IADC 119375 2009
55. Steven Radford "Novel Concentric Expandable Stabilizer Results in Increased Penetration" Rates and Drilling Efficiency with Reduced Vibration SPE/IADC 119534 2009
56. Svein Magne Osnes "MWD Vibration Measurements: A Time for Standardisation" SPE/IADC 119877 2009
57. T. Richard "Influence of bit-rock interaction on stick-slip vibrations of PDC bits" SPE 77616 SPE International 2002

58. Takashi Monden "Operation Support Centers - Real Time Drilling Optimization and Risk Mitigation" SPE 110950 2007
59. W.E Lear "Effect of Drillsring Vibration on MWD Pressure Pulse Signals" Journal Energy and Resources 1990
60. Warren, Thomas M. "Development of a Whirl-Resistant Bit" SPE 19572 1990
61. Y.A. Khulief "Vibration analysis of drillstrings with self-excited stick–slip oscillations" Journal of Sound and Vibration 299 July 2005
62. Zhang Zhenhai "From Vibration to Bouncing: The Introduction of Stress Wave Transmitting Theory" SPE 123839 2009