

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO Y EFECTIVIDAD DE SISTEMAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE LA SECCIÓN 8 1/2” EN LOS CAMPOS ZUATA PRINCIPAL Y CERRO NEGRO

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título
De Ingeniero de Petróleo
Por el Br. Peñalver Díaz, Carlos Augusto

Caracas, 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO Y EFECTIVIDAD DE SISTEMAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE LA SECCIÓN 8 1/2” EN LOS CAMPOS ZUATA PRINCIPAL Y CERRO NEGRO

Tutor Académico: Prof. Pedro Díaz
Tutor Industrial: Ing. Juan Luis Bravo

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título
De Ingeniero de Petróleo
Por el Br. Peñalver Díaz, Carlos Augusto

Caracas, 2015

DEDICATORIA

A Dios que siempre me acompaña

A mis Padres que son mi fortaleza

A mis hermanas

A mis abuelas

A la Universidad Central de Venezuela

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Divina Pastora, que guían mis pasos y me han colocado siempre en el camino correcto.

A mis Padres, las personas más importantes de mi vida, que siempre me han apoyado en todo lo que hago, no solo en mi carrera universitaria sino en cada actividad y decisión que he tomado, siempre han confiado y creído en mí, incluso más que yo mismo. Los amo.

A mis hermanas, María que me enseña siempre que las cosas se pueden lograr de manera distinta a las que pienso. Manu, la persona más alegre que he conocido, y que me muestra cada vez que la veo que aún sigo siendo un niño. Las amo.

A mis abuelas, cuyas palabras siempre me dan fortaleza, y me enseñan que debo tener fe y encomendarme al Espíritu Santo en todo lo que hago.

A la Universidad Central de Venezuela, que al momento de ingresar me di cuenta que no podría estudiar en otro lugar mejor que esta casa que vence la sombra, me formó como un profesional íntegro para en un futuro pueda ayudar a crecer a mi país, Venezuela, y me mostró que el mejor título que hay es ser UCVista. Vendrán tiempos mejores.

A mi tío Ángel, su esposa Ana Amelia y mis primos, que desde que llegué a Caracas me han hecho sentir parte de su familia y que siempre me ayudaron durante mi carrera.

A mis profesores, del ciclo básico, Petróleo y otras escuelas que siempre dejaron alguna enseñanza no sólo académica sino de vida. En especial a la profesora María Itriago que me apoyó en momentos complicados al inicio de mi carrera y al profesor Pedro, que me ayudó en este T.E.G., etapa cumbre de la misma.

A la empresa Schlumberger, por abrirme sus puertas, darme mi primera experiencia profesional y ayudarme en este T.E.G. Especialmente a todos los ingenieros que me guiaron para realizar mi tesis.

Last but not least. A mis amigos de la universidad, los que estudiaron, los que rumbearon, los que corrieron, y los que sufrieron conmigo para siempre seguir adelante y lograr convertirnos en ingenieros.

Peñalver D., Carlos A.

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO Y EFECTIVIDAD DE SISTEMAS DE
PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE LA SECCIÓN 8 1/2" EN LOS CAMPOS
ZUATA PRINCIPAL Y CERRO NEGRO**

Tutor Académico: Prof. Pedro Díaz. Tutor Industrial: Ing. Juan Luis Bravo.

Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo.

Año 2015, 133 p.

Palabras Claves: Perforación, Herramientas de perforación, Tortuosidad, Rata de penetración, Torque y arrastre, Motor de fondo, *PowerDrive Xceed*.

Resumen .Actualmente en la Faja Petrolífera del Orinoco se están desarrollando tres de sus bloques a través de la perforación horizontal en macollas. Para esto se han implementado distintos sistemas de perforación direccional, siendo hoy en día los principales: Motor de Fondo y *PowerDrive Xceed* las cuáles son provistos por la empresa *Schlumberger* de Venezuela en su segmento D&M. El Motor de fondo ha perforado gran parte de los pozos en la FPO y su funcionamiento es bastante conocido por la mayoría de los perforadores direccionales. Por otro lado, *PowerDrive Xceed* representa una nueva tecnología en la perforación de pozos direccionales y su uso no se ha masificado aún en Venezuela. Cada uno posee su propia manera de alcanzar los requerimientos exigidos por el plan de perforación específicamente en términos de inclinación, *azimuth* y TVD, por ello, es necesario evaluar la eficiencia de estos en lograr lo planteado. Para este fin, se tomaron datos de un total de diez pozos perforados con ambas herramientas y en base a parámetros de la perforación como ROP, tortuosidad, torque y arrastre se realizó un análisis comparativo. Se estudió también los tiempos de perforación y la extensión en distancia que consiguió cada pozo. *PowerDrive Xceed* al ser un RSS de segunda generación, posee la ventaja de ser 100 por ciento rotativo y así conseguir mejorar la mayoría de los parámetros que resulta finalmente en la disminución de tiempos operativos y reducción de eventualidades durante la perforación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.3 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.5 LIMITACIONES.....	6
CAPÍTULO II	7
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	7
2.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	9
2.2.1 Perforación Direccional	9
2.2.2 Pozos Horizontales	12
2.2.3 Ensamblaje de Fondo (BHA).....	12
2.2.3.1 Componentes Posibles de Ensamblaje de Fondo.....	12
2.2.3.2 Arreglos de Ensamblajes de Fondo.	13
2.2.3 Parámetros Operacionales.....	17
2.3 MOTORES DE FONDO	23
2.3.1 Tipos de Motores	23
2.3.2 Componentes	24
2.3.3 Teoría de funcionamiento de Motor de Fondo	30
2.3 <i>POWERDRIVE XCEED</i>	35

2.3.1 Características de <i>PowerDrive Xceed</i>	35
2.3.2 Componentes.	35
2.3.3 Teoría de Operación <i>PowerDrive Xceed</i>	42
CAPÍTULO III	49
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	49
3.1 FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO	49
3.2 CAMPO ZUATA PRINCIPAL	50
3.2.1 Formación Mesa	51
3.2.2 Formación las piedras	52
3.2.3 Formación Freites	52
3.2.4 Formación Oficina	52
3.3 CAMPO CERRO NEGRO	53
3.3.1 Estratigrafía.....	53
3.3.2 Basamento	54
3.3.3 Formación Oficina	55
3.3.4 Miembro Morichal	55
3.3.5 Miembro Yabo	56
3.3.6 Miembro Jobo	56
3.3.7 Miembro Pílon	56
3.3.8 Formación Freites	57
3.3.9 Formación Mesa-Las Piedras	57
3.4 PRÁCTICAS OPERACIONALES EN LA FPO	57
3.5 PROBLEMAS COMUNES EN LA FPO	59
CAPÍTULO IV	61
MARCO METODOLÓGICO	61
4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	61
4.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	61
4.3 POBLACIÓN Y MUESTRA	62
4.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	63
4.4.1 Técnicas	63

4.4.2 Instrumentos.....	63
4.5 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	65
4.5.1 Revisión Bibliográfica	65
4.5.2 Capacitación y adiestramiento	65
4.5.3 Recopilación de información geológica.	66
4.5.4 Recopilación de Datos de Pozos	66
4.5.4 Selección de la Muestra de Estudio	66
4.5.5 Análisis de Parámetros.....	68
CAPÍTULO V	75
ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
5.1 Análisis de Desempeño	75
5.1.1 Tasa de Penetración (ROP).....	75
5.1.2 Tortuosidad	85
5.1.3 Torque	90
5.1.4 Arrastre	99
5.2 Análisis de tiempo operativo	108
CONCLUSIONES	115
RECOMENDACIONES	117
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Configuración del Motor de Fondo.....	30
Tabla 2: Especificaciones de Funcionamiento Motor de Fondo	30
Tabla 3: Muestra de Pozos por Campo	67
Tabla 4: Pozos Zuata Principal	67
Tabla 5: Pozos Cerro Negro	68
Tabla 6: Inclinación, Azimuth y DLS en Plan del Pozo	70
Tabla 7: Inclinación, Azimuth y DLS en Surveys de Campo	71
Tabla 8: <i>Steering Sheet</i>	74
Tabla 9: Parámetros de Perforación Zuata Principal.....	75
Tabla 10: Parámetros de Perforación Cerro Negro	76
Tabla 11: Tortuosidad Zuata Principal.....	86
Tabla 12: Inclinación Pozo ZM1 (Tomado de Surveys de campo)	86
Tabla 13: Tortuosidad Cerro Negro	89
Tabla 14: Inclinación Inicial Pozo CX2 (Tomado de <i>Surveys</i> de Campo)	89
Tabla 15: <i>Doglegs</i> iniciales Pozo ZX2	94
Tabla 16: Altos <i>Doglegs</i> Pozo CX1	98
Tabla 17: Tiempos Pozo ZM1.....	108
Tabla 18: Tiempo Pozo ZM3	108
Tabla 19: Tiempo Pozo ZX1	109
Tabla 20: Tiempo Pozo ZX2.....	109
Tabla 21: Tiempo Pozo CM1	111
Tabla 22: Tiempo Pozo CM2	111
Tabla 23: Tiempo Pozo CX1	112
Tabla 24: Tiempo Pozo CX2	112
Tabla 25: Resumen Tiempos de Perforación por pozos.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Sidetrack</i>	9
Figura 2: Locaciones Inaccesibles	10
Figura 3: Domos de sal	10
Figura 4: Control de fallas	10
Figura 5: Perforación en macollas.....	10
Figura 6: Pozos de Alivio.....	11
Figura 7: Perforación Horizontal	11
Figura 8: Motivos Económicos	11
Figura 9: Ensamblajes de Fondo	15
Figura 10: BHA Motor. Modificado.	16
Figura 11: BHA <i>PowerDrive Xceed</i> . Modificado.....	17
Figura 12: Tortuosidad	20
Figura 13: Componentes Motor de fondo. Modificado	25
Figura 14: Sección de transmisión motor de fondo. Modificado	27
Figura 15: <i>Bent housing</i> ajustable. Modificado	28
Figura 16: Sección de Rodamientos. Modificado.	29
Figura 17: Eje de Dirección	30
Figura 18: Componentes <i>PowerDrive Xceed</i> . Modificado	36
Figura 19: CRSPA	36
Figura 20: CRSSA	38
Figura 21: Puertos del Collar	41
Figura 22: Columna Estratigráfica Zuata Principal	51
Figura 23: Columna Estratigráfica Campo Cerro Negro	54
Figura 24: <i>Drilling Office X</i>	64
Figura 25: ROP Pozo ZM1 Motor de Fondo	77
Figura 26: ROP Pozo ZM2 Motor de Fondo	78
Figura 27: ROP Pozo ZM3 Motor de Fondo	78

Figura 28: ROP Pozo ZX1 <i>PowerDrive Xceed</i>	79
Figura 29: ROP Pozo ZX2 <i>PowerDrive Xceed</i>	79
Figura 30: ROP Pozo ZX3 <i>PowerDrive Xceed</i>	80
Figura 31: ROP Pozo CM1 Motor de Fondo	82
Figura 32: ROP Pozo CM2 Motor de Fondo	82
Figura 33: ROP Pozo CX1 <i>PowerDrive Xceed</i>	83
Figura 34: ROP Pozo CX2 <i>PowerDrive Xceed</i>	83

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Configuración rotor/estator motor de fondo. Modificado ^[11]	27
Gráfica 2: Curva de Poder Motor de fondo.....	31
Gráfica 3: <i>Broomstick</i> Torque.....	72
Gráfica 4: <i>Broomstick</i> Cargas de la perforación	73
Gráfica 5: ROP Promedio Zuata Principal.....	81
Gráfica 6: ROP Promedio Cerro Negro	84
Gráfica 7: Macrotortuosidad Zuata Principal.....	85
Gráfica 8: Taedls y Tortuosidad Acumulada campo Zuata Principal	86
Gráfica 9: Macrotortuosidad Cerro Negro	88
Gráfica 10: Taedls y Tortuosidad Acumulada campo Cerro Negro	89
Gráfica 11: Torque Pozo ZM3 Motor de Fondo	91
Gráfica 12: Torque Pozo ZX2 <i>PowerDrive Xceed</i>	93
Gráfica 13: Torque Pozo CM1 Motor de Fondo.....	95
Gráfica 14: Torque Pozo CX1 <i>PowerDrive Xceed</i>	97
Gráfica 15: Arrastre Pozo ZM3 Motor de Fondo.....	100
Gráfica 16: Arrastre Pozo ZX2 <i>PowerDrive Xceed</i>	102
Gráfica 17: Arrastre Pozo CM1 Motor de Fondo	104
Gráfica 18: Arrastre Pozo CX1	106
Gráfica 19: Tiempo Perforación vs. Pies Perforados Zuata Principal	110
Gráfica 20: Tiempo Perforación vs. Pies Perforados Cerro Negro	113

INTRODUCCIÓN

Como parte de la producción inicial en frío en la faja petrolífera del Orinoco, las distintas empresas mixtas que la conforman han adoptado un agresivo plan de perforación de pozos horizontales organizados principalmente en unidades básicas de construcción de producción con las cuales se tiene el objetivo de alcanzar un *plateau* definido por cada empresa en un lapso de tiempo determinado.

Para este fin se han desarrollado distintas herramientas para la perforación direccional que faciliten este tipo de operaciones y que mejoren la calidad del hoyo, a través del control de la trayectoria mientras se perfora.

De esta manera, la empresa Schlumberger de Venezuela como compañía de servicios petroleros ha trabajado en conjunto con las distintas empresas mixtas a través de su segmento D&M VZE en la perforación de pozos horizontales prestando equipos y personal calificado para operarlos.

Por ello, para continuar desarrollando y en busca de optimizar la perforación del hoyo de 8 ½" en pozos de la Faja petrolífera del Orinoco, se desea establecer un análisis comparativo de los elementos de perforación direccional *PowerDrive Xceed* y Motor de Fondo a través de su rendimiento y evaluación de distintos parámetros de la perforación y calidad del hoyo en los campos Zuata Principal y Cerro Negro en cuyo territorio se ubican las empresas PetroMiranda y PetroIndependencia respectivamente.

Ambas herramientas son definidas básicamente como motores de fondo utilizados para la perforación direccional, sin embargo, sus tecnologías y funcionamiento son distintos. *PowerDrive Xceed* constituye una herramienta *RSS point-the-bit* (Sistema rotativo direccional que apunta a la mecha), la cual posee una curvatura interna que se puede variar durante la perforación causando la desalineación de la herramienta y los ejes del pozo, resultando en el cambio de dirección requerido.

Por otro lado, el motor de fondo de desplazamiento positivo, es un elemento de desviación para pozos horizontales que provee potencia hidráulica convertida a potencia dinámica para impulsar la barrena a través de un rotor y un estator cuya configuración de lóbulos helicoidales se define según las exigencias de presión y torque. Este motor produce cambio de dirección por medio de un *bent* (recodo) el cual posee varios grados de curvatura, se escoge uno previo a la perforación y se mantendrá constante durante ésta.

Para esta investigación, se reunirá información técnica de ambas herramientas y de las corridas en las cuales han sido utilizadas, esto en conjunto con la información de los campos respectivos para posteriormente realizar una evaluación del desempeño de *PowerDrive Xceed* y del Motor de Fondo de desplazamiento positivo.

Posteriormente se realizará un análisis de acuerdo a los resultados obtenidos y finalmente establecer conclusiones y recomendaciones acerca de la investigación realizada.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La perforación del hoyo de 8 ½” en la Faja Petrolífera del Orinoco consiste en la navegación horizontal dentro de la zona de producción, esto quiere decir, la perforación de arenas no consolidadas hasta alcanzar la profundidad total (TD) exigida por el cliente.

Por el tipo de litología mencionado antes se pueden producir problemas de hoyo tales como: pega por diferencial de presión, pega por empaquetamiento, embolamiento de la mecha y por consiguiente, pérdida del BHA, etc. Por ello, es necesario que la herramienta direccional busque la mayor limpieza del hoyo posible, ROP, menor tortuosidad entre otros parámetros para evitar la ocurrencia de los eventos mencionados.

De igual manera se debe buscar el mayor control direccional a fin de lograr los valores de inclinación y *azimuth* establecidos en el plan para la trayectoria del pozo, evitando así cambios de dirección severos, colisiones entre pozos o un aterrizaje fuera de lo planteado.

Por los motivos anteriores se desea establecer la comparación de *PowerDrive Xceed* y Motor de Fondo con el objetivo de encontrar que herramienta cumple mejor tanto en términos direccionales como de prevención de problemas en el hoyo.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar y realizar un análisis comparativo de la efectividad de las herramientas direccionales *PowerDrive Xceed* y Motor de fondo de desplazamiento positivo durante la perforación del hoyo de 8 ½” en pozos de la FPO.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Reunir información técnica detallada acerca de *PowerDrive Xceed* y Motor de Fondo, composición, funcionamiento y uso.
- Recopilar información geológica respecto a los campos Zuata Principal y Cerro Negro.
- Analizar las variables a utilizar para la evaluación del rendimiento de las herramientas, específicamente, Tortuosidad, tasa de penetración (ROP), Torque, Arrastre y factor de fricción.
- Reunir data sobre los pozos perforados en los cuales se haya empleado *PowerDrive Xceed* o Motor de Fondo en los campos Zuata Principal y Cerro Negro.
- Realizar un análisis comparativo en base a parámetros de perforación y limpieza del hoyo del desempeño de las herramientas direccionales durante la perforación de un hoyo de 8 ½” en los campos seleccionados.
- Realizar un análisis económico cualitativo en base a tiempos de perforación y tiempos no productivos.
- Establecer conclusiones en base a los análisis previos sobre la eficiencia y rendimiento de las herramientas.

1.3 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio se desarrollará en los campos: Zuata Principal y Cerro Negro pertenecientes a los bloques Junín y Carabobo respectivamente, de la Faja petrolífera del Orinoco. El número de pozos que serán objeto de análisis vendrán definidos por la cantidad de perforaciones realizadas con *PowerDrive Xceed* de las cuales sea posible obtener información oficial, para luego escoger las corridas de Motor de fondo en hoyos de 8 ½” en los campos mencionados anteriormente y establecer muestras de estudio en similares cantidades y condiciones.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El ritmo actual de la perforación de pozos horizontales en la Faja Petrolífera del Orinoco, requiere mayor eficiencia en las operaciones a fin de optimizar distintos parámetros del hoyo tales como trayectoria, limpieza, tortuosidad, entre otros, con el objetivo de reducir las eventualidades que puedan surgir al momento de instalar equipos de producción.

También, se conoce que debido a las condiciones geológicas existentes en la FPO, es común la ocurrencia de problemas de hoyo, que pueden desencadenar pérdida del BHA (*BottomHoleAssembly*), *Sidetracks*, y otros sucesos no deseados que ocasionan tiempo no productivo, desviación del plan original además de un incremento en el costo del pozo al no poder recuperar y reutilizar las herramientas.

Es por ello que el establecer una comparación entre las herramientas *PowerDrive Xceed* (usado solamente en la sección de 8 ½”) y Motor de fondo ayudaría a disminuir los riesgos que puedan aparecer al perforar la sección de 8 ½” en campos de la FPO, además de buscar un mayor acercamiento a la trayectoria original planteada para el hoyo.

1.5 LIMITACIONES

Para el desarrollo de este proyecto se presentan los siguientes obstáculos para concretar el éxito del mismo que se exponen a continuación:

- El uso de *PowerDrive Xceed* no se ha masificado en la FPO, es decir, el número de secciones de 8 ½” perforados por esta herramienta es reducido en comparación a otras como *Whipstocks*, otros RSS y Motores de Fondo, de forma tal que el tamaño de la muestra de estudio es pequeño para analizar.
- La información de las aplicaciones en campo de las herramientas serán suministrados únicamente por la empresa Schlumberger de Venezuela, por lo cual no se podrá conocer la evaluación realizada por las empresas mixtas en cuanto al rendimiento de *PowerDrive Xceed* y Motor de Fondo.
- Los datos geológicos de los campos Zuata Principal y Cerro Negro serán proporcionados por las empresas mixtas PetroMiranda y PetroIndependencia, siendo limitada la información que puedan presentar a terceros, se pudiera ver limitado el análisis de parámetros geológicos.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de los elementos de perforación direccional, se han realizado investigaciones con el fin de mejorar su rendimiento y evaluar sus alcances. A continuación se presenta un compendio de trabajos donde se estudian tanto *PowerDrive Xceed*, así como el motor de fondo, haciendo énfasis en aquellos cuya aplicación en campo haya sido en Venezuela.

Morante H., Eduardo A. (Caracas, Octubre 2011). “Evaluación del Tiempo Operativo de los Motores de Fondo de Schlumberger D&M East Venezuela en el Campo Zuata Principal”

Para su trabajo especial de grado, realizó una investigación en modalidad de proyecto documental con el fin de evaluar el tiempo operativo de los motores de fondo de Schlumberger Venezuela en el campo Zuata principal. Para ello tomó como muestra de estudio siete motores empleados en este campo basándose en el criterio de muestra intencional. Definió como indicadores tiempo de mantenimiento, tiempo operativo y costo asociado, variables que serían la base de evaluación de la investigación. Finalmente realizó un análisis y estableció conclusiones respecto al desgaste de los motores y recomendaciones para mitigarlo.

Sánchez, C.; Villegas, G. (México D. F., 2013) “Herramientas en la Perforación Direccional”

En este trabajo de grado, se realizó una descripción detallada de los distintos tipos de pozos desviados para luego realizar énfasis en los parámetros y herramientas requeridos para lograr la trayectoria deseada. Se trataron los componentes de una sarta para perforación direccional, desde el tipo de barrena a utilizar, mechas, estabilizadores, conformación del BHA (*Bottom Hole Assembly*) explicando incluso

el funcionamiento herramientas LWD y MWD, y por supuesto los elementos de desviación pasando por motores de fondo, herramientas de pared, codos desviadores y herramientas *Power Drive*, entre ellas *Power Drive Xceed*. Por último, se mostraron ejemplos de aplicación en campo, tanto en tierra como en costa afuera.

Chamat, E.; Peñaranda, J.; Gonzalez, K.; Trejo, E.; Meneses, M.; Rosales, A.; Martínez, J. (2014) “Perforación horizontal somera coincide con la perforación de largo alcance en la Faja venezolana”

En una investigación en conjunto de las empresas PDVSA y Schlumberger, se realizó un trabajo técnico donde exponen el comportamiento de parámetros como: Torque y arrastre, factor de fricción, viajes de limpieza y cambios de tubería que se realizan durante la perforación de este tipo de pozos en el bloque Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco, lugar donde las arenas productoras son más someras y dada la continuidad de éstas, es posible realizar pozos con ERD y VERD (perforación de largo alcance y perforación de muy largo alcance por sus siglas en inglés). En base a lo anterior, buscan optimizar los parámetros y tratar de estandarizar el número de viajes de limpieza y cambio de tuberías para mejorar las prácticas del campo con el fin de incrementar ROP sin poner en riesgo el plan del pozo referente a inclinación y *azimuth*, además de evitar eventos de pega de tuberías. Se realiza especial énfasis en el hecho de las ventajas de perforar con RSS (*Rotary Steerable System*) en comparación a perforar con motor de fondo al momento de conformar la sarta de perforación, ya que, es necesaria incrementar o disminuir el peso sobre la mecha cuando se perfora con motor de fondo y esto solo es posible al realizar cambios de *Drill Pipes* por *Heavy Weights* o viceversa, mientras que al perforar con RSS se puede mantener la misma sarta de tubería durante la totalidad de la sección.

Los trabajos explicados anteriormente sumados a las investigaciones desarrolladas dentro de la compañía Schlumberger D&M de Venezuela, han servido como base y fuentes de ejemplos para la realización del presente trabajo especial de grado.

2.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

A continuación se presentan una serie de definiciones necesarias para la comprensión del presente trabajo, relacionadas a la perforación direccional, parámetros importantes a chequear durante la perforación de pozos direccionales y herramientas para la desviación de pozos, específicamente *PowerDrive Xceed* y Motor de Fondo.

2.2.1 Perforación Direccional ^[1]

En épocas anteriores, la perforación direccional se utilizaba principalmente como una operación de recuperación, ya sea para desviar herramientas alrededor de herramientas atascadas, llevar el pozo de nuevo a vertical, o en el alivio de perforación de pozos para controlar explosiones. La participación en perforación direccional controlada comenzaron sobre 1929 después del desarrollo de nuevos métodos para la medición del ángulo del hoyo se introdujo durante la desarrollo de Seminole, campo de Oklahoma.

Luego de los años 70 y 80 se empezaron a desarrollar las herramientas de perforación direccional que son comunes hoy en día cuyo uso se ha masificado a nivel mundial tales como MWD, LWD, motores de fondo y RSS.

Las aplicaciones más comunes de la perforación direccional son las siguientes:

- **Sidetracks:** Fue la técnica original de perforación direccional cuando inicialmente se realizaban a ciegas. Ahora su principal uso es para desviar la trayectoria debido a cambios geológicos inesperados. (Ver figura 1)

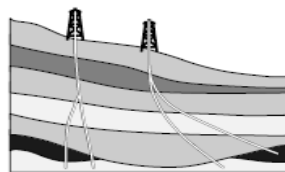


Figura 1: Sidetrack

- **Locaciones inaccesibles:** Objetivos ubicados en el área de una ciudad, ríos, o zonas ambientalmente sensibles. (Ver figura 2)

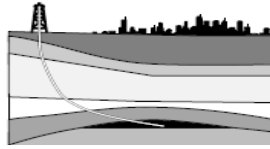


Figura 2: Locaciones Inaccesibles

- **Domos de sal:** Formaciones de petróleo se encuentran asociadas a domos de sal, sin embargo estos representan problemas operacionales y es necesario evitarlos perforando direccionalmente. (Ver figura 3)

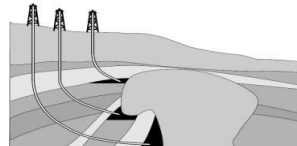


Figura 3: Domos de sal

- **Controlar Fallas:** Pozos verticales desviados naturalmente por efecto de las fallas, por ello se modifica inicialmente la trayectoria para evitar cruzar las líneas de fallas. (Ver figura 4)

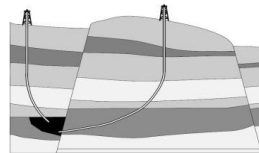


Figura 4: Control de fallas

- **Perforación de macollas:** La reducción de costos operacionales y de instalaciones se puede lograr llevando a cabo la perforación de pozos múltiples desde una misma plataforma o macolla. (Ver figura 5)

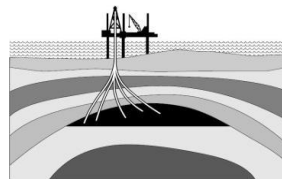


Figura 5: Perforación en macollas

- **Pozos de Alivio:** La necesidad de controlar presiones referidas a un pozo en reventón fundamenta la perforación de un pozo contiguo. Se busca drenar la zona de alta presión para aliviar el pozo. (Ver figura 6)

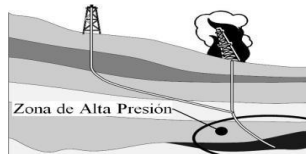


Figura 6: Pozos de Alivio

- **Perforación horizontal:** Las técnicas de recuperación mejorada requieren, por diseño, de pozos horizontales. Generalmente son aplicadas en reservorios de crudos pesados tal como en la FPO. (Ver figura 7)

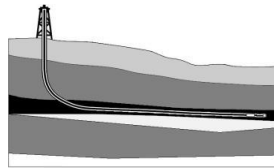


Figura 7: Perforación Horizontal

- **Motivos Económicos:** En yacimientos cercanos a las costas se opta por la perforación direccional con el fin de perforar desde instalaciones en tierra, esto debido a los mayores costos relacionados a la perforación costa afuera. (Ver figura 8)

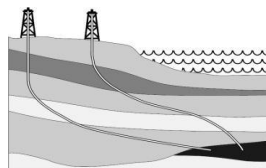


Figura 8: Motivos Económicos

2.2.2 Pozos Horizontales ^[2]

Se consideran pozos horizontales aquellos que son perforados paralelos a los estratos de un yacimiento o poseen un ángulo de inclinación mayor a 86°. Son los más empleados en la actualidad en la FPO y pueden ser clasificados según su radio de curvatura en 4 tipos: ultracortos, cortos, medios y largos. Cada uno con características específicas de radio de giro, tasa de construcción de ángulo y longitud de sección horizontal. Los de menor radio de curvatura (ultracortos) presentan radio de giro entre 1 y 2 pies, tasa de construcción de 45° a 60° por cada pie y una sección horizontal de hasta 200 pies. Por su parte los de mayor radio de curvatura (largos) son los más usados en el área de estudio de la investigación y poseen radio de giro de 600 a 2000 pies, tasa de construcción de ángulo de 1° a 6° por cada 100 pies y finalmente longitudes que parten desde los 1000 pies alcanzando extensiones hasta de 6000-8000 pies de sección horizontal.

2.2.3 Ensamblaje de Fondo (BHA) ^[2]

Es de vital importancia para el desarrollo exitoso de la perforación direccional, el apropiado diseño del ensamblaje de fondo. La elección correcta de este componente de la sarta de permitirá llevar a cabo el trabajo a una tasa de penetración óptima y con el mayor apego posible al plan de perforación.

2.2.3.1 Componentes Posibles de Ensamblaje de Fondo

Los componentes presentes en el ensamblaje de fondo son variables y dependen de los requerimientos del pozo en determinado momento de la perforación, a fin de cumplir con funciones específicas como proporcionar peso a la mecha, proteger a la tubería de pandeo y torsión, reducir *dogleg*, reducir daños a equipos por vibraciones y construir el pozo de acuerdo a su geometría.

Se cuenta con los instrumentos nombrados a continuación:

- Tubería.
- Tubería Compresiva.
- Estabilizador.
- Monel.
- Tubería Pesada o *Heavy Weight*.
- Martillo.
- Unión Flexible.
- Ensanchador de Subsuelo.
- Turbina de Perforación.
- Reductor de Diámetro.
- Herramienta de Medición o *Measuring While Drilling*(MWD).
- Herramienta de Registro o *Logging While Drilling*(LWD).
- Motor de Fondo.
- Mecha.

2.2.3.2 Arreglos de Ensamblajes de Fondo.

El diseño o arreglo de los ensamblajes de fondo varía de acuerdo a las condiciones del pozo a perforar, es por esto que se pueden presentar diversos escenarios en cuanto a los componentes requeridos para el trabajo, a continuación se describen los tipos más usados en la actualidad tomando en cuenta su función respecto a la sección del pozo en trabajo.

- **Ensamblaje de Estabilizador Único:** el punto de tangencia entre la sarta y la pared del hoyo puede ser controlado a través del uso de estabilizadores, en el caso de emplear un solo estabilizador se debe tomar en cuenta que su posición respecto a la mecha, además de cambiar el punto de tangencia, reduce la fuerza negativa resultante de la aplicación de peso sobre la sarta orientándola en sentido positivo o *highside* (cara de la herramienta dirigida a 90°) haciendo posible la construcción de ángulo del

pozo. Si bien este arreglo no es el más usado, es importante para fines de comprensión del escenario descrito.

- **Ensamblaje de Dos Estabilizadores:** el uso de dos estabilizadores controla más efectivamente el punto de tangencia, siendo un factor clave la distancia entre ambos estabilizadores para efectos de construcción o caída de ángulo debido a la fuerza positiva o negativa generada por el peso sobre la mecha, en este caso el segundo estabilizador disminuye el efecto de construcción de ángulo aumentando la fuerza negativa.

- **Ensamblaje de Estabilizadores Múltiples:** si bien se considera un ensamblaje múltiple a todo aquel que emplee más de dos estabilizadores, trabajar con tres permite, obtener una mejor respuesta en la construcción de ángulo del pozo y control de fuerza negativa por tanto es el arreglo recomendado para secciones de construcción y de mantenimiento de ángulo. Los arreglos más comunes de este tipo cuentan con la presencia de un estabilizador de bajo calibre cerca de la mecha para el caso de construcción o como segundo estabilizador para el caso de mantenimiento de la tangente.

- **Ensamblaje Combinado de Construcción y Mantenimiento de Ángulo:** a la hora de minimizar los viajes referidos al cambio o ajuste del BHA, se busca conformar el ensamblaje más versátil que opere de forma adecuada tanto en secciones de construcción de ángulo como en mantenimiento de la tangente, en estos casos se suelen emplear motores de fondo que apliquen técnicas de perforación en rotación y deslizamiento para mantener y construir ángulo respectivamente apoyados en un estabilizador integrado.

- **Ensamblaje Tipo Péndulo:** en algunos pozos, según lo requiera el plan de perforación es necesario disminuir el Angulo de inclinación del hoyo, por tanto se emplean ensamblajes adecuados para dicha operación, el tipo péndulo es el más común. Consiste en la ubicación de un estabilizador alejado de la mecha para generar un efecto de péndulo en la tubería y así orientarla para la reducción de la inclinación.

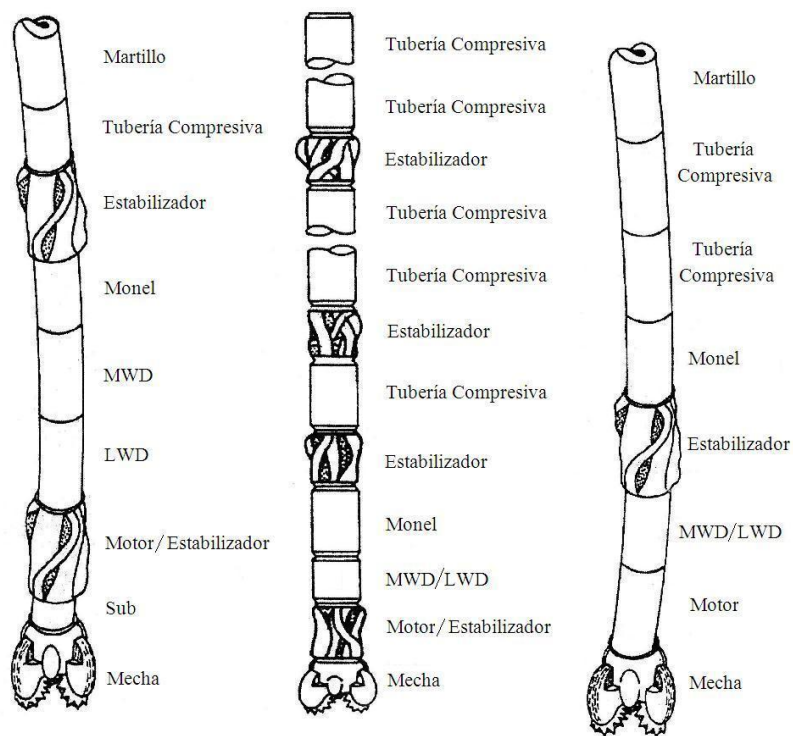


Figura 9: Ensamblajes de Fondo ^[2]

En la Figura 9 se muestran los ensamblajes para construcción, mantenimiento y disminución de ángulo en orden de izquierda a derecha.

- Ensamblaje de Perforación para hoyos de 8 ½” en la FPO ^[3]

El propósito de este BHA es el de perforar una sección horizontal extendida a lo largo del área productiva. Está compuesto por una mecha tipo PDC de 8 ½” conectada a un motor con un *bent housing* ajustado a 1,5° o un *PowerDrive Xceed 675* seguido de una herramienta LWD de 6 ¾”, un MWD del mismo diámetro, un estabilizador de 8” y un collar no magnético.

Está diseñado para proveer estabilidad y manejabilidad, configurado para impulsar la capacidad de construcción ya sea deslizando o rotando, además del estabilizador por encima del MWD que mitiga los choques y desgaste de los demás componentes del BHA.

En las Figuras 10 y 11 se muestran las configuraciones de BHA para motor y *PowerDrive Xceed* respectivamente.

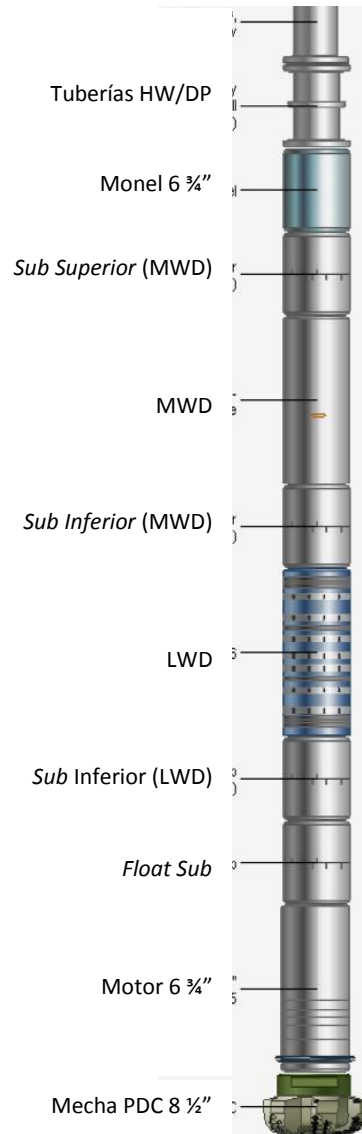


Figura 10: BHA Motor. Modificado.^[3]

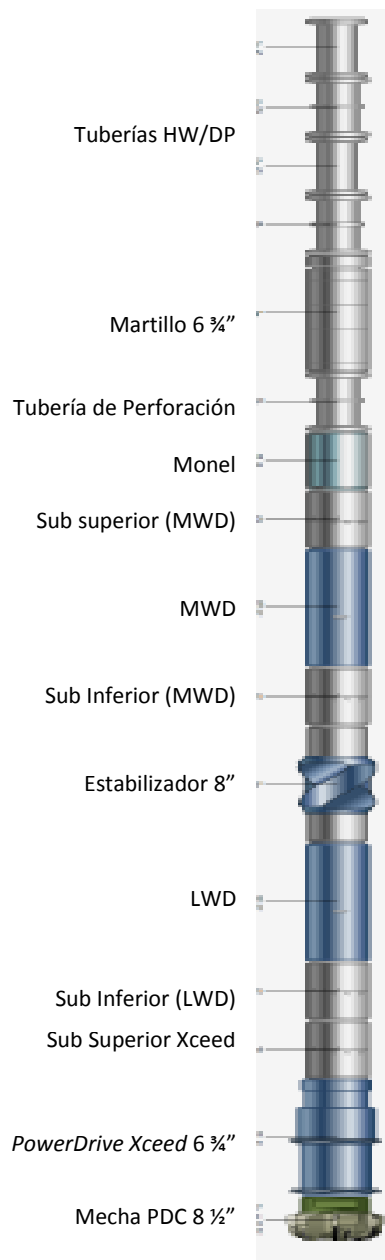


Figura 11: BHA *PowerDrive Xceed*. Modificado^[3]

2.2.3 Parámetros Operacionales

- Velocidad de perforación ^[4]

Representa el avance de la perforación expresada en metros por minutos o en pies por hora, este parámetro es la velocidad con la que se penetra la roca, el cual depende de

las propiedades físicas y la resistencia a la compresión de las rocas. Generalmente este parámetro es llamado ROP, por sus siglas en inglés (*Rate Of Penetration*).

- **Inclinación** ^[5]

Se refiere al ángulo medido en grados por el cual el pozo o el eje que toma la medición varía respecto a la línea vertical, siendo 0° una inclinación totalmente vertical y 90° una inclinación horizontal.

- ***Measured Depth (MD) Profundidad Medida*** ^[6]

Es la distancia total real perforada por el hoyo desde superficie hasta la profundidad total (TD por sus siglas en inglés) alcanzadas en la perforación.

- ***True vertical depth (TVD) Profundidad vertical real*** ^[6]

Es la profundidad del hoyo a cualquier punto medido en un plano vertical y que normalmente se encuentra referenciado en el plano horizontal del *Kelly bushing* del taladro.

- ***Azimuth*** ^[6]

Puede ser definido como la dirección del hoyo (en un punto dado) proyectado en el plano horizontal medido en dirección de las agujas del reloj respecto al norte magnético, norte real o norte de la cuadrícula. El *azimuth* se expresa en valores de 0 a 360°. Ref. Computalog

- ***Surveys***

Representan los chequeos que se realizan normalmente cada 90 pies (cada pareja) mediante la herramienta MWD. Estos permiten conocer la ubicación del pozo en términos de dirección e inclinación, y con ello, se calcula el *dogleg* además de realizar un estimado de los parámetros de perforación a usar durante la siguiente pareja.

- **Pata de Perro (*Dogleg*)** ^[4]

El término *Dogleg* es referido a que tan tortuoso está el agujero de un pozo. Similar a la pata posterior de un perro, de donde el nombre proviene. Este es una medida del cambio angular total en el agujero del pozo entre las estaciones de *surveys* expresada en grados, en otras palabras es el cambio angular calculado usando inclinación y dirección del agujero de las dos estaciones de *surveys* adyacentes.

- **Tasa de Construcción de Ángulo** ^[4]

Podría definirse como la tasa de cambio de la desviación del pozo, es decir, es una desviación normalizada calculada en grados por unidad de longitud estándar. Esto permite que se pueda referir la desviación del agujero sin tener que constantemente expresar las longitudes asociadas del curso entre las estaciones de *surveys*. Este es un valor calculado y usualmente se expresa en grados por cada cien pies.

Cualquier cambio de ángulo severo o brusco entre el rumbo verdadero o la inclinación de dos (2) secciones o registros del hoyo se define como pata de perro. La severidad de pata de perro, representa la tasa de cambio de ángulo expresada sobre una longitud específica.

La cantidad de daño que produce la fatiga depende del número de ciclos experimentados en la pata de perro, así como las dimensiones y propiedades mecánicas de la propia tubería. Debido a que la tensión en la tubería es crítica, una pata de perro de poca profundidad en un pozo profundo a menudo se convierte en una fuente de dificultades.

- **Tortuosidad** ^[7]



Figura 12: Tortuosidad ^[7]

Se define de forma básica como una medida de la desviación de una línea recta, es la distancia real recorrida entre dos puntos, incluyendo cualquier curva encontrada dividida por la distancia en recto. En términos de perforación es definida como una serie de patas de perro locales y que varía en base a secciones rectas y curvas que se aplican a una trayectoria (ver Figura 12).

- **Fricción** ^[4]

Superar el efecto de la fricción es el principal objetivo en el diseño de la sarta de perforación para un pozo horizontal. Además de la fricción axial (arrastre) debida al viaje y/o deslizamiento de la sarta dentro del pozo, también existe la fricción torsional (torque) debida a la rotación de la sarta.

Al girar y mover la tubería dentro o fuera del pozo, la fricción total se dividirá en fricción torsional (torque) y fricción axial (arrastre). La fricción total se dividirá dependiendo de la velocidad de rotación “Vc” (revoluciones por minuto) y la velocidad de viaje “Va” (m/min) de la sarta. La velocidad resultante “Vr” es determinada mediante la ecuación 1

$$V_r = \sqrt{V_a^2 + V_c^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

La sarta debe ser diseñada para proveer el peso requerido en la mecha, producir mínimo torque y arrastre y proveer una adecuada hidráulica para la circulación del

fluido de perforación y el drenaje hacia la superficie de los residuos productos del corte de los sustratos.

- **Torque** ^[4]

Representa la fuerza necesaria para rotar la tubería. Durante las operaciones normales de perforación el torque rotativo aumenta gradualmente con la profundidad, como resultado del efecto del contacto entre las paredes del pozo y la sarta de perforación.

El torque de la sarta en el punto de interés incluye el torque de la mecha. La torsión en la sarta es calculada a lo largo de la misma para cada uno de sus componentes, y es acumulativa a lo largo de la sarta de trabajo.

La torsión suele ser crítica en operaciones de desviación de pozos, pozos profundos y secciones de repaso para calibración.

- **Arrastre** ^[4]

El arrastre de la sarta de perforación es la diferencia entre el peso de la sarta en rotación en el fondo (sin movimiento axial) y su peso al momento de sacarla o meterla respectivamente. Medido desde el peso de la sarta en rotación, el arrastre ascendente usualmente es ligeramente mayor que el arrastre descendente.

En un pozo de alta inclinación las fuerzas laterales entre la sarta y la pared del pozo son bastante altas. El factor de fricción que indica la magnitud de la fricción se emplea para convertir las fuerzas laterales en arrastre.

El coeficiente de fricción deslizante es la relación de la fuerza de fricción con la fuerza normal de contacto. En realidad, este valor depende de los materiales de contacto específico y el grado de lubricación en los diferentes lugares dentro del agujero. Sin embargo, todos estos efectos son expresados como un coeficiente de fricción de característica única que representa las condiciones promedio en un agujero particular.

- **Tiempo Productivo** ^[8]

Es el período de tiempo de aquellas actividades de los equipos de perforación, que contribuyen al progreso de las operaciones de construcción o rehabilitación del pozo de acuerdo a lo planificado o de eventos adicionales no contemplados en la planificación, que surgen a requerimiento del cliente. El tiempo productivo está subdividido en: Tiempos Productivo Planificado y Tiempos Productivo Adicional.

- **Tiempo no productivo** ^[8]

Se define como el período acreditable a eventos o actividades en las operaciones del equipo de perforación, que retardan el avance de las actividades de Construcción y Rehabilitación de un pozo según lo planificado. Inicia desde que se evidencia una actividad no productiva hasta que se encuentren de nuevo las condiciones operacionales productivas que se tenían antes del evento improductivo.

Para un mejor análisis de los eventos que generan tiempos no productivos durante las diferentes fases del proceso de perforación y rehabilitación, se ha clasificado el tiempo no productivo en actividades de tiempo perdido y de problemas, los cuales se definen a continuación:

- **Tiempo Problemas** ^[8]

Son todos aquellos acontecimientos no productivos inherentes a la condición del hoyo y que por sus características se les denomina “problemas”. Comprende las actividades de: Reacondicionamiento del Hoyo, Pérdida de Circulación, Atascamiento de tubería, Control de Arremetida, Corrección de cementación primaria, Pesca y Complejidad Geológica.

- **Tiempo Perdido** ^[8]

Son todos aquellos acontecimientos no productivos que por su naturaleza no son considerados como tiempo problemas y no están asociados a condiciones del hoyo sino a eventos logísticos y superficiales. Estos son: las fallas en general, las esperas, reacondicionamientos de equipos, reparaciones y fuerza mayor.

2.3 MOTORES DE FONDO ^[9]

Herramientas de perforación direccional responsables de transmitir la energía necesaria a la mecha para desarrollar mayores tasas de penetración y conseguir la desviación necesaria, eliminando la rotación completa de la tubería mediante fuerzas de torsión en el fondo del pozo e induciendo el movimiento de la mecha a través de un sistema impulsado por el lodo.

2.3.1 Tipos de Motores

- Motores Tipo Turbina ^[10]

Consiste en una unidad axial de varias etapas accionada por el fluido de perforación que en la actualidad es usado para operaciones específicas, dejando su lugar a los motores de desplazamiento positivo. Las actividades en las cuales son empleados están referidas a formaciones de elevada dureza.

- Motores de Desplazamiento Positivo ^{[1] [2] [10]}

Consta de un motor de dos etapas, con forma helicoidal compuesto por un rotor que gira en torno a un estator fijo, de este modo se produce el desplazamiento positivo o *positive displacement* por sus siglas en inglés, que refiere su nombre. Un conjunto de bielas, cojinetes, ejes y válvula de descarga conforman el sistema usado por este tipo de motores para la perforación direccional, aportando energía a la mecha en técnicas de rotación y deslizamiento, en donde aumenta la tasa de penetración funcionando como una herramienta de desempeño de perforación vertical y orienta al pozo en una dirección definida en cada caso.

Este último tipo es en el cual se basa el desarrollo de esta investigación.

- Características de Motores de Desplazamiento Positivo ^[11]

- Son de diseño modular lo cual les permite operar en un amplio rango de condiciones con una interferencia mínima en sistemas MWD. Sus

componentes pueden ser seleccionados basándose en las condiciones de perforación.

- La variedad de configuraciones rotor/estator hace posible su uso para combinaciones de baja velocidad/alto torque y alta velocidad/bajo torque
- Un eje de hierro forjado provee fortalece al motor.
- El *Bent housing* ajustable en superficie SAB (por sus siglas en inglés) mejora la eficiencia y control de la perforación con el rango de ajustes que se pueden realizar en locación.
- La transmisión sellada extiende la vida del motor previniendo contaminación por lodo.

2.3.2 Componentes ^[11]

Los motores de fondo están compuestos por seis (6) elementos principales:

- *Top Sub*
- Sección de Poder
- Sección de Transmisión
- *Bent housing* ajustable en superficie (SAB)
- Sección de Rodamientos
- Eje de dirección

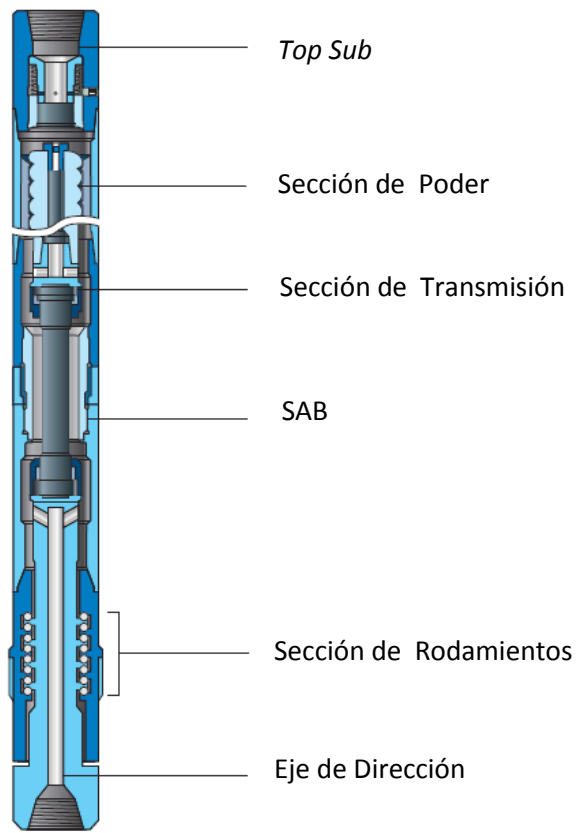


Figura 13: Componentes Motor de fondo. Modificado ^[11]

La Figura 13 muestra la ubicación de cada componente del motor de fondo de desplazamiento positivo.

2.3.2.1 Top Sub

Se requiere un crossover en el tope del motor con el fin de cambiar la rosca especial del estator a la rosca de tubería de perforación, sin embargo, existen varios tipos de *crossover sub* según la función que se requiera:

- *Crossover Sub*: Realiza la función básica de cambiar el tipo de rosca al de tubería de perforación.
- *Dump Valve*: Permite el drenaje de fluido de perforación durante viajes de salida del hoyo.

- *Float sub*: Posee espacio en su diámetro interno para la instalación de una válvula flotadora.
- *Flex Sub*: Puede ser usado para instalar una válvula flotadora y es especial para pozos de alta severidad de *dogleg* (mayor a 12°/100 pie)

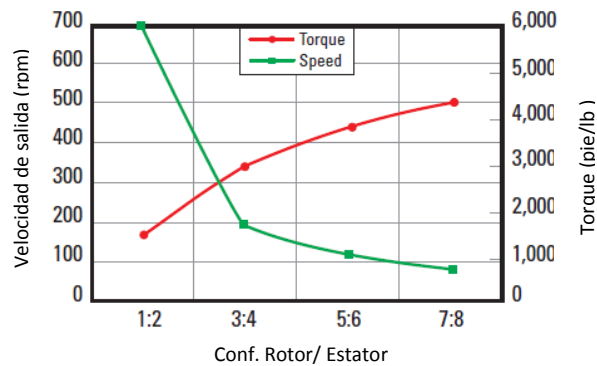
2.3.2.2 Sección de Poder.

Esta sección convierte la energía hidráulica del fluido de perforación en energía mecánica para lograr rotar la mecha. Esto es conseguido por la aplicación en reversa del principio de la bomba de Moineau, es decir, el fluido es bombeado dentro de la sección a una presión tal que genere la rotación del rotor dentro del estator. Ésta fuerza rotacional es transmitida luego a través del eje de transmisión y el eje de dirección a la mecha.

El rotor está fabricado de acero inoxidable anti corrosivo, mientras que el estator está hecho de una tubería de acero con un elastómero de goma moldeado a la camisa. Ambos, rotor y estator están diseñados para resistir abrasión y el deterioro inducido por hidrocarburos. Poseen una forma helicoidal o de lóbulos y debido al funcionamiento del motor, el rotor cuenta con un lóbulo menos que el estator, éstos lóbulos se sellan en puntos de contacto a lo largo de una línea recta, que genera un número de cavidades independientes que producen el movimiento del rotor dentro del estator también llamado *nutation* (nutación). Por cada ciclo de nutación realizado se rota la distancia equivalente al ancho de un lóbulo.

Configuración Rotor/Estator.

La sección de poder de un motor de fondo está diseñada en base a la configuración rotor/estator. De manera general, al tener un diseño con una mayor cantidad de lóbulos se conseguirá baja velocidad y alto torque, por el contrario al poseer menor cantidad de lóbulos, la velocidad será mayor pero obteniendo un menor torque, así es posible decir que los lóbulos actúan como una caja de cambios para controlar el torque, tal como se aprecia en la Gráfica 1.



Gráfica 1: Configuración rotor/estator motor de fondo. Modificado ^[11]

2.3.2.3 Sección de Transmisión.

Se encuentra adherida a la parte inferior del rotor y transmite la velocidad de rotación además del torque generado por la sección de poder a los rodamientos y al eje de dirección, también compensa el movimiento excéntrico de nutación del rotor y el empuje producido mediante dos juntas universales ubicadas en cada extremo tal como se muestra en la Figura14.

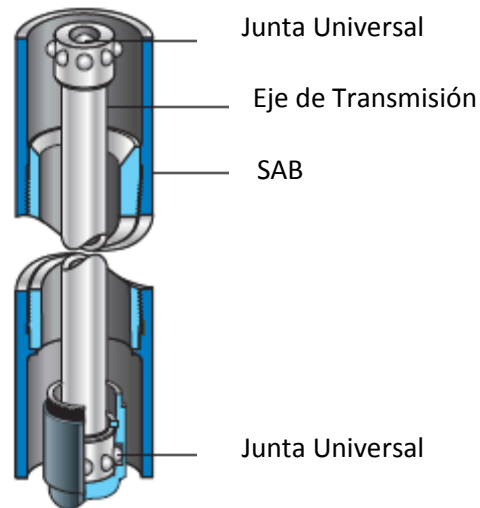


Figura 14: Sección de transmisión motor de fondo. Modificado ^[11]

- ***Bent housing ajustable en superficie (SAB).***

Es el elemento que permite llevar a cabo dicho direccionamiento de forma adecuada, una articulación que desvía la trayectoria de la tubería entre 0 y 3 grados (para el caso de motores estándar), posiciona la parte inferior del motor en la dirección requerida para la operación. Sus componentes se muestran en la Figura 18.

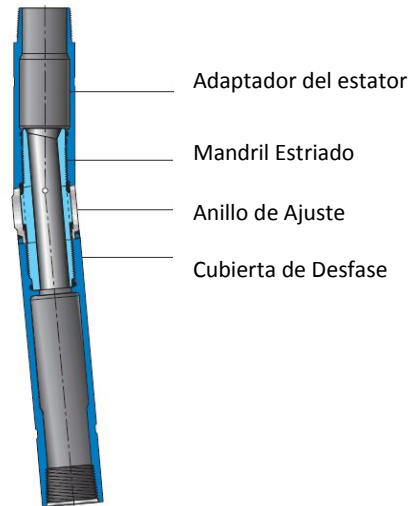


Figura 15: *Bent housing* ajustable. Modificado ^[11]

2.3.2.4 Sección de Rodamientos.

Esta sección resiste las cargas axiales y radiales. Transmite torque y velocidad de rotación del eje de transmisión a la mecha.

Consiste en un eje de dirección de hierro forjado que se encuentra entre los rodamientos axiales y radiales.

Los rodamientos axiales generalmente presentan diseño esférico y están encargados de soportar el empuje hidráulico y peso del rotor, barra de conexión, eje de dirección y mecha cuando el motor está rotando fuera de fondo.

Por su parte los rodamientos de soporte radial tienen un diseño tipo camisa recubierta de carburo de tungsteno y están encargados de proporcionar al soporte radial al eje de dirección. Además restringen el flujo de lodo a través de la sección, redireccionando

un porcentaje del mismo para lubricar los rodamientos como tal, dicho porcentaje es determinado por la condición de los mismos y la caída de presión en la mecha. Existen rodamientos radiales alternativos de mayor costo con un diseño sellado que permiten prescindir de la lubricación proporcionada por el lodo a través de un sistema de llenado con aceite que mantiene el buen desempeño de los mismos.

Finalmente los rodamientos axiales son los encargados de transmitir la carga de la cubierta no rotacional de la tubería del motor a la mecha a través de su diseño esférico, tomando el peso o la carga referida mientras se perfora. Como ejemplo de la sección de rodamientos, se muestra la Figura 19.

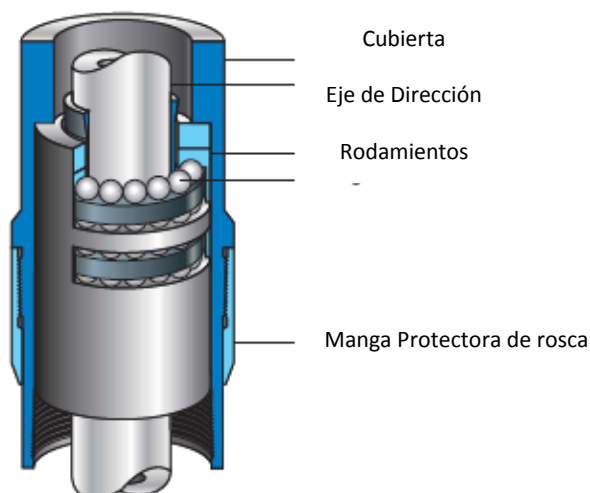


Figura 16: Sección de Rodamientos. Modificado. ^[11]

2.3.2.5 Eje de Dirección

Fabricado de hierro forjado con una rosca en su extremo inferior para la colocación de la mecha tal como se muestra en la Figura 17. Funciona como nexo entre el eje de transmisión y la mecha para lograr la rotación de la misma.

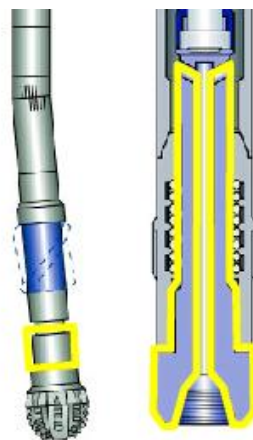


Figura 17: Eje de Dirección ^[11]

2.3.3 Teoría de funcionamiento de Motor de Fondo ^[11]

2.3.3.1 Especificaciones de funcionamiento.

A continuación se presentan las características del motor de fondo en base a su diámetro externo, configuración rotor/estator y número de etapas, que para el presente trabajo corresponden los siguientes valores:

Tabla 1: Configuración del Motor de Fondo

Configuración Motor de Fondo		
Diam. Ext.	Conf. Rot/Est	Etapas
6 ¾"	7:8	5

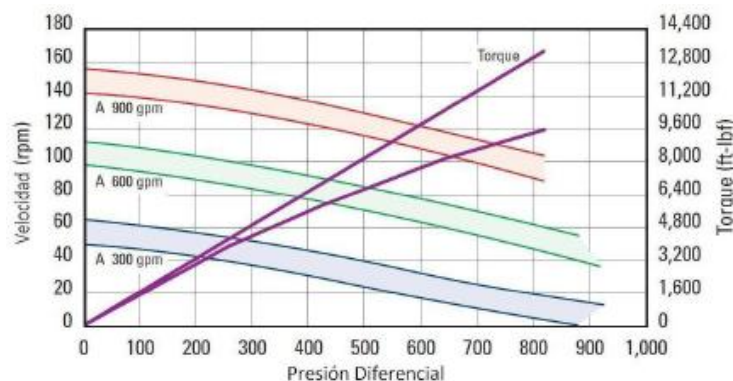
Tabla 2: Especificaciones de Funcionamiento Motor de Fondo

Datos de la herramienta	
Peso	2260 lbm
Longitud nominal	25,19 pie
Dist. Mecha-BH	6,03 pie
Dist. Mecha-Est.	1,75 pie
Datos de desempeño	
Rango de flujo	300-600 gpm
Revoluciones por galón	0,28rev/gal

Velocidad de la mecha	85-165rpm
Máxima Energía	180hp

2.3.3.2 Curva de Poder del Motor.

Las curvas de poder representan las características o respuesta esperada de la sección de poder de motores de fondo bajo condiciones de prueba en superficie. Al momento de la operación, dichas curvas pueden variar debido a efectos de presión, temperatura, dinámica del BHA, geometría del hoyo y propiedades químicas del lodo produciendo una reducción en el torque y potencia de la herramienta para cierto diferencial de presión. La Gráfica 2 muestra la curva de poder de un motor de 5 etapas y relación rotor/estator 7:8.



Gráfica 2: Curva de Poder Motor de fondo

Los parámetros envueltos en la curva de poder son el torque operacional y la velocidad de rotación, relacionados a diversas presiones diferenciales y determinados para caudales de flujo mínimo, medio y máximo según especificaciones de la herramienta. A medida que el torque operativo incrementa, la sección de poder genera una mayor caída de presión, esta relación idealmente es lineal pero en condiciones reales se produce una desviación de dicha tendencia debido a los efectos mencionados con anterioridad. Por su parte la velocidad de la mecha es determinada

por el caudal de flujo a través de la herramienta, ya que mientras mayor es dicho flujo, existe una mayor energía hidráulica que finalmente se traduce en mayor potencia mecánica entregada a la mecha.

2.3.4 Perforación con Motor de Fondo ^[11]

- Chequeo previo

1. Revisar serial y condiciones de daño por transporte.
2. Medir espacio libre del motor (*gap*) entre la parte inferior de la sección de rodamientos y el tope del *bit sub*, primero en tensión y luego levemente apoyado en el piso del taladro. Esta distancia se encuentra documentada en la tabla # del motor, en caso de que la distancia este fuera de rango, no debe ser corrida la herramienta.

- Ajuste del *bent housing*

1. Colocar las llaves, una en el adaptador del estator y otra en el *offset* del *bent* para quebrar conexión.
2. Desenroscar la conexión con dos giros completos, luego, colocar el anillo de ajuste en la posición deseada.
3. Luego de haber colocado los dientes del anillo en la posición requerida del *bent*, se invierte la posición de las llaves y se aplica el torque requerido. Para motores de 6 3/4" corresponde 25000 pie-lb.

Modos de Perforación

- **Deslizar:** El perforador orienta el *bent* del motor a través del *toolface*, dirigiéndolo en la dirección requerida para lograr la inclinación y *azimuth* indicado en el plan de perforación, se coloca peso en la mecha y se mantiene la dirección durante una longitud definida sin rotar la sarta. La distancia a deslizar depende de un cálculo trigonométrico y de la respuesta direccional.
- **Rotar:** Se rota toda la sarta para mantener dirección e inclinación, es decir, para realizar una trayectoria recta en la perforación.

Perforación

- Al alcanzar el fondo, se levante unos pies el motor y se circula brevemente con la tasa que se requiera.
- La presión fuera de fondo y las emboladas de la bomba deben ser registrados, durante la bajada del BHA el inicio de la perforación se identifica por un aumento en la presión correspondiente al diferencial de presión creado entre el rotor y estator mientras el torque se incrementa.
- Se aplica peso al inicio lentamente con cualquier cambio en la presión de las bombas, se continúa procediendo de esta manera mientras el perforador se familiariza con la formación y se establece un patrón para perforar.
- La perforación con motor de fondo es controlada por la cantidad de peso sobre la mecha requerida y el diferencial de presión desarrollado cuyo valor es un indicativo directo del torque en la mecha, ya que este aumenta al incrementar peso sobre la mecha y se reduce al dejar de perforar.
- Es posible aumentar el peso sobre la mecha para mejorar la tasa de penetración, sin embargo, se debe ser cuidadoso para evitar salir de los rangos de operación del motor.
- En caso de exceder el peso sobre la mecha, puede ocurrir que se trabe el motor, de suceder, es necesario levantar inmediatamente y apagar bombas, así

se liberará el torque acumulado en la sarta para luego volver a perforar normalmente.

- ***Rotary Steerable System (RSS). Sistema de dirección rotatorio***^[12]

Es un sistema de rotación que mejora las tasas de penetración ya que no posee componentes estacionarios que puedan crear fricción y reducir así la eficiencia, así evita también atascamientos del BHA. El flujo de recortes de la perforación es mejorado al no aparecer cuellos de botella en el hoyo.

- ***Herramientas Push- the-bit y Point- the- bit***^[13]

Tradicionalmente, todos los sistemas rotatorios (RSS) están divididos en:

- Sistemas *push-the-bit*
- Sistemas *point-the-bit*.

Los sistemas *push-the-bit* son generalmente simples, e involucran a un dispositivo mecánico que empuja contra la pared del pozo, desalineando el eje de la herramienta hacia el eje del pozo para entregar la fuerza en la mecha. Esta fuerza desvía el pozo en la dirección deseada.

Un sistema *push-the-bit* debe trabajar constantemente para aplicar una fuerza lateral y mantener la curvatura de la herramienta. Estos se ven afectados de gran manera por efectos ambientales.

Los sistemas *point-the-bit* son mecánicamente complejos, los cuales contienen un *bent* interno el cual desalinea la herramienta del eje del pozo, esto mediante envío de comando mediante pulsos de lodo que orientan la herramienta. Este *bent* resulta en la respuesta direccional.

La carga lateral se reduce cuando la curvatura del hoyo coincide con la curvatura del hoyo, de esta manera disminuye el trabajo que debe realizar la herramienta en

curvatura. Debido a que su *bent* se encuentra interno, se ve menos afectado por los efectos ambientales.

2.3 POWERDRIVE XCEED ^[13]

Es una herramienta RSS *point-the-bit*, método por el cual consigue realizar curvatura y *dogleg*, además provee control direccional mientras se rota la sarta de perforación. Utiliza la tecnología MWD y un sistema servo- motor que mantiene todas las partes movibles dentro del collar alejadas de formaciones abrasivas y de fluidos de perforación cargados con ripios.

Al igual que la mayoría de las herramientas direccionales, *PowerDrive Xceed* va situada directamente sobre la mecha y debajo de los equipos M/LWD.

2.3.1 Características de *PowerDrive Xceed*:

- Responde tanto en formaciones muy duras como muy suaves
- Excelente control direccional incluso en casos de alto *stick and slip*.
- *Doglegs* de alto ángulo.
- Se puede emplear con mechas bicéntricas.
- Es posible usarlo debajo de un motor de fondo.
- Temperatura máxima de 150 °C.
- Máxima velocidad del collar en fondo de 350 rpm.
- Medición de las revoluciones por minuto del collar en fondo.
- Reporta inclinación y *azimuth* continuo durante la perforación.
- Mide *toolface* tanto magnético como gravitacional.
- Indica valores de *stick and slip*.

2.3.2 Componentes.

PowerDrive Xceed está compuesta por cuatro (4) secciones principales mostrados en la Figura 18:

- CRSPA: Ensamblaje de Poder
- CRSEM: Módulo de Electrónica
- CRSSA: Ensamblaje Direccional
- CRSCA: Ensamblaje de collar

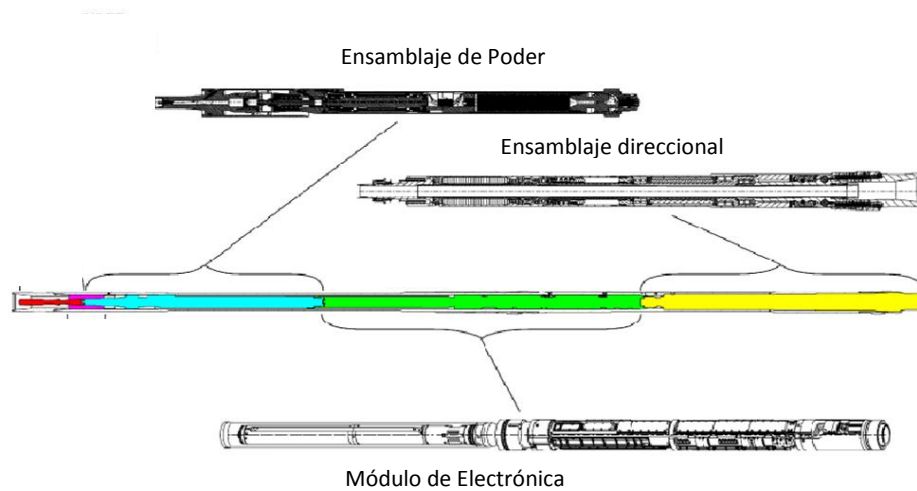


Figura 18: Componentes *PowerDrive Xceed*. Modificado ^[13]

- **CRSPA (*Counter Rotating System Power Assembly*) Ensamblaje de Poder.**

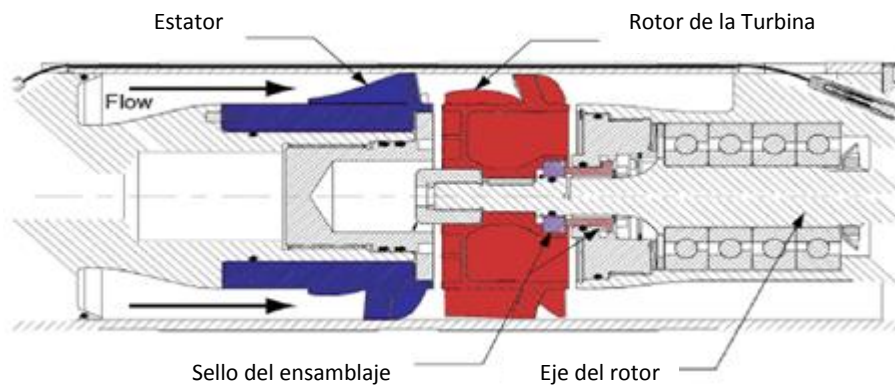


Figura 19: CRSPA ^[13]

Es una turbina dirigida por un alternador homopolar de tres fases instalado en un mandril que posee una cubierta presurizada y compensada por aceite, su función es generar poder para las secciones de dirección y electrónica de la herramienta.

Las turbinas convierten la energía cinética del fluido a energía rotacional a través de la acción dinámica de las aspas rotacionales. Las aspas estacionarias (estatores) re-direccionan el flujo de fluidos hacia las aspas del rotor para aumentar la eficiencia como se muestra en la Figura 19.

La sección de poder utiliza una combinación estator-rotor para girar el direccionador del rotor. El direccionador del rotor está conectado al alternador.

Diferentes kits de flujo existen para adaptar los rangos de flujo según se requieran. El máximo flujo con carga mínima, es en la cual la turbina no puede exceder las 5300rpm ya que las altas velocidades pueden dañar la cara del sello.

- **CRSEM (*Counter Rotating System Electronics Module*) Módulo de Electrónica.**

Contiene todos los detectores y controles de dirección electrónicos, está instalado debajo del ensamblado de la sección de poder y por encima de la sección de dirección dentro del collar.

El ensamblaje del módulo electrónico comprende:

- Los sensores que miden la velocidad angular de collar y *toolface*.
- Los circuitos que traducen las lecturas del sensor.
- Los circuitos que calculan el control de dirección.
- Los circuitos que impulsan el motor de dirección.

Sensores.

El conjunto del tubo sensor contiene un magnetómetro y un inclinómetro de tres ejes, el cual es el paquete estándar de la mayoría de los sistemas MWD, juntos forman un paquete para *surveys* en el hoyo de seis ejes el cual es usado para estimar valores de *azimuth* e inclinación del pozo. El tubo sensor también contiene la tarjeta de memoria

de sensores T1011880 que contiene un serial EPROM para almacenar la información de la calibración de los sensores y permite facilitar la interfase del ensamblaje entero a través de un conector de 25 pines. El ensamblaje de sensores va contenido en un depósito presurizado, ubicado sobre el eje de la herramienta con flujo de lodo de perforación a su alrededor.

- **CRSSA (*Counter Rotating System Steering Assembly*) Ensamblaje de dirección.**

Posee una configuración anular cuyo collar se encuentra lleno de aceite y compensa la presión. El mecanismo de dirección se encuentra aislado del fluido de perforación con un tubo de titanio flexible y corrugado en el eje de la mecha. El tubo flexible recorre la longitud total del ensamblaje direccional desde la base del motor de cambios hasta el tope del eje de la mecha. Éste lleva y aísla todo el fluido de perforación que circula por el centro de la herramienta, el tubo flexible también carga con todas los esfuerzos del dobléz ubicados en este por la acción del eje de la mecha dirigido por el mandril de desfase. (Ver Figura 20)

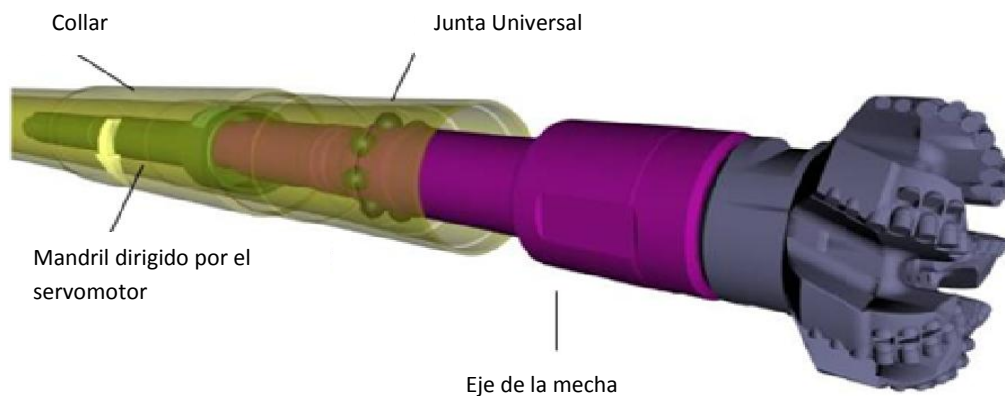


Figura 20: CRSSA. Modificado. ^[13]

- Motor de Cambios.

Posee un servomotor DC (máquina PMSM con un imán permanente sincronizado) que dirige el mandril de desfase mediante una caja de engranajes planetarios. Un resolutor se incluye dentro del ensamblaje para medir la posición del rotor. El motor está eléctricamente conectado a la electrónica a través de un mamparo de 16 pines el cual provee la corriente al motor.

- Compensador de baja presión.

Compensa el aceite del interior con el anular. Mantiene una sobrepresión interna para evitar la invasión de lodo.

- Mandril de desfase.

Este ejecuta sus funciones en dos conjuntos de rodamientos dentro del collar, y además es capaz de rotar estando dentro de este. Su extremo inferior posee un cojinete mecanizado fuera de la línea central del mandril, este contiene un rodamiento que soporta el extremo superior y el eje de la mecha. El cojinete proporciona la desviación requerida que provoca los cambios de posición del eje de la mecha respecto al collar.

- Eje de la mecha.

Su extremo superior va conectado al mandril de desfase vía un rodamiento colocado excéntricamente, de esta manera el mandril puede controlar a través de rotación al eje. De igual forma el eje de la mecha aloja anillos de empuje para aceptar cargas axiales así como también una junta universal que transmite torque desde el eje hacia el collar. Esta junta habilita al eje de pivotar permitiendo su movimiento y de esta manera un desfase de posición con el collar.

- **CRSCA (*Counter Rotating System Collar Assembly*) Ensamblaje de Collar.**

En el collar se alojan los tres sub- ensamblajes, es decir:

- Ensamblaje de Poder (CRSPA)
- Módulo de Electrónica (CRSEM)
- Ensamblaje de Dirección (CRSSA)

La sección de dirección se ubica desde el fondo del collar y anclado en el tapón del collar mediante un resorte ondulado en su parte superior. Esto mantiene a la sección dentro del collar y compensa choques, vibraciones y expansión térmica.

Los otros dos componentes CRSPA y CRSEM van armados desde el tope y hombro del collar hasta 9ft del fondo. Se ayudan mediante un dispositivo de carga axial, el cual es un conjunto de arandelas que resisten la acción de golpes, vibraciones y los cambios causados por temperatura.

El collar esta hecho de de material no magnético para evitar perturbaciones magnéticas en los sensores direccionales

Estabilizadores.

Dos estabilizadores del tipo manga van conectados al collar y ubicados entre 1ft y 11pie de la mecha. Se encuentran 1/8” debajo de calibre y su posición está diseñada para alcanzar un DLS teórico de 8 °/100pies para el caso de *PowerDrive Xceed 675*.

Estructura Interna.

Internamente el collar posee forma de decágono para encajar con el anillo de torque, esto permite transmitir el torque realizado desde el collar hasta el eje de la mecha mediante unas bolas de cerámica.

Puertos del collar.

El collar posee tres puertos localizados entre los dos estabilizadores (Ver Figura 21):

- Dos se ubican sobre la electrónica
 - El puerto inferior ROP (*Readout Port*) el cual comunica la herramienta con el TSIM.
 - El puerto superior HV que provee alto voltaje a la herramienta mientras se le realizan pruebas en laboratorio.
- El tercer puerto se ubica en la sección de dirección y es usado para el llenado de aceite.

Existen además 4 hoyos abiertos pequeños que son los puertos de compensación de presión de la CRSSA.



Figura 21: Puertos del Collar

2.3.3 Teoría de Operación *PowerDrive Xceed*.

Consideraciones de uso:

- Flujo de 290 gpm a 800 gpm dependiendo del *Flow Kit*.
- Zonas de campos magnéticos bajos.
- Alcanza un máximo de *Dogleg* de 8 °/100 pies
- Saturación magnética. Proximidad a grandes materiales magnéticos, la herramienta no puede determinar CRPM y se dificulta sostener el *ToolFace*.
- Hoyos verticales (inclinación < 4°) en un ambiente con interferencia magnética. MTF será impreciso.
- Máxima presión: 20000 lpc.
- Temperatura Máxima: 150 °C.
- Contenido de Arena < 2%.
- Presión de estallido del fuelle: 2500 psi.

- **2.3.3.1 Pasos Previos a la Perforación.**
 - Programar Herramienta.

Se realiza mediante el programa *ToolScope*. Se conecta el TSIM cable en un extremo al ROP y otro a al TSIM1, luego se inicia *ToolScope* donde se establece comunicación con la herramienta para posteriormente configurarla en base a valores de *Angle X*, valores de perforación, parámetros de *Downinking*, se realiza el WST (Prueba de pozo en el sitio) y finalmente inicializar la herramienta.

- Chequeos físicos.

Revisar ambos *extenders* tanto macho como hembra. Estos se conectarán luego a la mecha y a la herramienta LWD respectivamente. Para el extender hembra el torque aplicado debe ser de 50lbs/pie y la distancia entre el final del *extender* y la cara de la conexión tipo caja debe estar entre 1,618” y 1,738”. En el extremo superior, el

extender macho debe poseer una distancia entre 3,357” y 3,477” desde el inicio de la conexión hasta el final del extender.

Además de chequear ambos *extenders*, es necesario medir la longitud del *PowerDrive Xceed*, sus sub, diámetros internos y externos tanto del collar como de los estabilizadores. Las conexiones se deben revisar tanto su tipo como tamaño para conocer las especificaciones del torque a aplicar.

- Perforación con *PowerDrive Xceed*.

Toolface.

PowerDrive Xceed controla el *toolface* mediante su servo-motor que provoca la rotación del mandril de desfase; este a su vez, va conectado al eje de la mecha en su extremo inferior a través de una excentricidad, la cual es de 0,6” para *PowerDrive Xceed 675*, por esto, al controlar la excentricidad se controla el *toolface* en esta inclinación.

Junta Universal

La inclinación del eje de la mecha es equivalente a la inclinación del motor de fondo. Sin embargo, la diferencia radica en que la inclinación del Xceed no gira con el collar ya que se mantiene “geoestacionaria” (no se mueve en relación a la formación) mientras el collar rota alrededor de este.

Este movimiento relativo entre el collar y el eje de la mecha requiere un punto de pivoteo entre ellos. Para esta función está la junta universal, la cual está hecha por bolas de cerámica dentro de bolsillos en el controlador del eje, lo que permite el movimiento oscilatorio necesario para controlar el *toolface*. Esta junta fija el eje al collar en torsión haciendo posible rotar la mecha y perforar el hoyo.

Geoestacionario.

El servomotor va adherido al collar y mantiene la orientación del *toolface* geoestacionaria al contra-rotar el mandril de desfase a la misma velocidad del collar, mientras esta condición se mantenga, el *toolface* permanecerá geoestacionario. Para cambiar el *toolface*, la rapidez del servomotor es variada ligeramente así que variará la velocidad respecto al collar.

Cambio de dirección y perforación en recto.

El *toolface* puede ser cambiado a derecha o izquierda dependiendo de la distancia que será atravesada. Una vez la mecha ya esté apuntada en la nueva dirección, se realizan los cambios en la velocidad del servomotor para mantener el *toolface* geoestacionario. Para perforar una sección en recto, se cambia la dirección del *toolface* alrededor del eje lateral a 1,9 rpm.

Al igual que un motor de fondo, la tasa de construcción de ángulo se determina por el tiempo empleado dirigiendo o manteniendo el sentido.

Control de dirección y Teoría de *Downlinking*.

Para herramientas RSS, la dirección de la trayectoria del pozo es ajustado mediante el control de:

- La orientación del ángulo de dirección efectivo.
- El porcentaje de tiempo empleado orientando.

La tasa de máxima construcción/giro puede ser alcanzado al usar 100% del tiempo orientando en la dirección deseada. Cambiar el porcentaje de tiempo empleado orientando puede ajustar la tasa de construcción de ángulo y giro para cumplir los requerimientos de perforación y esto se logra por medio de *downlinking* a la herramienta mientras se perfora.

El perforador envía comandos de *downlink* al cambiar el flujo de lodo en un patrón predefinido; la herramienta detecta estos cambios de flujo al medir la velocidad de la turbina.

Modo de freno.

Cuando el motor rota más rápido de lo deseado, puede ser controlado colocándolo en modo de freno. En esta modalidad el motor produce energía eléctrica y se transforma esencialmente en un alternador. Una pequeña cantidad de la energía eléctrica se almacena en los capacitores a través del DC bus, pero cualquier exceso debe ser disipado, ya que, el voltaje del capacitor no puede exceder 400V.

Una bobina de freno se conecta al DC cuando el voltaje supera 380V y se desconecta al caer hasta 360V. En el momento en que el motor pasa a modo de freno el voltaje del capacitor empieza a aumentar hasta llegar a 380V, instante en que se conecta la bobina al DC y comienza a disipar la energía en forma de calor. Si la energía disipada es mayor a la producida por el motor, el voltaje empieza a caer hasta alcanzar 360V y la bobina procede a desconectarse. Cuando el voltaje aumenta de nuevo, se inicia el ciclo de nuevo.

Sensores y mediciones.

El sistema de control de *PowerDrive Xceed* requiere dos entradas:

- Velocidad de rotación del collar
- Orientación del eje de la mecha

Ambas entradas deben ser medidas con respecto a un sistema de coordenadas geoestacionarias. El sistema de coordenadas a escoger por lógica sería basado en el campo magnético de la tierra o el campo gravitacional de la tierra. Para esta función, *PowerDrive Xceed* está equipado con sensores para medir ambos campos.

Medición del Campo Gravitatorio.

El campo gravitatorio es el sistema de coordenadas natural para lograr una retroalimentación en términos de posición para aplicaciones de perforación. Sin embargo, es complicado lograr aislarlo de otras fuentes de aceleración, tal es el caso de choques y vibraciones que introducen ruido al sistema.

Las técnicas para toma de *surveys* ayudan a manejar este problema al mantener la sarta geoestacionaria, deteniendo la rotación al momento de tomar *survey*, y al suprimir vibraciones con filtros analógicos. Los acelerómetros en *PowerDrive Xceed* giran con el collar y son objeto de choques durante la perforación lo cual hace el procesamiento de la señal más complicado.

Medición del Campo Magnético.

El fondo del hoyo es un ambiente libre de perturbaciones magnéticas y como resultado, el uso de un paquete de magnetómetros es más efectivo para un uso general; es menos susceptible al ruido producido por choques en la perforación, además, la tasa de muestreo en los sensores radiales es relativamente rápido y las señales radiales son digitalmente filtradas lo cual minimiza el efecto de desfase por filtros en el sistema de rendimiento. Así se puede decir que las mediciones de tasa y posición de los magnetómetros son más confiables por requerir una filtración menor que los acelerómetros.

Paquete de magnetómetros.

Es un sensor MWD estándar de 3 ejes el cual contiene 3 sensores ortogonales entre ellos, uno alineado por cada eje del sistema de coordenadas cartesianas.

La tasa de rotación del collar y la posición de referencia del *toolface* pueden ser derivadas de los dos magnetómetros colocados en la sección radial cruzada de la herramienta, una vez la rotación del *collar* haya sido establecida por el magnetómetro radial, el mandril de desfase puede contra rotar a la misma tasa. Esto hace que la

inclinación efectiva sea creada por el mandril de desfase y el eje de la mecha. Sin embargo, para obtener control de dirección es necesario conocer:

- Orientación del *toolface*
- Orientación *highside* de la inclinación creada por el desfase entre el mandril y el eje.

Medición de la orientación del *toolface*.

Es controlada mediante el uso del motor para manejar el mandril de desfase. Un resolutor en la salida del eje del motor establece la orientación del *toolface* del eje con respecto al *collar*, y como el motor y los estatores del resolutor se encuentran adjuntos al collar, así como su respectivos rotores están conectados al mandril de desfase, el resolutor mide el ángulo entre el collar y el ensamblaje del eje de la mecha.

La posición relativa del mandril de desfase en el campo magnético de la tierra puede ser calculada si se conoce:

- Ubicación relativa del collar con el campo magnético de la tierra (de los magnetómetros radiales)
- Posición relativa del mandril de desfase con el collar (del resolutor)

Para mantener consistencia en la respuesta de posición, el *toolface* magnético es convertido a *toolface* gravitatorio (GTF por sus siglas en inglés) usando ángulo X. Cuando el GTF de la inclinación es conocido, el control de la trayectoria circular puede ser comparado con el introducido por el GTF deseado, para luego ajustar la velocidad del motor ligeramente y alcanzar el control del GTF.

Paquete de inclinómetros.

Este contiene tres acelerómetros donde cada uno está centrado en uno de los ejes de la herramienta y también con los ejes de coordenadas cartesianas del collar (x,y,z). Los sensores radiales del inclinómetro pueden ser usados para medir la posición del *toolface* y la tasa de rotación, pero el tiempo de retraso creado por la filtración para disminuir el ruido de perforación a un nivel aceptable hace que las mediciones del acelerómetro no puedan ser usadas directamente.

Para permitir que los acelerómetros sean usados en el control de la orientación del eje de la mecha, las señales del sensor radial son rotadas del sistema de coordenadas del collar, dentro del sistema de coordenadas del mandril de desfase usando el ángulo del resolutor. Al estar el mandril de forma geoestacionaria, la filtración puede ser aplicada para eliminar las influencias dinámicas en la señal.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

La faja petrolífera del Orinoco constituye actualmente las reservas de hidrocarburos pesados ($API < 20^\circ$) y extra pesados ($API < 10^\circ$) más grandes del mundo con un POES de 4 billones de barriles. Sus yacimientos están conformados por arenas no consolidadas formadas durante el mioceno que poseen una porosidad promedio de 25% y permeabilidades de 10 a 20 Darcys, espesores que varían entre 50 y 200 pies en una secuencia de rocas sedimentarias que aumentan de grosor y buzan hacia el norte de la estructura. ^[14]

Descubierta en Noviembre de 1938 luego de perforar el pozo Zuata-1. Se ubica en el Oriente de Venezuela al norte del río Orinoco cubriendo una extensión de 75,100 km² que abarca territorios del sur de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas (Oeste- Este), y que actualmente el área de explotación es de 11,598 km². ^[15]

La Faja Petrolífera del Orinoco se encuentra dividida en cuatro (4) grandes zonas de explotación que están identificadas como: Boyacá (previamente Machete), Junín (antes Zuata), Ayacucho (antes Hamaca), y Carabobo (antes Cerro Negro) ^[16]. Éstas a su vez se subdividen en un total de 27 bloques de menor tamaño que han sido repartidos mediante la figura jurídica de empresas mixtas, que consisten en la explotación en conjunto de PDVSA como participación mayoritaria (mayor al 60% del capital) en sociedad con otras empresas tanto extranjeras como venezolanas.

3.2 CAMPO ZUATA PRINCIPAL ^[17]

El campo Zuata principal está localizado en el Distrito Cabrutica, estado Anzoátegui, se ubica al centro- sur del territorio que corresponde al bloque Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco. Se extiende en una superficie 299,5 Km².

El campo Zuata principal contiene un POES total de 21.864 MMBN y un GOES de 1421 MMMPCN con unas Reservas Recuperables de Petróleo y Gas 2744 MMBN y MMMPCN. La gravedad API del yacimiento se encuentra en 9° API. La explotación se realiza en yacimientos arenosos Terciarios, localizado en la Formación Oficina.

Los ambientes sedimentarios interpretados en el campo son predominantemente fluviales, o fluviales con influencia de marea. Los intervalos productores consisten fundamentalmente, de varios depósitos fluviales con influencia de marea amalgamados.

Estructuralmente el Campo Zuata Principal forma parte de un homoclinal fallado, generalmente de rumbo Este - Oeste con un buzamiento suave de dos a tres grados al Norte. Existen dos sistemas de fallas normales, uno principal con rumbo Este - Oeste y buzamiento al Sur y otro secundario de fallas con rumbo Noroeste – Sureste y gradualmente orienta el buzamiento hacia el Suroeste. ^[18]

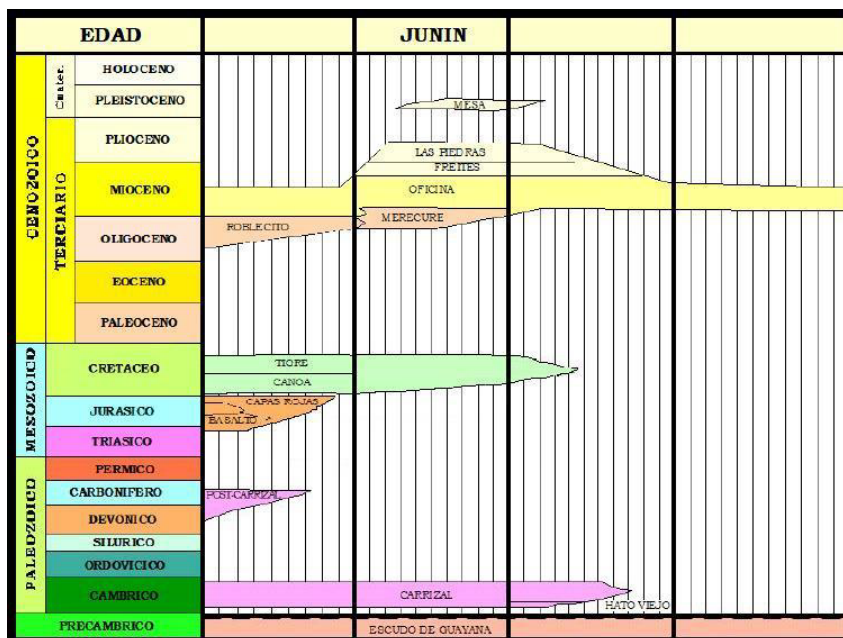


Figura 22: Columna Estratigráfica Zuata Principal ^[17]

Estratigráficamente, el campo Zuata Principal se compone de los sedimentos de los Paleozoicos encontrados en las formaciones Hato Viejo y Carrizal, seguidos por las formaciones del Cretácico Canoa y El Tigre pertenecientes al Grupo Temblador hasta encontrar la formación Oficina del Mioceno Inferior que representa la roca reservorio del área. Le siguen las formaciones Freites, Las Piedras y Mesa depositadas del Mioceno Medio al Pleistoceno (Ver Figura 22).

3.2.1 Formación Mesa ^[19]

Edad: Pleistoceno. Litológicamente consiste de arenas de grano grueso y gravas, con cemento ferruginoso cementado y muy duro; conglomerado rojo a casi negro, arenas blanco-amarillentas, rojo y púrpura, con estratificación cruzada; además contiene lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolitas. La Formación Mesa generalmente suprayace concordante y transicionalmente a la Formación Las Piedras. El espesor de la Formación Mesa es muy variable, pero en términos generales disminuye de norte a sur, como consecuencia del cambio en la sedimentación

3.2.2 Formación las piedras ^[19]

Edad: Plioceno-Mioceno Superior. Consiste principalmente de sedimentos finos, poco consolidados, que incluyen areniscas y limolitas más o menos carbonáceas, lutitas arcillosas, arcilitas abigarradas y lignitos. La Formación es concordante por encima de la Formación Freites.

3.2.3 Formación Freites ^[19]

Edad: Mioceno Medio. Está compuesta por lutitas fósiles verdes a gris verdoso, con areniscas en el tope y la base, que permiten la subdivisión de la unidad en tres intervalos: un intervalo superior de unos 300 pies, con capas delgadas de areniscas arcillosas de grano fino, de color blanco verdoso, algo glauconíticas y muy persistentes lateralmente. Un intervalo predominantemente lutítico y un intervalo inferior de aproximadamente 300 pies de lutitas intercaladas con areniscas verde-amarillentas, de grano medio a grueso, glauconíticas, calcáreas o sideríticas y muy fosilíferas. La Formación Freites suprayace concordantemente a la Formación Oficina.

3.2.4 Formación Oficina ^[19]

Edad: Mioceno Inferior. La Formación Oficina consiste en una alternancia de lutitas grises, gris oscuro y gris marrón, intercaladas e interestratificadas con areniscas y limolitas de color claro y grano fino a grueso. Componentes menores, pero importantes de la unidad, son las capas delgadas de lignitos y lutitas ligníticas, arcilitas verde y gris claro, con esférulas de siderita, areniscas siderítico-glauconíticas y calizas delgadas con estructuras cono en cono.

El material carbonoso es común y en algunos pozos pueden encontrarse hasta 40 ó 50 capas de lignito, que varían desde pocos centímetros hasta 60 cm de espesor y que son de considerable valor en las correlaciones. La formación en el área cuenta con un espesor aproximado de 650 pies.

3.3 CAMPO CERRO NEGRO ^[14]

Se ubica dentro del bloque Carabobo de la Faja petrolífera del Orinoco. El área a estudiar de este campo es la correspondiente al Bloque Carabobo 5, el cual está localizado en la jurisdicción de Barcelona en el estado Anzoátegui a 55Km al noreste de Ciudad Bolívar.

El campo Cerro Negro en total cuenta con un área aproximada de 7100 Km² que se extiende desde el sureste del estado Anzoátegui, la parte meridional del estado Monagas y un sector del occidente del estado Delta Amacuro.

3.3.1 Estratigrafía

La producción del campo Cerro Negro está asociada a la formación Oficina del Mioceno Inferior, siendo sus cuatro miembros principales: Morichal, Yabo, Jobo y Pílon.

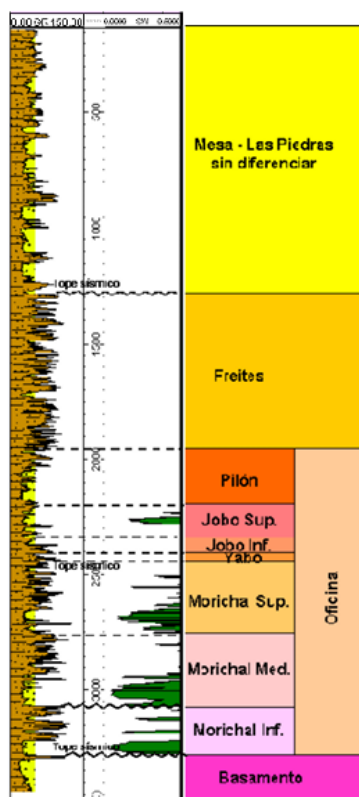


Figura 23: Columna Estratigráfica Campo Cerro Negro ^[19]

La columna estratigráfica mostrada en la Figura 23 avanza en la estructura de formaciones de mayor a menor edad está conformada por: Basamento, constituido en un complejo ígneo- metamórfico del Pre- Cámbrico, sigue en la secuencia el grupo Temblador de Edad Cretácica, para luego encontrar en contacto discordante a la formación Oficina ya mencionada. Seguidamente aparece la formación Freitas de edad Mioceno Superior hasta finalmente encontrar las formaciones más recientes Las Piedras- Mesa pertenecientes al Plioceno- Pleistoceno. A continuación se describen detalladamente cada formación:

3.3.2 Basamento ^[8]

Está representado por rocas ígneas y metamórficas con edades mayores a los 1300 m.a. La litología que predomina está definida por granitos, gneises, anfibolitas y esquistos. Constituye una superficie erosionada de forma irregular, fallada y con

paleorelieves, más fuertes hacia el sur que en la región norte. En los perfiles de pozos y en las secciones sísmicas resulta ser un marcador regional muy bien diferenciado y de fácil reconocimiento.

3.3.3 Formación Oficina ^[8]

En el área de Carabobo, la formación Oficina mantiene la condición de ser la más importante desde el punto de vista petrolífero. También permanece la subdivisión estratigráfica que se estableció en los campos tradicionales del Norte en cuatro (4) miembros: Miembro Morichal para las arenas basales. Miembro Yabo para el intervalo lutítico que separa al Miembro Morichal del Miembro Jobo, que a su vez contiene las arenas superiores de la formación Oficina. Por último un intervalo predominantemente lutítico denominado miembro Pílon que va desde el tope del miembro Jobo hasta el tope de la Formación Oficina.

3.3.4 Miembro Morichal ^[8]

Es el más profundo de todos, representado por una secuencia de arenas transgresivas cuarzosas de color marrón, de grano medio con pobre escogimiento, poco consolidadas, intercaladas con capas de lutitas y limolitas con presencia de intervalos de carbón. Hacia la base del intervalo existen arenas masivas poco consolidadas asociadas a un ambiente fluvial donde pueden encontrarse espesores importantes, mientras que en la sección media y superior se observan arenas intercaladas con lutitas y limolitas con presencia de carbones que fueron depositados en un ambiente deltaico en el que los espesores de arena son menores. Hacia el este de Carabobo el miembro Morichal se va reduciendo hasta desaparecer y acuñarse contra el Alto de Uverito. El contacto inferior es discordante con el basamento ígneo-metamórfico al sur y con el cretácico al norte y concordante en el tope con el miembro Yabo de la misma formación.

3.3.5 Miembro Yabo ^[8]

Está conformado por una sección lutítica que separa los miembros Morichal y Jobo. Es una lutita transgresiva de color gris verdoso con intercalaciones de areniscas de grano fino, calcáreas y fosilíferas. Este miembro está definido muy claramente en campos localizados al norte del bloque, pero hacia el sur se vuelve más arenoso, en donde en ocasiones la arena asociada a dicho miembro presenta saturación de petróleo. Los contactos inferior y superior de Yabo son concordantes con las arenas del miembro Morichal y con las secuencias de lutitas carbonosas y arenas del Miembro Jobo.

3.3.6 Miembro Jobo ^[8]

Está constituido por una alternancia de arenas, lutitas y limolitas que tienden a hacerse más arenoso hacia el tope mostrando buenas saturaciones de petróleo, por lo que este miembro constituye el segundo en importancia dentro de la formación Oficina después del Miembro Morichal. Este miembro al igual que Morichal se acuña contra el basamento al Sur y hacia el Este contra el Alto de Uverito.

3.3.7 Miembro Pílon ^[8]

Representa la parte superior de la formación Oficina que suele caracterizarse hacia los campos del Norte por una sección arcillosa transgresiva con escasos lentes de arena, en dirección al Sur (dentro del área de Carabobo) esta unidad sedimentaria incrementa su carácter arenoso mostrando espesores de arena neta petrolífera de 140 pies hacia el este del área. Los contactos tanto superior e inferior son transicionales.

3.3.8 Formación Freites ^[8]

Suprayacente y concordante con la formación Oficina, la formación Freites está definida como un intervalo lutítico (en los campos ubicados al norte del bloque Carabobo) que a medida que se aproxima al sur se vuelve más arenoso. Suele resultar difícil separar Oficina de Freites usando solamente perfiles eléctricos dado que el Miembro Pilón (tope de la formación Oficina) y la formación Freites son lutíticos y además sus contactos son concordantes, por lo que es necesario la utilización de otros métodos como bioestratigrafía. La formación Freites representa el sello regional para los yacimientos de hidrocarburos de la Faja y por debajo de este se encuentran los primeros reservorios de hidrocarburo como lo son los miembros Jobo y Pilón que suelen entrapar ocurrencias menores de crudo pesado.

3.3.9 Formación Mesa-Las Piedras ^[8]

De edad Pleistoceno a Plioceno constituye la formación más somera por debajo de la superficie del área de Carabobo. Ocupan el tope de la columna sedimentaria en toda el área de la Faja y además estas formaciones no se diferencian entre sí, por lo que suelen considerarse como una sola unidad. La litología es homogénea, consistiendo en gruesos paquetes de arena de grano grueso y gravas con cemento ferruginoso con menores cantidades de limolitas carbonosas y lutitas. Estas formaciones no contienen hidrocarburos pero sí almacenan grandes cantidades de agua dulce que puede utilizarse para uso doméstico o en procesos de generación de vapor, desalación de crudos, etc.

3.4 PRÁCTICAS OPERACIONALES EN LA FPO ^[3]

La perforación de la sección de 8 ½” representa un reto por sí mismo debido principalmente a la pobre limpieza del hoyo característica de la zona y causada por la plasticidad de la formación.

Por ello, existen una serie de prácticas para la perforación de la sección horizontal creadas para tratar de contrarrestar los inconvenientes que pueden aparecer durante el proceso.

- **Parámetros de perforación.**

La tasa de bombeo utilizada va usualmente entre 430 y 500 gpm con una rotación de 40 a 70 rpm. El diferencial de presión utilizado varía de 50 a 250 psi para perforación con motor de fondo, sin embargo, lo más recomendable es buscar el mayor porcentaje de rotación por pareja para mejorar limpieza del hoyo, adicionalmente al despegar de fondo se debe colocar la sarta en rotación a menos de 40 rpm.

- **Limpieza del hoyo.**

Una de las estrategias utilizadas de limpieza es la circulación fondo arriba cada 500 ft perforados, se utiliza una baja reología seguido de una alta y se bombea para agitar los recortes de formación. En fondo la ROP no puede ser reducida para evitar la caída de la inclinación y se repasa dos veces a 40 rpm.

- **Repasos y viajes.**

Los viajes de limpieza son bastantes comunes para tratar las condiciones del hoyo y usualmente van acompañados de un cambio de tubería para aumentar o disminuir el peso sobre la mecha (*pipeswap*). La sarta es sacada del hoyo en repaso hasta la posición requerida para realizar el cambio de tubería para luego volver a bajar y alcanzar la profundidad del hoyo. Es necesario indicar que el repaso no siempre es necesario y que previo a sacar, es prudente chequear los valores de torque y arrastre en función de los factores de fricción, de no ser mandatorio, se puede sacar normalmente con elevadores.

Posterior a finalizar la perforación y alcanzar la profundidad total, se circula a una rotación adecuada (40 rpm para motor de fondo y 100 rpm para *PowerDrive Xceed*) hasta obtener retornos limpios en los zarandas para después efectuar un viaje de limpieza repasando y subir hasta 30° de inclinación en el revestidor de 9 5/8". El viaje

hasta el revestidor se debe hacer monitoreando continuamente la velocidad de la sarta, ya que, está demostrado que a 1000 pies/hr o a una velocidad mayor incrementa las probabilidades de dañar algún componente del BHA debido a la cantidad de choques y vibraciones a las que se somete la sarta especialmente en secciones de alto *dogleg* dentro del revestidor. Por ello, el repaso se debe realizar a velocidades menores a 600 pies/hr.

Luego de haber circulado hasta retorno limpio dentro del revestidor, se baja de nuevo hasta el fondo del hoyo, esta vez, solo con elevadores en viaje de calibración del hoyo que simula la bajada del *liner* de 7", y buscando subsanar cualquier obstrucción.

Durante este viaje de calibración, uno de los riesgos asociados, es la posibilidad de un *sidetrack* involuntario a causa del *bent* del motor al momento de encontrar puntos de apoyo. Para evitar esta situación, se pueden chequear los gráficos de torque y arrastre a modo de buscar los puntos de alta tensión durante viajes previo a modo de descartar si se trata de un comportamiento normal o si se ha presentado una obstrucción real en el hoyo.

3.5 PROBLEMAS COMUNES EN LA FPO

- Pega de Tubería.

Esta es una de las más grandes preocupaciones al perforar en la faja. La mayoría de estos incidentes ocurren durante repasos, viajes y toma de *surveys*. Es necesario monitorear constantemente los factores de fricción en los gráficos de broomstick y entender los mecanismos de pega y la reacción para prevenir estas situaciones.

Los principales mecanismos de pega en la perforación de la sección horizontal son: acreción, diferencial de presión y empaquetamiento. Acreción es un mecanismo causado por la mezcla de arena y petróleo muy viscoso que crea factores de fricción

muy altos que limitan el movimiento de la sarta. Para controlar este fenómeno se acostumbra aplicar surfactantes en lodos de perforación. ^[3]

La pega por presión diferencial, ocurre al perforar con alto sobre balance en formaciones agotadas o con presiones anormales. El riesgo de pega disminuye al manejar la densidad del lodo y mejorar la calidad del revoque para reducir el filtrado. De igual manera, evitar que la sarta se mantenga estacionaria durante largos períodos es buena práctica, especialmente en procedimientos como toma de *surveys*, conexiones y al momento de deslizar con motor de fondo.

- ***Sidetrack Accidental***

Un inconveniente común en la perforación direccional en el área está relacionado a formaciones suaves en las cuales se debe operar de manera cautelosa al alcanzar el KOP del pozo, dicha precaución debe ser máxima si se continua la perforación con un BHA de estabilizadores múltiples usando una tasa de flujo alta (al menos 500gpm) y rotando lo menos posible la sarta, es decir, utilizando la técnica de desplazamiento al atravesar esa profundidad crítica siguiendo la trayectoria deseada y evitando incurrir en un *sidetrack* accidental perforando en la orientación inadecuada.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se presentan la serie de métodos y procedimientos utilizados para la realización y cumplimiento de objetivos establecidos para el presente trabajo de grado.

4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación llevada a cabo se puede clasificar como descriptiva, ya que, se caracterizó el comportamiento y rendimiento de distintas variables relacionadas a un hecho, para luego desarrollar un análisis en base a éstas.

La investigación descriptiva “consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno y se supo establecer su estructura o comportamiento. Los estudios descriptivos miden las variables de forma independiente, y aun cuando no se formulen hipótesis, las primeras aparecerán enunciadas en los objetivos de investigación” (Arias 2004).

Diseño

4.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación en cuestión se ubicó dentro de un diseño de investigación documental y de campo, dado que la obtención de la información fue recopilada tanto de manuales, libros y trabajos previos, además de recolección de datos directamente de campo.

La investigación documental “es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas” (Arias 2004).

Para llevar a cabo de manera satisfactoria la investigación se requiere la definición de los requerimientos por medio de una investigación documental, que permiten darle soporte y mayor veracidad al estudio realizado y obtener nuevos conocimientos para el análisis del mismo.

Mientras que la investigación de campo “consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variables alguna” (Arias 2004).

4.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población según Ballestrini (1997) “puede estar referida a cualquier conjunto de elementos de los cuales pretendemos indagar y conocer sus características o una de ellas y para el cual serán validadas las conclusiones obtenidas en la investigación”. Basado en lo anterior, para este TEG, la población se extendió a todas las secciones horizontales (8 ½”) de pozos perforados con motor de fondo y *PowerDrive Xceed* en los campos Zuata Principal y Cerro Negro en las áreas pertenecientes a las empresas mixtas PetroMiranda y PetroIndependencia respectivamente.

Por otro lado, Ballestrini (1997) define la muestra como “una parte de la población, o sea, un número de individuos u objetos seleccionados científicamente, cada uno de los cuales es un elemento del universo. La muestra es obtenida con el fin de investigar, a partir del conocimiento de sus características particulares, las propiedades de una población”. Por ello, fueron escogidos un total de 9 secciones de 8 ½” distribuidos de la siguiente manera: 4 perforados con motor de fondo y 3 perforados con *PowerDrive Xceed* en el campo Zuata Principal, mientras que para el campo Cerro, se escogió una sección por cada herramienta.

4.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

4.4.1 Técnicas

“Las técnicas de recolección de datos son las distintas formas o maneras de obtener información...” (Arias 2004)

En función del logro de los objetivos de la investigación se utilizaron instrumentos orientados a obtener información o datos a través de las siguientes técnicas: análisis documental, la observación directa.

Se realizó un análisis documental mediante la recolección y análisis de información técnica relacionada a motores de fondo, *RSS*, *PowerDrive Xceed* y los campos en cuestión, proveniente de manuales, publicaciones especializadas en el tema (*papers*), trabajos de grado previos, etc.

Otra parte de la información empleada en la investigación fue tomada directamente en la localización de los mismos realizándose así una observación directa.

4.4.2 Instrumentos

- DOX (*Drilling Office X*)

Es un sistema de aplicaciones utilizadas para planear y evaluar las operaciones de perforación el cual consiste en los siguientes cuatro módulos:

- Buscador de datos: Proporciona la capacidad de crear y manipular proyectos de perforación.
- Gestión de *Surveys*: Este módulo maneja un método para crear, importar y exportar *surveys* tanto propuestos como reales, además de efectuar un análisis anticolisión entre pozos.
- Ingeniería de perforación: Permite efectuar análisis de hidráulica, torque y arrastre, calibración del factor de fricción, pandeo del BHA, vibración del BHA y su tendencia según la geometría del hoyo. Para cada uno de estos

análisis, exceptuando factor de fricción, es posible realizar cálculos punto por punto o múltiples puntos para la perforación, viajes, repasos u operaciones de circulación.

- Herramientas DD: Representa un panel de control donde se despliega la jerarquía del hoyo, incluyendo desfase de *surveys*, plan del pozo, *surveys* reales, geometría del hoyo, eventos de riesgo y equipos, así como también, profundidad y tiempo real.

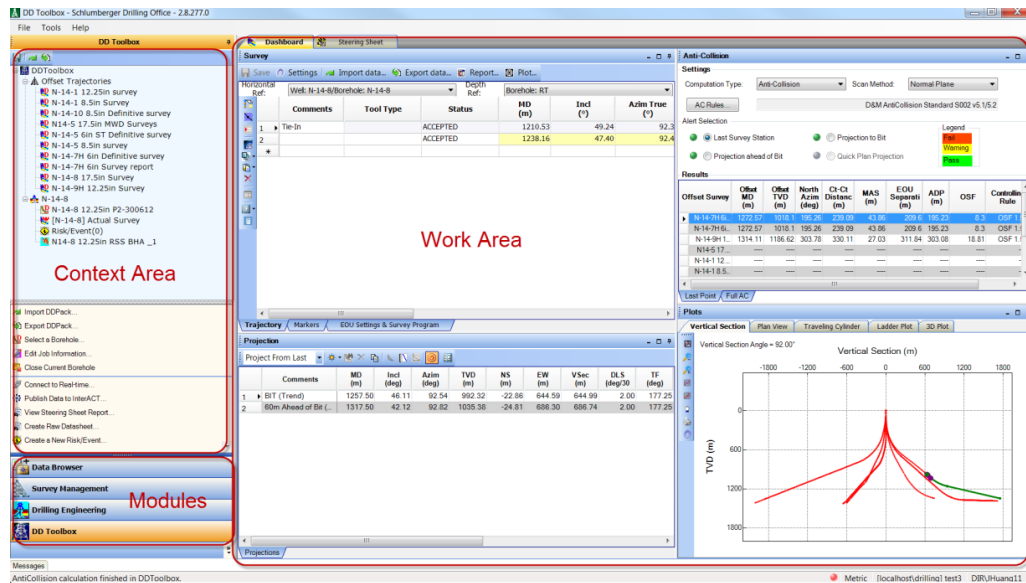


Figura 24: Drilling Office X

4.5 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se llevaron a cabo las fases que se presentan a continuación:

4.5.1 Revisión Bibliográfica

Se llevó a cabo una recopilación de material teórico y técnico que permitió la familiarización y comprensión del tema tratado, revisando informes técnicos de estudios similares e incluyendo en el material recolectado de revistas técnicas, publicaciones, libros y trabajos especiales de grado relacionados a la investigación, además de manuales de la empresa Schlumberger referentes a las herramientas a estudiar. Este paso fundamenta, desde el punto de vista teórico, el proyecto desarrollado, quedando reseñado en la sección de referencias bibliográficas del trabajo especial de grado.

4.5.2 Capacitación y adiestramiento

Esta fase permitió la observación, aprendizaje y recopilación de información técnica por parte del investigador. En principio, exploración visual de los sistemas de perforación *PowerDrive Xceed* y motor de fondo, acompañado de instrucción por parte de técnicos de mantenimiento en lo que concierne a estructura, funcionamiento interno, armado y desarmado de las herramientas, pruebas de seguridad y calidad efectuadas previo a la salida de éstas.

Luego, se continuó con la capacitación en campo durante el transcurso de las pasantías, en las cuales el investigador contó con adiestramiento en fundamentos de perforación direccional, operación de las herramientas durante la perforación, armado y quebrado del BHA, chequeos tanto previos como posteriores y seguimiento del plan de pozo preestablecido para al trabajo, lo cual fue realizado mediante el programa DOX explicado en párrafos anteriores.

Todo lo anterior, dentro de un contexto de seguridad que pudiera prevenir cualquier tipo de inconveniente o accidente relacionado a las actividades realizadas en un taladro de perforación.

4.5.3 Recopilación de información geológica.

Se reunió información de dos métodos distintos: inicialmente en base a libros, trabajos y artículos en línea sobre las características geológicas de los campos Cerro negro y Zuata Principal, acompañado también de documentos proporcionados por las empresas mixtas que actualmente producen de éstos.

Posteriormente, se logró recabar registros y estudiar de manera directa y física los cambios de litología que se producen durante la perforación, bajo el control y asesoramiento de los geólogos y personal de control de sólidos pertenecientes a la locación.

4.5.4 Recopilación de Datos de Pozos

Los parámetros de perforación de los pozos a utilizar, fueron extraídos de los reportes finales del pozo. Éste es generado mediante los datos cargados en el programa DOX y que posteriormente son publicados en un archivo en formato *Excel*.

Entre alguno de los documentos que se encuentran en este archivo son: plan original del pozo, BHA, *surveys* de campo finales, gráficos de *broomstick*, y cálculos de interferencia y anticollisión, entre otros.

En base a la información anterior, se procedió a realizar los análisis respectivos.

4.5.4 Selección de la Muestra de Estudio

Actualmente, en las empresas operadoras en la faja petrolífera del Orinoco, no poseen un método de selección exacto para el empleo de una herramienta de perforación u otra. Varía en base a espesores de arena, exigencias de giro y condiciones litológicas

durante la perforación de la sección de 8 ½”, sin embargo, siempre prevalecerá el criterio de la operadora y su solvencia económica para la decisión a tomar sobre la herramienta a usar.

Por ello, para este trabajo, se seleccionaron las corridas más recientes de *PowerDrive Xceed* hasta junio del año en curso (2015), junto con un número equitativo de pozos perforados con motor de fondo en las mismas locaciones, correspondientes a la información que la empresa Schlumberger de Venezuela estuviese en capacidad de proporcionar.

De esta manera, la muestra quedó definida en un total de 10 pozos repartidos de la siguiente manera:

Tabla 3: Muestra de Pozos por Campo

Campo	Motor de Fondo	<i>PowerDrive Xceed</i>
Zuata Principal	3	3
Cerro Negro	2	2

Por razones de confidencialidad tanto con la empresa como con la compañía operadora, los pozos en cuestión serán denominados como aparece a continuación:

- Zuata Principal

Tabla 4: Pozos Zuata Principal

Motor de Fondo	<i>PowerDrive Xceed</i>
ZM1	ZX1
ZM2	ZX2
ZM3	ZX3

- Cerro Negro

Tabla 5: Pozos Cerro Negro

Motor de Fondo	<i>PowerDrive Xceed</i>
CM1	CX1
CM2	CX2

Para efectos del análisis comparativo, no todos los pozos mencionados anteriormente pueden ser comparados entre sí, debido principalmente al plan original creado para cada uno que establece condiciones de giro e inclinación que dificultan realizar una comparación justa.

Es por ello que para ciertos parámetros que forman parte de la evaluación, se limitaron a realizarse únicamente para pozos con planes de perforación similares. Tal es el caso para las siguientes variables: tortuosidad, torque, arrastre y factor de fricción.

Para la tasa de penetración y los tiempos de perforación fue realizada la comparación con todos los pozos mencionados anteriormente.

4.5.5 Análisis de Parámetros

Para la evaluación de cada uno de los parámetros establecidos inicialmente para ser objeto de análisis, se procedió de la siguiente manera:

- **Tasa de Penetración (ROP)**

Se realizó a través de los tiempos reportados al final de cada corrida, tanto rotando como deslizando para el caso de motor de fondo.

- Tortuosidad

Para el análisis de tortuosidad, se dividió en dos cálculos. El primero basado en la microtortuosidad del pozo y el segundo en la macrotortuosidad del mismo.

Basado en la publicación SPE-67715, se deduce una fórmula para el cálculo de microtortuosidad para secciones rectas, tal como corresponde a la sección de 8 ½” en la FPO.

Así se tiene:

$$DL_p^i = \cos^{-1}[\sin I_p^{i-1} \sin I_p^i \cos(A_p^i - A_p^{i-1}) + \cos^{i-1} p \cos^i p] \quad 0 \leq i \leq M \quad \text{Ec. 2}$$

$$DL_s^j = \cos^{-1}[\sin I_s^{j-1} \sin I_s^j \cos(A_s^j - A_s^{j-1}) + \cos^{j-1} s \cos^j s] \quad 0 \leq j \leq N \quad \text{Ec. 3}$$

$$T = \frac{\sum_{j=1}^N DL_s^j - \sum_{j=1}^M DL_p^i}{MD_{TD} - MD_{DO}} \times 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

I_p = Inclinación del plan

I_s = Inclinación del *survey* real

A_p = Azimuth del plan

A_s = Azimuth del *survey* real

T = Tortuosidad

La macrotortuosidad, fue calculada mediante la fórmula utilizada por la empresa para el cálculo de tortuosidad en sus reportes finales del pozo (EOWR), y viene definida de la siguiente manera

$$T = \sum_{j=1}^M \frac{DL_s^j - (MD_j - MD_{j-1})}{100} \quad 0 \leq j \leq N \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

DLs= *Dogleg* a la profundidad

MD = Profundidad medida en pies

Para el empleo de las ecuaciones anteriores, los valores de inclinación, *azimuth* y *doglegs* planeados fueron extraídos de los planes definitivos de perforación de cada pozo tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Inclinación, Azimuth y DLS en Plan del Pozo

Rev9 DEF Proposal Report											
(Def Plan)											
Report Date: Client: Field: Structure / Slot: Well: Borehole: Rig: Survey Name: Survey Date: Tort / AHD / DDI / ERD Ratio: Coordinate Reference System: Location Lat / Long: Location Grid N/E Y/X: CRS Grid Convergence Angle: Grid Scale Factor: Version / Patch:						Survey / DLS Computation: Vertical Section Azimuth: Vertical Section Origin: TVD Reference Datum: TVD Reference Elevation: Seabed / Ground Elevation: Magnetic Declination: Total Gravity Field Strength: Gravity Model: Total Magnetic Field Strength: Magnetic Dip Angle: Declination Date: Magnetic Declination Model: North Reference: Grid Convergence Used: Total Corr Mag North->Grid North: Local Coord Referenced To:					
Comments	MD (ft)	Incl (°)	Azim Grid (°)	TVD (ft)	VSEC (ft)	NS (ft)	EW (ft)	Closure (ft)	Closure Azimuth (°)	DLS (°/100ft)	TF (°)
Superficie	0.00	0.00	55.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	N/A	140.64M
Marker	32.00	0.09	140.64	32.00	0.01	-0.02	0.02	0.02	140.64	0.27	140.64M
MudLine											
	78.24	0.21	140.64	78.24	0.07	-0.11	0.09	0.14	140.64	0.27	274.90M
	420.68	0.29	274.96	420.68	-0.46	-0.52	-0.37	0.64	215.70	0.13	333.94M
	807.51	0.98	333.94	807.50	-1.34	0.96	-1.55	1.82	301.88	0.46	274.42M
	695.66	1.34	274.42	695.63	-2.54	1.71	-2.91	3.37	300.50	1.35	156.01M
	788.17	1.40	156.01	788.13	-3.32	0.76	-3.53	3.61	282.20	2.54	159.76M
	880.83	1.65	139.76	880.76	-2.40	-1.29	-2.20	2.55	239.65	0.54	110.01M
	973.69	2.67	110.01	973.55	0.12	-3.05	0.69	3.13	167.21	1.60	89.92M
	1069.32	4.87	89.92	1068.97	6.02	-3.81	6.85	7.83	119.08	2.65	82.79M
	1160.48	6.56	82.79	1159.68	15.02	-3.15	15.88	16.19	101.21	2.01	78.45M
	1255.35	8.74	78.45	1253.70	27.64	-1.02	28.32	28.34	92.07	2.38	2.89L

Por otro lado, para la inclinación, *azimuth* y *doglegs* reales, los datos fueron tomados de los *surveys* de campo finales o *Geodetic Report* representado en la Tabla 7.

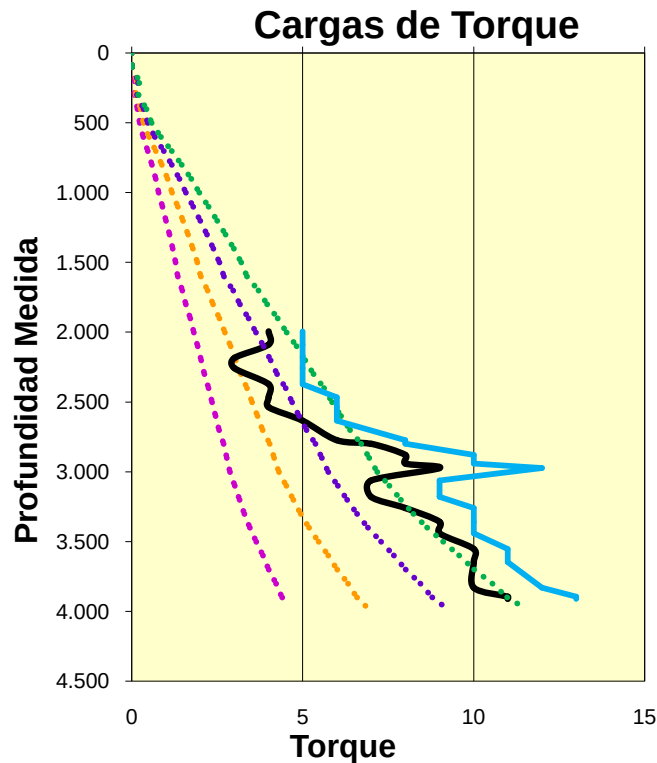
Tabla 7: Inclinación, Azimuth y DLS en Surveys de Campo

CMI-028 Actual Survey Geodetic Report												
(Non-Def Survey)												
Report Date: Client: Field: Structure / Slot: Well: Borehole: UWI / AP#: Survey Name: Survey Date: Tort / AHD / DDI / ERD Ratio: Coordinate Reference System: Location Lat / Long: CRS Grid Convergence Angle: Grid Scale Factor: Version / Patch:						Survey / DLS Computation: Vertical Section Azimuth: Vertical Section Origin: TVD Reference Datum: TVD Reference Elevation: Seabed / Ground Elevation: Magnetic Declination: Total Gravity Field Strength: Gravity Model: Total Magnetic Field Strength: Magnetic Dip Angle: Declination Date: Magnetic Declination Model: North Reference: Grid Convergence Used: Total Corr Mag North->Grid North: Local Coord Referenced To:						
Comments	MD (ft)	Incl (°)	Azim Grid (°)	TVD (ft)	VSEC (ft)	NS (ft)	EW (ft)	DLS (°/100ft)	Northing (m)	Easting (m)	Latitude (N/S ° ' ")	Longitude (E/W ° ' ")
Superficie	0.00	0.00	55.00	0.00	0.00	0.00	0.00	N/A	955533.57	488366.30	N 8 38 39.28	W 03 6 20.06
Marker MudLine	32.00	0.09	140.64	32.00	0.01	-0.02	0.02	0.27	955533.56	488366.30	N 8 38 39.28	W 03 6 20.06
	78.24	0.21	140.64	78.24	0.07	-0.11	0.09	0.27	955533.54	488366.33	N 8 38 39.28	W 03 6 20.06
	420.68	0.29	274.98	420.68	-0.46	-0.52	-0.37	0.13	955533.41	488366.19	N 8 38 39.28	W 03 6 20.06
	607.51	0.98	333.94	607.50	-1.34	0.98	-1.55	0.46	955533.86	488365.83	N 8 38 39.29	W 03 6 20.07
	605.96	1.34	274.42	605.63	-2.54	1.71	-2.91	1.35	955534.00	488365.41	N 8 38 39.30	W 03 6 20.09
	788.17	1.40	156.01	788.13	-3.32	0.76	-3.53	2.54	955533.80	488365.23	N 8 38 39.29	W 03 6 20.09
	880.83	1.65	136.76	880.76	-2.40	-1.29	-2.20	0.54	955533.18	488365.63	N 8 38 39.27	W 03 6 20.08
	973.69	2.87	110.01	973.55	0.12	-3.05	0.69	1.80	955532.94	488366.51	N 8 38 39.25	W 03 6 20.05
	1099.32	4.87	99.92	1098.97	6.02	-3.81	6.85	2.65	955532.41	488366.39	N 8 38 39.24	W 03 6 20.59
	1160.48	6.56	82.79	1159.66	15.02	-3.15	15.88	2.01	955532.61	488371.14	N 8 38 39.25	W 03 6 20.50
	1255.35	8.74	78.45	1253.70	27.64	-1.02	28.32	2.38	955533.26	488374.93	N 8 38 39.27	W 03 6 20.37
	1347.12	12.72	77.54	1343.85	44.72	2.55	45.03	4.34	955534.35	488380.02	N 8 38 39.31	W 03 6 20.21
	1446.12	17.97	70.25	1436.29	70.71	10.07	70.08	5.94	955536.94	488387.65	N 8 38 39.38	W 03 6 19.96
	1532.75	20.45	69.17	1521.09	98.81	19.97	96.79	2.89	955539.65	488395.79	N 8 38 39.48	W 03 6 19.89
	1675.81	75.77	71.44	1606.48	137.87	31.48	170.03	3.71	955543.16	488406.81	N 8 38 39.49	W 03 6 19.77

Con todos los datos ordenados en función a los valores que corresponden a la sección de 8 ½”, se procedió a realizar los cálculos de tortuosidad, para posteriormente aplicar el análisis comparativo a los pozos perforados con motor de fondo contra los perforados con *PowerDrive Xceed*.

- Torque y factor de fricción

La evaluación del torque se realizó mediante el análisis a gráficos de *Broomstick*, un ejemplo de este se muestra en la Gráfica 3.



Gráfica 3: *Broomstick Torque*

Dentro del plan original del pozo, se encuentran las simulaciones del torque basado en el factor de fricción, el cual va desde 0,2 a 0,5 y varía de acuerdo al tipo de formación y el lodo de perforación utilizado, las cuales se ven representadas en el gráfico anterior por las líneas punteadas cuyo valor aumenta de izquierda a derecha dentro del rango mencionado previamente.

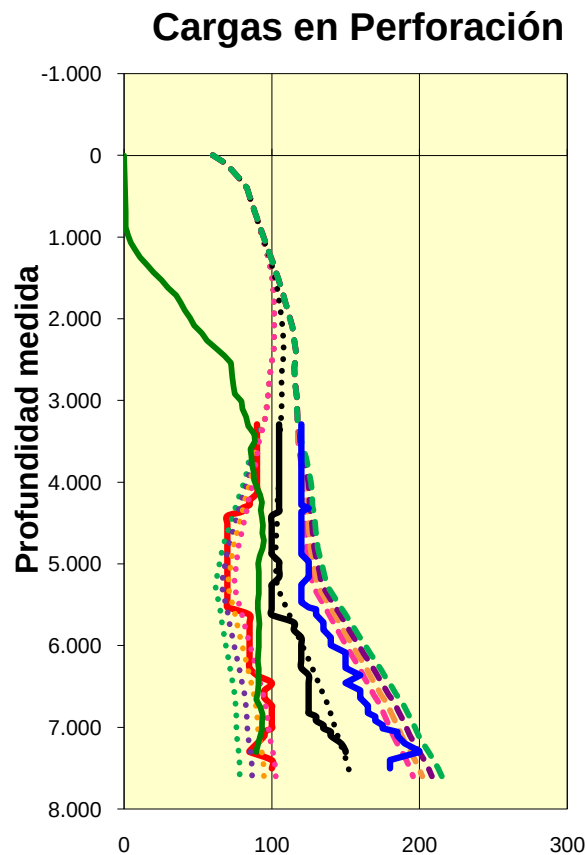
Luego de iniciada la perforación se incluyen los valores de torque reales, que eventualmente serán objeto de comparación de la presente investigación. Estos vienen graficados en la figura de la parte superior por las líneas azul y negra, que representan el torque en fondo y fuera de fondo respectivamente.

- Arrastre y factor de fricción

Al igual que como sucede con el torque, los valores de arrastre se grafican en base a las cargas durante la perforación, estas son:

- Peso levantando tubería
- Peso rotando
- Peso bajando tubería

Todos estos son igualmente calculados previos al inicio de la perforación en base a simulaciones del factor de fricción. De esta manera, un gráfico de cargas durante la perforación, luce de la siguiente manera (Ver Gráfica 4):



Gráfica 4: *Broomstick* Cargas de la perforación

Los valores de cargas graficados en la figura anterior, son registrados en la hoja de perforación o *steering sheet* (mostrado en Tabla 8), que consiste en una hoja formato *Excel* en la cual se registran valores de torque, inclinación, *azimuth*, pesos, etc. Por cada segmento deslizado o rotado.

Tabla 8: *Steering Sheet*

WOB 1000 lbf	SRPM c/min	Off Bot Torque 1000 ft.lbf	Torque 1000 ft.lbf	Flow gal/min	PP On B psi	Svy MD ft	Incl deg	Azmth deg	DLS deg/100ft	ECD lbm/gal	PU Weight 1000 lbf	Rotating HKL 1000 lbf	Back Off Weir 1000 lbf
20,0	50	3,0	7,0	450	700,0	3310,38	84,11	80,51	2,27	9,7	120,00	105,00	90,00
20,0	50	3,0	7,0	450	700,0	3409,97	88,25	81,35	4,24	9,7	120,00	105,00	90,00
10,0	60	4,0	7,0	450	700,0					9,6	120,00	105,00	90,00
15,0	60	2,0	6,0	450	700,0					9,6	120,00	105,00	90,00
15,0	40	3,0	5,0	450	700,0	3497,11	88,77	81,22	0,62	9,6	120,00	105,00	90,00
20,0	40	3,0	5,0	450	700,0					9,7	120,00	105,00	90,00
35,0	50	3,0	10,0	400	620,0	3592,17	85,55	80,18	3,56	9,6	120,00	105,00	90,00
35,0	80	3,0	13,0	380	550,0	3685,28	86,27	81,27	1,40	9,8	120,00	105,00	90,00
35,0	80	3,0	13,0	380	600,0	3778,43	86,73	81,93	0,86	9,8	120,00	105,00	90,00
35,0	50	3,0	13,0	380	600,0					9,7	120,00	105,00	90,00
35,0	50	3,0	15,0	380	600,0	3872,50	87,73	82,45	1,20	10,0	120,00	105,00	90,00
35,0	50	4,0	12,0	380	700,0	3965,62	88,02	82,70	0,41	10,1	120,00	105,00	90,00
35,0	50	4,0	12,0	380	700,0	4059,39	89,97	83,03	2,11	9,8	120,00	105,00	90,00
35,0	50	4,0	12,0	380	650,0	4152,19	92,12	83,24	2,33	9,9	120,00	105,00	85,00
35,0	40	4,0	12,0	380	650,0	4245,52	93,36	82,70	1,45	10,0	120,00	105,00	85,00
35,0	50	4,0	12,0	400	700,0					9,9	125,00	105,00	80,00
35,0	50	4,0	13,0	380	650,0	4338,95	92,67	80,80	2,16	10,0	120,00	105,00	80,00
30,0	50	4,0	12,0	400	700,0					9,9	120,00	100,00	70,00
25,0	80	5,0	10,0	450	750,0	4432,95	93,36	79,21	1,84	10,3	120,00	100,00	70,00
15,0	100	5,0	10,0	450	750,0	4525,78	94,11	78,40	1,19	10,4	120,00	100,00	70,00

Con los valores del *steering sheet* acompañados de los gráficos de cargas durante la perforación, se realizará el análisis comparativo.

- Tiempos Operativos

Para el estudio de los tiempos operacionales, se enfocará principalmente en:

- Tiempo de perforación
- Tiempo de bombeo

Los cuales son registrados tanto en el *steering sheet* como en el reporte de corrida de la herramienta.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de haber desarrollado la metodología descrita en el capítulo anterior, se obtuvieron los resultados que se presentarán a continuación y que se muestran con el fin de dar solución al problema y a los objetivos planteados al inicio de la investigación.

5.1 Análisis de Desempeño

5.1.1 Tasa de Penetración (ROP)

Los datos de los pozos utilizados para el análisis de este parámetro se presentan a continuación iniciando con el campo Zuata Principal y posteriormente el campo Cerro Negro, se muestran en las Tablas 9 y 10 respectivamente.

Tabla 9: Parámetros de Perforación Zuata Principal

Zuata Principal							
Pozo	Herramienta	Tipo Mecha	Conf. Mecha (Diam. Chorros/ ATF)	Lodo	Peso lodo(lpg)	Tasa (gal)	WOB (Klb)
ZM1	Motor	PDC 8 1/2"	3x13+3x14/0.84	Viscoelástico	8,7	440	12,35
ZM2	Motor	PDC 8 1/2"	2x15+1x11+1x16+1x14/0.78	Viscoelástico	8,9	524	19,8
ZM3	Motor	PDC 8 1/2"	3x15+1x8+1x11+1x10/0.736	Viscoelástico	8,8	450	15
ZX1	Xceed	PDC 8 1/2"	4x16+2x18/1.28	Viscoelástico	8,9	475	17,5
ZX2	Xceed	PDC 8 1/2"	4x16+2x18/1.28	Viscoelástico	9,2	450	17,5
ZX3	Xceed	PDC 8 1/2"	4x16+2x18/1.28	Viscoelástico	9	450	17

Tabla 10: Parámetros de Perforación Cerro Negro

Cerro Negro							
Pozo	Herramienta	Tipo Mecha	Conf. Mecha (Diam. Chorros/ ATF)	Lodo	Peso lodo(lpg)	Tasa (gal)	WOB (Klb)
CM1	Motor	PDC 8 1/2"	4x13+1x16+1x14/0.865	Viscoelástico	9,1	541	11,2
CM2	Motor	PDC 8 1/2"	1x9+2x10+3x17/0.881	Base agua	9,1	490	8,9
CX1	Xceed	PDC 8 1/2"	4x18+2x14/1.296	Viscoelástico	9	460	15
CX2	Xceed	PDC 8 1/2"	2x22+2x17+2x18/1,28	Base agua	9	460	22

Los valores anteriores representan factores influyentes para en el rendimiento de la ROP, sin embargo, es necesario aclarar:

1. Tipo de mecha y su configuración forman parte del cálculo de la hidráulica de la perforación junto con el tipo de lodo, su peso y el flujo, los cuales son calculados previo al inicio del trabajo y que son optimizados según sean las condiciones a las cuales se verán sometidos. Por ello se asume que la configuración que poseen estos parámetros es la mejor para la perforación, y que ningún cambio se realizará en esta.
2. Peso del lodo cambiará de acuerdo al tipo de formación y la presión estática deseada. La que se muestra en las tablas 9 y 10, reflejan la densidad inicial utilizada para la perforación, esta aumentará en 0,3-0,4 lpg a lo largo de la sección bajo condiciones normales.
3. Peso sobre la mecha y la tasa a la cual se bombea el lodo, se ve afectado por la respuesta direccional y el rango de bombeo de las herramientas direccionales. El perforador direccional decidirá cuando aumentar o disminuir tanto WOB como la tasa de bombeo según sean los requerimientos para obtener el mejor desempeño por parte de las herramientas.

De esta manera, se procede a mostrar los resultados referentes a la rata de penetración pozo a pozo:

- **Campo Zuata Principal**

- Pozo ZM1 Motor de Fondo

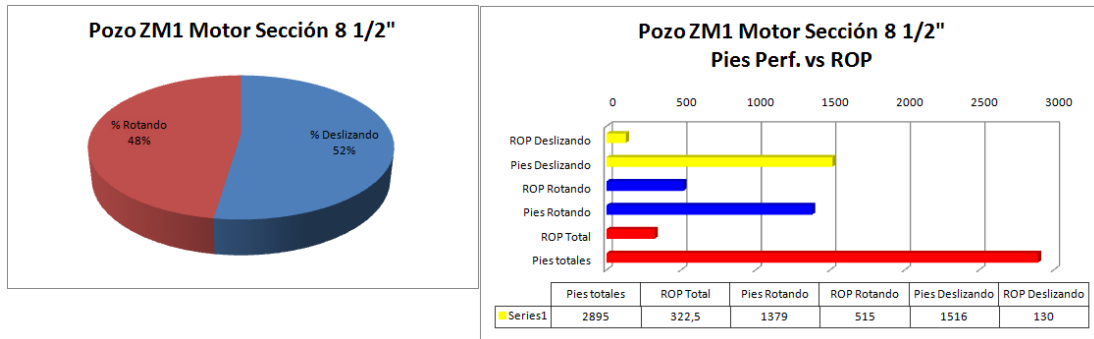


Figura 25: ROP Pozo ZM1 Motor de Fondo

En la Figura 25 se muestran dos gráficos donde en el primero se representan el porcentaje de rotación y deslizamiento, y en el segundo la tasa de penetración y pies perforados tanto rotando y deslizando como totales. La ROP total es la resultante del promedio ponderado de las tasas deslizando y rotando.

Se destaca el hecho de que el porcentaje deslizando es mayor al rotando, lo cual es anormal para secciones de 8 1/2" en la FPO dado que las trayectorias para éstas poseen una tendencia a ser rectas. Sin embargo, esta anomalía puede ser explicada debido a que para este pozo se realizaron dos *sidetracks* con el fin de realizar un *E-Bone* (navegación en una arena paralela superior o inferior) lo que conllevó a un mayor trabajo direccional disminuyendo la oportunidad de rotar y dando como resultado una ROP promedio de 322,5 pies/h.

- Pozo ZM2 Motor de Fondo

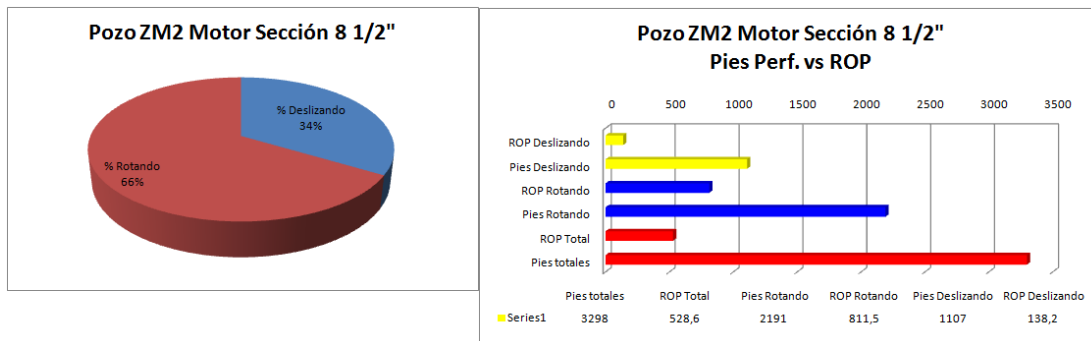


Figura 26: ROP Pozo ZM2 Motor de Fondo

Para el pozo ZM2 perforado con motor de fondo, se consiguió una ROP promedio de 528,6 pie/h en una longitud total de 3298', de la cual 66% se perforó rotando y 34% deslizando tal como se muestra en la Figura 26. Durante este trabajo hubo continuos problemas con el nivel de fluido en los tanques, sin embargo, la perforación era detenida al ocurrir situaciones como esta de modo tal que no produjo un impacto en la ROP.

- Pozo ZM3 Motor de Fondo

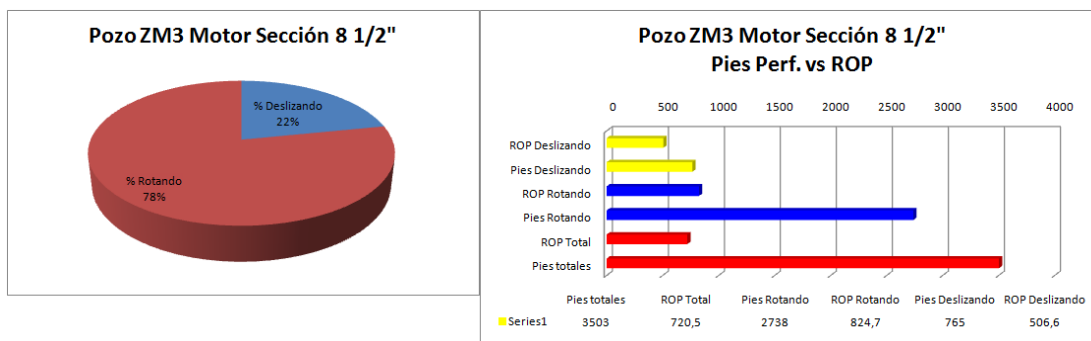


Figura 27: ROP Pozo ZM3 Motor de Fondo

Para el pozo ZM3 perforado con motor de fondo, se consiguió una ROP promedio de 720,5 pie/h en una longitud total de 3503', de la cual 78% se perforó rotando y 22% deslizando (ver Figura 27). La tasa de flujo de lodo fue reducida colocando al motor

fuera de especificaciones durante la perforación orientada (deslizada) a causa del poco peso disponible para deslizar.

- Pozo ZX1 *PowerDrive Xceed*

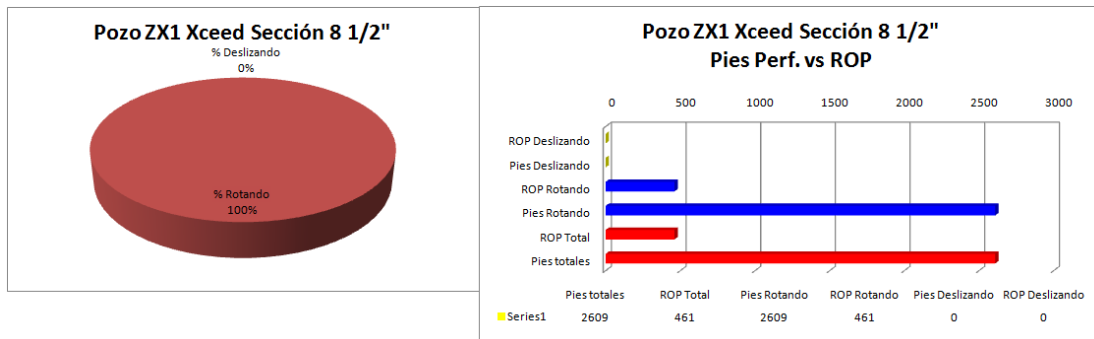


Figura 28: ROP Pozo ZX1 *PowerDrive Xceed*

Para el pozo ZX1 perforado con *PowerDrive Xceed*, se consiguió una ROP promedio de 461 pies/h en una longitud total de 2609' (ver Figura 28), sección que fue rotada en su totalidad dado el funcionamiento de la herramienta con que se perforó. Se trabajó con 430 gpm para asegurar la respuesta de *PowerDrive Xceed* pero comprometiendo la limpieza del hoyo, para contrarrestar este problema, se bombearon cuatro píldoras al llegar a fondo y se sacó repasando hacia arriba.

- Pozo ZX2 *PowerDrive Xceed*

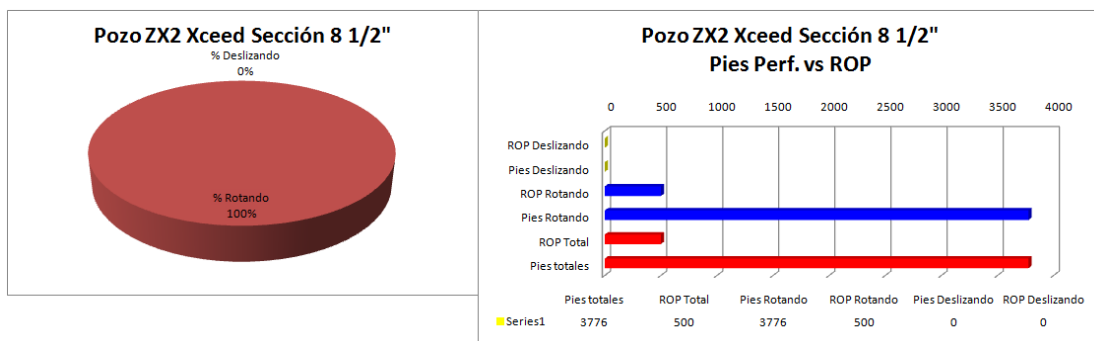


Figura 29: ROP Pozo ZX2 *PowerDrive Xceed*

Para el pozo ZX2 perforado con *PowerDrive Xceed*, se consiguió una ROP promedio de 500 pies/h en una longitud total de 3776' (ver Figura 29), sección que fue rotada en su totalidad dado el funcionamiento de la herramienta con que se perforó. Cabe destacar que la respuesta de *PowerDrive Xceed* fue óptima a todos los comandos sin tener inconvenientes durante la perforación.

- Pozo ZX3 *PowerDriveXceed*

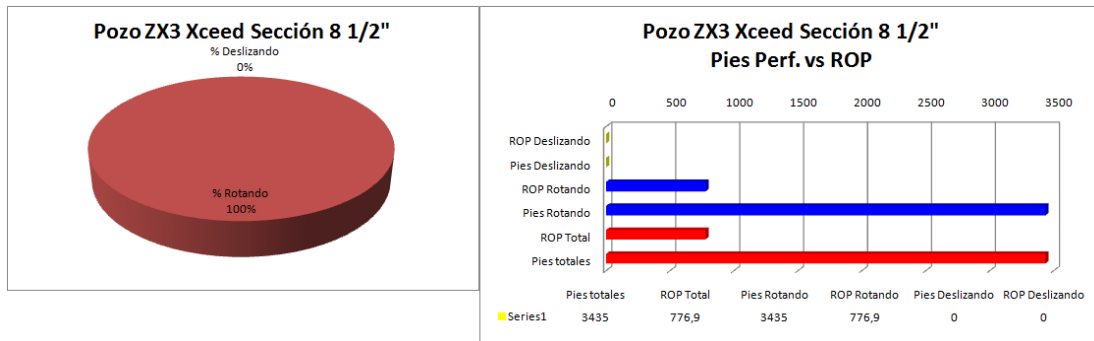
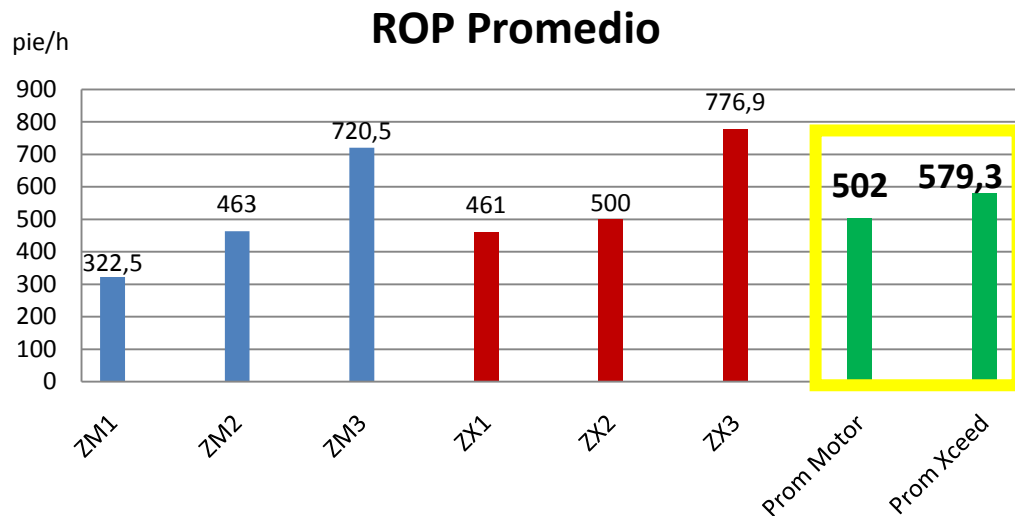


Figura 30: ROP Pozo ZX3 *PowerDrive Xceed*

Para el pozo ZX3 perforado con *PowerDrive Xceed*, se consiguió una ROP promedio de 461 pies/h en una longitud total de 2609' (ver Figura 30), sección que fue rotada en su totalidad dado el funcionamiento de la herramienta con que se perforó.

- Promedio



Gráfica 5: ROP Promedio Zuata Principal

En la Gráfica 6 se muestran los promedios de ROP para cada pozo y finalmente el promedio para pozos perforados con motor de fondo y con *PowerDrive Xceed* en el campo Zuata Principal, el cual fue 502 pies/h y 579,3 pies/h respectivamente.

Al perforar con *PowerDrive Xceed*, se produjo un incremento de 15,4% en la ROP, resultado que se puede argumentar por el hecho de la rotación continua con que trabaja *PowerDrive Xceed*, la cual ayuda a facilitar el desplazamiento durante la perforación.

Si bien el motor de fondo genera potencia extra gracias al desplazamiento positivo producido por el flujo de lodo a través del rotor y estator, lo cual debe originar una mayor ROP, esta potencia se ve diluida por el hecho de que para lograr la inclinación y *azimuth* deseado, es necesario deslizar toda la sarta de perforación reduciendo drásticamente la tasa de penetración que puede ser alcanzada rotando.

- **Campo Cerro Negro**

• **Pozo CM1**

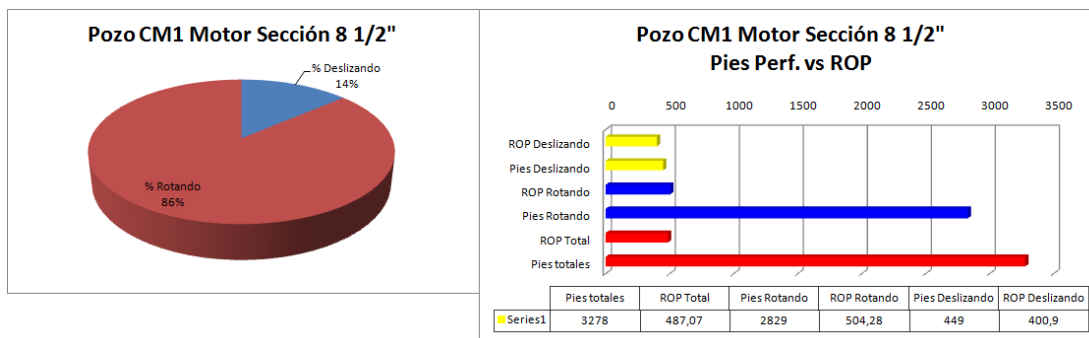


Figura 31: ROP Pozo CM1 Motor de Fondo

Para el pozo CM1 perforado con motor de fondo, se consiguió una ROP promedio de 487,07 pies/h en una longitud total de 3278', de la cual 86% se perforó rotando y 14% deslizando (ver Figura 31).

• **Pozo CM2**

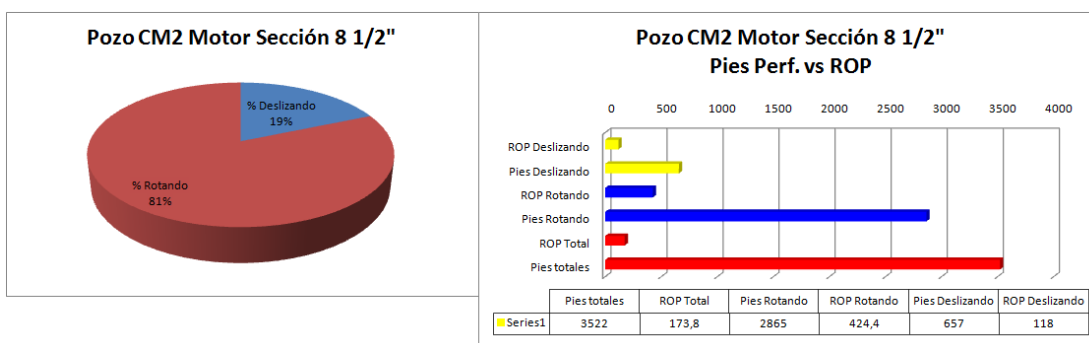


Figura 32: ROP Pozo CM2 Motor de Fondo

Para el pozo CM2 perforado con motor de fondo, se consiguió una ROP promedio de 173,8 pies/h en una longitud total de 3522', de la cual 81% se perforó rotando y 19% deslizando (ver Figura 32).

- Pozo CX1

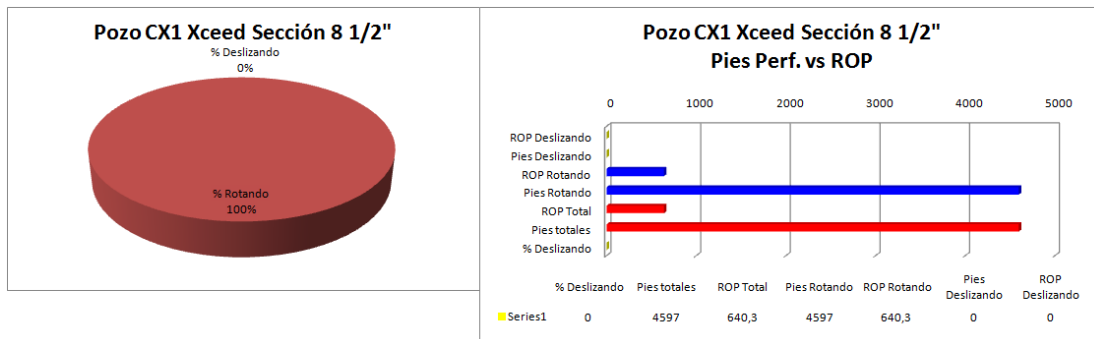


Figura 33: ROP Pozo CX1 *PowerDrive Xceed*

Para el pozo CX1 perforado con *PowerDrive Xceed*, se consiguió una ROP promedio de 640,3 pies/h en una longitud total de 4597', sección que fue rotada en su totalidad dado el funcionamiento de la herramienta con que se perforó, los valores se muestran en la Figura 33.

- Pozo CX2

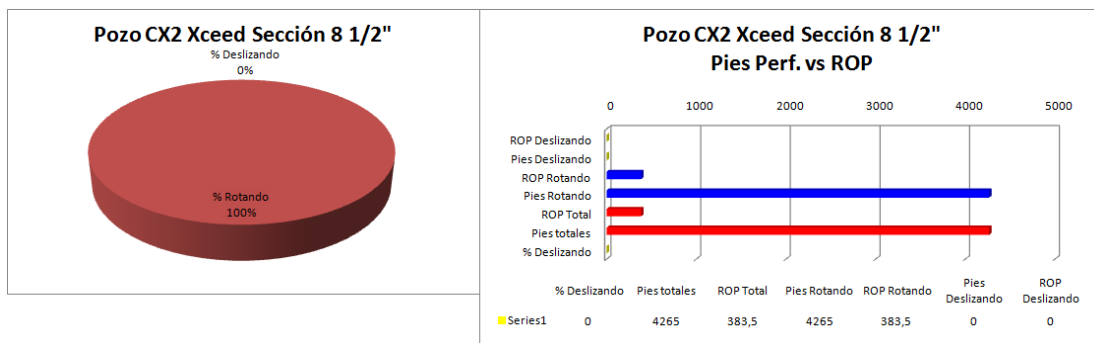
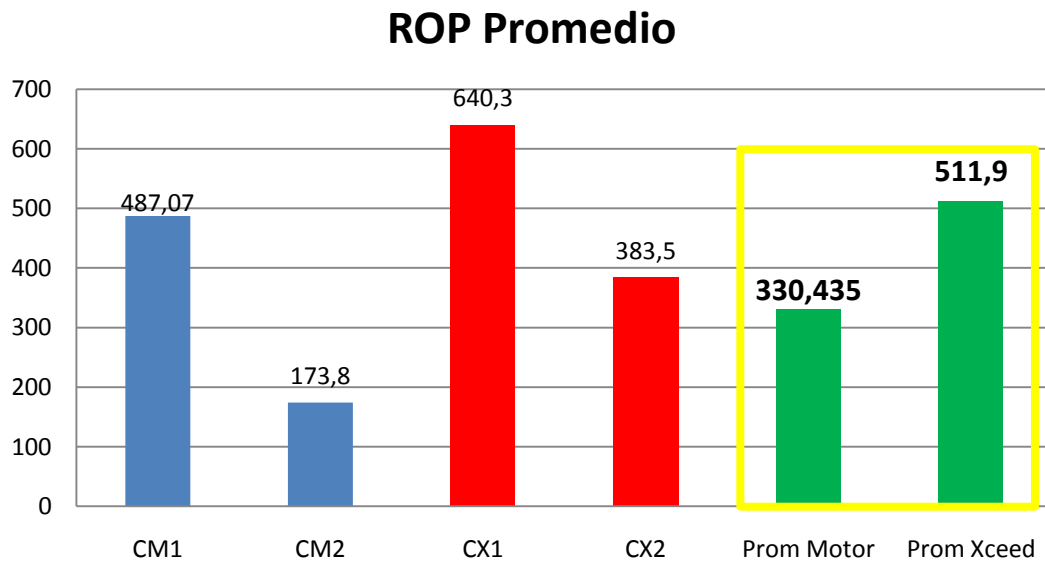


Figura 34: ROP Pozo CX2 *PowerDrive Xceed*

Para el pozo CX2 perforado con *PowerDrive Xceed*, se consiguió una ROP promedio de 383,5 pies/h en una longitud total de 4265' (ver Figura 34), sección que fue rotada en su totalidad dado el funcionamiento de la herramienta con que se perforó. Se trabajó inicialmente en un rango de ROP entre 300-450 pies/h buscando incrementar el ángulo hasta lograr la inclinación requerida. Luego de apegarse al plan, se navegó en arena consiguiendo una rata de 600-700 pies/h, súbitamente ocurrió un aumento de

torque entre 5-6 Klb que redujo la ROP a 50 pies/h a 7288' MD. Se realizó un viaje de calibración para solventar la situación y posteriormente volver a bajar hasta alcanzar 7500' MD.

- Promedio



Gráfica 6: ROP Promedio Cerro Negro

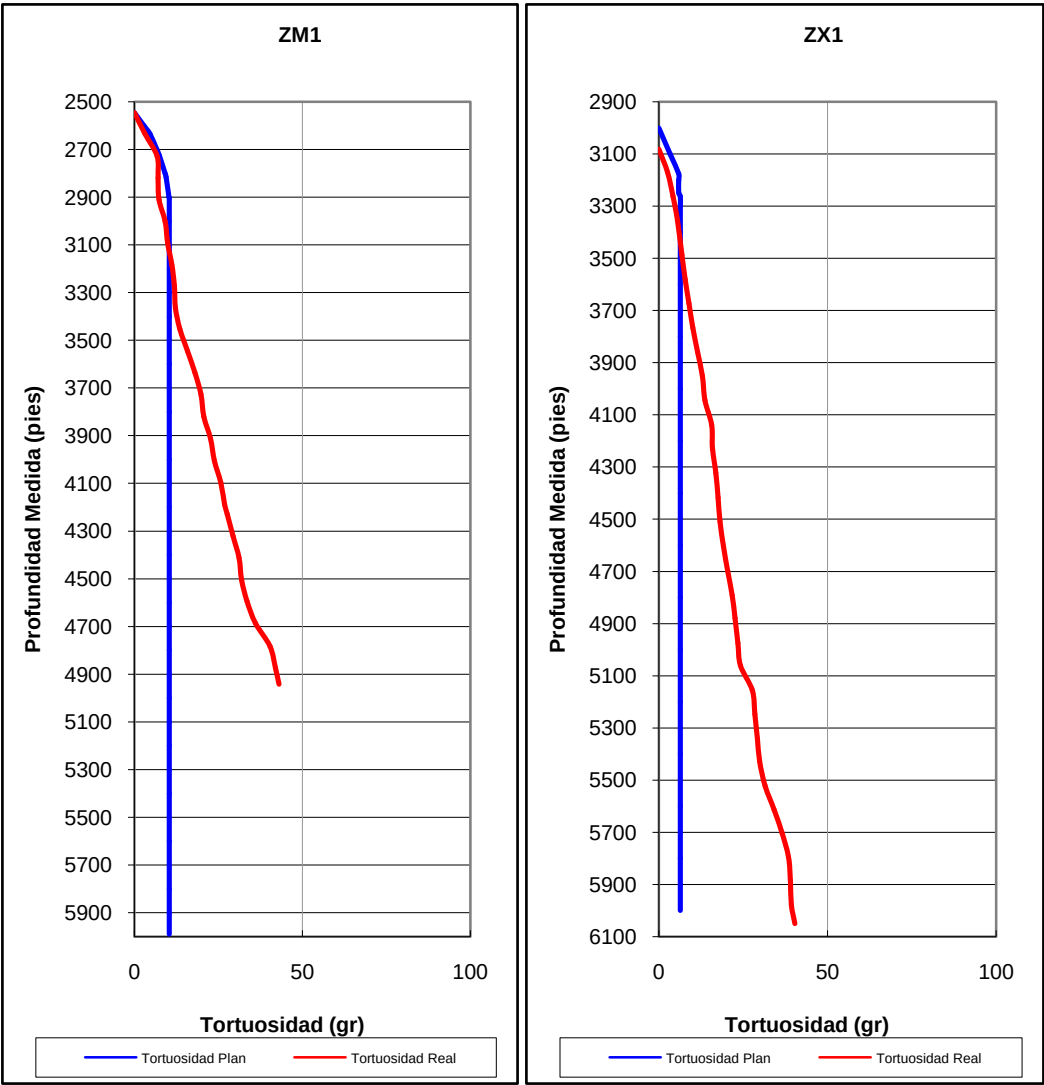
En la Gráfica 7 se muestran las ROP promedio para cada uno de los 4 pozos cuya sección de 8 ½" fue evaluada en el campo Cerro Negro. Los pozos CM1 y CM2 corresponden a aquellos perforados con motor de fondo, mientras que CX1 y CX2 fueron perforados con *PowerDrive Xceed*.

En la parte derecha del gráfico se muestran los valores de ROP promedio para Motor y *PowerDrive Xceed* los cuales fueron 330,4 pie/h y 511,9 pie/h respectivamente, lo que representa una mejoría de 54, 9% al perforar con *PowerDrive Xceed*.

5.1.2 Tortuosidad

Para la evaluación de la tortuosidad se calculó tanto microtortuosidad como macrotortuosidad mediante las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.El análisis en el campo Zuata Principal se efectuó en los pozos ZM1 con motor de fondo y ZX1 con *PowerDrive Xceed*. Por su parte, en el campo Cerro Negro el estudio fue realizado en los pozos CM2 con motor de fondo y CX2 con *PowerDrive Xceed*.

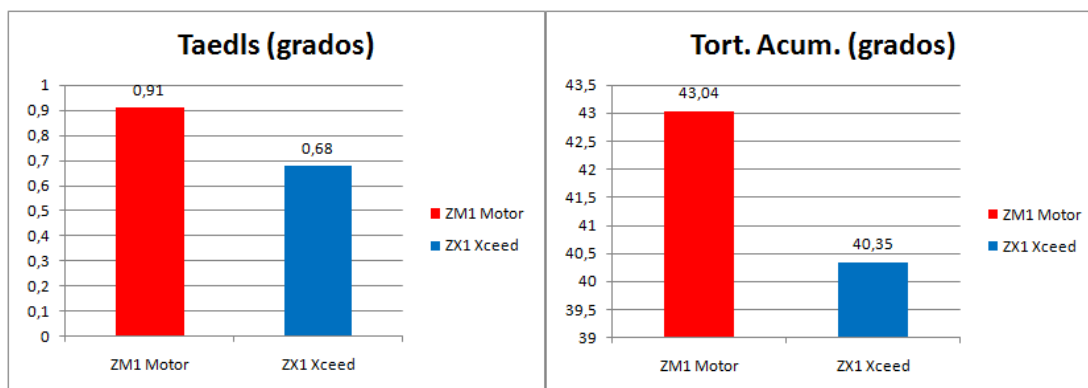
- Campo Zuata Principal



Gráfica 7: Macrotortuosidad Zuata Principal

Tabla 11: Tortuosidad Zuata Principal

Pozo	Taedls (grados)	Tort. Acum. (grados)
ZM1 Motor	0,91	43,04
ZX1 Xceed	0,68	40,35



Gráfica 8: Taeds y Tortuosidad Acumulada campo Zuata Principal

La gráfica 8 representa la tortuosidad acumulada o macro-tortuosidad, donde se muestra la diferencia entre la tortuosidad planeada y la real. En ambos pozos se observa que en ninguno fue posible mantener la horizontalidad. Esto debido a que, a pesar de poseer un plan de perforación, este puede ser cambiado según las condiciones geológicas existentes a esa profundidad haciendo necesario variar parámetros de inclinación y *azimuth* mientras se navega buscando siempre las mejores condiciones de la arena.

Tabla 12: Inclinación Pozo ZM1 (Tomado de Surveys de campo)

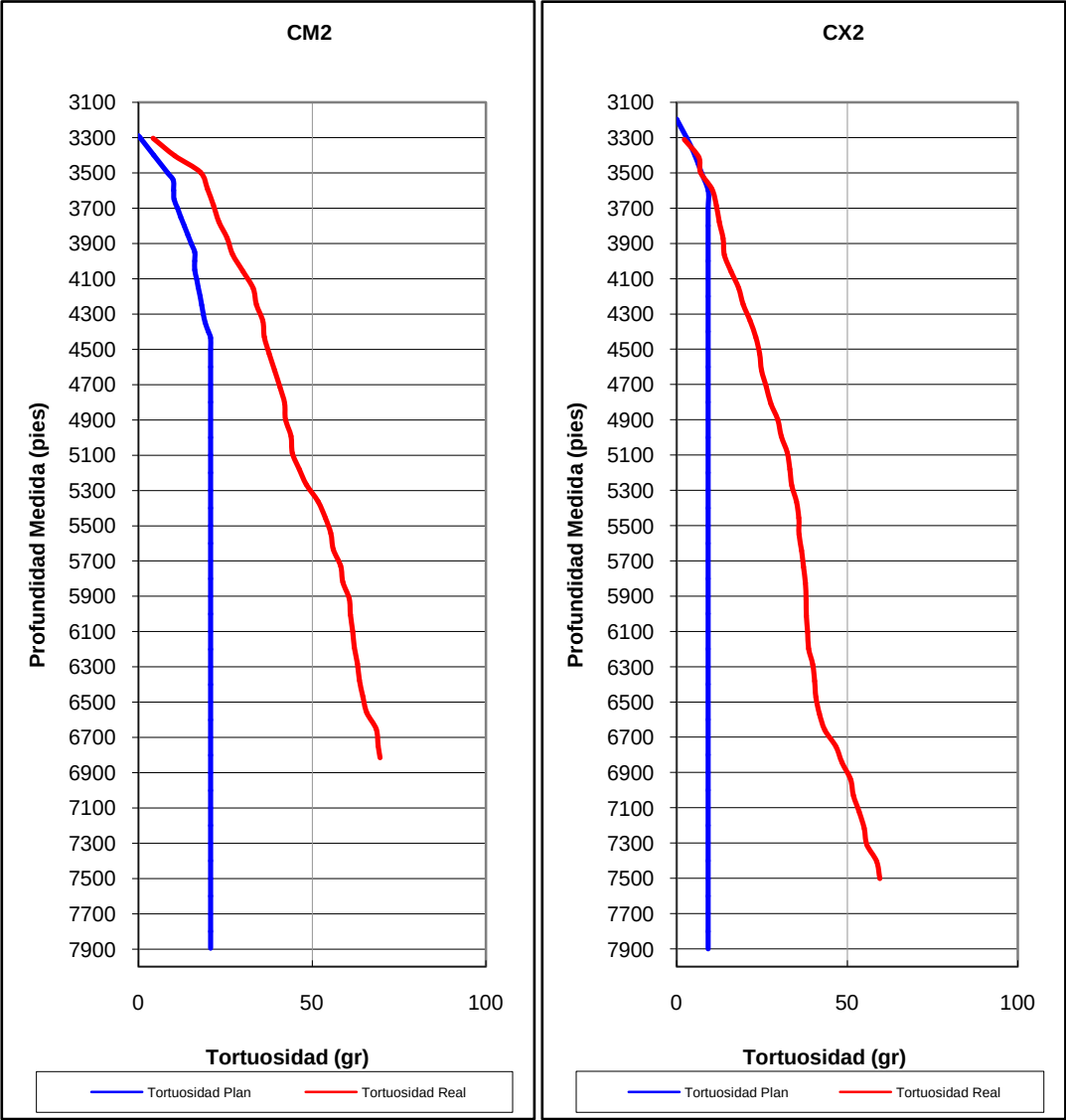
MD (Pies)	Inc (grad)
2545,20	90,00
2634,56	87,04
2727,76	90,63
....	...
4593,69	91,06
4685,28	91,38
4783,14	87,27
4874,65	85,61
4942,00	86,00

El pozo ZM1 totalizó una microtortuosidad (Taedls) de $0,91^\circ$ y una macrotortuosidad (Tot. Acum.) de $43,04^\circ$ como se muestra en la Tabla 11 y Gráfica 9. Los mayores valores de *dogleg* ocurrieron al inicio y final de la sección, yendo en inclinación de 87° a 91° para luego mantenerse entre 90° y 92° y culminar en un cambio brusco de 91° a 87° proyectando en la mecha 86° (ver Tabla 12). En cuanto al *azimuth*, los valores se mantuvieron en un rango de 129° a 132° sin mayores variaciones a lo largo de la sección.

El pozo ZX1 acumuló una macrotortuosidad de $40,35^\circ$ y microtortuosidad de $0,68^\circ$, siendo su mayor *dogleg* de $3,77^\circ$ a $5156'$, para ese momento, en *azimuth* había un retraso de 3° y comienza a trabajar hacia la derecha y se busca subir en inclinación para alejarse de la base de la arena. Se declaró TD a $6050'$ en MD, $50'$ extras con respecto al plan original, inclinación de $91,5^\circ$ y *azimuth* de 183° .

Ambos pozos fueron afectados por factores geológicos, sin embargo, el pozo ZX1 fue menos tortuoso que el pozo ZM1 perforado con Motor de fondo reduciendo en $33,8\%$ el valor de microtortuosidad mientras que la macrotortuosidad se redujo en $6,7\%$.

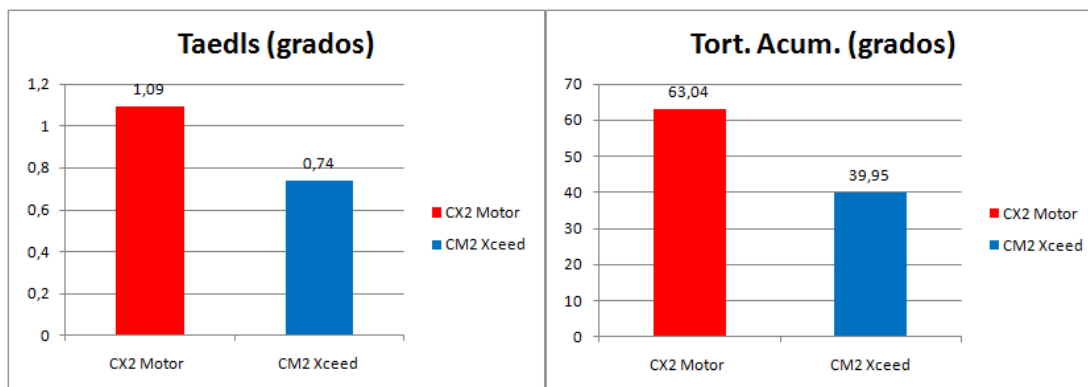
- **Campo Cerro Negro**



Gráfica 9: Macrotortuosidad Cerro Negro

Tabla 13: Tortuosidad Cerro Negro

Pozo	Tadls	Tort. Acum.
CX2 Xceed	0,74	39,95
CM2 Motor	1,09	63,04



Gráfica 10: Taedls y Tortuosidad Acumulada campo Cerro Negro

Los pozos utilizados para este análisis fueron: CM2 perforado con Motor de Fondo y CX2 perforado con *PowerDrive Xceed* (ver Gráfica 10). Es necesario resaltar el hecho de que el pozo CM2 es un *sidetrack* del pozo CX2.

Tabla 14: Inclinación Inicial Pozo CX2 (Tomado de *Surveys* de Campo)

MD (Pies)	Inc (grad)
3196,60	82,58
3310,38	84,11
3409,97	88,25
3497,11	88,77
3592,17	85,55

La perforación con *PowerDrive Xceed* del pozo CX2 inicia con una inclinación de 82°, por lo cual inmediatamente se intentó subir llegando hasta 88,5°, posteriormente se inició una tendencia de caída de ángulo llegando a 85,5° mostrado en la Tabla 14. Para contrarrestar la tendencia se procuró un poco más de agresividad con

inclinaciones de 92-95° para alcanzar las TVD propuesta, momento en que mejoran las propiedades de la arena.

Debido a que durante la perforación del pozo CX2 se invadió el área de drenaje de otro pozo, se decidió realizar un *sidetrack*. De esta manera se comienza a perforar el pozo CM2 con motor de fondo cuya profundidad inicial se establece a 3293'. Se realiza el *time drilling* (perforación con baja ROP para realizar entrada del *sidetrack*), pero debido a problemas de interferencia y distancia de los sensores, se hizo necesario incurrir en altos valores de *dogleg* (hasta 7,84°) para intentar alcanzar el plan propuesto.

Tanto el pozo CX2 como el CM2, tuvieron problemas inicialmente para acoplarse al plan, sin embargo, luego de alcanzado este, se perforó sin mayores eventualidades en lo que a tortuosidad del hoyo se refiere. Finalmente, el pozo CX2 consiguió una trayectoria más suave con una macrotortuosidad de 39,59° y una microtortuosidad de 0,74°. Para el pozo CM2, la macrotortuosidad fue de 63,04° y microtortuosidad de 1,09° como se muestra en la Tabla 13 y Gráfica 11, que resulta en una reducción de 47,2% en microtortuosidad y 59,2% en macrotortuosidad al perforar con *PowerDrive Xceed*.

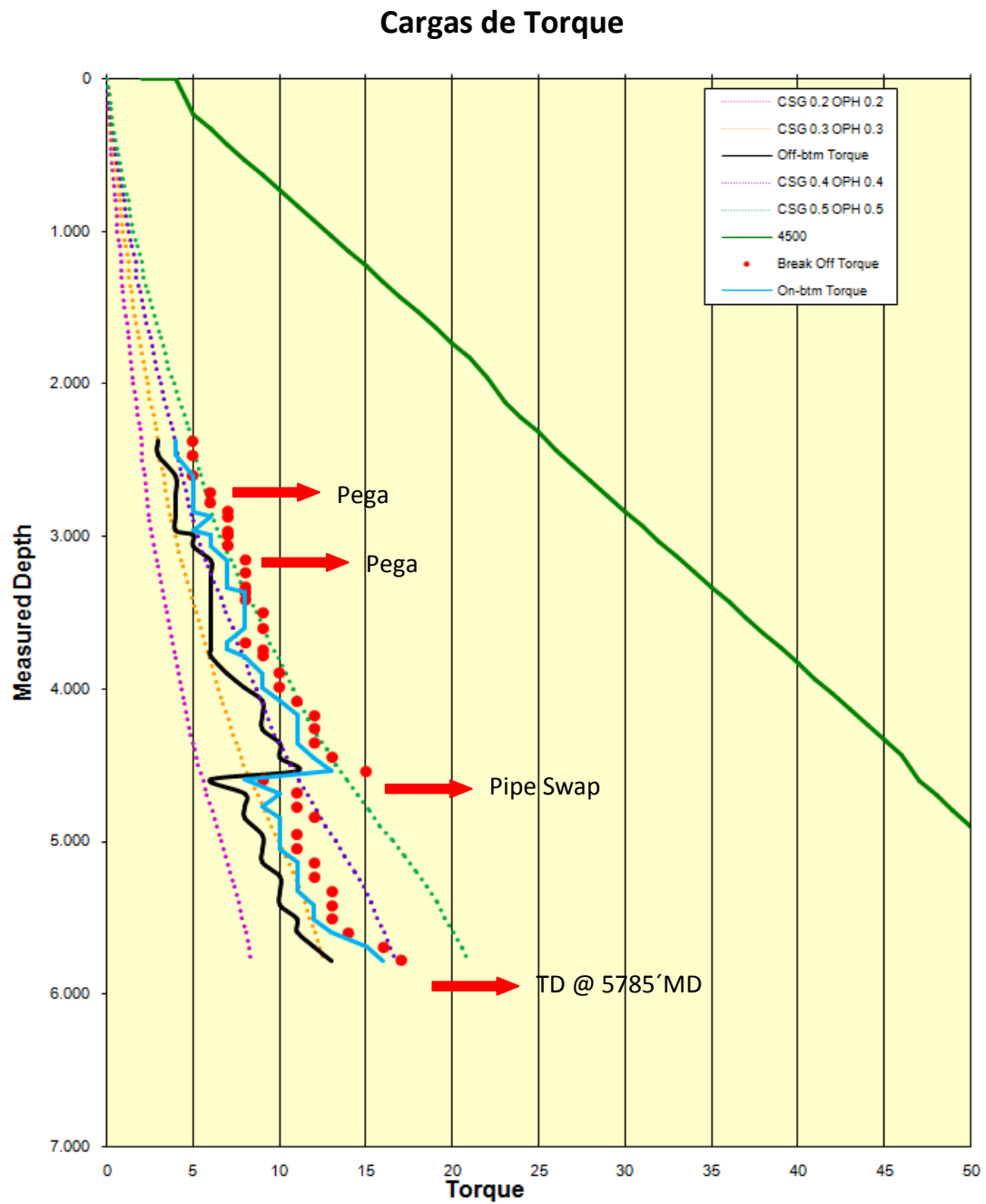
5.1.3 Torque

Los gráficos a continuación representan el torque durante la perforación de la sección 8 ½" en los campos Zuata Principal y Cerro Negro.

La curva azul celeste representa el torque en fondo, la curva color negra muestra el torque fuera de fondo, los puntos rojos en el gráfico representan el *break-off torque* y las curvas punteadas muestran las simulaciones de torque a distintos valores de factor de fricción, que van de 0,2 a 0,5, dentro del revestidor y a hoyo abierto.

- **Campo Zuata Principal**

- Pozo ZM3 Motor de fondo



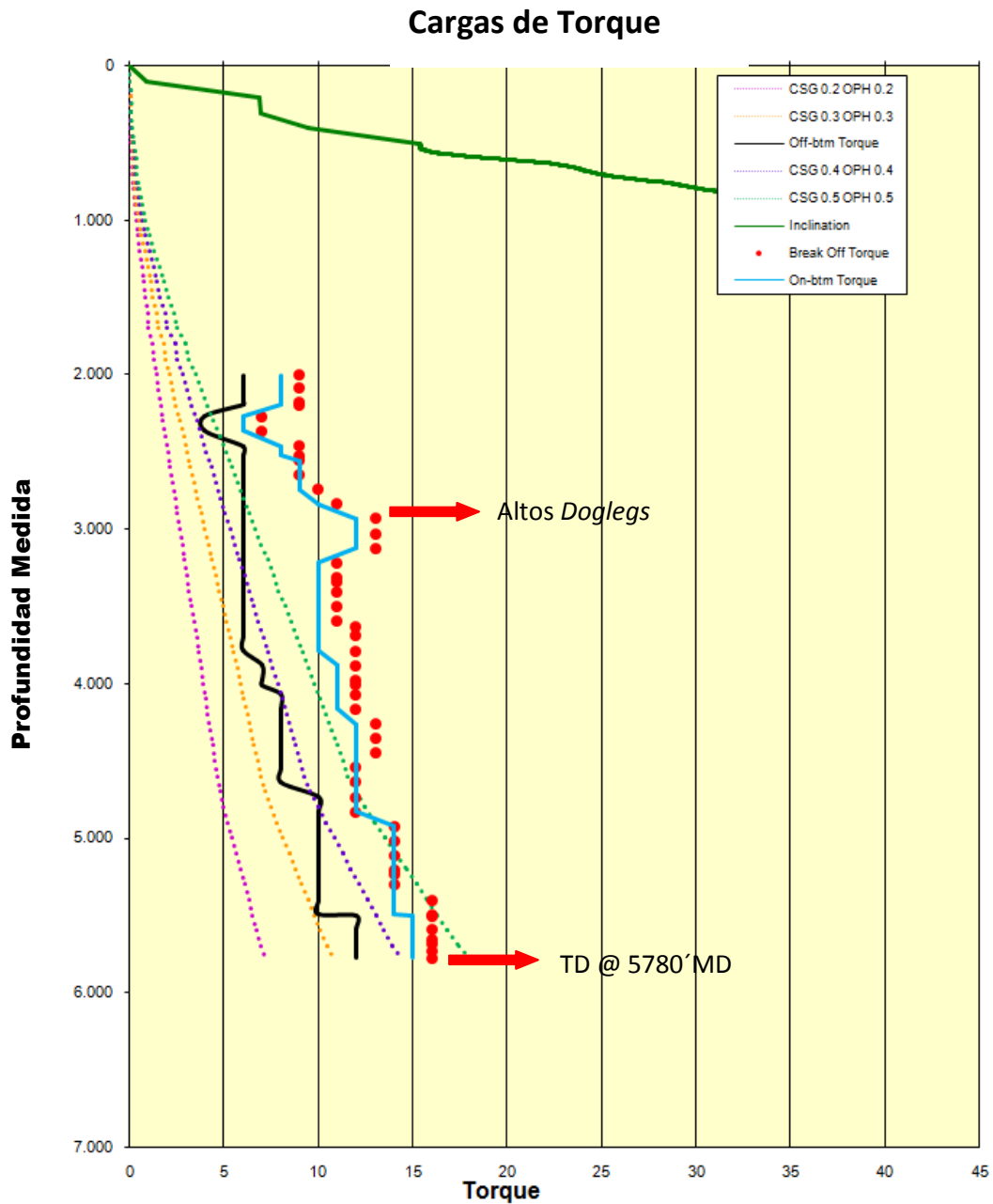
Gráfica 11: Torque Pozo ZM3 Motor de Fondo

En la Gráfica 12 se observa el comportamiento del torque a lo largo de la sección 8 ½" perforada con motor con las distintas situaciones que se presentaron. Al inicio de la perforación, ocurrieron dos eventos de pega cuyo mecanismo fue por acreción, hecho que fue analizado ya que el comportamiento del torque fue el esperado en esos dos puntos tal como se puede apreciar en el gráfico.

A 4550' se realiza un *pipe swap*, esta vez, si por un aumento significativo del torque en fondo de 13 Klb/pie y del *break-off torque* 15 Klb/pie. Además fue realizado un viaje de limpieza hasta 30° de inclinación para mejorar la situación reduciendo el torque en fondo y fuera de fondo, además de limpiar ripios.

A 5605' se produce un cambio brusco en inclinación pero no se cuenta con el peso suficiente para deslizar y levantar. Se decide continuar hasta 5785' MD donde incrementa de nuevo el torque hasta 16 KLb/pie debido posiblemente a un ojo de llave (o llavetero) formado por los cambios bruscos de inclinación.

- Pozo ZX2 *PowerDriveXceed*



Gráfica 12: Torque Pozo ZX2 *PowerDrive Xceed*

El pozo ZX2 perforado con *PowerDrive Xceed* hasta 5780' MD por decisión de geología. Inicialmente se incurrió en altos *doglegs* para alcanzar la inclinación

planeada tal como se muestra en la Tabla 15, ello generó altos torques al comienzo de la perforación que al normalizarse y seguir avanzando en profundidad, se logró mantener el torque dentro de lo simulado con los factores de fricción. A 5780' el torque final en fondo fue de 15Klb/pie y *break-off torque* de 16 Klb/pie reflejado en la Gráfica 13.

Tabla 15: *Doglegs* iniciales Pozo ZX2

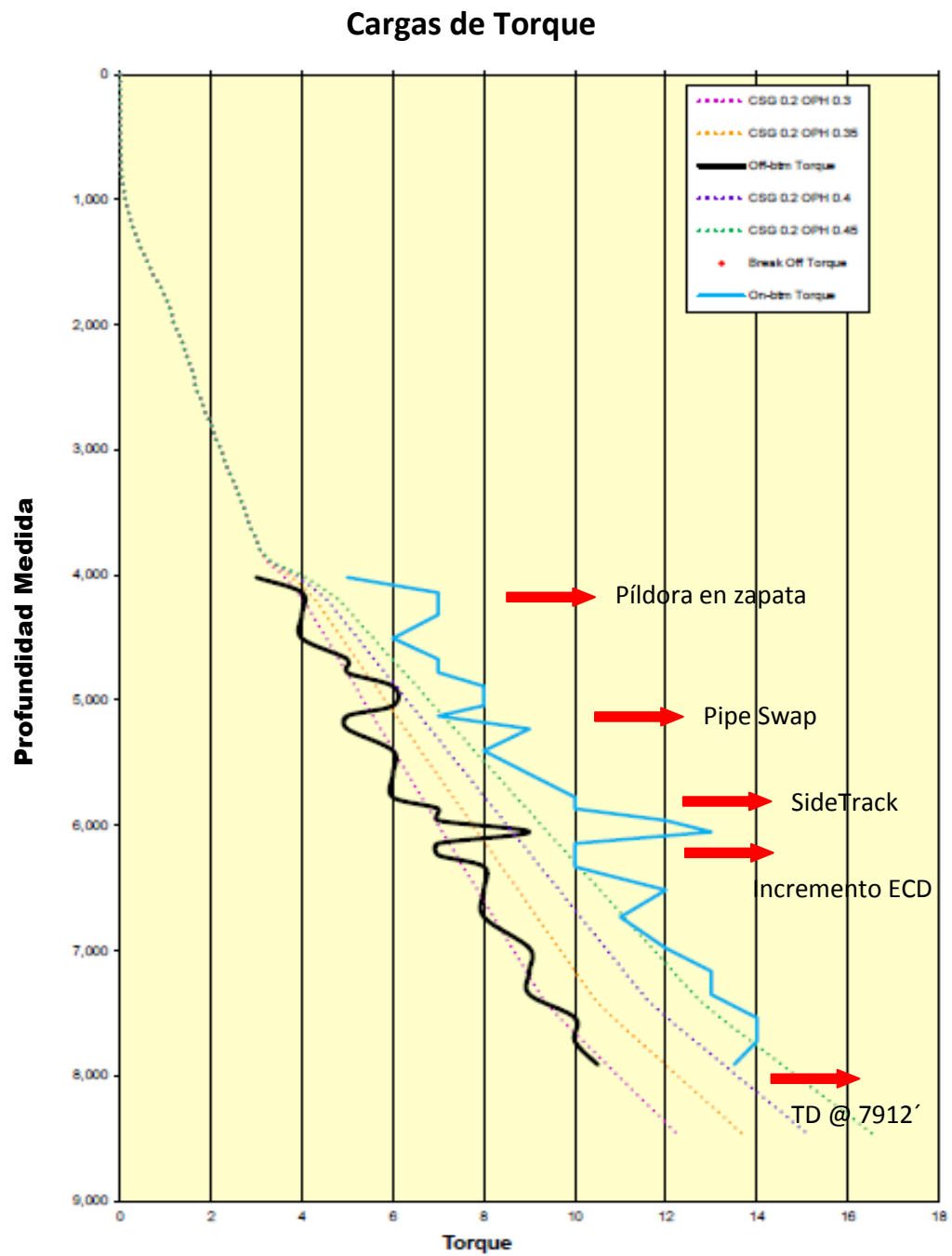
MD de pies	MD a Pies	DLS °/100ft
2004	2083	10,18
2083	2178	2,55
2178	2198	-
2198	2272	2,34
2272	2367	3,28
2367	2462	4,98
2462	2522	1,87

Al compararse los torques durante la perforación de los pozos ZM3 y ZX2 se observa que el ZM3 tuvo mayores complicaciones haciendo necesario realizar un *pipe swap* y un viaje de limpieza para poder continuar con la perforación, sin embargo, luego se produjo un ojo de llave que originó otro aumento de torque donde se decide declarar TD tanto por geología como por las condiciones mecánicas del pozo. A pesar de lo anterior, la diferencia en el torque final de los pozos fue de solo 1 Klb/pie y en profundidad fue de sólo 5'. Ambos pozos terminaron dentro de las predicciones de torque.

- **Campo Cerro Negro**

Los pozos a comparar en el campo Cerro negro son: CM1 perforado con Motor de Fondo y CX1 perforado con *PowerDrive Xceed*.

- Pozo CM1 Motor de Fondo

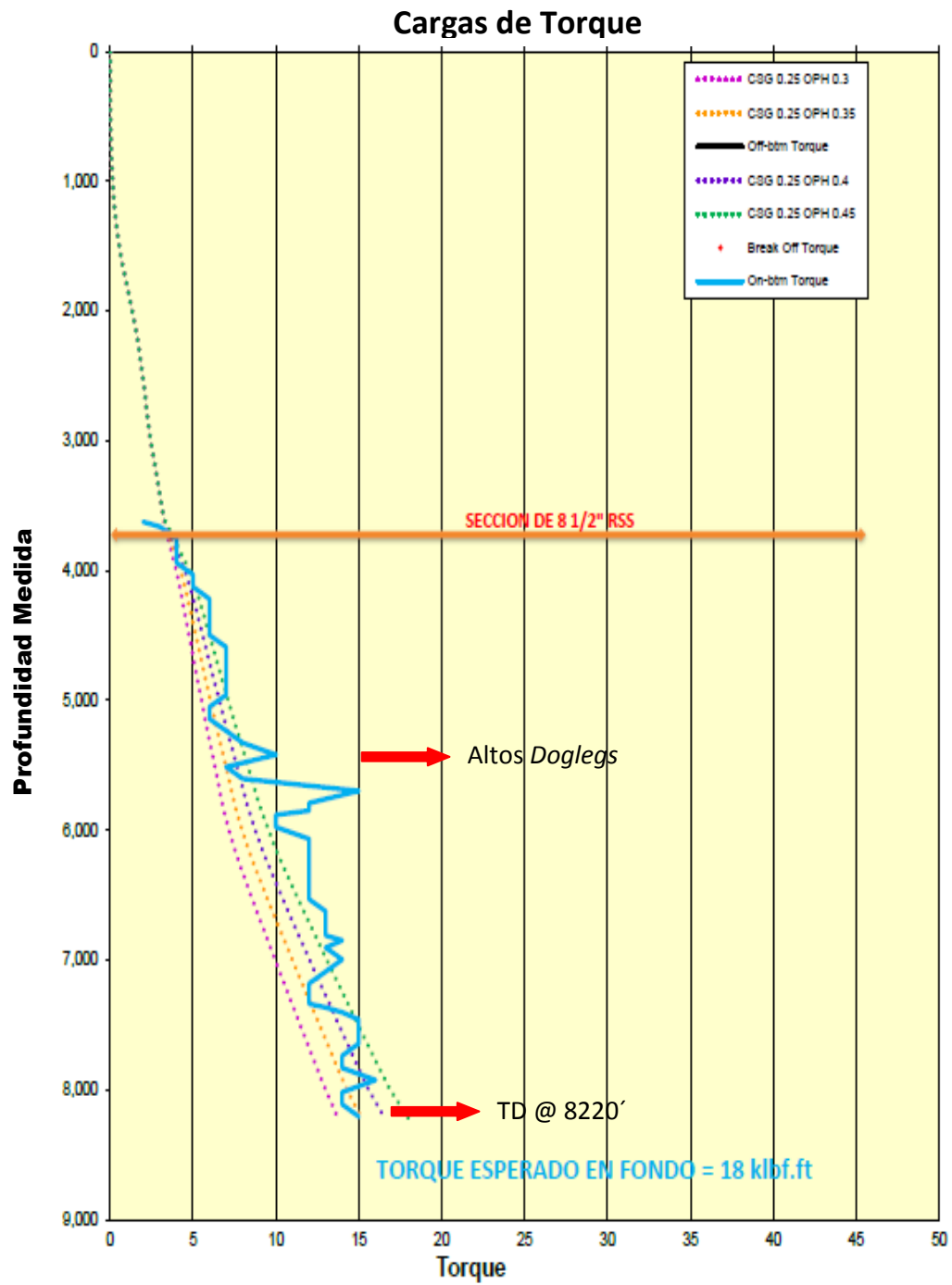


Gráfica 13: Torque Pozo CM1 Motor de Fondo

La perforación inicia a 3971', luego de perforar dos parejas se saca repasando hasta zapata para bombear píldora. Se baja y se continua la perforación hasta 5044' momento en que se produce un aumento de torque, no se consigue transferir peso a la mecha por lo cual se realiza un *pipe swap* y logra alcanzar 6500' MD donde geología decide realizar una espina estratigráfica (desviación de la arena original) que llega hasta 7259', al no encontrar cambios significativos en las propiedades de la arena se propone realizar un *sidetrack*, el cual iniciará desde 6460'.

Se perfora hasta 7912', se toma *survey* y se presenta una situación de pega diferencial que logra liberar al activar martillo, razón por la cual se decide dejar el pozo hasta esa profundidad con un torque final de 13 Klb/pie (ver Gráfica 14).

■ Pozo CX1 *PowerDriveXceed*



Gráfica 14: Torque Pozo CX1 *PowerDrive Xceed*

La perforación del pozo CX1 con *PowerDrive Xceed* fue iniciada a una profundidad de 3638', se trabajó para mantener la TVD y el *azimuth* requerido por el plan y por geología. Aproximadamente a 5700' se produce un cambio repentino en la ROP sin que los parámetros petrofísicos presentaran una variación importante. Esta situación generó una caída en inclinación de 89° a 87° lo que eventualmente provocaría un aumento significativo en el torque hasta llegar a 15 Klb/pie al incurrir en altos *doglegs* tal como se muestra en la Tabla 16. A pesar de lo ocurrido, esto no produjo conatos de pega ni un incremento del torque.

Tabla 16: Altos *Doglegs* Pozo CX1

MD De Pies	MD a Pies	DLS %/100ft
5790	5849	2,87
5849	5883	-
5883	5927	4,76

La profundidad total se alcanzó a 8220' MD, con una distancia al plan de 174' que no afectó a pozos adyacentes y con un torque en fondo en la TD de 15 Klb/pie.

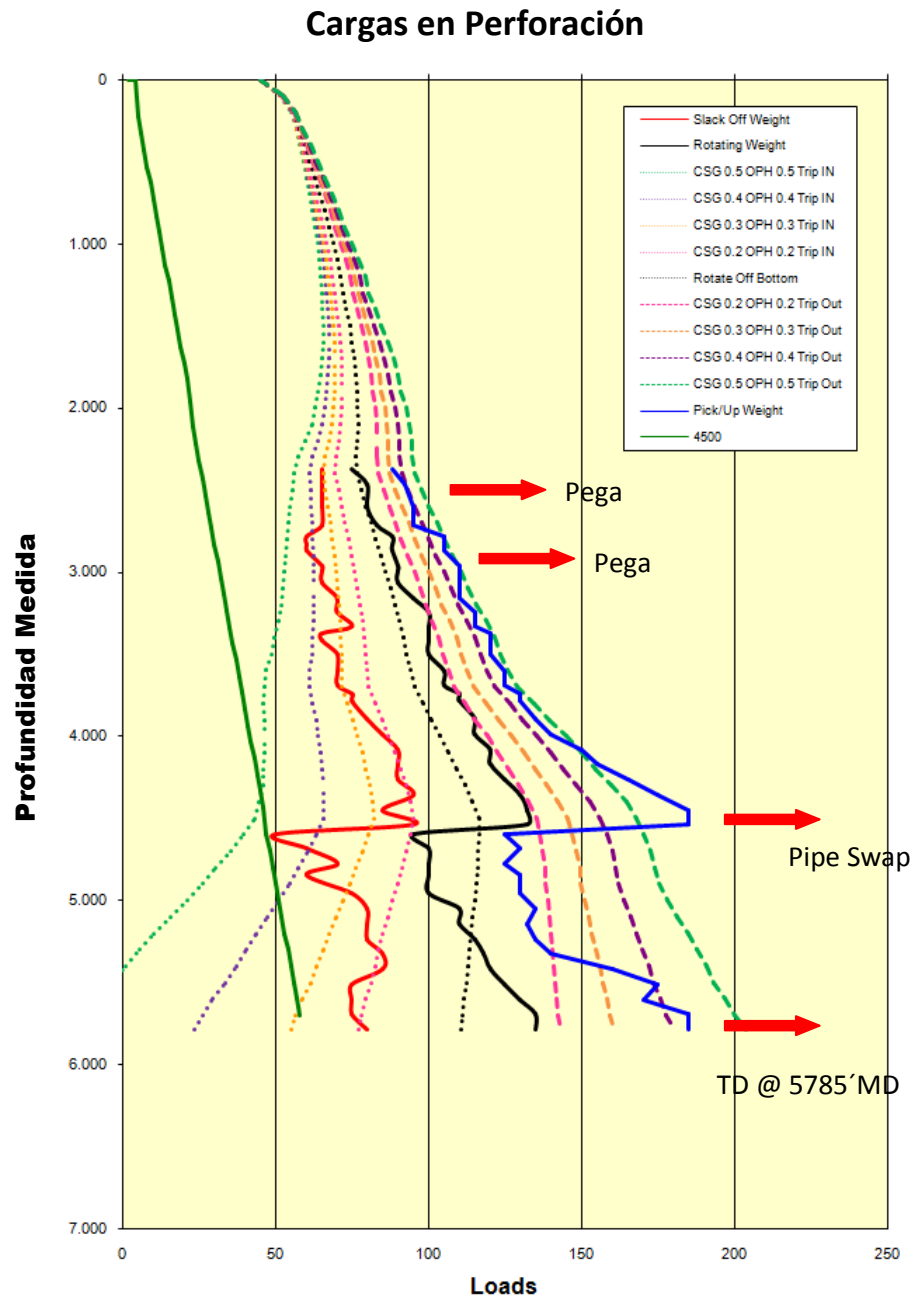
En el campo Cerro Negro, el torque final del pozo CM1 fue 13 Klb/pie, 2 Klb/pie menos que el pozo CX1 perforado con *PowerDrive Xceed*, sin embargo, para esto fue necesario realizar un *pipe swap* y bombear píldoras desde el inicio de la perforación, y esta sección tuvo una extensión de 3218' en comparación a los 4597' perforados con *PowerDrive Xceed*. (Ver Gráfica 15)

5.1.4 Arrastre

Para el estudio del arrastre en los campos Zuata Principal y Cerro Negro, se evaluarán los mismos pozos utilizados para el análisis de torque, es decir, ZM3, ZX2, CM1 y CX1.

Mediante los gráficos de cargas en la perforación, se mostrarán las curvas de peso al levantar (color azul), peso rotando (color negro) y peso bajando tubería (color rojo). De igual forma, están incluidas la simulación de cargas tanto bajando como levantando tuberías calculadas a distintos factores de fricción.

- **Campo Zuata Principal**
- Pozo ZM3 Motor de fondo



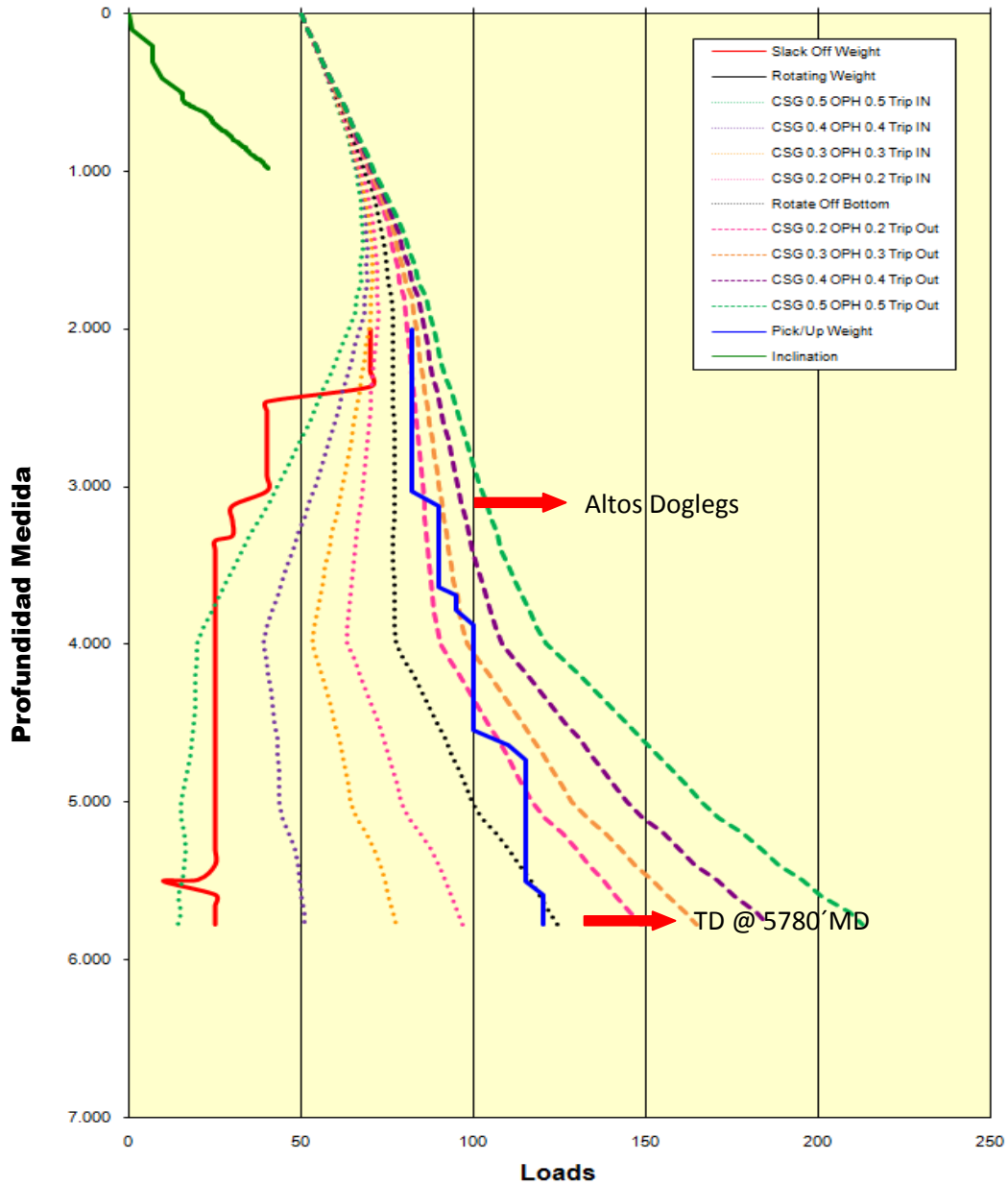
Gráfica 15: Arrastre Pozo ZM3 Motor de Fondo

Durante la perforación con motor de fondo del pozo ZM3, las cargas se comportaron de acuerdo a lo previsto a pesar de haber ocurrido dos situaciones de pega diferencial. A 4550' se produce un aumento en las cargas, alcanzando 185Klb al levantar, véase Gráfica 16. Por ello, se realiza un *pipe swap* y un viaje de limpieza para mitigar el problema.

Se reanuda la perforación y al alcanzar 5785' se observa nuevamente en torque y arrastre generado posiblemente por un ojo de llave, esto aunado también al hecho de empobrecimiento de propiedades de la arena lleva a la decisión de declarar TD a esa profundidad.

- Pozo ZX2 PowerDrive Xceed

Cargas en Perforación



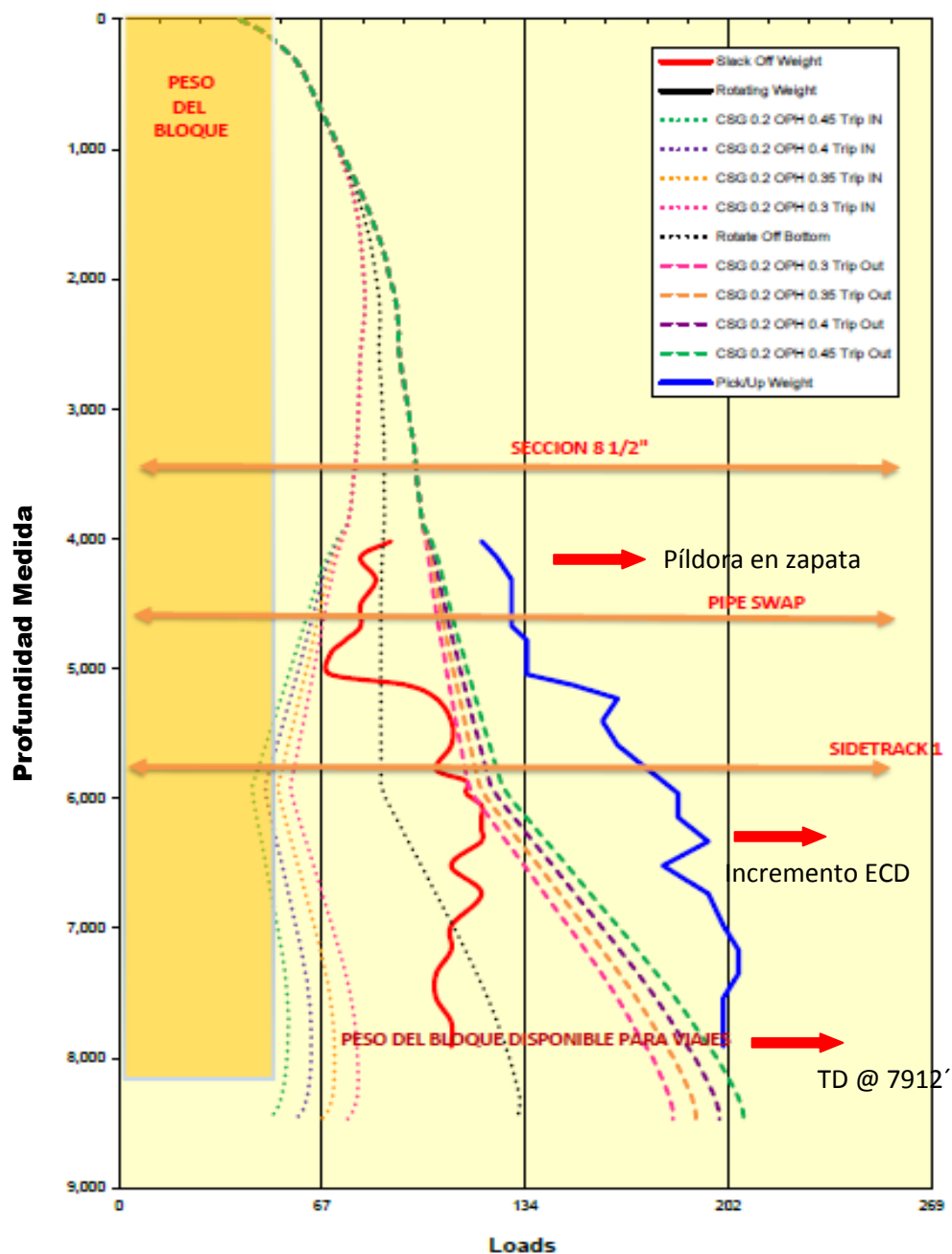
Gráfica 16: Arrastre Pozo ZX2 PowerDrive Xceed

Durante la perforación del pozo ZX2, no se observó un notable incremento de las cargas (Gráfica 17) a causa de altos *doglegs* tal como ocurrió con el torque (Gráfica 13). La sección se perforó con normalidad en lo que a cargas se refiere, dentro de lo estimado por las simulaciones del factor de fricción.

Luego al comparar las cargas de los pozos ZM3 y ZX2 perforados con motor y *PowerDrive Xceed* respectivamente, es notable la diferencia de valores. El peso en TD del pozo ZM3 levantando fue de 185Klb, mientras que para el pozo ZX2 fue de solo 120 Klb. Este hecho va estrictamente relacionado a la rotación continua de *PowerDrive Xceed* que produce una mejor integridad del hoyo, reduciendo tortuosidad y mejorando limpieza.

- Campo Cerro Negro
- Pozo CM1 Motor de fondo

Cargas en Perforación



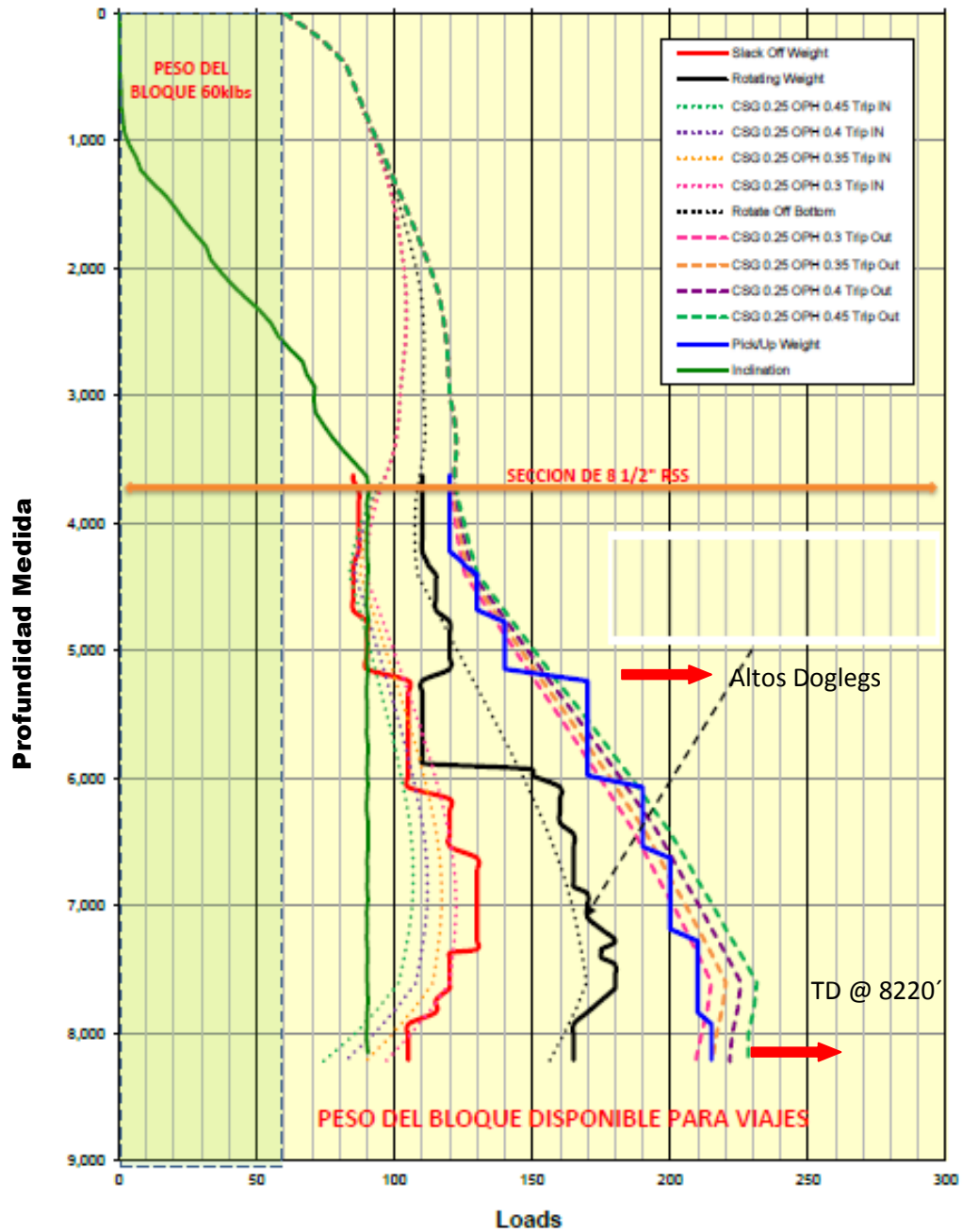
Gráfica 17: Arrastre Pozo CM1 Motor de Fondo

Se observa en la Gráfica 18 que desde el inicio de la perforación se estuvo fuera del rango de cargas simulado incluso con 0,5 el factor de fricción más alto. Por ello se hizo necesario que apenas dos parejas después de zapata se bombeara una píldora de limpieza que se circula hasta superficie.

A 5044' la transferencia de peso a la mecha es pobre, por lo que se decide realizar un *pipe swap*, luego, se hace un *sidetrack* por geología para alcanzar una arena ubicada 50 pies TVD por encima de la planificada, esto lleva a incurrir en altos *doglegs*, situación que genera un aumento en el arrastre y se mantiene la tendencia hasta TD en 7912'MD.

- Pozo CX1 *PowerDriveXceed*

Cargas en Perforación



Gráfica 18: Arrastre Pozo CX1

Al igual que como ocurrió con el torque, altos *doglegs* de hasta 4,76 afectaron el arrastre, sin embargo, luego de esto la perforación se mantuvo dentro de lo estimado a lo largo de la sección finalizando en un MD de 8220' (ver Gráfica 19).

El valor de final de peso para el pozo CX1 fue de 215 Klb, mientras que el del pozo CM1 perforado con motor de fondo fue de 202 Klb. Aunque el peso del pozo perforado con *PowerDrive Xceed* fue mayor que el perforado con motor, el primero se mantuvo dentro de los valores predichos, por el contrario, el pozo CM1 desde su inicio se tuvo que tomar medidas para tratar de alcanzar la profundidad total planteada.

5.2 Análisis de tiempo operativo

A continuación se presenta un estudio respecto a tiempos de perforación y tiempos de repaso empleado en pozos perforados con Motor de fondo y PowerDriveXceed en los campos Zuata principal y Cerro Negro.

- Zuata Principal

Pozos perforados con Motor de Fondo:

Tabla 17: Tiempos Pozo ZM1

Pozo ZM1	
Tiempo	Horas
Perforación	21
Repaso	20
Circulación	103
Circ. Total	144
BRT(Tiempo bajo mesa rotaria)	S/I
TD@	4942ft
Pies Perf (ft)	2329

Tabla 18: Tiempo Pozo ZM3

ZM3	
Tiempo	Horas
Perforación	4,8
Repaso	39,5
Circulación	74,7
Circ. Total	119
BRT(Tiempo bajo mesa rotaria)	S/I
TD@	5785ft
Pies Perf (ft)	3503

Pozos perforados con *PowerDriveXceed*:

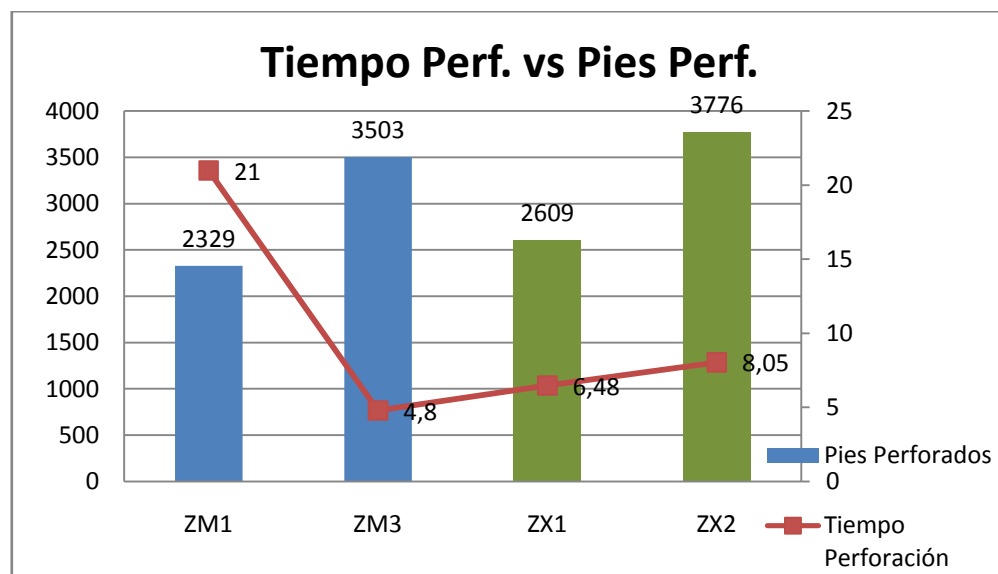
Tabla 19: Tiempo Pozo ZX1

ZX1	
Tiempo	Horas
Perforación	6,48
Repaso	S/I
Circulación	41,52
Circ. Total	48
BRT(Tiempo bajo mesa rotaria)	87,5
TD@	6050ft
Pies Perf (ft)	2609

Tabla 20: Tiempo Pozo ZX2

ZX2	
Tiempo	Horas
Perforación	8,05
Repaso	S/I
Circulación	31,45
Circ. Total	39,5
BRT(Tiempo bajo mesa rotaria)	90
TD@	5780ft
Pies Perf (ft)	3776

Mediante las tablas 17, 18, 19 y 20 se muestran los tiempos de perforación, circulación y repaso de cada pozo frente a la distancia perforada. Los tiempos de perforación fueron representados en la gráfica 20. En promedio se perforaron 435 pies por hora con *PowerDrive Xceed* mientras que con motor de fondo se perforaron 167 pies por hora, resultando una mejoría de 38% en tiempo de perforación.



Gráfica 19: Tiempo Perforación vs. Pies Perforados Zuata Principal

- **Cerro Negro**

Pozos perforados con Motor de fondo:

Tabla 21: Tiempo Pozo CM1

CM1	
Tiempo	Horas
Perforación	10
Repaso	10
Circulación	47
Circ. Total	67
BRT(Tiempo bajo mesa rotaria)	S/I
TD@	7911ft
Pies Perf (ft)	3930

Tabla 22: Tiempo Pozo CM2

CM2	
Tiempo	Horas
Perforación	14
Repaso	39
Circulación	39
Circ. Total	92
BRT(Tiempo bajo mesa rotaria)	S/I
TD@	6815ft
Pies Perf (ft)	3522

Pozos perforados con *PowerDriveXceed*:

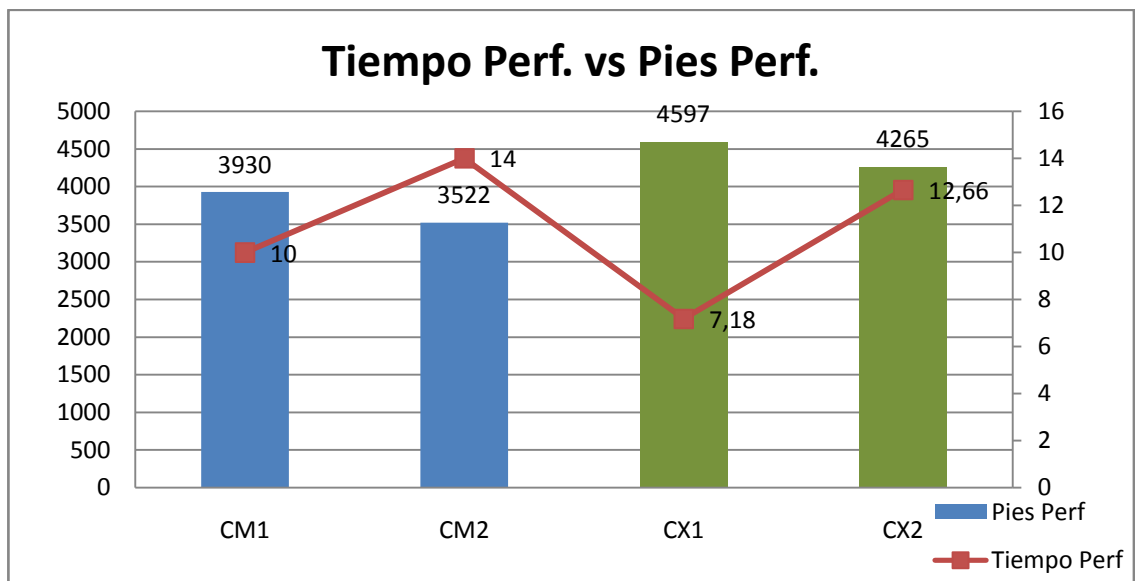
Tabla 23: Tiempo Pozo CX1

CX1	
Tiempo	Horas
Perforación	7,18
Repaso	S/I
Circulación	40,57
Circ. Total	47,75
BRT(Tiempo bajo mesa rotaria)	129
TD@	8220
Pies Perf (ft)	4597

Tabla 24: Tiempo Pozo CX2

CX2	
Tiempo	Horas
Perforación	12,66
Repaso	S/I
Circulación	95
Circ. Total	107,66
BRT(Tiempo bajo mesa rotaria)	179,5
TD@	7500
Pies Perf (ft)	4265

Los datos de horas de perforación de los pozos CM1, CM2, CX1, CX2 mostrados en las tablas 21, 22, 23 y 24 se encuentran resumidos en la gráfica 21. Los pozos perforados con motor de fondo.



Gráfica 20: Tiempo Perforación vs. Pies Perforados Cerro Negro

En la Tabla 25 se muestra un resumen de los 4 pozos evaluados en Zuata Principal y Cerro Negro, se incluye además los eventos de pega de tuberías, *pipe swaps*, *sidetracks* y pérdidas de herramientas en el hoyo.

Tabla 25: Resumen Tiempos de Perforación por pozos

Zuata Principal				
Pozo	M/X	Tiempo Perf(h)	Distancia(ft)	Eventos
ZM1	Motor	21	2329	2 ST, 3 Pipe Swaps
ZM2	Motor	11	2468	3SP, LIH
ZX1	Xceed	6,48	2609	-
ZX2	Xceed	8,05	3776	-
Cerro Negro				
Pozo	M/X	Tiempo Perf(h)	Distancia(ft)	Eventos
CM1	Motor	10	3278	1 Pipe Swap, 1 ST, 1 SP
CM2	Motor	12,81	3580	2SP, 1 Pipe Swap
CX1	Xceed	7,18	4597	-
CX2	Xceed	12,66	4255	2SP, 1 ST

CONCLUSIONES

1. Al perforar con *PowerDrive Xceed* se incrementó la ROP en 15,4% en el campo Zuata Principal y 54,9% en el campo Cerro Negro.
2. Debido a su sistema rotatorio continuo que permite orientar sin dejar de rotar, los hoyos perforados con *PowerDrive Xceed* fueron menos tortuosos y más homogéneos en comparación a los perforados con Motor de fondo, lo cual puede ser corroborado en los valores de macrotortuosidad, microtortuosidad y que se redujeron en 33,8 por ciento y 6,7 por ciento respectivamente en Zuata Principal, mientras que en Cerro Negro se redujo en 47,2 por ciento y 59,2 por ciento en el número de viajes de calibración.
3. Gran parte de la tortuosidad generada durante la perforación, es debido a la incertidumbre geológica. La geonavegación busca siempre las mejores propiedades litológicas sin que necesariamente se tenga que seguir el plan diseñado para el pozo, por ello, frecuentemente se hace mandatorio caer en altos *doglegs* a fin de cumplir con los requerimientos geológicos. En este escenario la herramienta de perforación utilizada no puede ser responsabilizada por la tortuosidad generada.
4. Los valores de torque y arrastre de pozos perforados con *PowerDrive Xceed* mostraron un comportamiento similar al calculado mediante los distintos factores de fricción. Aunque en pozos como CX1 tuvo carga y torque final mayor al pozo CM1 perforado con motor, sin embargo este nunca estuvo dentro del rango de valores estimados por las simulaciones.
5. La limpieza del hoyo fue mejorada notablemente con *PowerDrive Xceed*, lo que se observa en el comportamiento de valores de torque y arrastre al igual

que en la reducción del número de viajes de limpieza y horas de circulación y repaso.

6. Los tiempos de perforación fueron reducidos con *PowerDrive Xceed* en 38 por ciento y 51 por ciento en Zuata principal y Cerro Negro respectivamente, se disminuyeron los eventos de pega de tubería, *sidetracks*, y *pipe swaps*.
7. Parte de los problemas ocurridos al perforar con motor de fondo son generados por el hecho de ser necesario deslizar toda la sarta para orientar y alcanzar la inclinación y *azimuth* requeridos.

RECOMENDACIONES

1. Al perforar con Motor de fondo es necesario tratar de reducir al mínimo el porcentaje de perforación deslizante, de esta forma se mejorará la limpieza, los altos *doglegs* y consecuentemente la ROP, tortuosidad y torque y arrastre.
2. La transmisión de peso a la mecha es fundamental en trabajos tanto de Motor como de *PowerDrive Xceed*, por ello, se debe estudiar el diseño de la sarta de perforación para cada herramienta.
3. La configuración de tasa de flujo de la herramienta MWD debe corresponder con la configuración de trabajo de *PowerDrive Xceed*, evitando así comprometer la funcionalidad de alguna de ellas.
4. Para obtener una medida más precisa de la microtortuosidad, debería ser calculada en base a inclinación y *azimuth* continuo, así se tendrían valores por cada pie perforado y se obtendría una mejor imagen de la forma del pozo.
5. Actualmente se están desarrollando trabajos con *PowerDrive Xceed* en el bloque Ayacucho de la FPO. Realizar este estudio en los campos involucrados sería favorable a fin de obtener datos sobre el desempeño y rendimiento y eventualmente compararlos con los resultados en los campos Zuata principal y Cerro Negro.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]: Schlumberger Anadrill. (1996). *Directional Drilling Training Manual*. Version 1.1
- [2]: Universidad Central de Venezuela. Escuela de Petróleo. *Pozos I: Perforación vertical, horizontal y direccional controlada*. Caracas: Pedro Díaz.
- [3]: Chamat Burgos, E., Penaranda, J., Gonzalez, K., Trejo, E. D., Meneses, M., Rosales, A., & Martinez, J. (2014, Mayo 21). *Shallow Horizontal Drilling Meets with Very Extended Reach Drilling in the Venezuelan Faja*. Society of Petroleum Engineers.
- [4]: Ramírez, M. (2012). *Determinación de la factibilidad del uso del rotativo direccional en perforación de pozos horizontales en la fase de navegación*. Trabajo de Grado. Inédito. Universidad de Oriente, Barcelona.
- [5]: Sperry Drilling Services. (2006). *Directional Drilling*
- [6]: Computalog Limited. (2010). *Directional Drilling Course*. Calgary, Canadá.
- [7]: Anadrill & Geoquest (2006). *Drilling Office Manual*
- [8]: Linares., C. (2015). *Desarrollo de una herramienta computacional para el análisis estadístico de las operaciones de taladro y estado de los pozos del campo*. Trabajo de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [9]: Morante., E. (2011). *Evaluación del Tiempo Operativo de los Motores de Fondo de Schlumberger D&M East Venezuela en el Campo Zuata Principal*. Trabajo de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [10] Arévalos, Diego. (2010). *Optimización de la perforación direccional y horizontal en el campo Auca Sur*. Universidad Central de Ecuador.

- [11]: Connolly, J. (2006). *PowerPak Motors- Theory (TBT)*. Schlumberger. Version 1.1
- [12]: *Rotary Steerable System*. (2015) Consultado el 29 de septiembre de 2015 de, http://www.slb.com/services/drilling/drilling_services_systems/directional_drilling/powerdrive_family.aspx.
- [13]: Schopp, C., Revington, J. (2012) *PowerDrive Xceed – An Introduction (TBT)*. Schlumberger. Version 1.5
- [14]: Miranda, A. (2015). Construcción de una herramienta computacional para el desarrollo de planes de perforación óptimos para el cumplimiento de perfiles volumétricos (caso macollas). Trabajo de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [15]: Sitio Oficial de Petróleos de Venezuela S.A., 2005.
- [16]: Martínez, A. (2004). *La faja del Orinoco* Caracas. Galac.
- [17]: Acuña, A. (2008). *Estudio comparativo de fuentes de energía sísmica sobre la Faja Petrolífera del Orinoco*. Universidad Simón Bolívar.
- [18]: PDVSA. (2008). *Perforación de Pozos Horizontales en arreglos tipo Macolla, Campo Zuata Principal*. Venezuela.
- [19]: Petróleos de Venezuela, S.A. (2007). *Revisión de Características de Subsuelo, Área Petrozuata*. Cabrutica: Irúa Euribe y Rodríguez Oscar.
- [20]: Arias, F. *El Proyecto de Investigación, introducción a la metodología científica*. Edt. Episteme, C.A. 5ª edición. Caracas. Venezuela.
- [21]: Ballestrini, M. (1997) *Como se Elabora el Proyecto de Investigación*. Bl Consultores Asociados. Caracas, Venezuela.