

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DEL MOTOR DE
FONDO Y POWERDRIVE RSS EN POZOS DIRECCIONALES EN LA
SECCIÓN 12 ¼” PARA EL CAMPO BOSCÁN**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por la Br. Vivanco G., Daniela

Para optar al Título de

Ingeniera de Petróleo

Caracas, Octubre de 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DEL MOTOR DE FONDO Y POWERDRIVE RSS EN POZOS DIRECCIONALES EN LA SECCIÓN 12 ¼” PARA EL CAMPO BOSCÁN

Tutor Académico: Prof. Pedro Díaz

Tutor Industrial: Ing. Germán Barboza

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por la Br. Vivanco G., Daniela

Para optar al Título de

Ingeniera de Petróleo

Caracas, Octubre de 2015

Caracas, 26 de Octubre de 2015

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Vivanco G., Daniela, titulado:

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DEL MOTOR DE FONDO Y POWERDRIVE RSS EN POZOS DIRECCIONALES EN LA SECCIÓN 12 ¼” PARA EL CAMPO BOSCÁN

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniera de Petróleo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.



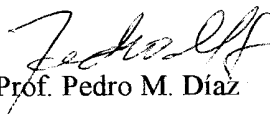
Prof. Pedro Martorano

Jurado



Prof. Richard Muñoz

Jurado



Prof. Pedro M. Díaz

Tutor

DEDICATORIA

A Dios, a la Universidad Central y a mi familia ya que con su apoyo me motivaron a
terminar esta etapa de mi vida.

Daniela Vivanco G.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por concederme la determinación necesaria para la obtención de este logro.

A la Universidad Central de Venezuela, por permitir mi formación como ingeniero de petróleo y por darme lazos de amistad únicos.

Al segmento y al personal *Drilling and Measurements* de Schlumberger en Venezuela West por darme la oportunidad de llevar a cabo las pasantías como parte de su equipo de trabajo.

A Giovannina Ragusa por ser una aliada de la universidad en todo momento y apoyarnos en la formación como ingeniera de petróleo y profesionales de la industria.

Al profesor Pedro Díaz, mi tutor académico y amigo por su confianza y paciencia.

Al ingeniero Germán Barboza por su orientación como tutor industrial de este proyecto.

A mi familia, por estar allí siempre para mí, dándome todo su cariño, atención y no dejándome de caer.

A mis amigos y especialmente a Paola Martínez por creer en mí siempre y apoyarme en cada paso.

Daniela Vivanco G.

Vivanco G., Daniela

Análisis Comparativo de las Tecnologías del Motor de Fondo y PowerDrive® RSS en Pozos Direccionales en la Sección de 12 ¼" Para el Campo Boscán

Tutor Académico: Prof. Pedro Díaz. Tutor Industrial: Ing. Germán Barboza.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Petróleo. Año 2015,
114 p.

Palabras Claves: Motor de fondo, *Rotary steerable system* RSS, PowerDrive® RSS, Campo Boscán, estado Zulia, pozos direccionales

Resumen: En la búsqueda optimizar recursos usando la tecnología más adecuada para perforar en campo Boscán, en el estado Zulia se tomó una muestra de pozos perforados direccionalmente por Schlumberger entre los años 2014 y 2015, donde se hubieran usado las herramientas de motor de fondo y RSS, quedando seleccionada una macolla al norte del campo donde se usaron ambas tecnologías. El propósito de la siguiente investigación consistió en el análisis de los ensamblajes de fondo usados en la perforación de la sección de 12 ¼" con motor de fondo y PowerDrive® RSS. Para ello fue necesario recopilar información sobre el funcionamiento de las herramientas direccionales, luego fue necesario recopilar los datos de los pozos a estudiar y establecer para comparar el desempeño de las tecnologías durante la perforación de la sección y los viajes a superficie. Adicionalmente abordar la causa de los problemas de las pegas durante los viajes a superficie en *backreaming* donde se pierden en el hoyo los ensamblajes direccionales. El presente estudio se justificó por cuanto posee valor para optimizar recursos aumentando la vida productiva de las herramientas y la calidad del servicio prestado al cliente del campo estudiado. Para el análisis técnico se tomarán en cuenta características de los pozos durante la perforación como la tasa de penetración promedio, inclinación, azimut, tortuosidad, torque de perforación entre otros. Y para el análisis económico se compararán los costos de las herramientas direccionales y el costo total de la sección con cada herramienta direccional. Para el análisis de los viajes a superficie se compararán los valores de arrastre. Y para finalizar se evaluarán las secuencias de actividades durante viajes a superficie y los factores predominantes en las fallas de la tubería de perforación. Metodológicamente hablando el trabajo de grado es de investigación de campo, directa y participativa, donde la muestra estuvo conformada por cuatro pozos perforados en campo Boscán en una macolla de 20 pozos; ya que solo un pozo fue perforado con motor de fondo y seleccionado esa macolla se toma como constante las características del taladro, equipos y personal. El análisis de los datos recolectados permitió comprobar que a pesar de que el motor de fondo es capaz de perforar la sección de 12 ¼", el mejor desempeño técnico y económico la mejor herramienta direccional para el campo en estudio es el PowerDrive® RSS. Y los problemas durante los viajes a superficie que terminan en pérdida del ensamblaje direccional están relacionados a problemas de superficie y no a las herramientas direccionales.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos de la investigación	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Alcance	5
1.5 Limitaciones	5
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	
2.1 Perforación direccional.....	6
2.2 Componentes de un ensamblaje convencional	6
2.3 Ensamblajes direccionales.....	7
2.3.1 Ensamblajes Convencionales	7
2.3.2 Motor de Fondo.....	8
2.3.2.1 Partes del motor PDM.....	10
2.3.2.2 Especificaciones de motor de fondo en estudio	11
2.3.2.3 Curva de Poder del Motor	12

2.3.2.4	Factores a tomar en cuenta para el uso de motor de fondo	13
2.3.2.5	Ventajas uso del motor de fondo PDM.....	15
2.3.3	Sistemas Rotativos Direccionales	15
2.3.3.1	Especificaciones del RSS en estudi.....	17
2.3.3.2	Ventajas uso del PowerDrive® RS	18
2.4	Factores para evaluar el desempeño de pozos direccionales.....	19
2.4.1	Tasa de Penetración.....	19
2.4.2	Tortuosidad	19
2.4.3	Inclinación.....	20
2.4.4	Azimut.....	20
2.4.5	Grado de Construcción.....	20
2.5	Problemas de hoyo	21
2.5.1	Pega de tubería	21
2.5.2	Pega diferencial.....	21
2.5.3	Pega mecánica.....	21
2.5.4	Pérdida de circulación	22
2.5.5	Fallas de la tubería	22
2.5.6	<i>Sidetrack</i> accidental	22
2.5.7	Problemas relacionados a los equipos.....	22
2.5.8	Problemas asociados al personal	23

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1	Ubicación.....	24
3.2	Características generales	25

3.3	Descripción geológica	25
3.3.1	Estratigrafía	25
3.3.2	Estructura	26

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

4.1	Tipo de Investigación	27
4.2	Diseño de la Investigación	27
4.3	Población y Muestra	28
4.4	Técnicas e Instrumentación de Datos	28
4.4.1	HSPM®	29
4.4.2	Maxwell®	29
4.4.3	Carpetas de Pozos	29
4.5	Fases de la investigación	29
4.5.1	Recopilar información bibliográfica	30
4.5.2	Revisión y selección de material bibliográfico	30
4.5.3	Entrenamiento	30
4.5.4	Recolección de Datos en Operaciones de Campo	31
4.5.5	Diseño y Elaboración de Base de Datos de Campo	31
4.5.6	Analizar, Calcular y Evaluar los Datos Recolectados en Campo	32
4.5.7	Elaboración del informe	35
4.6	Conclusiones	35

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1	Datos Generales de los pozos en estudio.....	36
-----	--	----

5.2	Ensamblajes de fondo utilizados por pozo	37
5.2.1	Pozo B-01.....	37
5.2.2	Pozo B-02.....	38
5.2.3	Pozo B-04.....	39
5.2.4	Pozo B-05.....	41
5.3	Características de los pozos en estudio	43
5.4	Resumen de operaciones de los pozos en estudio	44
5.4.1	Pozo B-01.....	44
5.4.2	Pozo B-02.....	47
5.4.3	Pozo B-04.....	50
5.4.4	Pozo B-05.....	52
5.5	Comparación de las herramientas direccionales según la inclinación y dirección	54
5.6	Evaluación de las Tasas de Penetración Promedios por Pozo.....	56
5.7	Evaluación de la tortuosidad por pozos.....	58
5.8	Comparación de las herramientas direccionales por los costos asociados ...	62
5.9	Evaluación del Torque.....	64
5.10	Evaluación del arrastre por pozo en estudio.....	66
5.11	Evaluación de las causas de pega de tubería mientras se realizan viajes a superficie	74
5.11.1	Pozo B-03.....	74
5.11.1.1	Geometría del hoyo	74
5.11.1.2	Ensamblaje de fondo en el hoyo.....	75
5.11.1.3	Secuencia de Eventos	76
5.11.1.4	Identificación del mecanismo de pega	84

5.11.1.5	Análisis de la causa de la falla de tubería.....	85
5.11.2	Pozo B-05.....	85
5.11.2.1	Geometría del hoyo	85
5.11.2.2	Ensamblaje de fondo en el hoyo.....	86
5.11.2.3	Secuencia de Eventos	86
5.11.2.4	Análisis de la causa de la falla de tubería.....	91
CONCLUSIONES		92
RECOMENDACIONES.....		94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del motor de estudio .	12
Tabla 2. Especificaciones del RSS de estudio	18
Tabla 3. Características generales del campo en estudio	25
Tabla 4. Topes de formaciones para la zona en estudio.....	26
Tabla 5. Datos Generales de los pozos de estudio	36
Tabla 6. Datos de las características de los pozos de estudio	44
Tabla 7. Valores obtenidos de tortuosidad de pozos en estudio	59
Tabla 8. Tiempos a tomar en cuenta para el análisis de costos.....	63
Tabla 9. Costos asociados a la perforación y ensamblaje de fondo	63
Tabla 10. Costos y Gastos asociados	63
Tabla 11. Geometría del hoyo B-03.....	74
Tabla 12. Identificación del mecanismo de pega pozo B-03	85
Tabla 13. Geometría del hoyo B-05.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de ensamblajes de fondo.....	8
Figura 2. Principio operacional de motores tipo PDM	9
Figura 3. Partes de un motor PDM	11
Figura 4. Curva de poder del motor en estudio	13
Figura 5. Curva de Poder vs diferencial de presión del motor en estudio	13
Figura 6. Partes del RSS	16
Figura 7. Principio de control de dirección.....	17
Figura 8. Ejemplo de hoyo tortuoso.....	20
Figura 9. Ubicación geográfica del Campo Boscán.....	24
Figura 10. Fases de la investigación	30
Figura 11. Ensamblaje de fondo usado en el B-01.....	38
Figura 12. Ensamblaje de fondo usado en el B-02.....	39
Figura 13. Ensamblaje de fondo número uno usado en el B-04	40
Figura 14. Ensamblaje de fondo número dos usado en el B-04.....	41
Figura 15. Ensamblaje de fondo usado en el B-05.....	43
Figura 16. Tiempo vs MD pozo B-01	46
Figura 17. Tiempo vs MD pozo B-02	49
Figura 18. Tiempo vs MD pozo B-04	51

Figura 19. Tiempo vs MD pozo B-05	53
Figura 20. Relación entre la inclinación y la profundidad medida	55
Figura 21. Vista de planta de los pozos en estudio.	56
Figura 22. Tasa de penetración promedio de los pozos en estudio	57
Figura 23. Número de corridas totales y donde se perforó	58
Figura 24. Tortuosidad en la sección de verticalidad para los pozos de estudio	60
Figura 25. Tortuosidad en la sección de incremento para los pozos de estudio	61
Figura 26. Tortuosidad en la sección tangente para los pozos de estudio	62
Figura 27. Relación entre el torque durante la perforación y la profundidad medida	65
Figura 28. Gráfico de arrastre del pozo B-01.....	67
Figura 29. Gráfico de arrastre del pozo B-02.....	69
Figura 30. Gráfico de arrastre del pozo B-04.....	71
Figura 31. Gráfico de arrastre del pozo B-05.....	73
Figura 32. Ensamblaje de fondo en el hoyo del B-03	75
Figura 33. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad antes del evento 1-3.....	77
Figura 34. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad antes del evento 2-3.....	79
Figura 35. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad antes del evento 3-3.....	81
Figura 36. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad del evento	83
Figura 37. Tubería que falló durante viaje a superficie en backreaming B-03	84

Figura 38. Tratando de desconectar tubería de perforación	88
Figura 39. Tratando de desconectar tubería de perforación	89
Figura 40. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad del evento	90

INTRODUCCIÓN

Actualmente la mayoría de los pozos que se perforan requieren del uso de tecnología de perforación avanzada ya que hoy en día se requiere de trayectorias más difíciles debido a geología compleja o a locaciones de difícil acceso o con restricciones de tipo ambiental. Por eso empresas como Schlumberger poseen una amplia variedad de herramientas direccionales y de medición que permiten alcanzar la trayectoria deseada en menor tiempo y de una manera más segura combinada con la consecución de información en tiempo real de las formaciones ubicadas lo más cerca de la mecha posible en el ensamblaje de fondo, que permiten decisiones oportunas.

La desviación intencional de los pozos inició cuando los perforadores buscaban rodear obstrucciones, perforar pozos de alivio o inclusive para evitar que se desviaran pozos verticales. Inicialmente utilizaron cucharas deflectoras, cambios en el ensamblaje de fondo o aprovechando la tendencia natural de las formaciones, pero de esta manera se realizaban muchos viajes a superficie para modificar el ensamblaje de fondo.

Actualmente se utiliza el motor de desplazamiento positivo que es la combinación de rotor/estator helicoidales para darle potencia a la mecha con un codo ajustable en superficie y éste funciona con el paso del fluido de perforación a través de esta sección generadora de potencia encargada de convertir la energía hidráulica en energía mecánica. Los motores direccionales perforan en dos modos; deslizamiento y rotación. Del modo deslizamiento solo gira la mecha gracias a la energía imputada por el fluido y en modo rotación gira toda la sarta por la rotación que se le imprime a la sarta desde superficie.

En la década de 1990 se introduce en el mercado un sistema de rotación continuo que en principio usaban *Pads* o aletas accionados por lodo para provocar cambio de dirección mediante el empuje de la sarta contra las paredes del hoyo. Este sistema se sigue usando hasta la actualidad.

Con esta evaluación es posible optimizar recursos para buscar nuevos mercados ya que un problema de este segmento es la pérdida de ensamblaje de fondo direccional durante los viajes a superficie por pega o la aplicación de la técnica de *backreaming*, lo cual genera pérdida de recursos y altos costos de mantenimiento. Esto genera una limitación a la hora de prestar servicios direccionales y aumenta los costos operacionales.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

La perforación direccional es la técnica de desviar un pozo a lo largo de una trayectoria planeada hasta una zona de interés. Schlumberger ofrece estos servicios de perforación direccional y estas permiten el control de la sarta para obtener junto con las herramientas de medición el objetivo planeado. Entre las tecnologías disponibles para direccionar un pozo se tiene el motor de desplazamiento positivo de sus siglas en inglés PDM (*Positive Displacement Motor*) y el PowerDrive® que es un sistema de rotación continua de sus siglas en inglés RSS (*Rotary Steerable System*).

En Schlumberger D&M West Venezuela se han utilizado las tecnologías de motor de fondo y PowerDrive® RSS para perforar pozos en campo Boscán, en donde se han presentado muchos problemas que conducen a pegas de tubería, pérdida de herramientas en el hoyo y que conllevan a tiempo no productivo. En la búsqueda de la definición de la mejor opción para el campo y buscando reducir la problemática mencionada se requirió la realización de un análisis para la evaluación del desempeño de estas herramientas para la sección de 12 ¼". Adicionalmente se requiere evaluar si el principal problema de hoyo, pega durante viajes a superficie en *backreaming* está asociado al tipo de tecnología usado.

Ya que la demanda de herramientas direccionales ha aumentado en mayor proporción que la capacidad de brindar el servicio y sumando el aumento de pérdida de tubería en el hoyo, es necesario realizar una evaluación del desempeño de los ensamblajes de fondo usados en Campo Boscán en la sección de 12 ¼".

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo General

Analizar los ensamblajes de fondo direccionales de Schlumberger comparando las tecnologías de Motor de Fondo y PowerDrive® RSS en la sección de 12 ¼” en Campo Boscán

1.2.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información teórica sobre las herramientas direccionales a estudiar, Motor de Fondo y PowerDrive® RSS.
- Recopilar información sobre las características de los pozos direccionales perforados y ensamblaje de fondo utilizados en la sección de 12 ¼" en Campo Boscán.
- Establecer parámetros para evaluar el rendimiento de los ensamblajes de fondo durante la perforación de la sección y viajes a superficie.
- Evaluar el rendimiento de los ensamblajes de fondo comparando las tecnologías en estudio, según los parámetros establecidos durante la perforación de la sección.
- Determinar la causa de las pegas de tubería mientras se realizan viajes a superficie en *backreaming* y proponer medidas de prevención y mitigación.
- Realizar análisis comparativo de los ensamblajes de fondo con las herramientas direccionales respectivas durante los viajes a superficie.

1.3 Justificación

El requerimiento del análisis para el segmento de D&M West de Schlumberger en Venezuela busca optimizar el uso de sus herramientas, evaluando el ensamblaje de fondo direccional más apropiado para la perforación de la sección 12 ¼” de campo Boscán, ya que con esto es posible disminuir las pérdidas de herramientas en el hoyo, especialmente durante los viajes de tubería, aumentando la vida productiva de las herramientas y la calidad del servicio prestado al cliente en el campo a estudiar.

1.4 Alcance

Esta evaluación del desempeño de los ensamblajes de fondo direccionales comparando las tecnologías de las herramientas direccionales está limitada a una macolla perforada por Schlumberger Venezuela West, en la sección de 12 ¼” para Campo Boscán entre los años 2014 y 2015.

1.5 Limitaciones

Un solo pozo perforado con motor de fondo es la principal limitación para esta investigación ya que los resultados deberían estar expresados a partir de una estadística. Además de la limitación radica en las reservas de la empresa en difundir algunos materiales teóricos sobre las herramientas y procedimientos, además de que no es posible difundir con nombre real los nombres de los pozos a estudiar.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Perforación direccional ^[1] ^[2]

La perforación direccional se realiza desde la década de 1920, cuando los perforadores se dieron cuenta que los pozos que debían ser verticales, realmente se desviaban. Para enfrentar estos problemas de desviación emplearon técnicas para mantener la dirección lo más vertical posible. De esta experiencia, años más tarde se utilizaron las mismas técnicas con la intención de desviar la trayectoria del pozo de manera controlada. Siendo la perforación direccional «la ciencia que se ocupa de la desviación de un hoyo a lo largo de un rumbo planificado, hacia un objetivo subterráneo localizado a una distancia horizontal dada desde un punto directamente debajo del centro de la mesa rotatoria de un taladro de perforación».

2.2 Componentes de un ensamblaje convencional ^[2] ^[3]

Los componentes principales de un ensamblaje de fondo se mencionarán a continuación:

- *Drill pipe* es la herramienta usada para conectar el ensamblaje de fondo con superficie.
- Portamechas o *Drill collar* es la herramienta que se coloca en la sarta de perforación con la intención de aumentar el peso sobre la mecha y dar rigidez a la sarta de perforación.
- Monel es una herramienta de material no magnético que se coloca en la sarta con la intención de disminuir la interferencia magnética de las herramientas de medición, adicionalmente cumple la función del *drill collar*.
- *Heavy Weight* o tubería de transición es una herramienta utilizada como transición entre los *drill pipe* y *drill collar*, también aportan peso sobre la mecha.

- Martillo es la herramienta que se coloca en la sarta para usarse en caso de pega de tubería, desatascando mediante golpes sucesivos.
- Herramientas de medición son puestas en la sarta de perforación con la intención de ubicar la dirección e inclinación del pozo, actualmente en tiempo real. Existe una amplia variedad de herramientas de medición pero la usada en este estudio es el denominado MWD de sus siglas en inglés *Measurements While Drilling*.
- Estabilizadores son herramientas que se utilizan con el fin de centralizar el ensamblaje de fondo y para controlar la dirección de acuerdo a lo requerido.
- La mecha es una herramienta que se encuentra en contacto con el fondo, esta es la que permite la penetración hacia la formación mediante cortes y chorros que dejan pasar el fluido de perforación a velocidades que ayuden penetrar. Existe una gran variedad de mechas y son usadas dependiendo de las características de las formaciones a ser atravesadas. Para el caso de estudio se utilizaron mechas PDC de diámetro de 12 ¼” de cinco aletas de 19 mm, por lo que la mecha no es una variable de estudio.

2.3 Ensamblajes direccionales

2.3.1 Ensamblajes Convencionales ^[4]

Originalmente la desviación de los pozos se realizaba a través de la ubicación de los estabilizadores en el conjunto de fondo buscando mantener, aumentar o disminuir la inclinación de un pozo. Adicionalmente es necesario tener un equilibrio con la velocidad de rotación, peso sobre la mecha, dureza de la formación y tipo de mecha.

En la Figura 1 se muestran las disposiciones de los estabilizadores para los objetivos planteados. En la primera configuración se muestra un estabilizador cercano a la mecha y tenderá a incrementar ángulo cuando se le aplique peso a la mecha, ya que el estabilizador funcionará como un punto de apoyo. En la segunda configuración se utiliza un estabilizador después de un *drill collar* para que cuando se aplique peso sobre la mecha este funcione como péndulo llevando dirección de la mecha a la parte más

baja. Y en la tercera configuración se busca colocar más de un estabilizador a una distancia fija entre ellos para darle mayor rigidez a la sarta de perforación, logrando así mantener ángulo.

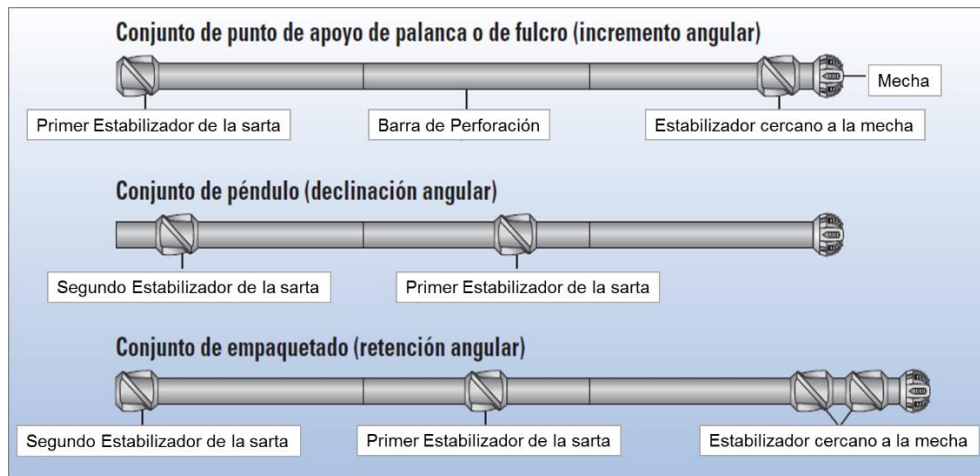


Figura 1. Tipos de ensamblajes de fondo ^[4]. Modificado

2.3.2 Motor de Fondo ^[5]

Los motores pueden ser de turbina de fondo o desplazamiento positivo PDM de sus siglas en inglés *Positive Displacement Motor*, como fuente de potencia y con un ángulo de curvatura fijo. Para este trabajo se analizarán los motores de desplazamiento positivo ya que son los utilizados en Campo Boscán, en la sección de 12 ¼” y en estos el fluido de perforación convierte la potencia hidráulica del fluido en potencia mecánica para hacer rotar la mecha de perforación. A continuación en la Figura 2 se presentan los principios operacionales de motores tipo PDM.

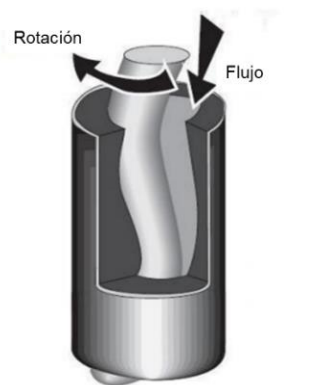


Figura 2. Principio operacional de motores tipo PDM [5]

La perforación direccional con motor de fondo se logra con la combinación de dos técnicas y dependiendo de las características del pozo y zona atravesada se perfora en modo de deslizamiento y modo rotacional. En el modo de deslizamiento es necesario sacar de fondo la mecha y orientar la sección inclinada del motor con ayuda del MWD hacia la dirección deseada, una vez logrado se inicia la perforación solo la mecha rota por acción del lodo de perforación. En esta modalidad es posible realizar un cambio de dirección o inclinación de la trayectoria del pozo. Durante la perforación en modo deslizamiento se disminuye la capacidad del fluido de perforación de remover los recortes desde el fondo del hoyo, así como la tasa de penetración ocasionando mayores riesgos de pega de tubería.

El segundo método es el rotacional donde la rotación es generada por el *topdrive* o mesa rotaria y esta hace girar toda la sarta continuamente, ayudando al fluido de perforación a remover los recortes desde el fondo del hoyo a superficie. Este modo se utiliza cuando es necesario mantener ángulo de inclinación del pozo.

2.3.2.1 Partes del motor PDM ^[6]

El motor está compuesto por cuatro partes básicas y estas se pueden apreciar en la Figura 3 y estas son *Top Sub* o *Float Sub*, sección de poder, dispositivo ajustable en superficie y sección de rodamientos el cual puede tener estabilizador. Para este trabajo en el campo Boscán los motores de fondo tienen estabilizador en la sección de rodamientos.

- El *Top Sub* o *Float Sub*, es un *crossover* que se utiliza con la finalidad de generar el cambio de diámetro entre el estator y el resto del ensamblaje de fondo. Este posee una válvula de descarga, es decir que solo permite el flujo hacia el pozo y no en sentido contrario.
- La sección de poder es donde se convierte la energía hidráulica del fluido de perforación en energía mecánica para que la mecha rote mientras se tiene la sarta en modo de deslizamiento y esta sección está compuesta básicamente por un rotor y un estator.
- La sección de transmisión está unida a la de poder y su función es transmitir la velocidad de rotación, esta sección del motor de fondo posee un doblez en su collar ajustable que permiten de 0 a 3 grados.
- La sección de rodamiento es la que soporta las cargas axiales y radiales esta transmite el empuje y la velocidad de rotación del eje de transmisión a la mecha.



Figura 3. Partes de un motor PDM ^[6]. Modificado

2.3.2.2 Especificaciones de motor de fondo en estudio ^[6]

Existe una gran variedad de motores, dependen del tamaño del collar, relación rotor/estator, numero de etapas, entre otros. La selección está basada según el diámetro del hoyo a perforar tipo de lodo a usar a continuación se presentan las características del motor usado para esta investigación en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones del motor de estudio ^[6].

Parámetro	Valor
Diámetro Externo (pulg.)	8,25
Relación rotor/estator	7/8
Etapas	4,00
Lubricación de rodamientos	Lodo
Flujo (GPM)	300-900
Revoluciones por galón (RGP)	0,16
Velocidad (RPM)	45-145
Máxima potencia (hp)	190
Longitud (pies)	29,73
Diámetro del hoyo (pulg.)	12,25
Máxima tensión Operativa (lbf)	219500
Máxima tensión Absoluta (lbf)	754800
Contenido de Arena (%vol)	2,00

2.3.2.3 Curva de Poder del Motor ^[6]

A continuación se presenta la curva de poder del motor usado para este estudio en la Figura 4, para un motor de un collar de 8,25 pulgadas, relación rotor/estator 7:8 y 4 etapas. En esta figura se puede ver la respuesta esperada de la sección de poder bajo condiciones de prueba en superficie. Se muestra como están relacionados el torque operacional (ft-lbf) y la velocidad (rpm) con diferentes rangos de galonaje permitidos para la herramienta a determinada presión diferencial. Se puede apreciar una tendencia lineal creciente entre el torque y la presión diferencial. Es importante acotar que estas curvas posiblemente varíen en condiciones reales, es decir, con la temperatura, presión, aditivos que forman parte del lodo.

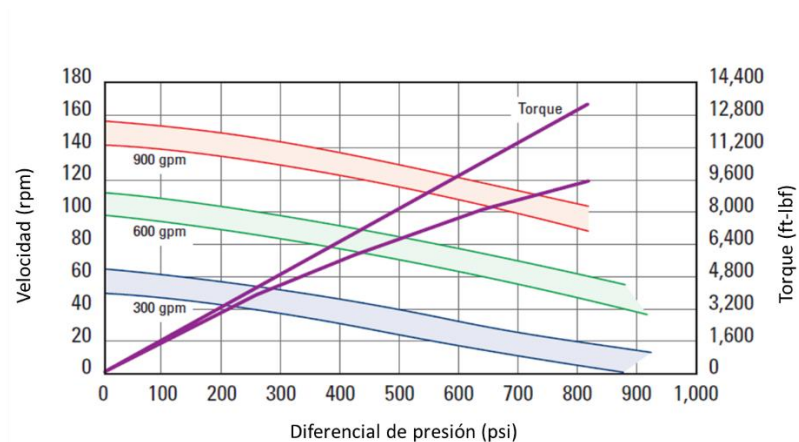


Figura 4. Curva de poder del motor en estudio ^[6]. Modificado

En la Figura 5 se muestra la relación de poder con respecto al diferencial de presión para diferentes galonajes dentro de los permitidos para un motor de un collar de 8.25 pulg, relación rotor/estator 7:8 y 4 etapas.

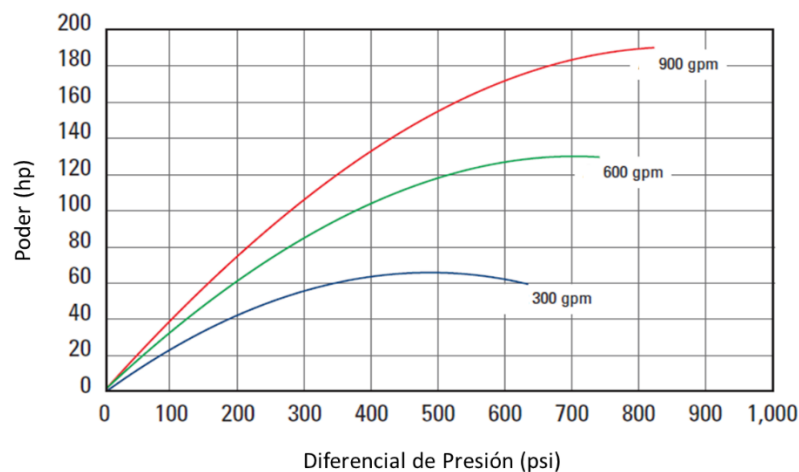


Figura 5. Curva de Poder vs diferencial de presión del motor en estudio ^[6]. Modificado

2.3.2.4 Factores a tomar en cuenta para el uso de motor de fondo ^[6]

Un fluido de perforación adecuado es fundamental para el desempeño de los motores de fondo, y estos no están limitados por el tipo de lodo, pueden ser base agua o aceite. Pero están limitados por la densidad, temperatura, contenido de arena y sólidos. Por

ejemplo, algunos densificantes como la hematita o concentraciones de arena mayor al dos por ciento pueden generar desgaste por abrasión en los rodamientos.

Adicionalmente cuando es requerido añadir material contra pérdida de circulación se pueden generar dos problemas, taponamiento en la parte superior de los rodamientos o desgaste del estator, esto es posible mitigarlo bombeando progresivamente este material y evitando el uso de micas de cuarzo o carbonato de calcio.

La temperatura como se mencionó también es un factor importante ya que a medida que aumenta, el elastómero del estator se tiende a expandir y para los fluidos base aceite se debe tomar en cuenta adicionalmente el punto de anilina ya que genera desgaste en este material.

Adicionalmente cuando se perfora como motor de fondo lubricado con lodo es necesario evaluar varios aspectos cuando se diseña el programa de hidráulica entre ellos el diferencial de presión, la caída de presión de la mecha y el balance del empuje.

El diferencial de presión está definido como la diferencia entre la presión de perforación en fondo y fuera de fondo. La sección de rotor/estator del motor genera la diferencia de presión cuando se aplica peso a la mecha y es necesario mayor torque desde el motor. Cuanto mayor sea la diferencia de presión, mayor es el torque de salida del motor y menor es la velocidad del eje de salida. Establecer un óptimo diferencial de presión a usar depende del tipo de sección de poder, las condiciones de fondo de pozo, y los objetivos de la sección a perforar. Por desgracia, el punto de trabajo óptimo no es fácilmente identificable hoy con las mediciones disponibles en la superficie. Es muy importante no usar demasiada presión diferencial por etapa ya que aunque se genera mayor torque del aumento de la presión también pone mucho mayor énfasis en el elastómero del estator que puede reducir la vida laboral.

La caída de presión de la mecha suministra la fuerza que actúa para empujar el lodo a través de los rodamientos radiales y axiales. El flujo de fluido que pasa a través de los

cojinetes debe ser a un ritmo lo suficientemente alto como para enfriarlos y lubricarlos, pero el exceso de flujo puede lavar los rodamientos.

El equilibrio de empuje se refiere a optimizar la vida de los cojinetes del motor equilibrando las fuerzas del flujo de fluido a través del conjunto de motor y el peso sobre la mecha. La vida del rodamiento óptimo se obtendrá si este empuje hidráulico es exactamente equilibrado por el WOB aplicado durante la perforación.

2.3.2.5 Ventajas uso del motor de fondo PDM ^[5]

El uso de la tecnología de motor de fondo trae como beneficio:

- Optimización de la hidráulica
- Es posible el uso de cualquier tipo de mecha, incluyendo la bicéntrica
- No está limitado a un máximo DLS, es posible aumentar el ángulo de del dispositivo ajustable.
- Es posible perforar en zonas no consolidadas.
- Posibilidad de desviar en cualquier punto de la trayectoria de un pozo.

2.3.3 Sistemas Rotativos Direccionales ^{[3] [4] [7]}

Los sistemas de rotativos direccionales RSS por sus siglas en inglés *Rotary Steerable System* son una tecnología que tiene la capacidad de perforar direccionalmente mientras toda la sarta de perforación se encuentre en rotación, siendo esta su principal ventaja.

«El RSS dirige con precisión el pozo al rotar el ángulo de perforación mientras que la tasa de construcción y dirección de la herramienta puede ser ajustada cuando se perfora utilizando fluctuaciones de presión en la columna de lodo, haciendo que el sistema sea virtualmente invisible a la operación de perforación. El servicio del RSS proporciona direccionamiento continuo en la mecha y evaluación de la formación en tiempo real para otorgar un cálculo exacto de la posición del pozo» ^[3].

Se tienen dos sistemas principales, *push-the-bit* y *point-the-bit*. El sistema, *push-the-bit* empuja contra la pared del pozo para llevar la sarta en la dirección deseada. El sistema *point-the-bit* utiliza un codo interno para desplazar la alineación entre el eje de la herramienta y el eje del pozo produciendo una respuesta direccional. Y adicionalmente se ha desarrollado un híbrido que combina las características de desempeño de los sistemas *push-the-bit* y *point-the-bit*. Para este trabajo se evaluará el sistema *push-the-bit* que Schlumberger llama comercialmente PowerDrive® ya que es el usado en el área de estudio.

El PowerDrive® es una herramienta compuesta por una unidad sesgada y unidad de control, en la Figura 6 se pueden apreciar las partes mencionadas del RSS.

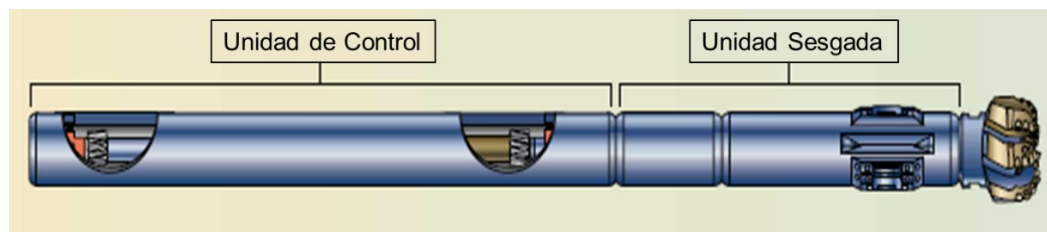


Figura 6. Partes del RSS ^[7]. Modificado

La unidad sesgada es la parte mecánica del RSS, ya que tiene tres *pads* externos que le dan la dirección a la mecha y está ubicado justo después de la mecha, los *pads* son controlados por el flujo de lodo a través de una válvula, esta utiliza la diferencia de presión de lodo entre el interior y el exterior de la unidad sesgada. Posee tres vías de disco rotativo que acciona los patines al dirigir el lodo en forma sucesiva a la cámara del pistón de cada *pad*, a medida que rota para alinearse con el punto de empuje deseado en el pozo, que es el punto opuesto a la trayectoria deseada como lo muestra la Figura 7. Una vez que un *pad* pasa el punto de empuje, la válvula rotativa corta el suministro de lodo y el mismo se escapa a través de una compuerta especialmente diseñada para la filtración del lodo. Cada *pad* se extiende no más de un centímetro durante cada revolución de la unidad sesgada.

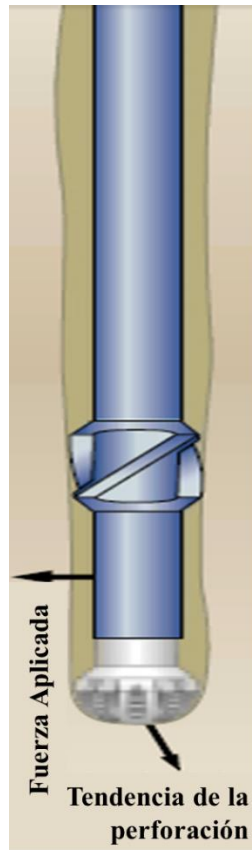


Figura 7. Principio de control de dirección ^[8]

La unidad de control que se encuentra justo detrás de la unidad sesgada, contiene dispositivos electrónicos, sensores y un mecanismo de control que proporcionan la magnitud y la dirección promedio de las cargas del lado de la mecha, necesarias para alcanzar la trayectoria deseada.

2.3.3.1 Especificaciones del RSS en estudio ^[9]

Existe una gran variedad de PowerDrive[®] RSS, dependen del tamaño del collar, tasa de construcción, entre otros. La selección está basada según el diámetro del hoyo a perforar, tipo de lodo a usar, entre otras características que se presentan a continuación en la tabla 2 y estas pertenecen al PowerDrive[®] X6 usado para esta investigación.

Tabla 2. Especificaciones del RSS de estudio ^[9]

Parámetro	Valor
Diámetro Externo (pulg.)	8,25
Longitud (pies)	14,60
Tasa de Construcción	0°-6°/100ft
Máximo Torque de operación (ft-lbf)	32000
Máximo WOB (lbf)	65000
Máximo LCM (lbm/bbl)	50
Rango de Flujo (galUS/min)	300-2000
Máxima velocidad de rotación(rpm)	220
Máxima temperatura (F)	302
Máxima presión hidrostática (psi)	20000
Contenido de Arena (%vol)	1,00

2.3.3.2 Ventajas uso del PowerDrive® RSS ^[8]

El uso de la tecnología de rotación continua trae como beneficio:

- Mejor limpieza del hoyo, se puede apreciar con el ECD de sus siglas en inglés *Equivalent Circulating Density*.
- Menos riesgo de atascamiento de tubería
- Mejor control direccional
- Mayor calidad del pozo
- Menor torque y arrastre
- Elimina los problemas al deslizar y baja tasa de penetración mientras se realiza esta operación.
- No es necesario orientar el ensamblaje de fondo.
- Es posible tener el estatus de la trayectoria en tiempo real.
- Posee un sensor para medir GR (*Gamma Ray*) más cerca de la mecha.

2.4 Factores para evaluar el desempeño de pozos direccionales ^[10]

Los principales factores para analizar el desempeño de un pozo durante la perforación son el tiempo y el costo. Por eso es necesario evaluar la tasa de penetración y los tiempos productivos y no productivos.

La complejidad del pozo será determinada por la inclinación y dirección que se seguirá así como el grado de construcción. Tomando en cuenta esos factores se deberá elegir un ensamblaje de fondo adecuado para la actividad sin olvidar la optimización de costos.

2.4.1 Tasa de Penetración ^[10]

La tasa de penetración es la relación entre los pies perforados y el tiempo empleado en realizar la operación, las unidades utilizadas son pies/hora. La disminución o aumento de la tasa de penetración depende de los parámetros de perforación, formaciones atravesadas, ensamblaje de fondo usado, entre otros.

2.4.2 Tortuosidad ^[10]

La tortuosidad del pozo se puede definir como cualquier desviación no deseada de la trayectoria del pozo planificada. La tortuosidad puede ser una fuente potencial del aumento del torque y arrastre de un pozo, que puede traer problemas durante los viajes de tubería, bajada de revestidores y terminaciones, en algunos casos puede perjudicar la productividad de los pozos. En la figura 8 se muestran dos ejemplos de tortuosidad donde la línea punteada blanca es la trayectoria planeada y la línea roja es la trayectoria realizada.

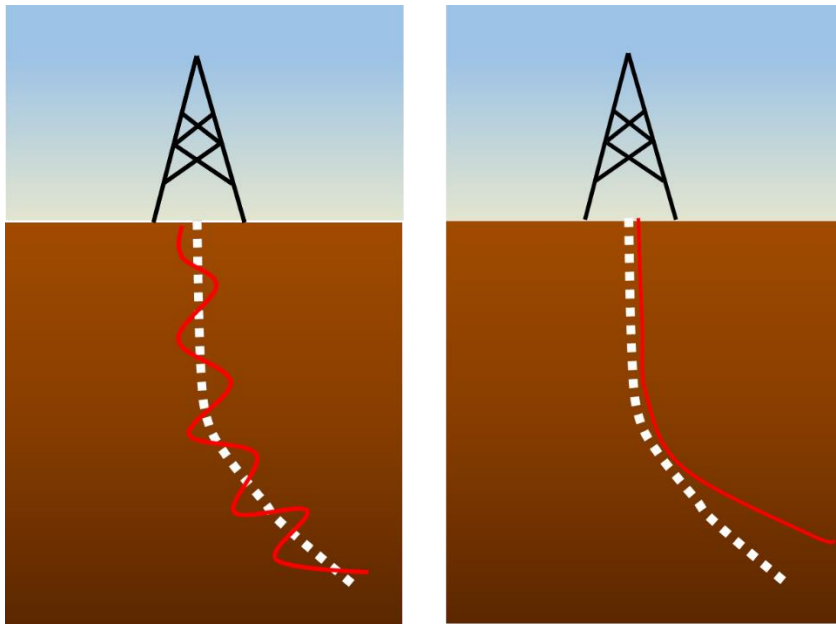


Figura 8. Ejemplo de hoyo tortuoso

2.4.3 **Inclinación** ^[10]

Es la desviación del hoyo respecto al plano vertical y se expresa en grados. Se mide inicialmente con el mecanismo de péndulo y se confirma con los acelerómetros del MWD.

2.4.4 **Azimut** ^[10]

Es la dirección desde la vista de planta. Se mide con los magnetómetros del MWD, que funcionan como una brújula. Se expresa en grados y la medición puede ser con respecto al norte geográfico o al norte magnético.

2.4.5 **Grado de Construcción** ^[10]

Es el cambio de inclinación por unidad de longitud de sección perforada y se expresa típicamente en grados/100 pies.

2.5 Problemas de hoyo ^[11]

Durante la perforación de un pozo se van a producir problemas, a pesar de que la planificación haya sido minuciosa. Adicionalmente es necesario recordar que la geología no es homogénea, por lo tanto dos pozos cercanos podrían tener condiciones de perforación diferentes. Por eso durante la planificación se deben tomar en cuenta los posibles problemas de hoyo como precaución.

Los problemas de hoyo más frecuentes son la pega de tubería, pérdida de circulación, desviación del hoyo, fallas de tuberías, mechas desgastadas, inestabilidad del pozo, contaminación del lodo, daños a la formación, pobre limpieza del hoyo, entre otros.

A continuación se presentan algunos de los problemas de hoyo mencionados anteriormente.

2.5.1 Pega de tubería ^[11]

Durante las operaciones de perforación, se considera que la tubería está atascada cuando no puede liberarse y sacarse del hoyo sin dañar la tubería o exceder el máximo peso en el gancho permitido. Existen tres tipos de pega que son:

2.5.2 Pega diferencial ^[11]

La pega de tubería por presión diferencial se produce cuando una porción de la sarta de perforación se incrusta en el revoque. Debido a la presión que actúa sobre la pared exterior de la tubería, es mayor que la presión de formación, que generalmente es el caso ya que se perfora sobre balance.

2.5.3 Pega mecánica ^[11]

La pega mecánica es causada por una obstrucción o restricción física y son causadas principalmente por la eliminación inadecuada de los recortes perforados, inestabilidades del pozo, desprendimiento o hundimiento, entre otros.

2.5.4 Pérdida de circulación ^[11]

La pérdida de circulación se define como el flujo incontrolado de fluido de perforación hacia la formación. La pérdida de circulación puede ser parcial, es cuando el fluido de perforación sigue fluyendo hacia superficie con pérdidas hacia la formación o total cuando no existe retorno hacia superficie.

2.5.5 Fallas de la tubería ^[11]

Las fallas de tubería se pueden clasificar como *twist off* causada por un torque excesivo; debido a la tensión excesiva se puede partir; reventar o colapsar debido a la presión interna excesiva o presión externa, respectivamente; o la fatiga como resultado de cargas cíclicas mecánicas con o sin la corrosión.

2.5.6 Sidetrack accidental ^[11]

Un inconveniente en la perforación direccional es el cambio de orientación accidental ya sea por atravesar formaciones blandas o por múltiples viajes de calibración o a superficie. En el caso de atravesar formaciones blandas se debe tener precaución con los parámetros de flujo y rotación. Para el segundo caso es necesario el constante monitoreo de la ubicación del pozo cuando se encuentra apoyo durante los viajes.

2.5.7 Problemas relacionados a los equipos ^[11]

La integridad de los equipos de perforación y su mantenimiento son factores importantes en la minimización de problemas de perforación. La hidráulica de perforación adecuada garantizan una buena limpieza del anular, el poder de elevación adecuado para una eficiente manejo de la sarta, las cargas de diseño adecuado de la cabria y de la línea de perforación, carga de tensión para permitir *overpull* seguro en caso de un problema de fricción, y sistemas de control de pozos que permiten el control del pozo bajo cualquier situación. Sistemas de seguimiento y registro adecuado que monitorean los cambios de tendencia en todos los parámetros de perforación y puede recuperar datos de perforación en una fecha posterior.

2.5.8 Problemas asociados al personal ^[11]

Teniendo en cuenta la igualdad de condiciones durante las operaciones de perforación, el personal es la clave para el éxito o el fracaso de esas operaciones. Los costos totales, así como resultado de cualquier problema de perforación puede ser muy alta; Por lo tanto, la educación y la formación para el personal directa o indirectamente involucrados es esencial para las prácticas de perforación con éxito.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación ^[12] ^[13]

Este campo fue descubierto en 1947 por Richmond Exploration Co y está ubicado al occidente de Venezuela, a 40 Km de la ciudad de Maracaibo y ocupa un área probada de 660 Km² y se puede apreciar en la Figura 9. Actualmente es operado por Petroboscán, SA, una empresa mixta con PDVSA en el que Chevron tiene un 39,2 por ciento. Durante 2014, la producción neta diaria promedio de 26.000 barriles de líquidos y 5 millones de pies cúbicos de gas natural.



Figura 9. Ubicación geográfica del Campo Boscan ^[12]. Modificado

3.2 Características generales ^[13]

A continuación en la tabla 3 se muestran las principales características del campo en estudio:

Tabla 3. Características generales del campo en estudio ^[13]

Área del Campo	660 Km ²
POES	36,84 MMMBLS
Trampa	Combinación Estructural-Estratigráfica
Ambiente Depositacional	Fluvial-Deltaico
Tope del Reservorio	Entre 4500 y 9200 pies de profundidad
Relación Arena Neta	70-80%
Porosidad	10-26%
Viscosidad	130-500 cP
Permeabilidad	1-5000 mD
Gravedad °API	9,5-12 °API
Saturación de Agua Promedio	35%
Pozos Perforados	944
Levantamiento	Bombeo Mecánico, Bombeo de Cavidad Progresiva, Bombeo Electro-sumergible
Estaciones de Flujo	29
Plantas Deshidratadoras	2

3.3 Descripción geológica

3.3.1 Estratigrafía ^[12]

La roca yacimiento de este campo está compuesto por las arenas de Boscán superior y Boscán Inferior ambas pertenecientes a la formación Misoa del Eoceno. El ambiente depositacional de la formación Misoa es fluvial-deltaico con influencias de mareas, las principales facies productoras pertenecen a canales y barras de marea. Las arenas de Boscán superior e inferior están separadas estratigráficamente por lutitas, las arenas de Boscán Inferior se caracterizan por poseer mejores condiciones petrofísicas. Para la zona de estudio se tienen los topes de las formaciones que se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Topes de formaciones para la zona en estudio

Secuencia	Formaciones	TVD (pies)	Zona Prod.	Litología
Icotea superior	Icotea	5268		Arcilla, Arena
Anhidrita	Icotea	5624		Arcilla, Arena
Icotea Medio	Anhidrita	6171		Lutita, Arena, Anhidrita
Icotea Basal	Icotea	6458		Lutita, Arena
Tope Upper Boscán	Boscán Superior	6521	x	Lutita, Arena
Base Upper Boscán	Boscán Superior	6728	x	Arena, Lutita
Tope Lower Boscán	Boscán Inferior	6976	x	Arena, Lutita
Base Lower Boscán	Boscán Inferior	7106	x	Arena, Lutita

3.3.2 Estructura ^[12]

La estructura más importante del campo es un anticlinal que tiene rumbo Norte-Sur, que termina antes de llegar a un campo contiguo llamado campo García. En el flanco occidental es un monoclinal de rumbo noreste que buza de 8 a 10 grados hacia el suroeste, este monoclinal está cortado al este por la falla de Boscán y esta se extiende norte-sur. Siendo este el sello estructural para el yacimiento del campo. Por truncamiento gradual de las areniscas de Boscán superior y gradación de las lutitas del miembro Boscán inferior hacia el norte y noreste existen trampas estratigráficas. Por tanto acumulación del Campo está en una trampa estructural-estratigráfica del monoclinal. Al sur y suroeste se encuentra un acuífero activo, por tanto hay un contacto agua-petróleo.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

Con el fin de alcanzar el objetivo principal de este Trabajo Especial de Grado, el cual consiste en analizar los ensamblajes de fondo direccionales de Schlumberger comparando las tecnologías de Motor de Fondo y PowerDrive® RSS en la sección de 12 ¼” en Campo Boscán, se establecieron un conjunto de pasos, técnicas y procedimientos para la resolución del problema planteado, así como se plantea en las siguientes líneas.

4.1 Tipo de Investigación ^[14]

La investigación realizada es una investigación de campo ya que está definido según la UPEL como «el análisis sistemático de problemas de la realidad, con el propósito bien sea de describirlos, interpretarlos, entender su naturaleza y factores constituyentes, explicar sus causas y efectos, o predecir su ocurrencia, haciendo uso de métodos característicos de cualquiera de los paradigmas o enfoques de la investigación conocidos o en desarrollo». Esto concuerda con los objetivos planteados en este trabajo especial de grado, ya que se busca realizar un análisis comparativo para el mejoramiento de la calidad del servicio del segmento de D&M West presta a Petroboscán en el Campo Boscán.

4.2 Diseño de la Investigación ^[14]

El trabajo de investigación se diseña mediante una metodología de investigación de campo, apoyada en una investigación descriptiva y evaluativa, ya que no solo es necesario realizar una revisión de información tanto del campo en estudio como de las herramientas direccionales a evaluar, sino realizar una descripción de las actuales actividades con los datos crudos es decir, estos se obtuvieron directamente sin modificar ninguna variable.

4.3 Población y Muestra ^[15]

Según Bau «Toda investigación debe plantearse inicialmente la delimitación espacial», por eso el estudio realizado quedó constituido por la población seis macollas perforadas campo Boscán entre los años 2014 y 2015 con motor de fondo y/o RSS que forman parte de las herramientas utilizadas en operaciones de perforación direccional en Schlumberger D&M West. Esta población con un total de veinticuatro pozos perforados con herramientas direccionales cumplen con el objetivo en Campo Boscán de perforar la sección de 12 ¼” con sarta estabilizada para construir y mantener tangente. Según Bau, esa «población en el que se limitará la investigación podría resultar de dimensiones incontroladas por parte del investigador, de allí, que requerirá del uso de la muestra con el fin de analizar las variables consideradas en el problema», por esta razón se extrajo una muestra representativa, esta ilustra las características de la población. Esta muestra está constituida por un pozo perforado con motor de fondo, dos pozos perforados con RSS y uno perforado con ambas herramientas. Cabe destacar que la razón por la cual se tiene solo un pozo con motor de fondo en la muestra es que no existen más pozos perforados con esta herramienta en el período de estudio.

Para lograr este objetivo, fue seleccionada una macolla, que fue donde se perforó la sección de 12 ¼” con motor de fondo. Para la comparación se decidió usar datos solo de esta macolla para poner como constante el desempeño del taladro, cuadrilla y la zona del campo en estudio.

4.4 Técnicas e Instrumentación de Datos ^[14]

Todo lo que se va a realizar en la investigación debe estar apoyado en la observación, y para el cumplimiento de los objetivos planteados la técnica de recolección de datos más apropiada según los autores es la de observación directa en el campo, participante e individual.

De campo, ya que los datos fueron obtenidos durante la perforación, es decir que los datos son reales. Participante, ya que el investigador hizo monitoreo durante las

operaciones de perforación y para finalizar tomando en cuenta el número de investigadores es catalogado como individual.

La técnica de observación fue definida como directa de campo, los instrumentos de recolección son principalmente los registrados por las herramientas de medición durante la perforación. Los instrumentos de recolección de datos están apoyados en los programas que procesan los datos, que son HSPM® y Maxwell®. Luego los datos finales se pueden encontrar en las carpetas de pozos. A continuación se explican cada uno de estos:

4.4.1 HSPM® [16]

HSPM® es un *software* que se ejecuta en las computadoras, este tiene varias funciones, como lo son la digitalización de señales de los sensores y demodular la señal de telemetría MWD.

4.4.2 Maxwell® [16]

Maxwell® es un software que recibe los datos de HSPM® través de una red Ethernet. Consiste de seis consolas que en conjunto cubren las tareas relacionadas con la ejecución de un trabajo, es decir en Maxwell® se procesa la información a través de la ventana principal, ventana de adquisición, ventana de derivables, ventana de monitoreo en tiempo real durante la perforación y la ventana para que el cliente pueda monitorear a distancia las actividades de perforación.

4.4.3 Carpetas de Pozos

Estas carpetas están disponibles en físico y digital, y en ellas se encuentra toda la información de las operaciones durante la perforación del pozo.

4.5 Fases de la investigación

La ejecución de la investigación fue llevada a cabo de acuerdo a las fases presentadas a continuación en la Figura 10.

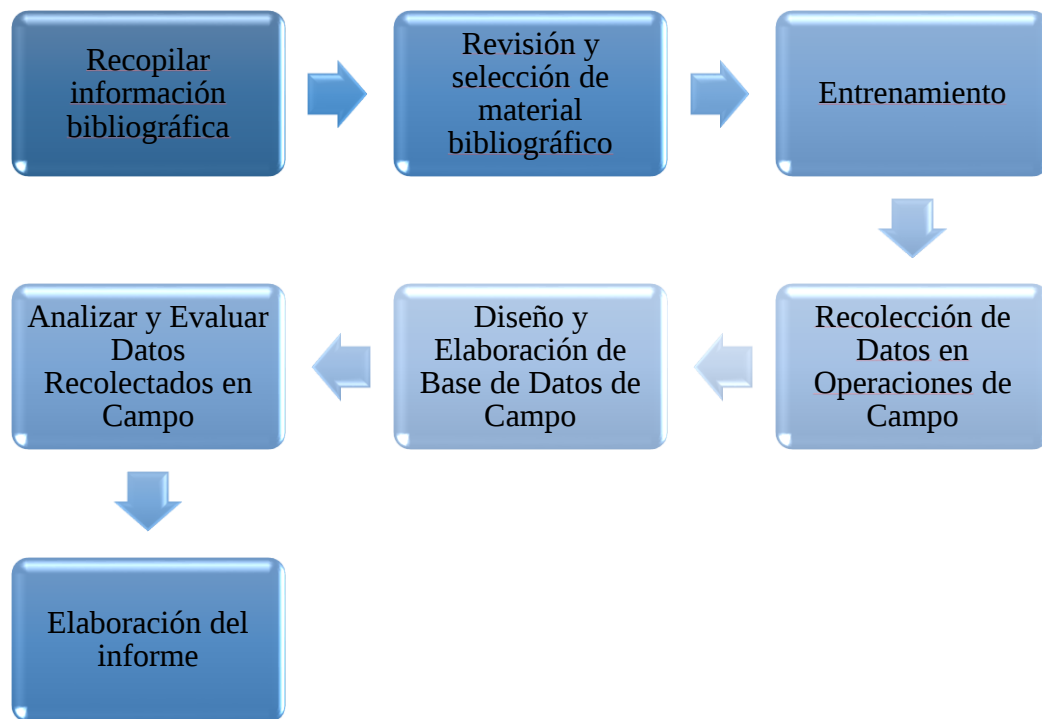


Figura 10. Fases de la investigación

4.5.1 Recopilar información bibliográfica

Se realizó una recopilación de información teórica del campo en estudio y sobre el tema tratado en libros, publicaciones, trabajos especiales de grado. También se realizó una recopilación de información técnica en revistas de Schlumberger D&M y otras investigaciones realizadas en trabajos especiales de grado.

4.5.2 Revisión y selección de material bibliográfico

Se realizó una revisión del material bibliográfico recopilado y se seleccionó el que proporciona la información que ayudó al cumplimiento de los objetivos planteados.

4.5.3 Entrenamiento

Inicialmente se realizó un entrenamiento en material de seguridad en Campo, llamado *New Employee Safety Trainee* (NEST). Luego se procedió al entrenamiento sobre las herramientas direccionales de manera teórica a través de manuales operativos y con

diferentes ingenieros de campo se complementó el entrenamiento en el campo, estando el investigador expuesto a las operaciones de perforación. Además en el taller de mantenimiento se tuvo entrenamiento sobre los componentes de las herramientas direccionales.

4.5.4 Recolección de Datos en Operaciones de Campo

En esta etapa el investigador se dirigió al campo en estudio como parte del equipo de trabajo del segmento de D&M West y estuvo involucrado en las operaciones de perforación de la sección de 12 ¼ ", por lo tanto se cumple con exactitud la premisa de la técnica de observación definida por Bau como directa de campo. El formato para la recolección de datos de las actividades de taladro está compuesto por el número de corrida, hora de inicio, hora de fin, profundidad inicial, profundidad final y descripción.

4.5.5 Diseño y Elaboración de Base de Datos de Campo

En esta etapa fue necesario cumplir previamente con el objetivo de «establecer parámetros para evaluar el rendimiento de las herramientas direccionales en Campo Boscán», ya que con los parámetros definidos fue posible diseñar un formato para elaborar la base de datos de manera óptima, tomando en cuenta sólo la muestra de estudio.

El formato de los datos generales de los pozos en estudio está compuestos por el taladro, campo, profundidad de la zapata en pies, profundidad final en pies, tipo de lodo, diámetro del hoyo en pulgadas, herramienta usada para cada pozo en estudio.

Y el formato de los datos de las características de los pozos en estudio está compuesto por profundidad de entrada en pies, profundidad de salida en pies, pies perforados, inclinación de entrada en grados, inclinación de salida en grados, tiempo de perforación en horas, tiempo de viajes a superficie en horas, tiempo de circulación en horas para cada pozo en estudio.

4.5.6 Analizar, Calcular y Evaluar los Datos Recolectados en Campo

Una vez seleccionados los datos y cargados a la base de datos, se procedió al análisis detallado de los parámetros en los cuales fueron corridas las herramientas direccionales en el campo en estudio. A continuación se presentarán los cálculos necesarios para complementar la evaluación:

- **Tasa de Penetración:**

Un parámetro a evaluar es la tasa de penetración y esta viene dada por la ecuación 01.

$$ROP_{prom} = \frac{\text{Pies perforados}}{\text{horas de perforación}} \quad (\text{Ec. 01})$$

Donde:

ROP_{prom} es la tasa de penetración en pies/h

Pies perforados es en pies

Horas de perforación es en horas

- **Tortuosidad ^[17]:**

Otro parámetro a evaluar es la tortuosidad que según Weijermans, P., Ruszka, J. y otros, es un factor fundamental en la actualidad y los cálculos para los pozos de estudio se harán como lo propone el material con la ecuación de mínima curvatura para los cálculos de *dogleg*. Los datos necesarios para realizar los cálculos son la profundidad medida en pies, inclinación en grados y azimut en grados. Cabe destacar que los *dogleg* serán calculados a una misma profundidad medida.

Para los surveys planeados el *dogleg* se calcula a partir de la ecuación 02

$$DL_P^i = \cos^{-1}[\sin I_P^{i-1} \sin I_P^i \cos(A_P^i - A_P^{i-1}) + \cos I_P^{i-1} \cos I_P^i] \quad 0 \leq i \leq M \quad (\text{Ec. 02})$$

Donde:

i es la profundidad de estudio.

M es el survey del punto de asentamiento del revestidor planeado.

DL_P es el *dogleg* según el plan en grados/100 pies

I_p es la inclinación según el plan en grados

A_p es el azimut según el plan en grados

Y para el cálculo del *dogleg* a partir de los *surveys* obtenidos durante la perforación se tiene la ecuación 03

$$DL_S^j = \cos^{-1}[\text{sen}I_S^{j-1}\text{sen}I_S^j\cos(A_S^j - A_S^{j-1}) + \cos I_S^{j-1}\cos I_S^j] \quad 0 \leq j \leq N \quad (\text{Ec. 03})$$

Donde:

i es el profundidad de estudio.

N es el *survey* del punto de asentamiento del revestidor real.

DL_S es el *dogleg* obtenido en grados/100 pies

I_S es la inclinación obtenido en grados

A_S es el azimut obtenido en grados

Una vez obtenidos los valores de *dogleg* tanto del plan como los de perforación se procederá a separar por zona de interés. Siendo estas la sección de verticalidad, sección de incremento, sección de disminución de ángulo y sección tangente.

Para estas secciones se calculará el valor de tortuosidad a partir de la ecuación 04

$$\tau = \frac{\sum_{j=1}^N DL_S^j - \sum_{i=1}^M DL_P^i}{MD_{TD} - MD_0} * 100 \quad (\text{Ec. 04})$$

Donde:

τ es la tortuosidad expresada grados/pies²

DL_S es el *dogleg* obtenido en grados/100 pies

DL_P es el *dogleg* según el plan en grados/100 pies

MD es la profundidad medida expresada en pies

- **Análisis de Costos** ^[18]:

El análisis de costos se realizará de acuerdo a Bourgoyne, adaptándolo a las condiciones actuales. Para esto es necesario presentar las horas bajo la mesa rotaria y

tiempos no productivos, el formato está compuesto por las horas bajo a mesa rotaria, tiempo no productivo y las horas de corridas donde no se perforó para cada pozo en estudio.

Luego con los costos de la herramienta diarios y los costos asociados a la perforación diarios se procederá a calcular el costo de la sección de la herramienta en la ecuación 05, costo de la sección real en la ecuación 06, gastos asociados a tiempos no productivos, costos por tiempos productivos en la ecuación 07 y Costo asociado a tiempo productivo en la ecuación 08.

$$C_h = \text{Costo}_{\text{herra}} * \frac{T_t}{24} \quad (\text{Ec.05})$$

Donde:

C_h es el costo de la herramienta expresada en dólares

$\text{Costo}_{\text{herra}}$ es el costo diario de la herramienta expresado en dólares

T_t es el tiempo de uso de las herramientas expresado en horas

$$C_r = (\text{Costo}_{\text{perfo}} + \text{Costo}_{\text{herra}}) * \frac{T_t}{24} \quad (\text{Ec.06})$$

Donde:

C_r es el costo real de la perforación expresada en dólares

$\text{Costo}_{\text{perfo}}$ es el costo diario de la perforación expresado en dólares

$\text{Costo}_{\text{herra}}$ es el costo diario de la herramienta expresado en dólares

T_t es el tiempo total de perforación expresado en horas

$$G_{NPT} = (\text{Costo}_{\text{perfo}} + \text{Costo}_{\text{herra}}) * \frac{T_{\text{no prod}}}{24} \quad (\text{Ec.07})$$

Donde:

G_{NPT} es el gasto por tiempo no productivo expresado en dólares

$\text{Costo}_{\text{perfo}}$ es el costo diario de la perforación expresado en dólares

$\text{Costo}_{\text{herra}}$ es el costo diario de la herramienta expresado en dólares

$T_{\text{no prod}}$ es el tiempo no productivo durante la perforación expresado en horas

$$C_{\text{tp}} = \text{Costo}_{\text{real}} - \text{Gasto}_{\text{NPT}} \quad (\text{Ec.08})$$

Donde:

C_{tp} es el costo asociado a tiempo productivo de la perforación expresado en dólares

$\text{Costo}_{\text{real}}$ es el costo real de la perforación expresado en dólares

G_{NPT} es el gasto por tiempo no productivo expresado en dólares

4.5.7 Elaboración del informe

En esta última fase se procedió a estructurar y redactar el Trabajo Especial de Grado, siguiendo el esquema metodológico expresado en este capítulo.

4.6 Conclusiones

Una vez que se estudió y analizó los datos de la muestra cómo se evaluará en el capítulo V y con la experiencia de campo adquirida en las operaciones de perforación se pudo llegar a conclusiones sobre el desempeño de las herramientas direccionales, motor de fondo y RSS para el campo en estudio, estas se apreciarán en la conclusiones de este Trabajo Especial de Grado.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de dar respuesta al problema planteado en capítulos anteriores y cumpliendo con los objetivos fue necesario la recolección de los datos de campo por medio de la observación directa y participante durante las operaciones de perforación direccional en la macolla de estudio, por el taladro PDV-56 en campo Boscán, estado Zulia, por el segmento D&M de Schlumberger West. Luego como se plantea en la metodología se procedió a diseñar y elaborar una base de datos para facilitar el análisis de estos.

Para el análisis comparativo se estudiará una de las seis macollas perforadas entre el año 2014 y 2015, ya que es la única macolla en la cual se perforó con motor de fondo y PowerDrive® RSS, entonces es representativa para los efectos del estudio, que es realizar un análisis comparativo de las tecnologías del motor de fondo y el PowerDrive®.

5.1 Datos Generales de los pozos en estudio

A continuación se presentan en la Tabla 5 los datos generales de los pozos en estudio enfatizando la herramienta direccional utilizada en cada ensamblaje de fondo. Aquí se muestra que todos los pozos en estudio fueron perforados por un taladro y todos poseen la misma geometría.

Tabla 5. Datos Generales de los pozos de estudio

	B-01	B-02	B-04	B-05
Taladro	PDV-56	PDV-56	PDV-56	PDV-56
Campo	Boscán	Boscán	Boscán	Boscán
Prof. zapata (pies)	720	730	2935	720
Prof. Final (pies)	6962	7091	6898	7724
Tipo de lodo (lpg)	Base Agua	Base Agua	Base Agua	Base Agua
Diámetro del hoyo (pulg.)	12,25	12,25	12,25	12,25
Herramienta usada	Motor de fondo	PD X6	Motor de fondo y PD X6	PD X6

5.2 Ensamblajes de fondo utilizados por pozo

Para la perforación de la sección de 12 ¼” de la macolla en estudio se tenía como objetivo principal la construcción de ángulo, a continuación se presentaran las características de los ensamblajes de fondo utilizados para cada pozo en estudio.

5.2.1 Pozo B-01

El ensamblaje de fondo usado para la perforación de la sección de estudio en el pozo B-01, se puede apreciar en la Figura 11 que está compuesto de una mecha PDC de cuerpo de matriz de cinco aletas de diecinueve milímetros con cinco chorros con un TFA por sus siglas en inglés *Total Flow Area* de 1,052 pulgadas cuadrados. Seguido del motor de fondo estabilizado que posee las especificaciones mostradas en la tabla 11 en el capítulo II. Para cumplir con el objetivo de construcción de ángulo el ensamblaje de fondo posee un estabilizador inmediatamente después de la herramienta direccional. Y para finalizar la herramienta de medición MWD ubicada entre dos moneles para disminuir la interferencia magnética producida por la sarta de perforación.

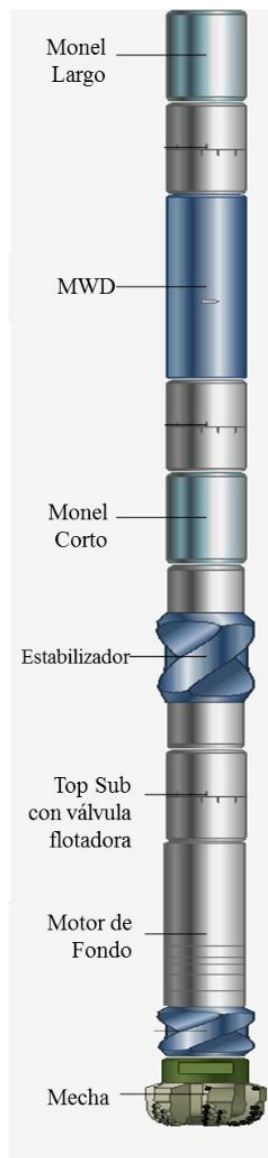


Figura 11. Ensamblaje de fondo usado en el B-01

5.2.2 Pozo B-02

El ensamblaje de fondo usado para la perforación de la sección de estudio en el pozo B-02, se puede apreciar en la Figura 12 que está compuesto de una mecha PDC de cuerpo de matriz de cinco aletas de diecinueve milímetros con seis chorros con un TFA de 1,059 pulgadas cuadrados, seguido del PowerDrive[®] que posee las especificaciones

mostradas en la tabla 2 en el capítulo II. Para cumplir con el objetivo de construcción de ángulo el ensamble de fondo posee un estabilizador inmediatamente después de la herramienta direccional, y para finalizar la herramienta de medición MWD seguida de un monel para disminuir la interferencia magnética producida por la sarta de perforación.

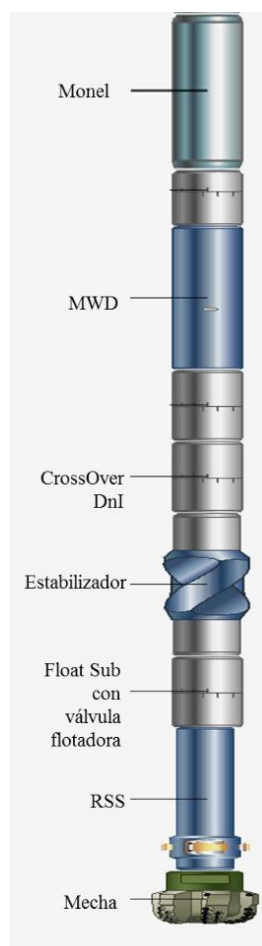


Figura 12. Ensamblaje de fondo usado en el B-02

5.2.3 Pozo B-04

El pozo B-04 fue un *sidetrack*, ya que el pozo B-03 terminó en pérdida de tubería, esto se analizará más adelante. Para realizar el *sidetrack* fueron necesarios dos ensambles de fondo. El primero para realizar la curva se puede apreciar en la Figura 13 que está

compuesto por una mecha PDC de cuerpo de matriz con cinco aletas de diecinueve milímetros con siete chorros con un TFA de 1,075 pulgadas cuadrados. Seguido del motor de fondo estabilizado que posee las especificaciones mostradas en la tabla 1 en el capítulo II. Luego posee un estabilizador inmediatamente después de la herramienta direccional. Y para finalizar la herramienta de medición MWD ubicada entre dos moneles para disminuir la interferencia magnética producida por la sarta de perforación.

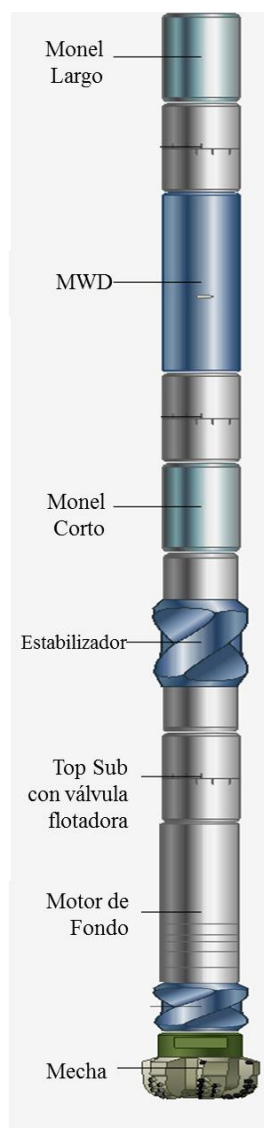


Figura 13. Ensamblaje de fondo número uno usado en el B-04

El segundo ensamblaje fue utilizado para continuar la trayectoria cambiando únicamente la herramienta direccional, es decir, cambiando el motor de fondo por el PowerDrive® y se puede apreciar en la Figura 14

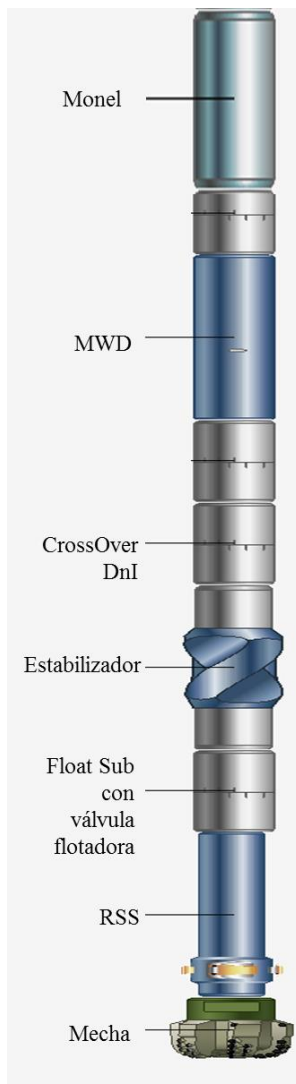


Figura 14. Ensamblaje de fondo número dos usado en el B-04

5.2.4 Pozo B-05

El ensamblaje de fondo usado para la perforación de la sección de estudio en el pozo B-05, se puede apreciar en la Figura 15 que está compuesto de una mecha PDC de cuerpo de matriz de cinco aletas de diecinueve milímetros con siete chorros con un

TFA de 1.057 pulgadas cuadrados. Seguido del PowerDrive® que posee las especificaciones mostradas en la tabla 2 en el capítulo II. Para cumplir con el objetivo de construcción de ángulo el ensamblaje de fondo posee un estabilizador inmediatamente después de la herramienta direccional. Luego está compuesto de un conjunto de herramientas de medición, LWD y MWD seguida de un monel para disminuir la interferencia magnética producida por la sarta de perforación. Cabe destacar que para la perforación de esta sección se incluyó el uso del LWD para monitorear la densidad equivalente de circulación.



Figura 15. Ensamblaje de fondo usado en el B-05

5.3 Características de los pozos en estudio

En la tabla 6 se presentan las características de los pozos en estudio. Específicamente las profundidades de entrada y salida, al igual que la inclinación y azimut, adicionalmente las horas de perforación, horas de circulación y horas bajo la mesa rotaria.

Tabla 6. Datos de las características de los pozos de estudio

	B-01	B-02	B-04	B-05
Prof. Entrada (pies)	720,00	732,00	2935,00	720,00
Prof. Salida (pies)	6962,00	7091,00	6898,00	7724,00
Pies perforados (pies)	6242,00	6359,00	3963,00	7004,00
Incl. Entrada (grados)	0,52	1,10	28,80	0,51
Incl. Salida (grados)	36,29	37,74	32,10	52,4
Tiempo de perforación (h)	80,50	49,29	37,05	66,52
Tiempo de viajes a sup. (h)	36,00	120,98	67,02	114,83
Tiempo de circulación (h)	211,53	200,35	169,34	173,08

5.4 Resumen de operaciones de los pozos en estudio

A continuación se presentará un resumen de las operaciones durante la perforación de la sección 12 ¼” de la macolla en estudio, adicionalmente en las figuras 16, 17, 18 y 19 se presentan los gráficos de los tiempos de viajes y perforación versus profundidad perforada por pozo.

5.4.1 Pozo B-01

Fue el primer pozo perforado de la macolla en estudio, este es un pozo tipo J y se perforó con motor de fondo con *Bent Housing* de 1.5 grados con un solo ensamblaje sin mayores contratiempos durante la perforación. Durante el viaje a superficie hubo problemas por riesgos de pega de tubería y/o empaquetamiento que se evidenciaron por la pérdida de peso y/o aumento de presión durante el monitoreo, ya que se requirió realizar el viaje a superficie en *backreaming*.

Durante el armado del ensamblaje de fondo y la perforación de la sección se presentaron demoras por parte del taladro aumentando los tiempos improductivos afectando los tiempos planificados para la sección.

En la figura 16 se muestra una gráfica de los tiempos empleados durante la perforación y los tiempos de viaje en función de los pies perforados. Se puede apreciar que una vez

armado el ensamble y tocado fondo se inició la perforación sin contratiempos hasta el día nueve de marzo por problemas de superficie que fueron solventados para continuar la perforación hasta el final de la sección.

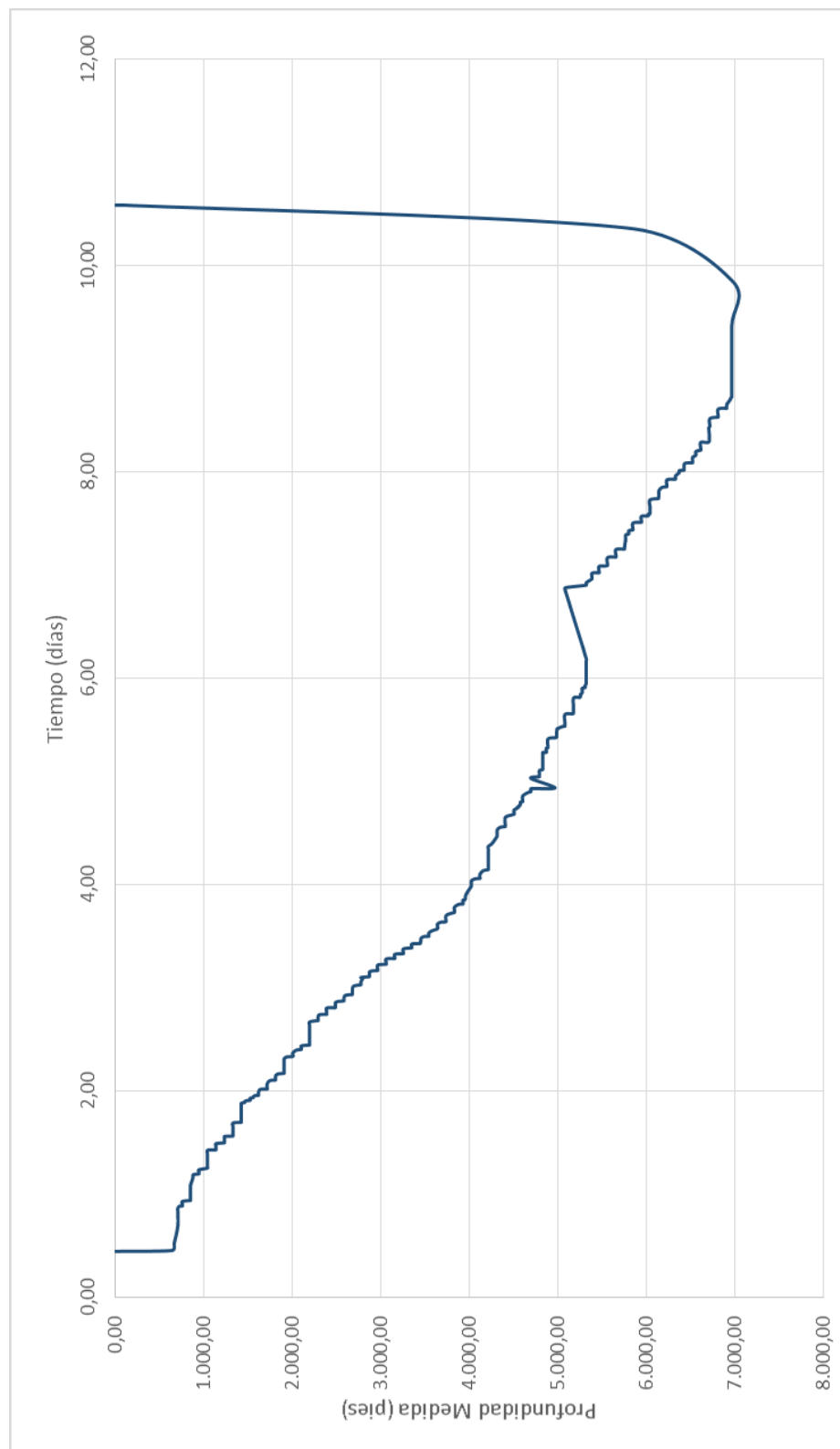


Figura 16. Tiempo vs MD pozo B-01

5.4.2 Pozo B-02

El segundo pozo perforado de esta macolla fue el B-02, que es un pozo tipo J y se perforó con PowerDrive® RSS. Para lograr el objetivo planificado para esta sección fueron necesarios seis ensamblajes de fondo ya que hubo varios contratiempos durante la perforación de la sección, relacionados mayormente a problemas de superficie.

En la primera corrida hubo problemas con bombas lo cual comprometió el desempeño de la herramienta direccional por las fluctuaciones de la presión, por esta razón se decidió realizar un viaje a la zapata para reparar las bombas y continuar con la perforación de la sección, pero luego a 6017 pies MD durante el repaso de la pareja se observó pérdida de circulación completa y apoyo, se bombeó píldora anti pérdida, luego de tres horas del suceso se consiguió retorno y se procede a realizar una segunda corrida con sarta convencional y MWD para calibrar y verificar las condiciones del hoyo antes de reanudar la perforación y esta fue realizada con éxito. Para la tercera corrida se decide bajar tubería conectado al *top drive*. Realizarlo de esta manera implica mayor tiempo para realizar el viaje a fondo pero de haber restricción se puede establecer circulación, las operaciones continúan y luego de realizar la conexión de una pareja se pierde la sarta debido a que el pin de sacrificio del *top drive* estaba lavado, se bajó punta libre y realizó la pesca exitosa de todo el ensamblaje, éste se sacó hasta superficie para ser inspeccionado.

Luego de inspeccionar y probar las herramientas en superficie inicia la cuarta corrida bajando tubería de manera convencional, cuando se llega a fondo decide circular antes de reanudar las operaciones pero se evidencian problemas con las bombas por lo cual se decide realizar viaje a superficie hasta que el problema estuviera solventado. Una vez solventados los problemas con las bombas se baja el quinto ensamblaje de manera convencional y se continúa la perforación hasta que se ve comprometido el objetivo planificado por falta de respuesta de la herramienta direccional que fue confirmada en superficie. La herramienta direccional fue sustituida y se inició la sexta corrida con la cual se terminó la sección, durante las operaciones ocurre un conato de pega por

empaquetamiento el cual fue atacado a tiempo bombeando píldora y circulando para poder continuar. Todo lo descrito anteriormente se puede apreciar en la figura 17 se muestra una gráfica de los tiempos empleados durante la perforación y los tiempos de viaje en función de los pies perforados. En resumen se tiene que aproximadamente el 60 por ciento del tiempo de taladro fue no productivo. Si bien es cierto que el tiempo no productivo no se debe a la herramienta direccional, los costos totales si se ven incrementados por el hecho de tenerla.

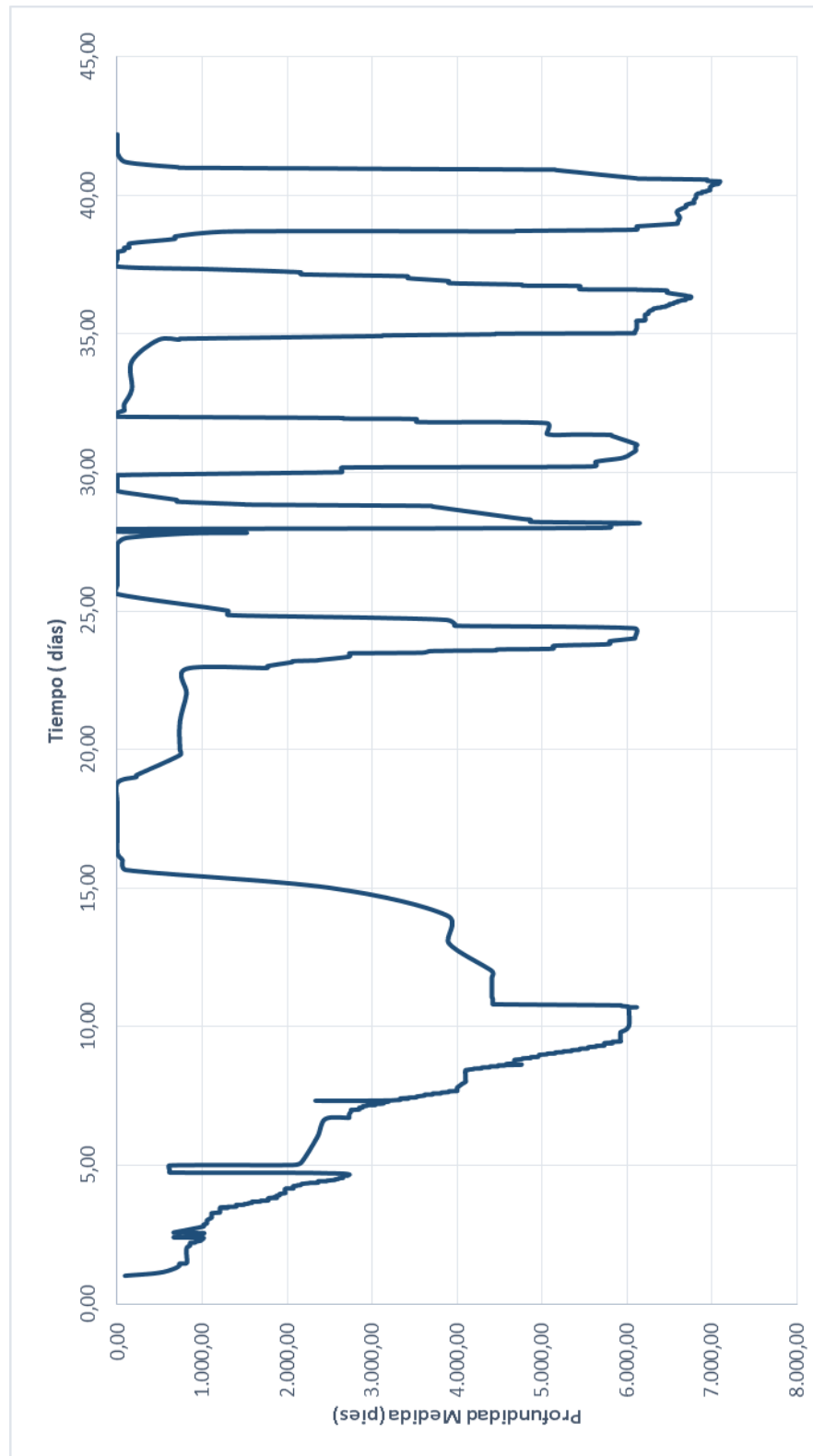


Figura 17. Tiempo vs MD pozo B-02

5.4.3 Pozo B-04

En la figura 18 se muestra un gráfico de los tiempos de perforación y viajes del pozo B-04, que es tipo S iniciando con un *sidetrack* a 2964 pies en profundidad medida, debido a una pérdida de tubería en el hoyo LIH original B-03 por pega diferencial que se detallará más adelante.

Para la perforación de la sección en estudio fue necesario realizar dos corridas en las cuales la primera se realizó con motor de fondo y la segunda con PowerDrive®. Durante la primera corrida se observaron constantes colgamientos del ensamblaje trayendo dificultades a la hora de orientar el motor y muchos problemas de señal del MWD debido a un mal funcionamiento de las bombas de lodo. En la segunda corrida continúan los problemas con las bombas de lodo y adicionalmente de los generadores, también se evidencian problemas de vibraciones torsionales que fueron debidamente mitigados hasta el objetivo planeado.

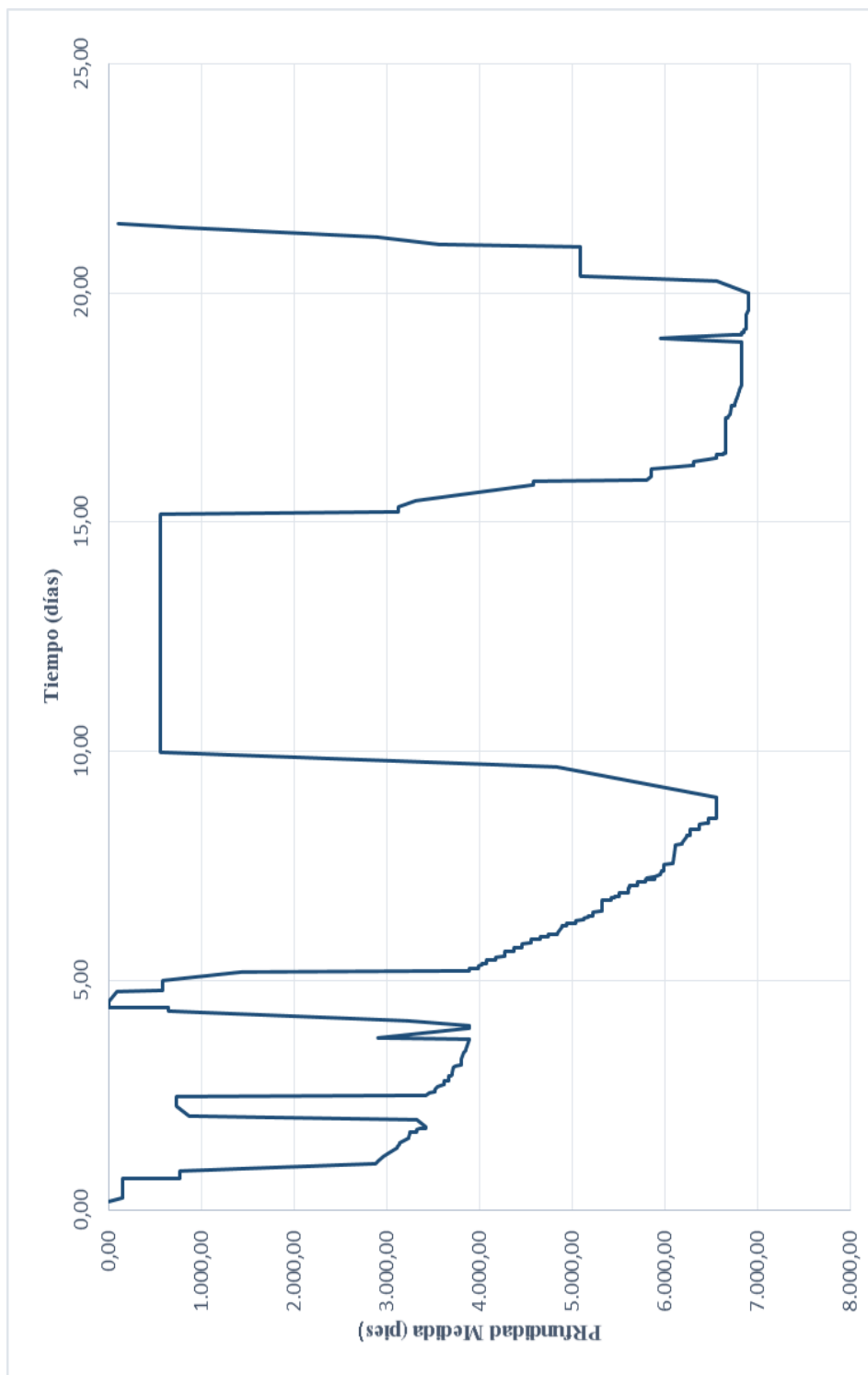


Figura 18. Tiempo vs MD pozo B-04

5.4.4 Pozo B-05

En la figura 19 se muestra un gráfico de los tiempos de perforación y viajes del pozo B-05, que es un pozo tipo J y se perforó en la sección de estudio con cuatro corridas con PowerDrive[®] RSS, igualmente durante la perforación de este pozo se tuvieron muchos tiempos improductivos debido a problemas de superficie. Ya que no se perforó hasta la tercera corrida por problemas con las cámaras de video de la planchada de perforación, con el *topdrive* y con la distribución a la locación del Gasoil. En la cuarta corrida se culmina la sección y durante el viaje a superficie se deja la sarta estacionaria por problemas de bombas, luego cuando se reanuda la operación del viaje a superficie la sarta se rompe y luego de realizar trabajos de pesca se decide realizar el *sidetrack* a aproximadamente 3500 pies en profundidad medida. Más adelante se especificarán más detalles sobre el LIH.

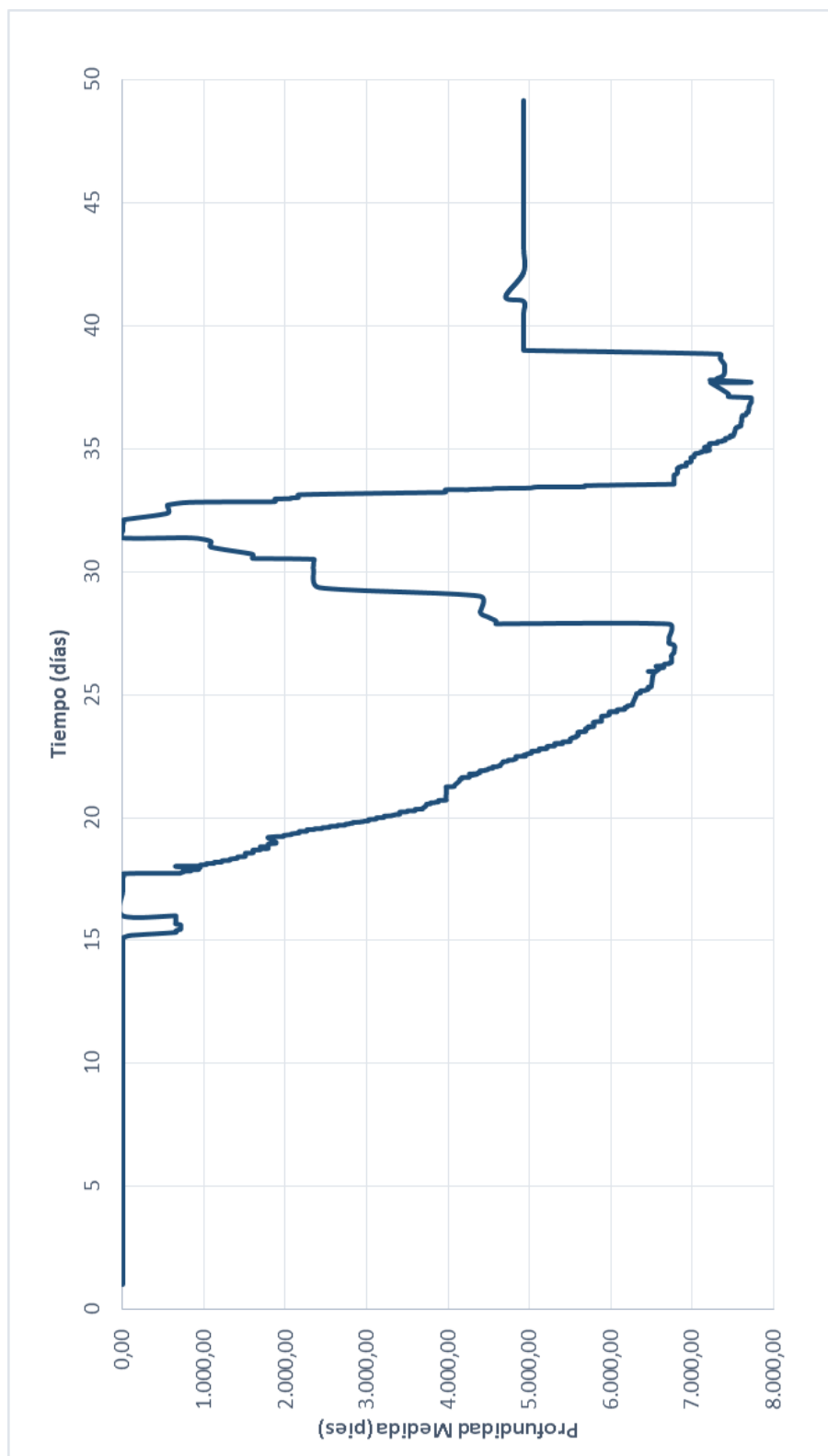


Figura 19. Tiempo vs MD pozo B-05

5.5 Comparación de las herramientas direccionales según la inclinación y dirección

Para realizar la comparación de las herramientas direccionales es necesario verificar que las condiciones en las que se evaluarán sean iguales o en su defecto como es el caso, parecidas. Por esto los pozos evaluados son en el mismo campo, en la misma macolla y por el mismo taladro y cuadrillas de perforación, las características del ensamblaje de fondo ya fueron expuestas en líneas anteriores. Con respecto a las características de los pozos son parecidas en inclinación y azimut, «ya que no existen dos pozos iguales» ^[17].

En la figura 20 se muestra la relación entre la inclinación y la profundidad medida de los pozos en estudio y en éste se muestra los gráficos de todas las trayectorias que los pozos alcanzan de 41,22 grados en promedio, y el B-05 es el pozo de mayor inclinación de la macolla estudiada con 52,40 grados de inclinación. Para el pozo B-01 el incremento y disminución de ángulo en la inclinación era planificado por la existencia de peligro de colisión con un pozo vecino. De la misma manera ocurre con el pozo B-04, pero en este caso es para evitar colisionar con el tope del pescado del pozo B-03.

En la figura 21 se muestra una vista de planta con la dirección de los pozos en estudio, la trayectoria realizada con motor de fondo está resaltada de color rojo y la trayectoria perforada con PowerDrive® está resaltada de color azul. Adicionalmente se puede apreciar que las trayectorias planificadas son en dos dimensiones.

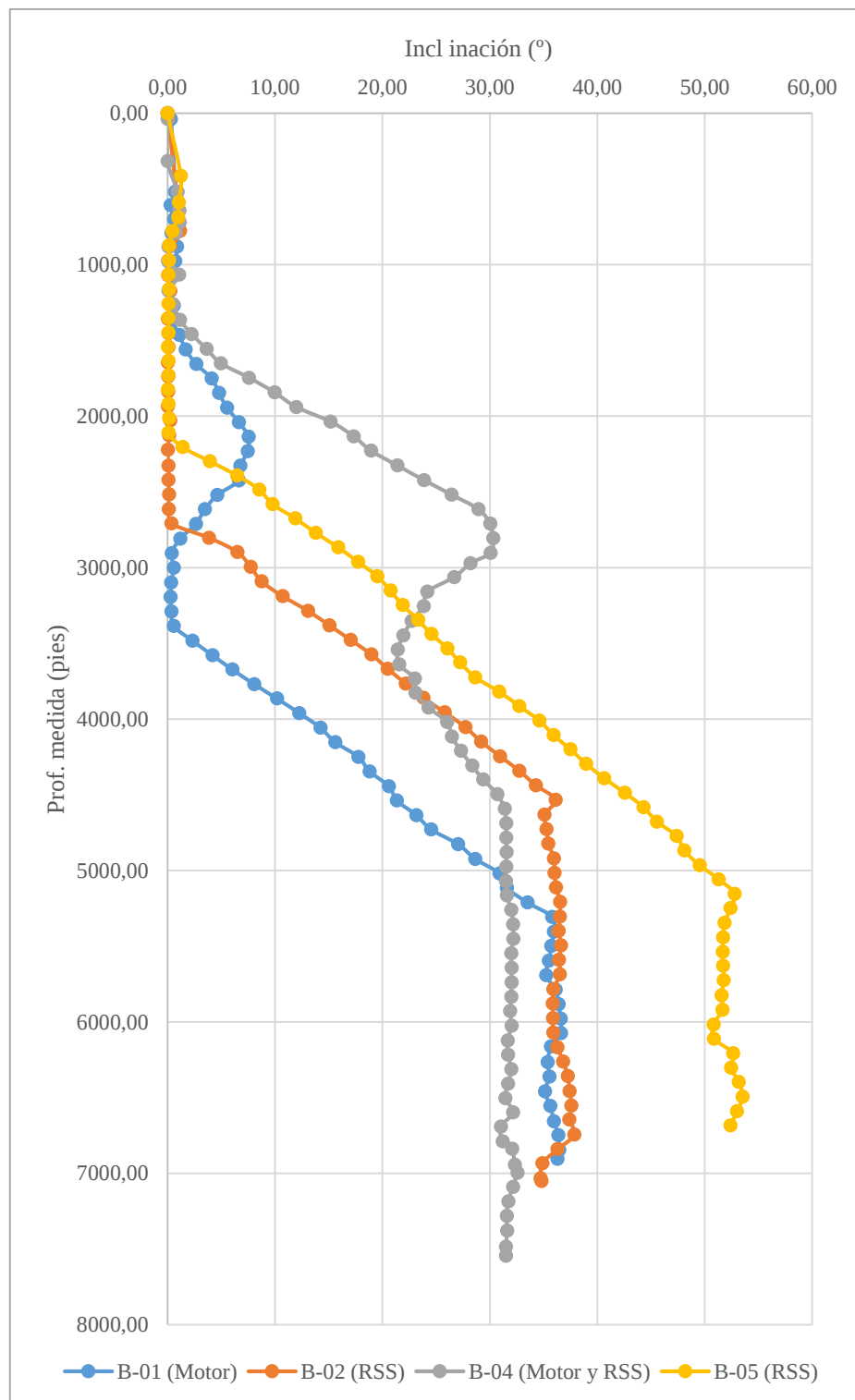


Figura 20. Relación entre la inclinación y la profundidad medida

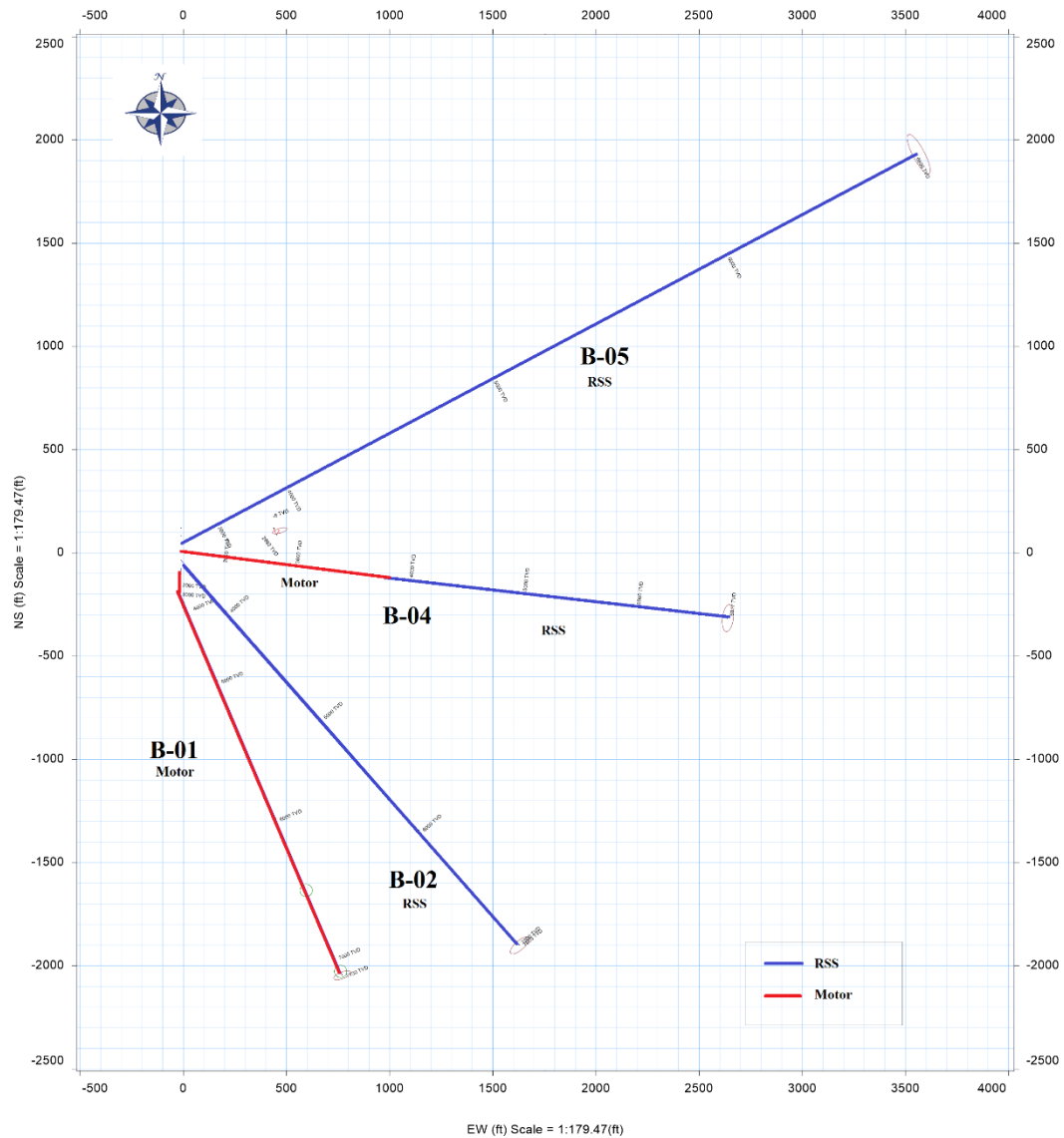


Figura 21. Vista de planta de los pozos en estudio.

5.6 Evaluación de las Tasas de Penetración Promedios por Pozo

En la figura 22 se muestran las tasas de penetración promedios, estas son el resultado de los pies perforados entre las horas de perforación. De este gráfico de barras se obtiene que las mayores tasas de penetración son la de los pozos perforados con RSS. Este es un factor importante a la hora de comparar desempeño ya que mayor tasa de penetración indica un menor tiempo de perforación y como consecuencia disminución

de los días de taladro y posiblemente de costos, este factor se evaluará más adelante en este capítulo. El pozo B-02 perforado con RSS obtuvo el mejor desempeño y comparando con el pozo B-01 perforado con motor de fondo este obtuvo un desempeño menor en un 39%, el pozo B-04 obtuvo un menor desempeño con un 23% al igual que el pozo B-05 con un 18% menos.

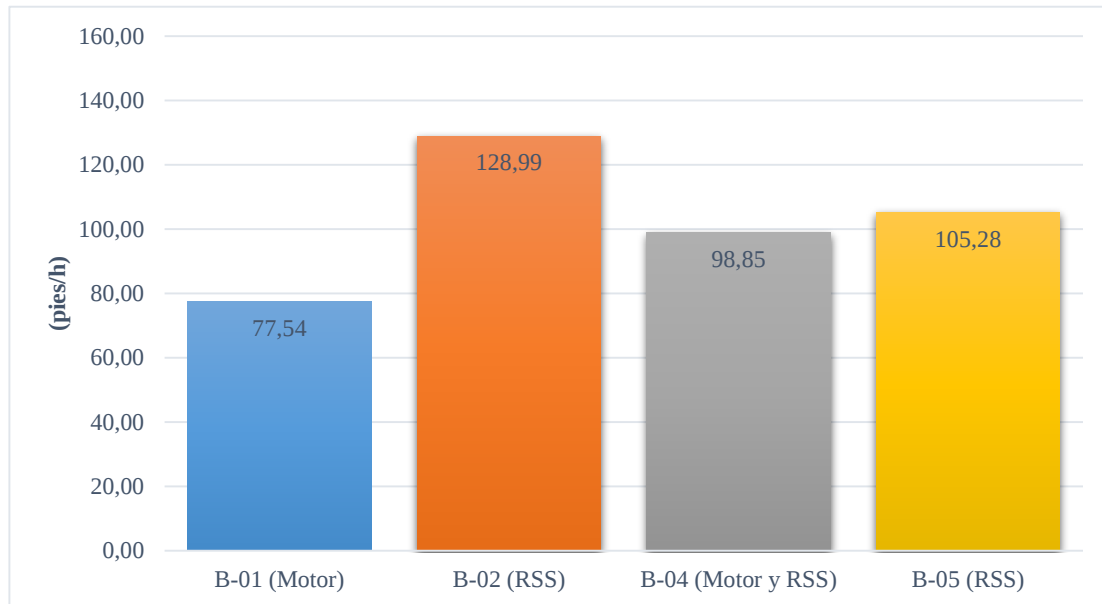


Figura 22. Tasa de penetración promedio de los pozos en estudio

Es necesario resaltar que durante la perforación de los pozos de estudio, se tuvieron muchos tiempos no productivos por inconvenientes en superficie relacionados al taladro utilizando así un número mayor de corridas a las planificadas y aumentando el número de horas del hoyo abierto. En la figura 23 se muestra el número de corridas totales comparando el número de corridas donde se perforó, solo para el caso del pozo B-01 se logró perforar en una sola corrida, los demás pozos se caracterizaron por tener muchos inconvenientes en superficie que aumentaron los viajes a superficie y el número de horas bajo la mesa rotaria de los ensamblajes de fondo aumentado así los posibles problemas de hoyo y el desgaste excesivo de las herramientas, ya que con 300

horas de circulación es necesario realizar mantenimiento de las mismas por estándares de la empresa.

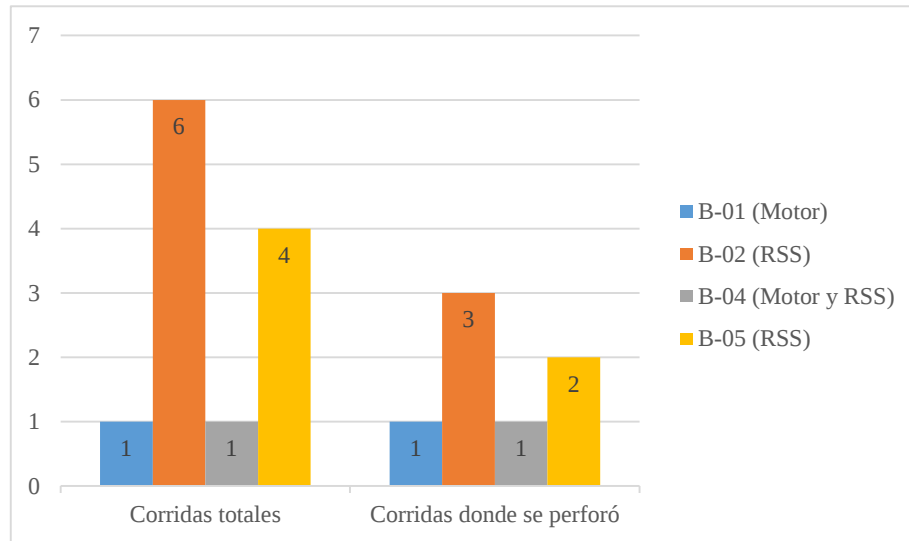


Figura 23. Número de corridas totales y donde se perforó

5.7 Evaluación de la tortuosidad por pozos

El concepto de calidad de hoyo, está normalmente asociado a la perforación direccional y así mismo, está ligado a muchos inconvenientes que suceden durante la perforación del hoyo. En la determinación de un hoyo de calidad, existen muchas interpretaciones y mediciones y ningún método probado que pueda determinarla.

Entre los parámetros que ayudan a definir la calidad del hoyo está la tortuosidad y esta está definida como «cualquier desviación de la trayectoria del plan» ^[13], siendo lo primero que se asocia, es que el hoyo tenga una tortuosidad mínima y un efecto de espiral bajo. A su vez la tortuosidad del hoyo puede evaluarse como macro-tortuosidad y micro-tortuosidad; la macro-tortuosidad se evalúa a partir de los *surveys* planeados y los obtenidos que se evaluarán a continuación, la micro-tortuosidad está relacionada a la amplitud de la tortuosidad, esto se evalúa con un *software* o registros de imágenes no disponibles para la realización de este trabajo especial de grado.

Entre los beneficios que trae un hoyo de calidad, se tiene una mejor transferencia de peso sobre la mecha, mejor limpieza del hoyo debido a que no se crean camas de ripios, menos problemas a la hora de realizar corridas de sartas de perforación o de revestidores y menores valores de torque y arrastre.

En la tabla 7 se muestran los resultados de la tortuosidad para los pozos en estudio separándolo por el trabajo direccional realizado, ya sea incremento o disminución de ángulo, o mantener tangente o verticalidad; además de la herramienta utilizada para dicha actividad. Se puede denotar que para en el caso de disminución de ángulo no es posible comparar la tortuosidad con las dos tecnologías, porque solo se realizó este trabajo direccional en las secciones donde se usó motor de fondo.

Tabla 7. Valores obtenidos de tortuosidad de pozos en estudio

Pozo	Sección	Valor
B-01 (Motor)	Verticalidad	0,7865
	Incremento	0,6678
	Disminución	0,0508
	Tangente	0,5706
B-02 (RSS)	Incremento	1,0344
	Tangente	0,9681
	Incremento	0,5434
	Tangente	0,4299
B-04 (Motor, RSS)	Disminución	0,6893
	Incremento	0,2827
	Tangente	0,3821
B-05 (RSS)	Verticalidad	0,3136
	Incremento	0,3407
	Tangente	0,8400

A continuación en las figuras 24, 25 y 26 se muestran unos gráficos de barras para comparar los valores obtenidos por las secciones del plan. En la figura 24 se muestra que en la sección donde se busca mantener la verticalidad del pozo, solo se pueden comparar los pozos B-01 y B-05, el primero perforado con motor muestra ser más tortuoso con respecto al pozo B-05 perforado con RSS en un 39%.

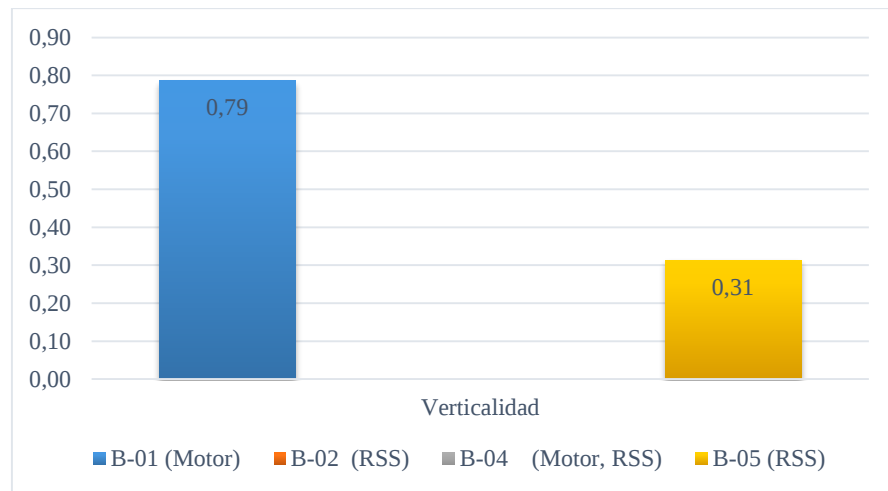


Figura 24. Tortuosidad en la sección de verticalidad para los pozos de estudio

Para la figura 25, se muestran las tortuosidades de todos los pozos en estudio en la sección de incremento, siendo el más tortuoso el perforado con motor de fondo. Cabe denotar que a pesar de que el pozo B-05 es el que alcanzó el mayor ángulo de inclinación en esta sección, no es el que posee la mayor tortuosidad con respecto a los demás pozos perforados con RSS.

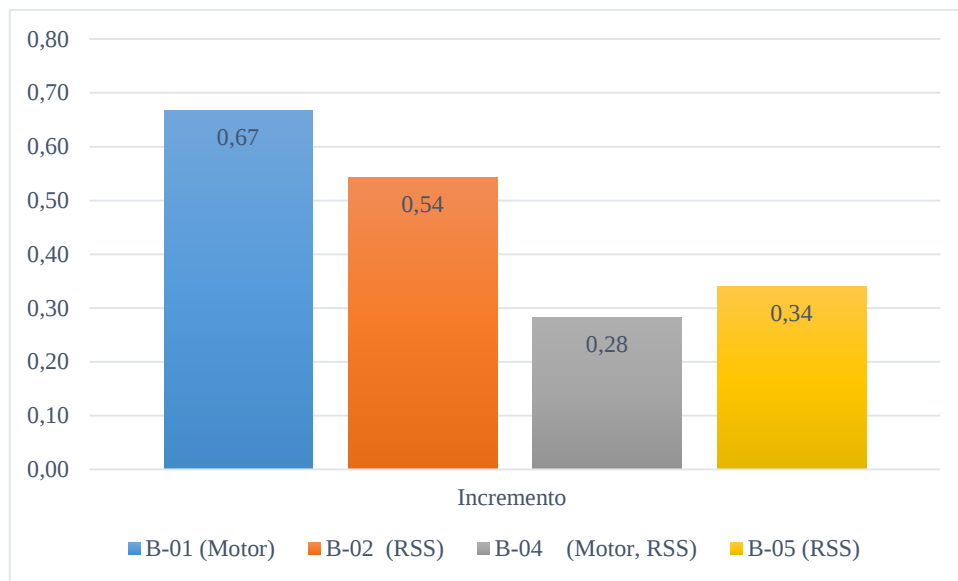


Figura 25. Tortuosidad en la sección de incremento para los pozos de estudio

En la figura 26 se puede comparar los resultados de las tortuosidades obtenidas en la sección tangencial, se evidencia que el pozo con la tortuosidad más alta es el pozo B-05 perforado con RSS, esto es de resaltar ya que este pozo como se estudiará más adelante tuvo inconvenientes durante un viaje a superficie en *backreaming* luego de llegar a la profundidad de asentamiento de revestidor.

Para los demás casos se obtienen los resultados esperados con la teoría. Siendo el pozo B-01 el más tortuoso perforado con motor de fondo, pero su variación con respecto a los perforados con RSS no varía más del 33%.

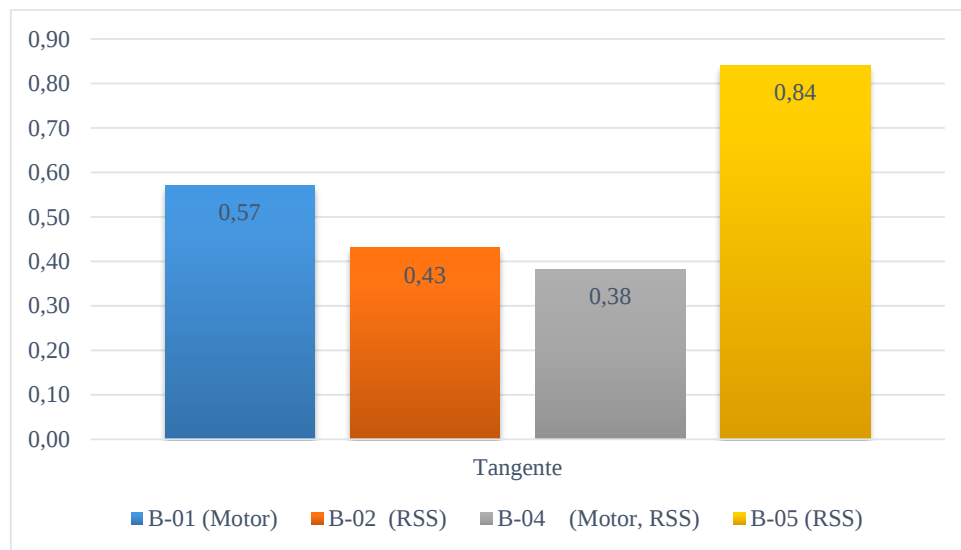


Figura 26. Tortuosidad en la sección tangente para los pozos de estudio

5.8 Comparación de las herramientas direccionales por los costos asociados

Para realizar la comparación de costo se escogerán los pozos con mejor tiempo durante la perforación, es decir con las tasas de perforación más altas y solo se tomará el tiempo durante la perforación ya que como se mencionó anteriormente para los pozos de estudios se tuvieron muchas horas de tiempo no productivo debido a problemas de superficie, no relacionado a los ensamblajes de fondo direccionales. Sólo se eligen dos pozos para comparar por costos asociados porque el pozo B-04 es un *sidetrack*, en el cual se usaron las dos herramientas direccionales en estudio, y el B-05 porque terminó en LIH.

En el caso del motor de fondo se tomará en el pozo B-01 por ser el único pozo perforado con esa herramienta del estudio y para el caso del RSS se tomará el pozo B-02.

Para analizar los costos es necesario agregar que en Schlumberger West los honorarios son contabilizados por las horas bajo la mesa rotaria y el ensamblaje de fondo completo, no por herramienta en el hoyo. Entonces para el análisis se tomará en cuenta las horas bajo la mesa rotaria, tiempo no productivo y el tiempo de corridas donde no se perforó, estas se aprecian en la tabla 8.

Tabla 8. Tiempos a tomar en cuenta para el análisis de costos

	Horas bajo la mesa rotaria	Tiempo No Productivo	Horas de corridas donde no se perforó (h)
B-01 (Motor)	254 h	35,85 h	0 h
B-02 RSS	631,19 h	257,96 h	269,86 h

Los costos asociados al día de taladro y a las herramientas direccionales se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Costos asociados a la perforación y ensamblaje de fondo

	Costo diario de la perforación	Costo diario del ensamblaje de fondo
B-01 (Motor)	\$ 50.000,00	\$ 20.000,00
B-02 RSS	\$ 50.000,00	\$ 52.000,00

En la tabla 10 se muestran los costos y gastos asociados. Se puede notar el alto costo real de la sección perforada con RSS pero vale la pena resaltar que durante la perforación de esta sección se tuvieron muchos problemas no asociados al ensamblaje de fondo direccional, adicionalmente en el caso del pozo perforado con RSS se hicieron corridas en las cuales no se perforó, adicionalmente se aprecia el costo óptimo de la sección. Tomando en cuenta estos valores se puede decir que a pesar del alto costo diario del ensamblaje de fondo con PowerDrive® RSS la sección se puede perforar con un 45 por ciento menos presupuesto que la perforada con Motor de fondo. Ya que a pesar de que la herramienta PowerDrive® RSS es más costosa, perfora en menor tiempo, reduciendo los costos de taladro, fluido de perforación, entre otros.

Tabla 10. Costos y Gastos asociados

	Costo Real de la perforación	Gastos asociado a NPT	Gastos asociado a Corridas donde no se perforó	Costo Óptimo
B-01 (Motor)	\$ 740.833,33	\$ 104.562,50	\$ -	\$ 636.270,83
B-02 RSS	\$ 2.682.557,50	\$ 1.096.330,00	\$ 1.146.905,00	\$ 439.322,50

5.9 Evaluación del Torque

Existen muchos parámetros que pueden ocasionar hoyos tortuosos, pero sin lugar a dudas el uso de motores de fondo es una de ellas, y este está directamente relacionado con la calidad del pozo, ya que, se tendrán más problemas durante las operaciones de perforación, viajes, bajada de revestidores y completación del pozo debido a que esto origina un alto torque.

En la figura 27 se muestran los valores obtenidos de torque mientras se perforaba, cabe destacar que estos valores no es obtenidos por sensores del segmento ya que por la configuración del taladro no es posible instalarlo, sino que es tomado del torquímetro del perforador y este oscila mucho en su valor.

Se observa de la figura 27 que los valores de torque aumentan a medida que aumenta la profundidad medida de manera escalonada. Al inicio de la sección se obtienen menores valores de torque para los pozos B-02 y B-05 ambos perforados con RSS esto continua de la misma manera hasta aproximadamente a 5300 pies a profundidad medida el valor de torque aumenta en el pozo B-05 perforado con RSS y en esta zona se tuvieron inconvenientes que se expondrán en las próximas líneas. Para el pozo perforado con motor de fondo se observa que de manera general el torque es mayor que en los pozos perforados con RSS.

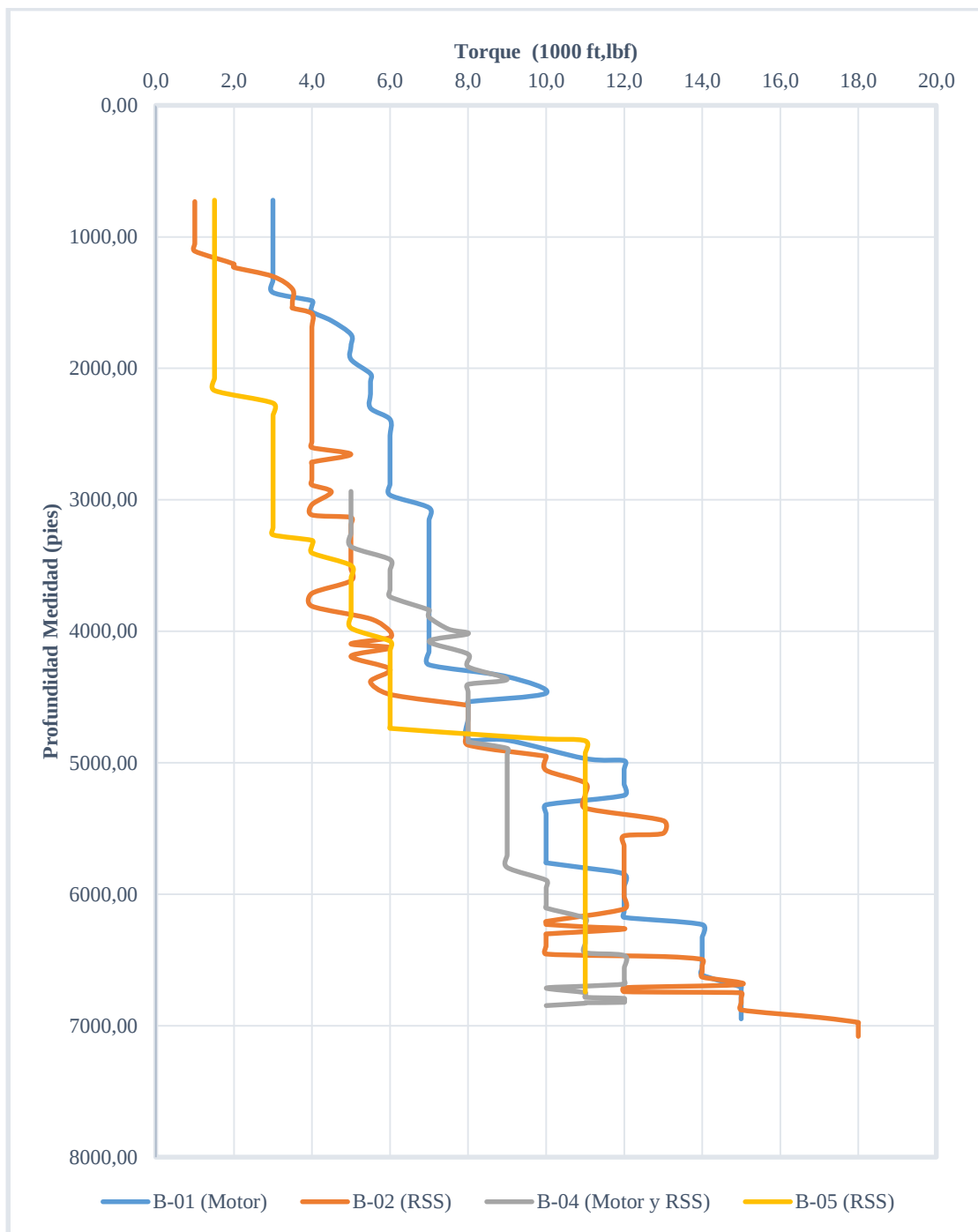


Figura 27. Relación entre el torque durante la perforación y la profundidad medida

En conclusión se observa que el pozo con mayor torque durante la perforación es el B-01 perforado con motor de fondo. El resultado va acorde con lo esperado, ya que con la perforación con RSS se espera obtener menor torque de perforación debido a que se obtiene mejor calibración del hoyo.

5.10 Evaluación del arrastre por pozo en estudio

El arrastre es una fuerza mecánica generada entre un cuerpo rígido y el fluido de perforación. Esta fuerza está presente durante la perforación y se produce entre las superficies de contacto de las conexiones de tubería y las paredes del pozo que se está perforando causado por el deslizamiento y/o la rotación de la sarta de perforación. En las siguientes figuras se presentan los gráficos de arrastre para cada pozo en estudio.

En la figura 28 se aprecia el gráfico del arrastre presente durante la perforación del pozo B-01 perforado con motor de fondo, donde se muestran las cargas en el gancho a cada profundidad medida. La línea continua azul representa el peso de la sarta cuando esta sube, la línea continua roja el peso bajando la sarta, la línea continua negra representa el peso de la sarta mientras esta se encuentra en rotación, las líneas punteadas representan la simulación de los factores de fricciones tanto de bajada como de subida de tubería para el campo y la línea continua verde representa la inclinación obtenida.

En la gráfica se muestra que hasta 3975 pies las cargas en el gancho poseen un comportamiento lineal, en los siguientes puntos se ajustan a la curva simulada bajando y subiendo del factor de fricción de 0,2 a hoyo abierto hasta los 6100 pies aproximadamente. Luego hasta la profundidad de asentamiento del revestidor la curvas de peso subiendo se aproxima al valor de fricción de hoyo abierto al valor de 0,3 y la curva de peso bajando se aproxima al valor de fricción de 0,4.

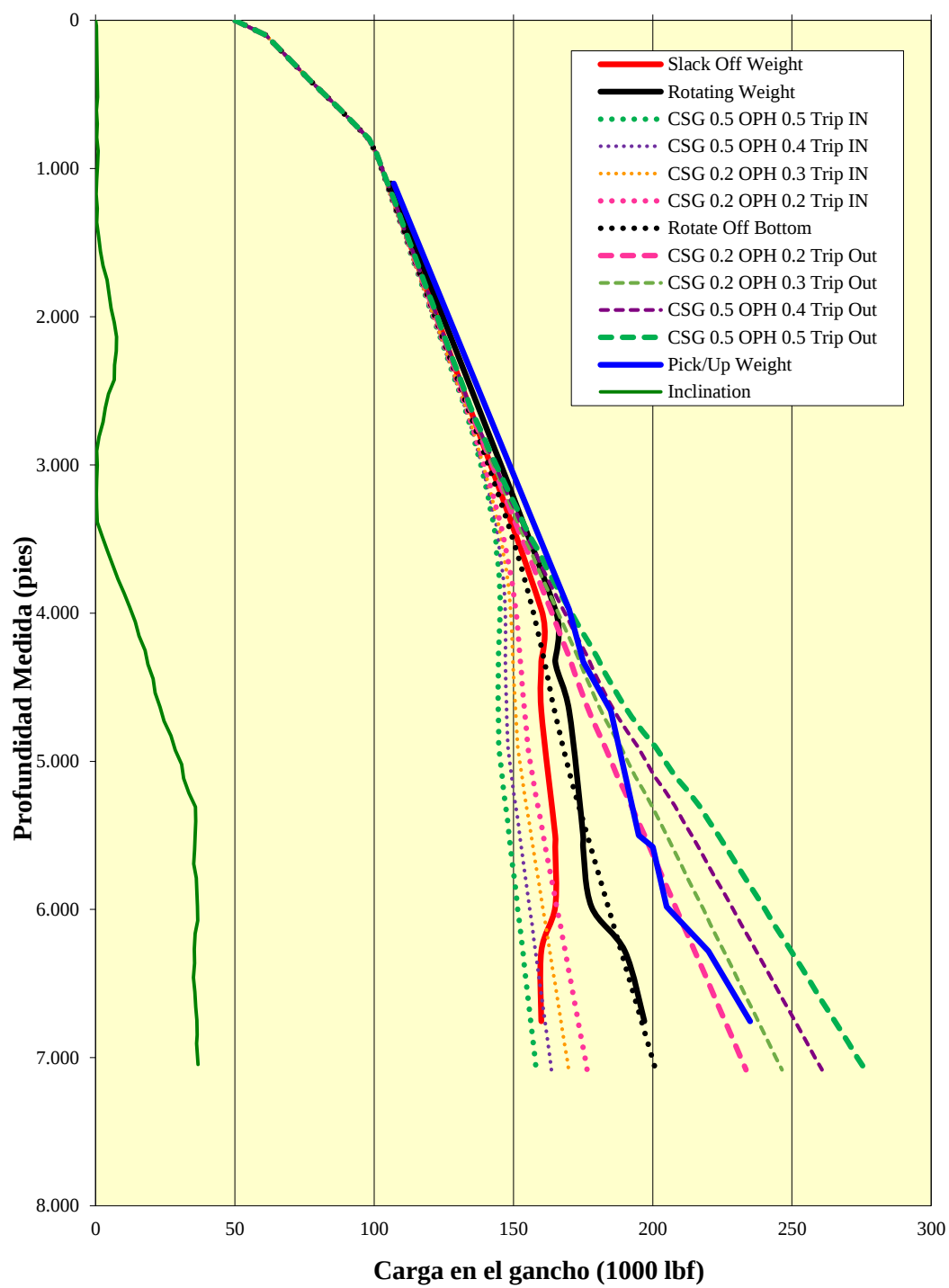


Figura 28. Gráfico de arrastre del pozo B-01

En la figura 29 se aprecia el gráfico del arrastre presente durante la perforación del pozo B-02 perforado con RSS, donde se muestran las cargas en el gancho a cada profundidad medida. La línea continua azul representa el peso de la sarta cuando esta sube, la línea continua roja el peso bajando la sarta, la línea continua negra representa el peso de la sarta mientras esta se encuentra en rotación, las líneas punteadas representan la simulación de los factores de fricciones tanto de bajada como de subida de tubería para el campo y la línea continua verde representa la inclinación obtenida.

Para este pozo los valores se tomaron a partir de 2940 pies a profundidad medida. Inicialmente la variación entre los pesos subiendo, bajando y rotando poseen el mismo comportamiento y valores hasta aproximadamente 5500 pies a profundidad medida. Luego la curva de peso rotando real se continúa ajustando a la simulada, en cambio la curva de peso subiendo posee un comportamiento diferente al simulado, llamando la atención la disminución del peso del gancho entre 5900 y 6680 pies a profundidad medida. Para la curva del peso bajando se aprecia que a la curva que más se ajusta es la del factor de fricción 0,2. Pero igualmente se observa un comportamiento diferente en el rango de 5900 y 6680 pies a profundidad medida, en esta curva se observa un aumento de la carga en el gancho.

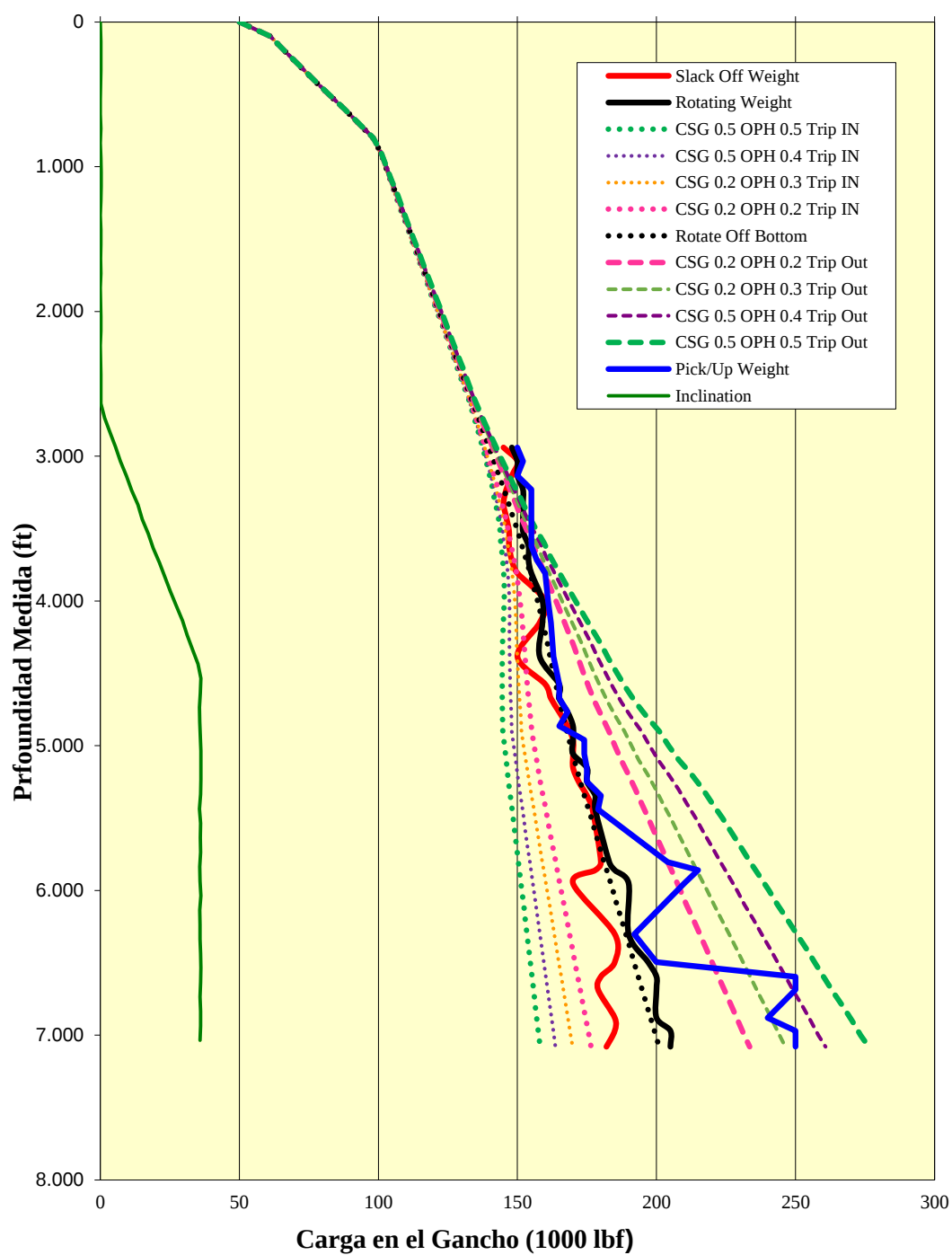


Figura 29. Gráfico de arrastre del pozo B-02

En la figura 30 se aprecia el gráfico del arrastre presente durante la perforación del pozo B-04 perforado con motor de fondo y RSS, donde se muestran las cargas en el gancho a cada profundidad medida. La línea continua azul representa el peso de la sarta cuando esta sube, la línea continua roja el peso bajando la sarta, la línea continua negra representa el peso de la sarta mientras esta se encuentra en rotación, las líneas punteadas representan la simulación de los factores de fricciones tanto de bajada como de subida de tubería para el campo y la línea continua verde representa la inclinación obtenida.

Este pozo fue perforado con motor de fondo hasta 3893 pies a profundidad medida y hasta esta profundidad se observa que el peso rotando es mayor al peso subiendo de la sarta. Luego para finalizar con la sección se perforó con RSS, en esta zona se aprecia que la curva de peso subiendo se ajusta entre las curvas de factor de fricción de 0,3 y 0,4 a hoyo abierto. Para el caso del peso bajando esta se ajusta a la de menor valor de la curva de factor de fricción a hoyo abierto siendo la de 0,2. La curva de peso rotando posee la misma tendencia que la simulación pero con un desplazamiento 10 libras fuerza.

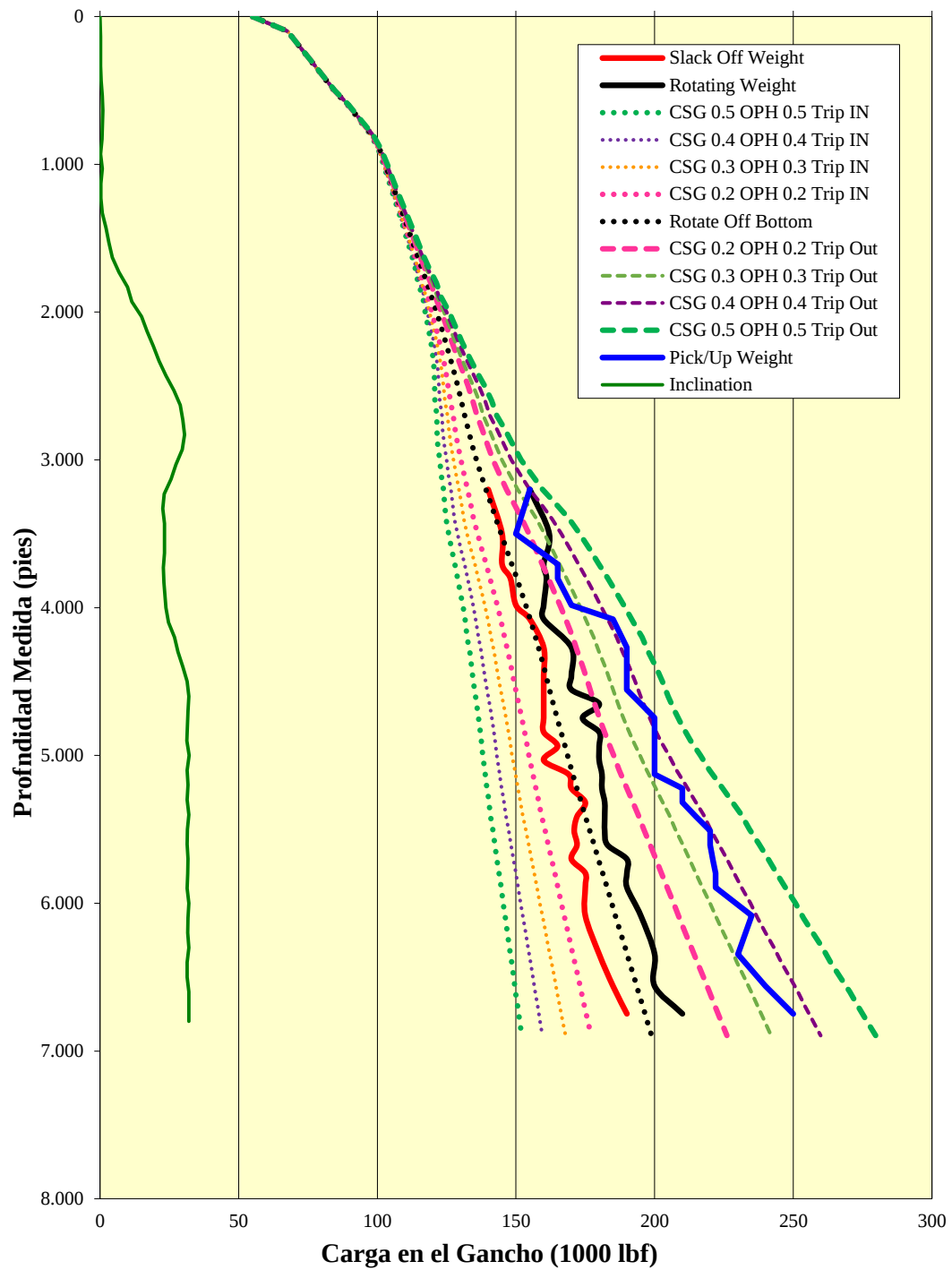


Figura 30. Gráfico de arrastre del pozo B-04

En la figura 31 se aprecia el gráfico del arrastre presente durante la perforación del pozo B-05 perforado con RSS, donde se muestran las cargas en el gancho a cada profundidad medida. La línea continua azul representa el peso de la sarta cuando esta sube, la línea continua roja el peso bajando la sarta, la línea continua negra representa el peso de la sarta mientras esta se encuentra en rotación, las líneas punteadas representan la simulación de los factores de fricciones tanto de bajada como de subida de tubería para el campo y la línea continua verde representa la inclinación obtenida.

Al igual que el pozo B-04 se observa un desfase entre las curvas reales y los factores de fricción simulados, también se aprecia que las curvas son paralelas entre sí. Adicionalmente en las curvas a 5600 pies a profundidad medida se observa un aumento brusco de peso.

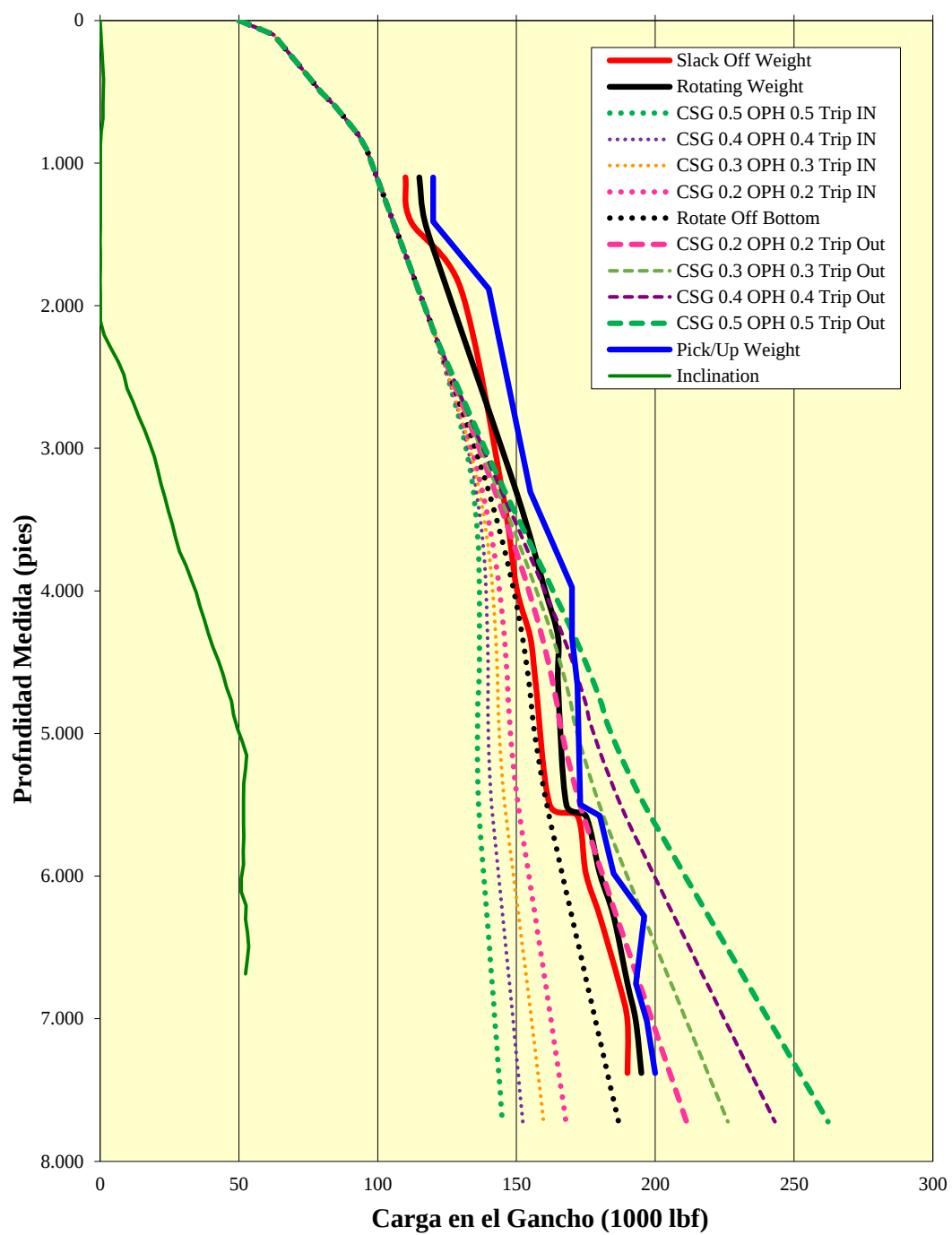


Figura 31. Gráfico de arrastre del pozo B-05

En conclusión se obtuvo que para el pozo B-01 perforado con motor de fondo se tienen los mayores valores de arrastre durante la perforación de la sección, comparándolo con los pozos B-02, B04 y B-05 perforados con RSS. Adicionalmente es de destacar que es necesario realizar un ajuste de los valores del factor de fricción simulados con los valores obtenidos en campo.

5.11 Evaluación de las causas de pega de tubería mientras se realizan viajes a superficie

En la macolla de estudio se presentaron varios eventos de pega de tubería y a continuación se evaluarán dos de ellos, ya que en estos están involucrados los ensamblajes de fondo direccionales durante los viajes a superficie en *backreaming* y terminaron con pérdida de tubería en el hoyo.

5.11.1 Pozo B-03

5.11.1.1 Geometría del hoyo

En la tabla 11 se muestran las características de la geometría del hoyo del pozo B-03 y ubicación en el hoyo del evento.

Tabla 11. Geometría del hoyo B-03

Sección Actual	12 ¼"
Último revestidor	13 ¾" / 720 pies MD
Profundidad final perforada	6879 pies MD
Profundidad de evento	4900 pies MD
Inclinación y azimut de evento	29,69° / 97,36°
Máxima Inclinación	29,69° a 3697 pies MD
Formación	Lutitas y arenas intercaladas
Actividad realizada antes del evento	Viaje a superficie por problemas de superficie asociados al taladro

5.11.1.2 Ensamblaje de fondo en el hoyo

El ensamble de fondo usado para la perforación de la sección de estudio en el pozo B-03, se puede apreciar en la Figura 32 que está compuesto de una mecha PDC de cuerpo de matriz de cinco aletas de diecinueve milímetros con seis chorros con un TFA de 1,059 pulgadas cuadrados. Seguido del PowerDrive[®] que posee las especificaciones mostradas en la tabla 2 en el capítulo II. Para cumplir con el objetivo de construcción de ángulo el ensamble de fondo posee un estabilizador inmediatamente después de la herramienta direccional. Y para finalizar la herramienta de medición MWD seguida de un monel para disminuir la interferencia magnética producida por la sarta de perforación.

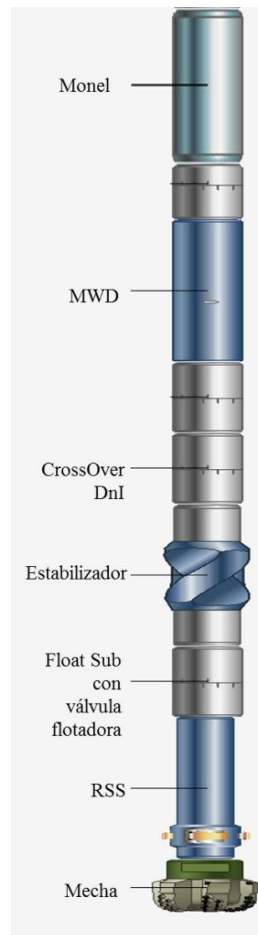


Figura 32. Ensamblaje de fondo en el hoyo del B-03

5.11.1.3 Secuencia de Eventos

A continuación se presentan una serie de figuras donde están representados las actividades de perforación en función de la profundidad y el tiempo. Se representan la posición del bloque, presión, profundidad del hoyo, profundidad de la mecha, las revoluciones por minuto de las turbinas del modulador de la herramienta de medición, las revoluciones por minuto que el collar de la herramienta de medición y la carga en el gancho.

En la figura 33 muestra cómo se perforó sin inconvenientes hasta la una de la mañana, esto se parecía ya que la presión es constante a 2500 psi, las revoluciones de la turbina de la herramienta de medición es constante, la sarta está rotando sin inconvenientes a 100 vueltas por minutos en promedio, el peso de la sarta es aproximadamente 160.000 lbf, la profundidad del bloque disminuye y aumenta el valor de la profundidad. A la derecha de la figura se aprecia que a partir de las dos de la mañana se muestra como en dos oportunidades hubo una caída de presión de 400 psi, luego se determinó que era debido a una fuga en el *saver sub* del *top drive*. Por eso a las cuatro de la mañana se aprecia la sarta se reciproca mientras se hacen las reparaciones pertinentes.

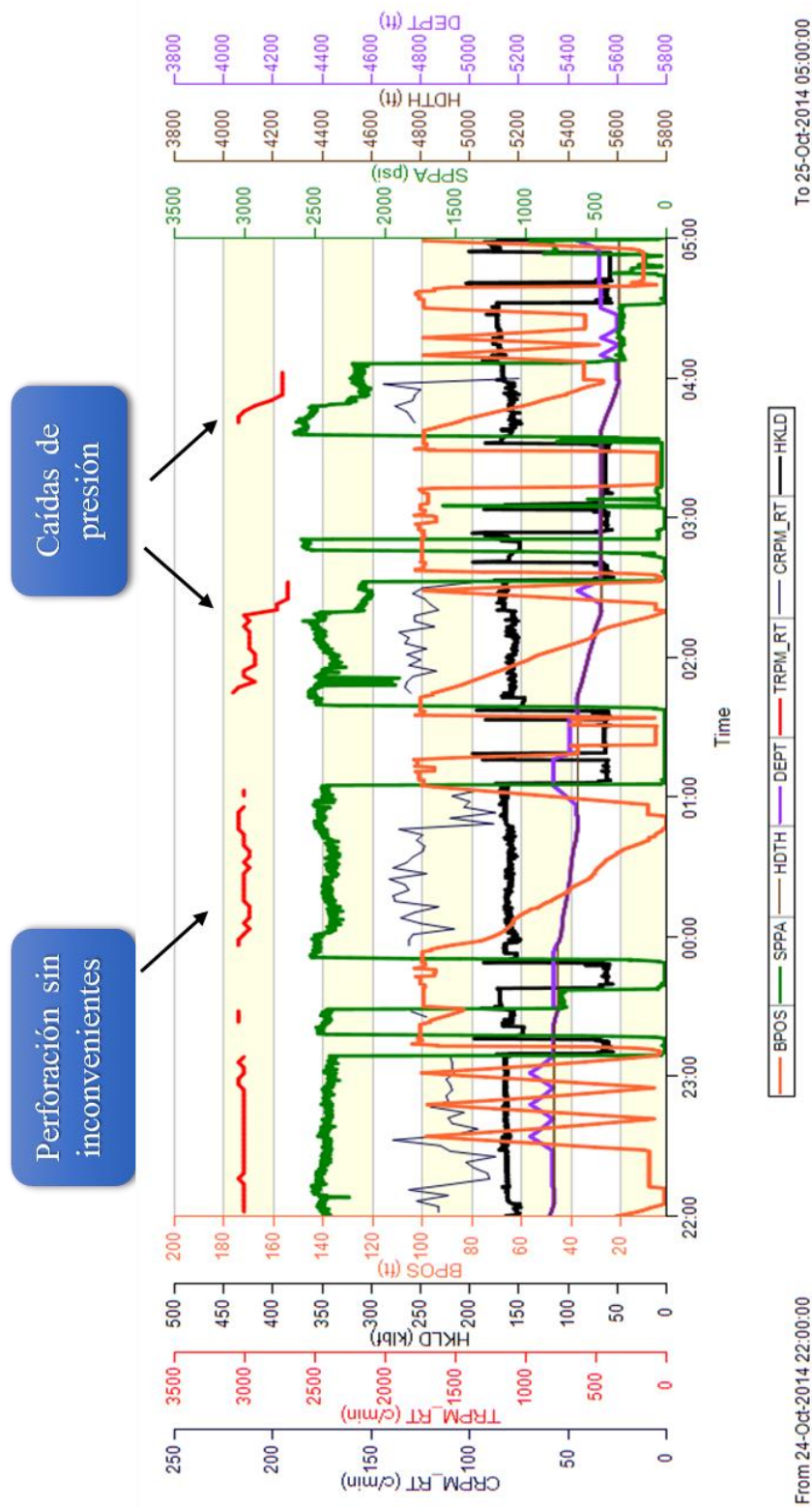


Figura33. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad antes del evento 1-3

En la figura 34 se muestra la continuación del gráfico de la profundidad en función del tiempo a partir de las tres de la mañana donde se aprecia la segunda caída de presión de 400 psi y el período donde se reciproca la sarta de perforación hasta las cuatro y media de la mañana, luego se decide sacar del hoyo cinco parejas con bombas y rotaria y se continua reciprocando la sarta a 5100 pies de profundidad medida. A partir de las siete de la mañana se decide continuar reciprocando la sarta de perforación con una presión de 2000 psi que se mantiene constante al igual que las revoluciones por minuto de la herramienta de medición hasta las diez de la mañana, por falta de personal en el taladro.

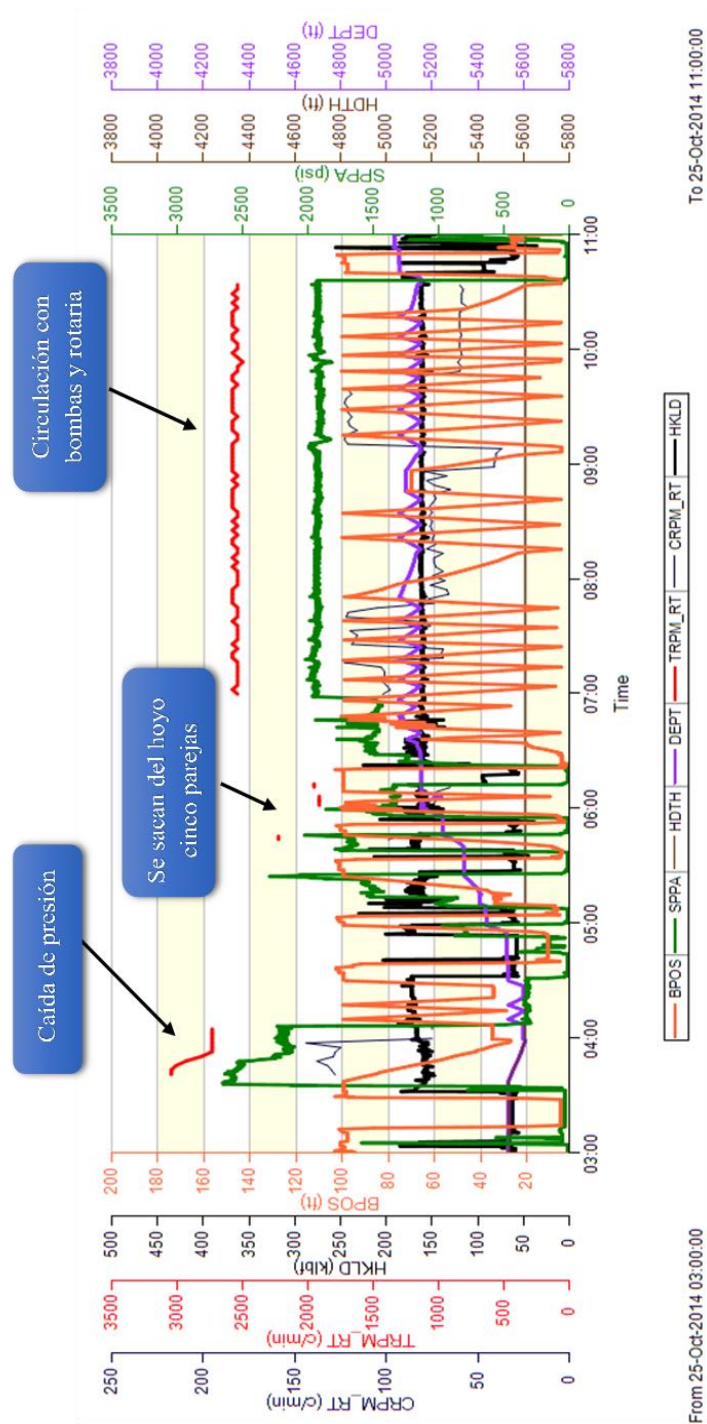


Figura34. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad antes del evento 2-3

En la figura 35 se muestra la continuación del gráfico de la profundidad en función del tiempo a partir de las diez de la mañana donde se reanuda el viaje a superficie de manera convencional, para la siguiente pareja fue necesario prender bombas y rotaria observándose picos de presión, hasta pasadas las catorce horas que se produce el evento de pega que identifica por los disminución de la carga en el gancho y el pico de presión hasta 3200 psi. Inmediatamente se trabaja la sarta durante dos horas y media sin circulación y sin poder reciprocarse la sarta hacia abajo con el martillo.

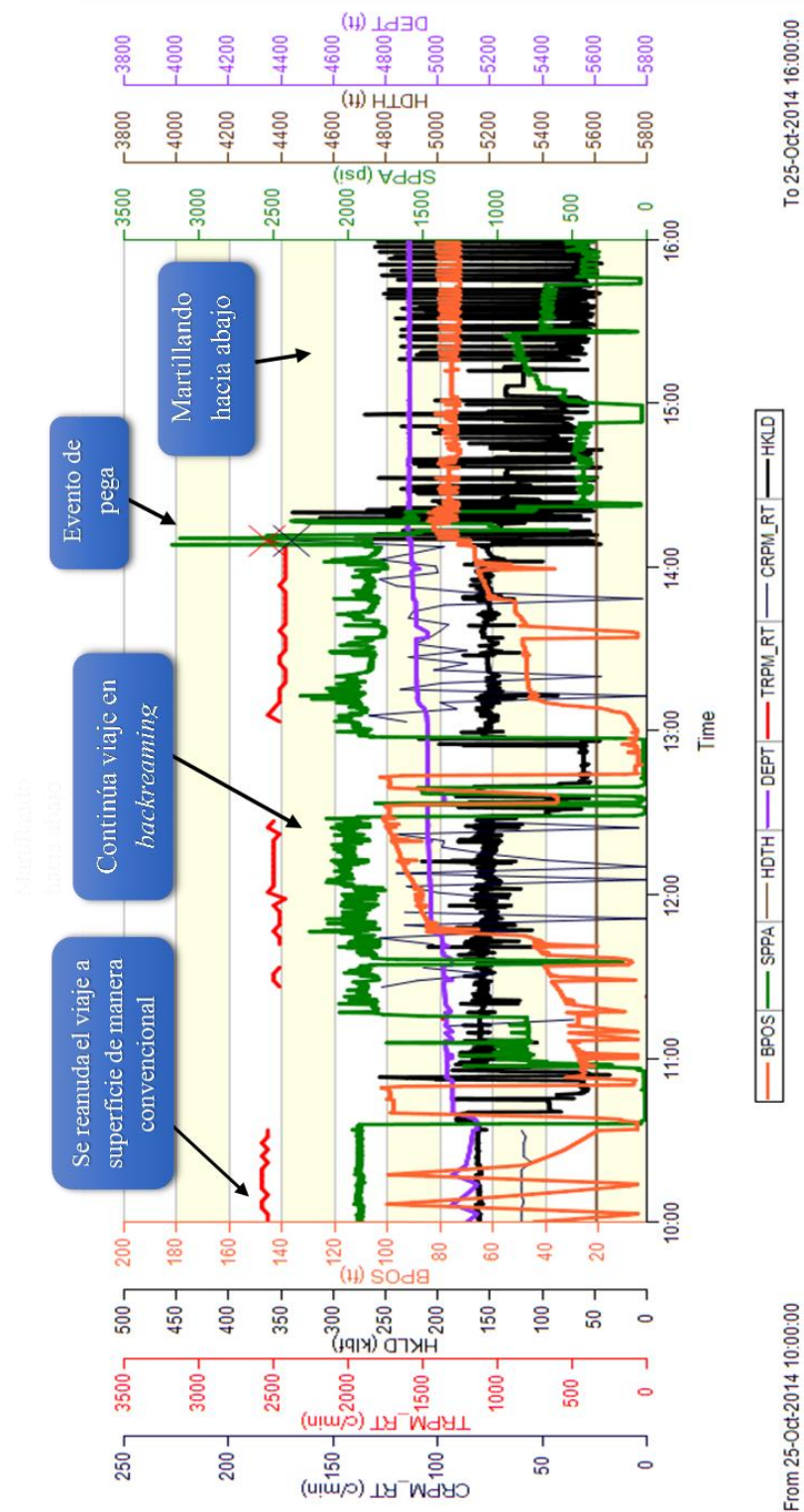


Figura35. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad antes del evento 3-3

En la figura 36 se muestra la continuación del gráfico de la profundidad en función del tiempo a partir de las quince horas donde se sigue trabajando con el martillo hasta 350 klbf de *over pull* y se aprecia en los picos de peso en el gancho, hasta las veintitrés horas donde se observa un pico en el peso en gancho seguido de la pérdida del mismo. Después es posible seguir sacando la tubería de perforación sin inconvenientes hasta que sale una tubería rota y con esto se confirma la pérdida de tubería en el hoyo.

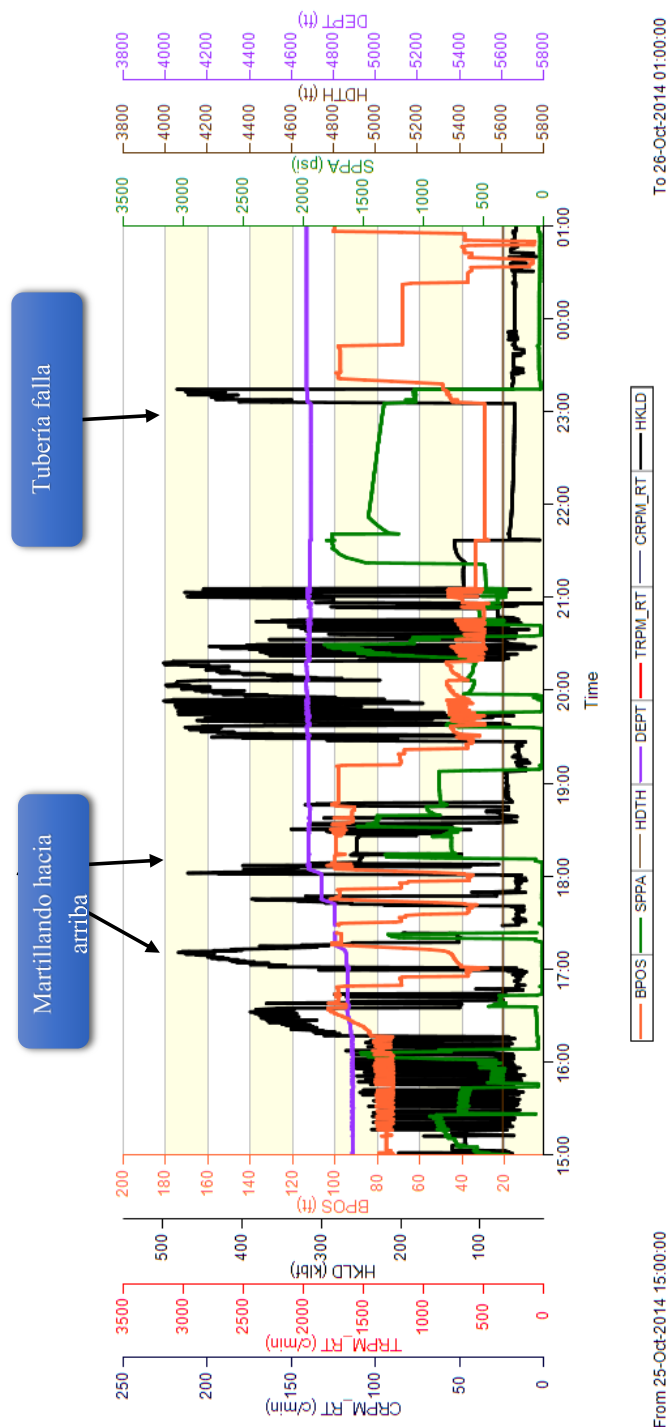


Figura36. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad del evento

En la figura 37 se aprecia una imagen de la tubería rota que salió del hoyo luego del evento de pega y posterior pérdida de peso en el gancho.



Figura 37. Tubería que falló durante viaje a superficie en backreaming B-03

5.11.1.4 Identificación del mecanismo de pega

Para identificar el mecanismo de pega es necesario identificar las actividades antes y después del evento y en campo se utiliza el formato presentado en la tabla 12, donde se aprecia que antes del evento de pega era posible la rotación hacia arriba y circulación libre. Luego del evento, era imposible el movimiento de la sarta de perforación hacia abajo al igual que la rotación y la circulación. Entonces la causa más probable de atascamiento es por empaque de sólidos y la pega mecánica y por geometría del hoyo.

Tabla 12. Identificación del mecanismo de pega pozo B-03

Movimiento de la sarta de perforación antes de la Pega		Movimiento de la sarta de perforación después de la pega	Circulación después de la pega	
Movimiento hacia arriba		Movimiento libre hacia abajo	Circulación libre	
Rotación hacia arriba	x	Movimiento restringido hacia abajo	Circulación restringida	
Movimiento hacia abajo		Movimiento imposible hacia abajo	Circulación imposible	x
Rotación hacia abajo		Libre rotación		
Estático		Rotación restringida		
		Rotación imposible		x

5.11.1.5 Análisis de la causa de la falla de tubería

A continuación se enumeran las posibles causas de la falla de tubería durante el viaje a superficie luego de comparar las actividades planeadas con las ejecutadas y se encontró que:

- Se revisó la curva de lodo del plan del pozo y se comparó con los reportes de lodo evidenciándose que el peso del lodo era inferior al planificado, esto implica que pueden haber derrumbes en el hoyo.
- Alto *over pull* mientras se realizaba viaje a superficie 100 Klbs
- Aumento de torque y vibraciones torsionales observado en la segunda pareja sacada del hoyo.
- Limitación del flujo por falla del *top drive*.

5.11.2 Pozo B-05

5.11.2.1 Geometría del hoyo

En la tabla 13 se muestran las características de la geometría del hoyo del pozo B-05 y ubicación en el hoyo del evento.

Tabla 13. Geometría del hoyo B-05

Sección Actual	12 ¼"
Último revestidor	13 ¾" / 720 pies MD
Profundidad final perforada	7724 pies MD
Profundidad de evento	7336 pies MD
Inclinación y azimut de evento	54,34° / 59,90°
Máxima Inclinación	53,30° a 7724 pies MD
Formación	Lutitas y arenas intercaladas(Base de Upper Boscán)
Actividad realizada antes del evento	Viaje a superficie luego de finalizar la sección

5.11.2.2 Ensamblaje de fondo en el hoyo

El ensamblaje de fondo en el hoyo fue descrito en secciones anteriores cuando se describían los ensamblajes de fondo empleados en la perforación de los pozos en estudio, más específicamente en la sección 5.2.4 e ilustrado en la figura 15.

5.11.2.3 Secuencia de Eventos

Durante la perforación del pozo B-05 se tuvieron problemas en superficie generando muchas horas de tiempo no productivo. De tal manera que en dos oportunidades se armó BHA direccional y no se pudo perforar.

Cuando se logró empezar a perforar en la corrida tres y se perforaba a 6788 pies a profundidad medida, se decidió circular mientras se realizaban reparaciones a las bombas. El personal de taladro decidió chequear el piso del taladro y para ello desconectó el freno hidráulico, inmediatamente después el bloque cayó siendo detenido por el carril, pero se partió a la mitad el soporte conectado y el lodo se derramó por todo el piso del taladro. La sarta debido a la compresión avanzó 39 pies a profundidad medida, por esta razón se decide realizar un viaje a superficie para verificar el estado de las herramientas. Durante el viaje a superficie se tuvieron varios connatos de pega. Uno de ellos se aprecia en la figura 38 donde están representadas gráficamente las

actividades de perforación en función de la profundidad y el tiempo. Se representan la posición del bloque, presión, profundidad del hoyo, profundidad de la mecha, las revoluciones por minuto de las turbinas del modulador de la herramienta de medición, las revoluciones por minuto que el collar de la herramienta de medición detecta, y la carga en el gancho. Donde inicialmente se observa alto torque durante las operaciones en *backreaming*, y luego de la desconexión a 2386 pies a profundidad medida se observa circulación con un incremento de 350 psi pero no es posible rotar la sarta de perforación, la sarta es trabajada y luego de veinticuatro horas es posible continuar el viaje a superficie.

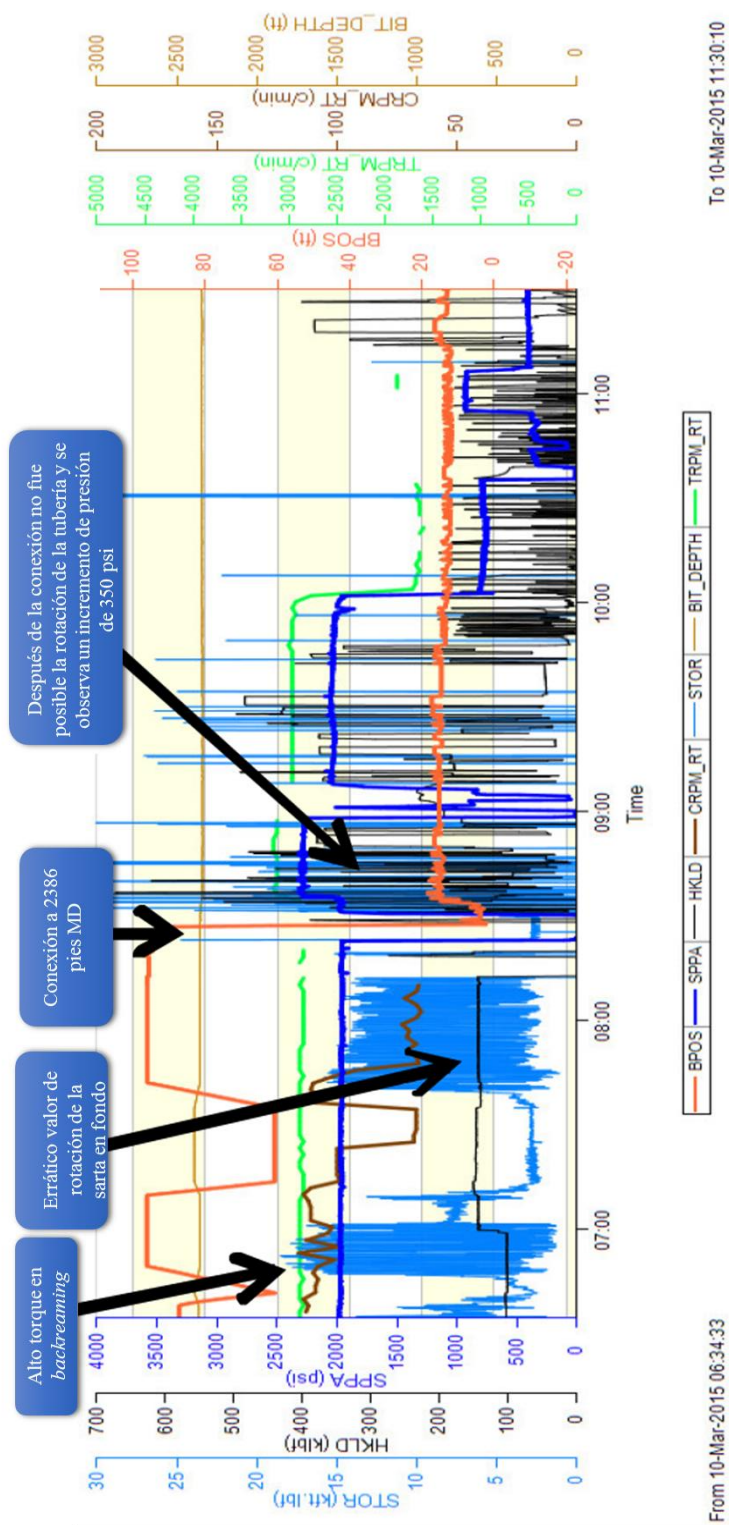


Figura 38. Tratando de desconectar tubería de perforación

En superficie se intentaron desconectar algunas parejas de tubería de perforación pero esto no fue posible. En la figura 39 se muestra como se intentaba desconectar la tubería de perforación sin éxito.



Figura 39. Tratando de desconectar tubería de perforación

La tubería de perforación fue reemplazada parcialmente para armar el ensamblaje de fondo direccional número cuatro y con este fue posible perforar hasta el punto de asentamiento de revestidor a 7724 pies a profundidad medida, se circuló para limpiar el hoyo con alto torque como lo muestra la figura 40 donde se aprecia donde gráficamente las actividades de perforación en función de la profundidad y el tiempo. Se representan la posición del bloque, presión, profundidad del hoyo, profundidad de la mecha, las revoluciones por minuto de las turbinas del modulador de la herramienta de medición, las revoluciones por minuto que el collar de la herramienta de medición detecta, y la carga en el gancho y se inició el viaje a superficie pero no fue posible el movimiento de la sarta por problemas de fuga en la manguera de lodo. A las doce del mediodía se observó pérdida de presión, seguido de pérdida de peso y torque. Se sacó hasta superficie y se confirmó la falla de la tubería de perforación.

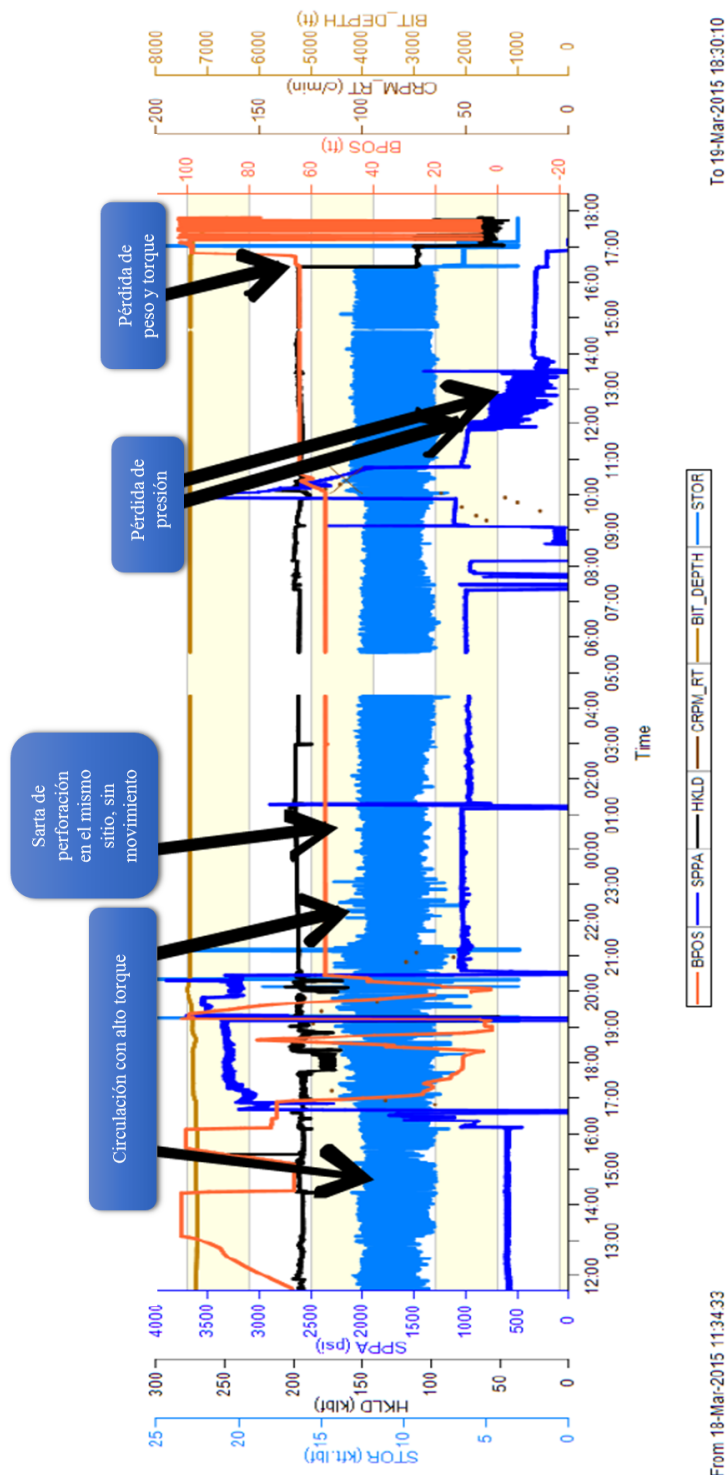


Figura 40. Gráfico de tiempo con respecto a la profundidad del evento

5.11.2.4 Análisis de la causa de la falla de tubería

A continuación se enumeran las posibles causas de la falla de tubería durante el viaje a superficie luego de comparar las actividades planeadas con las ejecutadas y se encontró que:

- La caída del *top drive* afectó la condición de la tubería de perforación en la tercera corrida.
- No se inspeccionaron todas las parejas de tubería de perforación, solo fueron reemplazadas las que no se pudieron desconectar o las dobladas.
- Constante fallas de las bombas de lodo afectan las operaciones de perforación y exponen la sarta a hoyo abierto innecesariamente.

Los eventos sucedieron por falta de mantenimiento oportuno e inspecciones preventivas de los equipos de superficie, por eso el personal de taladro debe conocer y estar atento de sus actividades y mantenimiento de los equipos. Ya que todos estos eventos incrementan los tiempos no productivos y trae como consecuencia directa el incremento de costos de la perforación de pozo y retrasos en inicio de la producción del mismo.

CONCLUSIONES

- Los pozos perforados con RSS se perforan con una mayor tasa de penetración con respecto a los perforados con motor de fondo y por consecuencia esto indica que la sección es perforada en menor tiempo.
- Para los pozos perforados en la macolla de estudio el 50 por ciento de los pozos tuvo corridas donde no fue posible perforar por problemas de superficie.
- La tortuosidad en la sección de verticalidad de los pozos perforados con RSS es menor en un 60 por ciento con respecto a la sección vertical en los pozos perforados con motor de fondo.
- La tortuosidad en la sección de incremento de los pozos perforados con RSS es menor en un 58,2 por ciento con respecto a la sección de incremento en los pozos perforados con motor de fondo, comparando los mejores casos.
- La tortuosidad en la sección tangente de los pozos perforados con RSS es menor en un 33,3 por ciento con respecto a la sección tangencial en los pozos perforados con motor de fondo.
- Los tiempos no productivos no solo afectan los costos sino la calidad del hoyo.
- La mayor calidad del hoyo en términos de torque se da en pozos perforados con RSS, ya que los valores reflejados a una misma profundidad son menores con RSS que con motor de fondo.
- El RSS posee un valor bajo la mesa rotaria mucho mayor al del motor de fondo, pero el impacto en los costos finales de la sección de 12 ¼” representa un ahorro del 45 por ciento.
- Los tiempos no productivos incrementan los costos de tal manera que pueden ser mayores a los de la perforación de una sección nueva, evaluando los pozos en estudio.
- Los pozos perforados con motor de fondo poseen mayor arrastre subiendo y bajando la tubería.

- La causa de las pegas durante las operaciones en *backreaming* no están asociadas a ninguna herramienta direccional estudiada ni a los ensamblajes de fondo direccionales.

RECOMENDACIONES

- Se deben tomar en cuenta las especificaciones de las herramientas direccionales durante la perforación, ya que puede afectar el desempeño de las mismas.
- Es necesario realizar un análisis para campo Boscán de los factores de fricción.
- Es necesario involucrar a todos los responsables antes de iniciar cualquier actividad durante la perforación para recordar los posibles inconvenientes que se pueden presentar y recordar las mejores prácticas para evitarlos o saber cómo afrontarlos de manera correcta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mantle, K (2014). *El arte de controlar la trayectoria de pozos*. OilfieldReview, Schlumberger. Volumen 25. Nº4. Página 61.
- [2] Universidad Central de Venezuela. Escuela de Petróleo. *Pozos I: Perforación vertical, horizontal y direccional controlada*. Caracas: Pedro Díaz.
- [3] Jaimes, L., Quintero, R. (2012). *Estado de arte en la construcción de pozos direccionales con la tecnología rotary steerable system RSS*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [4] Felczak, E., Torre, A. (2012). *Lo mejor de ambos mundos: un sistema rotativo direccional híbrido*. Oilfield Review.Schlumberger. Volumen 23, nº 4
- [5] Morante, E. (2011). *Evaluación del tiempo operativo de los motores de fondo de Schlumberger D&M east Venezuela en el campo Zuata principal*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [6] Schlumberger (2004). *PowerPak: Steerable Motor Handbook*. Sugar Land, Texas.
- [7] Williams, M. (2004). *Un Nuevo giro en la perforación rotativa direccional*. OilfieldReview, Schlumberger.
- [8] Downton, G. (2000). *Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional*. OilfieldReview, Schlumberger.
- [9] Schlumberger (2010). *PwerDrive X6, rotary Steerable System for high-performance drilling and accurate wellbore placement*. Obtenida el de junio de 2015, de, www.slb.com/PowerDriveX6
- [10] Bradley, W.B (1975). *Factors Affecting the Control of Borehole Angle In Straight and Directional Wells*. Obtenida el 13 de agosto de 2015, de, <https://www.onepetro.org/>

- [11] Lake, W. (2006). *PEH: Drilling Problems and Solutions*. Obtenida el 13 de agosto de 2015 de, <http://petrowiki.org/>
- [12] Almarza, R. (1997). *Campos petrolíferos de Venezuela*. PDVSA-Intevep. Extraído el 21 de julio de 2015 de: <http://www.pdv.com/>
- [13] Chevron Latin America (2015). *Venezuela Fact Sheet*.
- [14] Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Vicerrectorado de Investigación y Postgrado. (2012). *Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales*. Caracas.
- [15] Bau (1997). *Etapas del diseño de Investigación*. Sin lugar de publicación.
- [16] Schlumberger, (2011). *OIL*.
- [17] Weijermans, P., Ruzska, J. y otros. (2001). *Drilling with rotary system reduces wellbore tortuosity*. Society of Petroleum Engineers, n° 67715.
- [18] Bourgoyne, A., (1984). *Applied Drilling Engineering*. Society of Petroleum Engineers. Richardson, Texas.

GLOSARIO

Ángulo de inclinación: Es el ángulo fuera de la vertical que marca la dirección del pozo, también se llama ángulo de deflexión.

Anular: Espacio entre las paredes desnudas del pozo o entre ésta y la tubería de revestimiento.

Arena: Roca sedimentaria, formada por granos principalmente de cuarzo, consolidada en areniscas en las cuales se encuentran la mayoría de los yacimientos en Venezuela.

Arenisca: Roca Sedimentaria detrítica formada por la cementación de granos individuales del tamaño de arena compuesta comúnmente del mineral de cuarzo.

Circulación: Recorrido que hace el lodo a través de las bombas, mangueras, sarta de perforación, barrena y espacio anular.

Costo: Cantidad que se paga por una cosa.

Crossover: Para fines del presente trabajo, se denomina *crossover* a la tubería empleada para el cambio de diámetro entre componentes de la sarta de perforación.

Densidad: Propiedad de una sustancia que mide la cantidad de masa por unidad de volumen.

DLS: Dog leg severity, es el ángulo de construcción por cada 100 pies o también llamada “pata de perro”, y es un proceso de perforación direccional de un pozo.

Fluido: Material que ofrece poca resistencia a las fuerzas que tienden a cambiar de forma.

Formación: Se refiere a estratos rocosos, homogéneos de cualquier tipo, usados particularmente para describir zonas de rocas penetradas durante la perforación

Gasto: Costo de las operaciones efectuadas por la empresa, aunque no den lugar a una salida de dinero u otro medio de pago inmediatamente, sino que se registran en la contabilidad externa.

Localización: Ubicación geográfica de un pozo.

Lodo: Fluido que se hace circular durante la perforación de un pozo con el fin de retirar los ripios del fondo del hoyo, enfriar la mecha y tubería de perforación, así mismo el lodo evita el derrumbe de las paredes del pozo.

Lutita: Arcilla de origen rocoso finamente granular.

LWD: Transmite información a la superficie, sobre las características geológicas que incluye la densidad, porosidad, resistencia, Pseudos-calibrador, inclinación en la presión, y de resonancia magnética.

Método de mínima curvatura: Método que presupone que el pozo es un arco esférico con mínimo de curvatura, que hay un máximo de radio de curvatura entre puntos o estaciones.

MWD: Transmite información a la superficie mientras perfora, que incluye presión, temperatura, torque, torsión entre otros.

Norte Magnético: Se habla de norte magnético al referir la dirección desde cualquier punto en la superficie terrestre al polo norte magnético.

Norte Verdadero: Es la dirección del polo norte geográficamente hablando, ubicado sobre el eje de rotación de la Tierra.

Objetivo: Punto fijo del subsuelo en una formación que debe ser penetrado con un hoyo o pozo desviado o vertical.

Pads: es el actuador del sistema RSS – Empuje la mecha (*push the bit*)

Pérdida de Circulación: el resultado de la fuga de fluido de perforación dentro de la formación a través de fisuras, medios porosos o dentro de fracturas

Perdida de presión: disminución de presión en un conducto o espacio anular, debido a la velocidad del líquido en el conducto, las propiedades del fluido, la condición de la pared de la tubería y la alineación de la tubería.

Perforación Direccional Controlada.: Es la ciencia de desviar un pozo a lo largo de un curso planeado hasta un objetivo en el subsuelo, cuya localización está en una distancia y una dirección lateral desde la vertical y a una profundidad vertical específica.

Presión Diferencial: diferencia de presión entre la presión hidrostática de la columna de fluido de perforación y la presión de la formación a cualquier profundidad determinada del pozo.

Pozo: Hoyo que se perfora para buscar o poner a producir hidrocarburos.

Presión: Es la fuerza ejercida sobre una superficie por unidad de área.

Profundidad Medida (MD): Es la profundidad en el pozo direccional, que se hace con la medición de la sarta (tubería) de perforación, midiendo la longitud del hoyo.

Profundidad vertical verdadera (TVD): Es la distancia vertical de cualquier punto dado del hoyo a la planchada del Taladro.

Punto de arranque (KOP): Profundidad del hoyo en la cual se coloca la herramienta de deflexión inicial y se comienza el desvío del pozo.

Registro: Conjuntos de medidas diversas en un pozo, que permiten la determinación de los tipos de roca, el contenido de fluido, los resultados de las diversas operaciones como cementación, dirección del hoyo y otros.

Revestidor: es una tubería que se utiliza para recubrir las paredes del pozo con el Propósito general de protegerlo.

Rodamientos: Son elementos mecánicos encargados de reducir la fricción entre un eje y los componentes unidos a él, soportando cargas radiales y axiales inducidas por esfuerzos del mismo corte.

Rotor: Parte móvil de un motor de fondo.

RSS: Sistema de Navegación con Rotación continua, es una herramienta diseñada para perforar direccionalmente con rotación continua de la superficie, eliminando la necesidad de deslizar con motor de fondo.

Rumbo de la formación: Rumbo de un estrato de formación, es la intersección entre el estrato y un plano horizontal medido desde el plano Norte – Sur.

Sección aumentada: Parte del hoyo, después del arranque inicial donde el ángulo de desvía o inclinación aumenta.

Sección de disminución: Parte del hoyo después de la sección tangencial donde el ángulo de inclinación disminuye.

Sección tangencial: Parte del hoyo después del incremento del ángulo de inclinación, donde este y la dirección del pozo debe mantenerse constante.

SideTrack: Es el caso de un pozo, en proceso de perforación que no "marcha" según la trayectoria programada, bien sea por problemas operacionales o fenómenos inherentes a las formaciones atravesadas. También pozos ya perforados a los cuales se le desea abandonar el hoyo viejo por diversos problemas como: producción de fluidos indeseables, arena, pescados y otros.

Survey: Medición por medio de instrumentos, del ángulo de inclinación y de la dirección o rumbo en cierto punto (estación) del hoyo desviado.

Tasa de incremento de ángulo: Número de grados de aumento del ángulo de inclinación sobre una longitud específica.

Tasa de disminución de ángulo: Número de grados de disminución del ángulo de inclinación sobre una longitud específica.

Torque: medida de la fuerza o esfuerzo aplicado a un eje, causando su rotación. En un equipo de perforación rotatorio, esto se aplica específicamente a la rotación de la tubería de perforación, en lo que se refiere a su acción contra el calibre del pozo. El torque puede generalmente ser reducido mediante la adición de varios aditivos al fluido de perforación.

Zapata: Extremo inferior de la tubería de revestimiento que sirve para el anclaje contra el fondo del pozo.