

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE LA ROP EN LOS CAMPOS PETROLEROS DEL NORTE DEL ESTADO MONAGAS MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL ROPO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Brs. Díaz R. Luis B.,

Para optar al Título de

Ingeniero de Petróleo

Caracas, Octubre 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE LA ROP EN LOS CAMPOS PETROLEROS DEL NORTE DEL ESTADO MONAGAS MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL ROPO

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Adrián Amaro Luna

TUTOR ACADÉMICO: Ing. Pedro Díaz

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Brs. Díaz R. Luis B.,

Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, Octubre 2014

Caracas, Octubre de 2014

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 el Bachiller Luis Beltran Díaz Reyes, titulado:

“OPTIMIZACIÓN DE LA ROP EN LOS CAMPOS PETROLEROS DEL NORTE DEL ESTADO MONAGAS MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL ROPO”

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



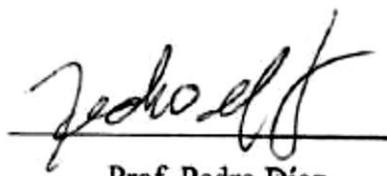
Prof. René Rojas

Jurado



Prof. Pedro Martorano

Jurado



Prof. Pedro Díaz

Tutor Académico

Diaz R., Luis B.

**OPTIMIZACIÓN DE LA ROP EN LOS CAMPOS PETROLEROS DEL
NORTE DEL ESTADO MONAGAS MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA
COMPUTACIONAL ROPO**

Tutor académico: Prof. Pedro Díaz. Tutor industrial: Ing. Adrián Amaro Luna.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería de Petróleo.

Año 2014, 92 p.

Palabras Claves: optimización de ROP, tasa de penetración, peso sobre la mecha, WOB, revoluciones por minuto, RPM, campo Orocual (Edo. Monagas).

Resumen. La presente investigación busca comprobar la factibilidad del uso del programa ROPO durante las perforación direccionales de los pozos petroleros en los campos del norte del estado Monagas; el cual, es capaz de recomendar valores de peso sobre la mecha y revoluciones por minutos para ser aplicados a la tubería de perforación todo esto en función de poder optimizar la tasa de penetración; en relación a las actuales que son bastante bajas, por el orden de los 30 pies/horas de promedio aproximadamente. Para comprobar esto se decidió usar el programa durante la perforación del pozo 1, en la sección de 17 ½” que se perforó con una mecha PDC bi-centrica 14 ½” x 17 ½”. El programa fue utilizado en aproximadamente 514 pies de perforación rotacional, y en efecto se logró una tasa de penetración promedio cercana a los 39 pies/hora, significando esto un ahorro de más del 20 por ciento en relación a los tiempos de perforación, con un aprovechamiento conjunto de los dos valores recomendados por ROPO, superior al 76 por ciento. Este resultado demuestra que con un poco más de conocimiento y con mayor uso del programa, los resultados se podrían mejorar logrando mayores tasas de penetración y consecuentemente con ello menores tiempos de perforación.

DEDICATORIA

A mi padre Luis Beltrán Díaz, que Dios lo tenga en la gloria el cual me apoyo incondicionalmente en todo lo que pudo, sé que donde quiera que te encuentres, estas muy orgulloso de mi.

A mi madre Maritza Verónica Reyes, por su apoyo a lo largo de mi carrera universitaria y mi vida, mucho de lo que soy hoy se lo debo a ella.

A mis dos hermanos Juan Diaz y Maritza Diaz, por estar ahí cuando los he necesitado para cualquier cosa y por estar juntos desde que nacieron.

A la señora María de Graterol, su esposo Rafael Graterol y sus hijos Moisés y Rubén Graterol, los cuales son como una segunda familia para mi me han apoyado en todo momento desde que nos conocimos.

A mi tía Fidelina Reyes, a su esposo e hijos los cuales son mis primos y quiero mucho. Desde mis primeros años de vidas pase mucho tiempo en su casa, compartiendo y aprendiendo sus costumbres y valores, cosa que me ha ayuda a ser quien soy día.

AGRADECIMIENTOS

A Dios ante todo, por darme la vida y permitirme alcanzar mis metas y ser la persona que hoy soy.

A la Universidad Central de Venezuela, por darme la oportunidad de formarme como profesional en sus aulas de clase, a los profesores que durante todos estos años de estudio fueron parte fundamental en mi desarrollo como persona y como futuro ingeniero. A mi padre, que en paz descansa, el cual falleció al comienzo de mi carrera universitaria, pero que siempre estuvo allí apoyándome incondicionalmente y a mi madre, que siempre ha estado pendiente de mí, dándome su apoyo y junto a mi padre me enseñaron e inculcaron los valores que hoy tengo.

A mis hermanos Juan Díaz y Maritza Díaz por apoyarme en lo que pudieron y por estar siempre cuando los necesité.

A mi familia en general, por ayudarme de una u otra forma, especialmente a mi tía Fidelina Rondón, su esposo e hijos, con los cuales compartí mucho de niño y a los que le debo mucho de la persona que hoy soy y los valores que hoy tengo.

A mis compañeros de clase, con los cuales compartí de una u otra manera durante la carrera, en especial a Andrés Ache, Auri Carrasco, Jean David, Gerardo Rumbos, Jennifer Mendoza, Diana Marrero, Pierina Martínez, Isbelis Romero, Christian Brito y Eliana Cortez con los cuales compartí innumerables horas de estudio y que no solo fueron mis compañeros de clase sino también mis amigos, le doy gracias a Dios de haber tenido la oportunidad de estudiar con ellos, y a Eliana por haber estado conmigo durante toda la carrera, desde mi primer día de clases, y hasta en mis pasantías de tesis, excelente compañera y amiga.

Al profesor Pedro Díaz, por ser amigo y guía. Gracias por apoyarme en la carrera y en especial en la realización de este trabajo, que aun mis perdidas, siempre estuvo para brindar su apoyo y colaboración.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
ANTECEDENTES.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
ALCANCE.....	4
JUSTIFICACIÓN.....	6
CAPÍTULO II.....	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Perforación de pozos.....	8
2.2 Limpieza del hoyo.....	8
2.3 Factores que afectan la limpieza del hoyo.....	9
2.4 Etapas en la perforación.....	12
2.5 Herramientas de subsuelo.....	12
2.6 Mecha o Barrena.....	13
2.6.1 Barrena de compacto de diamante policristalino (PDC).....	13
2.7 Técnicas direccionales aplicadas en la perforación.....	13
2.7.1 Método de rotación.....	13
2.7.2 Método de deslizar.....	14
2.8 Parámetros operacionales.....	16
2.9 Evaluación de formaciones.....	23
2.10 Propiedades físicas de las rocas.....	24
2.10.1 Clivaje.....	24
2.10.2 Fractura.....	24

2.10.3 Dureza.....	24
2.10.4 Rocas sedimentarias.....	24
2.11 Clasificación de las rocas según su característica.....	24
2.11.1 Brecha.....	24
2.11.2 Conglomerados.....	24
2.11.3 Calizas.....	25
2.11.4 Margas.....	25
2.11.5 Dolomita.....	25
2.11.6 Esquisto.....	25
2.11.7 Pedernal.....	25
2.11.8 Lutita.....	25
2.11.9 Arenisca.....	26
2.12 Impacto geológico en la perforabilidad.....	26
2.13 Selección de brocas de diamantes.....	27
2.13.1 Tipo de roca.....	27
2.13.2 Litología.....	27
2.13.3 Características litológicas.....	27
2.13.4 Fracturados o nodulares.....	28
2.13.5 Tendencias de desviación.....	28
2.13.6 Vibración.....	28
2.13.7 Selección por medio de Registros Geofísicos.....	29
2.13.8 Análisis de resistencia a la compresión.....	30
2.14 Selección de la mecha PDC en función de la formación a perforar.....	32
2.15 Factores que afectan el desgaste de las mechas.....	32
2.15.1 Factores Geológicos.....	32
2.15.1.1 Abrasividad.....	32
2.15.1.2 Resistencia específica de la roca.....	32
2.15.2 Factores operativos.....	32
2.15.2.1 Peso sobre la mecha.....	33
2.15.2.2 Velocidad de rotación.....	33

2.15.2.3 Limpieza en el fondo del pozo.....	34
2.16 Funcionamiento de ROPO.....	34
2.17 Limites operacionales de ROPO.....	36
CAPÍTULO III.....	37
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	37
3.1 Ubicación Geográfica del Área.....	37
3.2 Generalidades del Campo.....	38
3.3 Descripción Geológica del Campo Orocual.....	38
3.4 Correlación Estratigráfica de la Cuenca Oriental de Venezuela.....	40
3.4.1 Formación Las Piedras.....	40
3.4.2 Formación Carapita.....	41
CAPÍTULO IV.....	44
MARCO METODOLÓGICO.....	44
4.1 Tipo y Diseño de la Investigación.....	44
4.2 Población y Muestra.....	45
4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	45
4.4 Procedimiento.....	45
Etapa 1: Revisión Bibliográfica.....	45
Etapa 2: Desarrollo, elaboración y revisión de procedimientos.....	45
Etapa 3: Discusión de resultados.....	46
Etapa 4: Conclusiones y recomendaciones.....	46
Etapa 5: Redacción y Presentación del Trabajo Especial de Grado.....	46
4.5 Características del pozo donde se usará ROPO.....	46
4.5.1 Diagrama de completación.....	48
4.5.2 Trayectoria del pozo.....	49
4.5.3 Análisis de riesgo.....	50
4.5.4 Estado actual del pozo.....	51
4.6 Funcionamiento de ROPO.....	52
4.7 Limites operacionales de ROPO.....	54
4.7.1 Máximo WOB.....	55

4.7.2	Mínimo/máximo RPM en superficie.....	56
4.7.3	Torque en superficie.....	57
4.7.4	ROP.....	58
4.7.5	Tasa de flujo.....	59
4.8	Monitoreo de parámetros durante la perforación.....	59
4.8.1	Torque en superficie.....	60
4.8.2	Choques y vibraciones.....	60
4.8.3	Arrastre.....	61
4.8.4	Pesos de la tubería.....	62
4.8.5	WOB.....	62
4.8.6	RPM en superficie.....	63
4.8.7	Emboladas de las bombas.....	63
4.8.8	Tipo de perforación y profundidad de la misma.....	64
4.8.9	Características del lodo.....	65
4.9	Todo listo para el uso de ROPO.....	66
CAPÍTULO V.....		67
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		67
5.1	Ensamblajes de fondo usados en la sección.....	67
5.2	WOB y RPM promedio usados durante la perforación en modo rotacional de la sección 17 ½” del pozo 1.....	74
5.3	WOB y RPM promedio usados durante el uso de ROPO en la perforación en modo rotacional de la sección 17 ½” del pozo 1.....	76
5.4	RPM usados durante la perforación de la sección 17 ½” del pozo 1.....	78
5.5	RPM usados durante el uso de ROPO en la perforación de la sección 17 ½” del pozo 1.....	80
5.6	Características del lodo en la perforación de la sección 17 ½” del pozo 1.....	81
5.7	Tiempos de perforación totales de la sección 17 ½” del pozo 1.....	82
5.8	Tiempos de perforación mientras se usó ROPO.....	83
5.9	Porcentaje de cumplimiento por parte de los perforadores de las recomendaciones de WOB y RPM dadas por ROPO durante su uso.....	85

5.10 Comparación final de la perforación utilizando ROPO y sin el uso de él.....	86
5.11 Ventana operacional con la cual se puede lograr optimizar la ROP.....	88
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍA.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Flujo del Lodo por el espacio anular.....	9
Figura 2.2 Motor de fondo con inclinación.....	15
Figura 2.3 Profundidad desarrollada.....	16
Figura 2.4 Profundidad vertical verdadera.....	17
Figura 2.5 Mecha PDC bi-céntrica 14 ½” por 17 ½”.....	18
Figura 2.6 Sarta en cuña.....	20
Figura 2.7 Sarta en cuña, taladro PDV-151.....	21
Figura 2.8 Sarta Fuera de cuña en el aire.....	22
Figura 2.9 Sarta Fuera de cuña en el aire.....	23
Figura 2.10 <i>ROPOTechnology Watch_D&M</i>	35
Figura 3.1 Ubicación Geográfica del Campo Orocual.....	37
Figura 3.2 La Estratigrafía de la Cuenca Oriental de Venezuela.....	39
Figura 3.3 Profundidades estimadas de las formaciones del Campo Orocual Somero.....	43
Figura 4.1 Diagrama de completación del pozo 1.....	48
Figura 4.2 Vista de perfil de la trayectoria del pozo 1.....	50
Figura 4.3 Condición del pozo 1, antes de perforar la zona donde se implementará el programa ROPO.....	52
Figura 4.4 <i>ROPOTechnology Watch_D&M</i>	53
Figura 4.5 Sensor de peso.....	56
Figura 4.6. <i>Top Drive</i> NOV, tds-4.....	57
Figura 5.1 Ensamblaje de fondo número uno utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	70
Figura 5.2 Ensamblaje de fondo número dos utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	72
Figura 5.3 Ensamblaje de fondo número tres utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	74

Figura 5.4 ROP promedio por cada valor de WOB aplicado durante la perforación del pozo 1 en la sección de 17 ½”	76
Figura 5.5 ROP promedio por cada valor de número de revoluciones por minuto aplicado durante la perforación del pozo 1 en la sección de 17 ½”	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Impacto geológico en la perforabilidad.....	26
Tabla 4.1 Riesgos más importantes durante la perforación del pozo 1.....	51
Tabla 4.2 Límites de los parámetros de perforación establecidos inicialmente para el uso de ROPO.....	55
Tabla 5.1 Ensamblaje de fondo número uno utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	69
Tabla 5.2 Ensamblaje de fondo número dos utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	70
Tabla 5.3 Ensamblaje de fondo número tres utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	72
Tabla 5.4 Valores en lb-f de peso sobre la mecha aplicados durante la perforación rotacional del pozo 1 en la sección 17 ½”.....	75
Tabla 5.5 Valores de peso sobre la mecha usados durante la implementación de ROPO en la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	77
Tabla 5.6 Valores de revoluciones por minutos en superficie usados en la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	79
Tabla 5.7 Valores de revoluciones por minutos en superficie usados durante el uso de ROPO en la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	80
Tabla 5.8 Valores promedios de las propiedades del lodo a la salida del pozo durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	81
Tabla 5.9 Tasa de flujo promedio empleada durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.....	81
Tabla 5.10 Tiempos de perforación y ROP promedio durante la realización del pozo 1, sección 17 ½”.....	82
Tabla 5.11 Tiempos de perforación mientras se usó ROPO.....	84
Tabla 5.12 Tiempos de perforación mientras se usó ROPO.....	85
Tabla 5.13 Porcentaje de cumplimiento de los valores recomendados por ROPO por parte de los perforadores del taladro.....	85

Tabla 5.14 Promedios y valores resaltantes durante la perforación rotacional del pozo 1 sección 17 ½”.....	86
Tabla 5.15 Tiempo ganado mediante el uso de ROPO durante la perforación rotacional del pozo 1 sección 17 ½”.....	86
Tabla 5.16 Ventana operacional de WOB y RPM en superficie que pueden optimizar la ROP.....	88

INTRODUCCIÓN

Venezuela lleva cerca de cien años de producción de petróleo a nivel comercial, en los cuales ha extraído el petróleo de los yacimientos convencionales de muy fácil acceso. Desde finales de los 90 y principios de este siglo, la creciente demanda de petróleo a nivel mundial ha elevado sustancialmente los precios de este, convirtiendo yacimientos que en el pasado no eran rentables, en económicamente rentables.

Esto a su vez ha creado la necesidad de hacer pozos cada vez más profundos y de mayor complejidad, aumentando los riesgos aunados a la perforación y haciendo casi indispensable la realización de pozos direccionales.

La empresa Schlumberger proporciona los servicios de perforación direccional y corrida de registro durante la perforación a PDVSA, a través de su segmento *Drilling & Measurements* (D&M). Los campos del norte del estado Monagas, forman parte del área de trabajo de Schlumberger y del segmento como tal, en esta zona, los pozos superan generalmente los 15.000 pies de profundidad, con perforaciones extremadamente lentas debido a las bajas tasas de penetración (ROP, *Rate of Penetration*, por sus siglas en inglés) y a los retos direccionales que representan perforar a tanta profundidad.

A lo largo de la perforación de los pozos direccionales en esta área, se atraviesan una gran cantidad de formaciones litológicas, entre ellas se destacan miles de pies de lutitas y arcillas muy compactas y cementadas las cuales, al estar expuestas mucho tiempo al lodo de perforación pueden causar problemas de derrumbe e hinchamiento, ocasionando problemas a la hora de bajar los revestidores.

Con el propósito de optimizar la ROP y disminuir así los tiempos de perforación en estas locaciones, se utilizará el programa computacional ROPO (*Rate of Penetration Optimizer*, por sus siglas en inglés), desarrollado hace algunos años por la empresa Schlumberger, el cual genera valores de recomendación tales como peso sobre la mecha (WOB, *Weight On Bit* por sus siglas en inglés) y revoluciones por

minuto(RPM), mediante el uso de algoritmos matemáticos, para ser aplicados en las operaciones de perforación a determinadas condiciones.

El programa ROPO hasta los momentos no ha sido utilizado en Venezuela, pero si en otros países como Ecuador y México donde ha probado ser eficiente, logrando muy buenos resultados.

Gracias a la aplicación en campo de este programa durante la perforación se podrán comparar los valores actuales de ROP sin el uso de ROPO y los valores con el uso del programa y así medir su eficiencia, basado en esto, poder determinar los parámetros de perforación óptimos a utilizar en los campos petroleros del norte del estado Monagas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ROP es un parámetro expresado en pies/hora que indica la capacidad o velocidad que ha tenido la mecha en atravesar las formaciones en la cual está perforando. La ROP depende de muchos factores, algunos geológicos, como el tipo de formación, grado de compactación, dureza, buzamiento, etc., y otros parámetros mecánicos u operacionales, tales como tipo de ensamblaje de fondo (BHA, *BottonHoleAsamble*, por sus siglas en inglés), tipo de mecha, tipo de tubería de perforación, plan direccional, etc.

Durante la perforación de pozos direccionales en el norte del estado Monagas, se ha notado bajas ROP la cual se busca optimizar mediante el uso del programa computacional ROPO desarrollado hace algunos años por Schlumberger y el cual es capaz de recomendar valores de WOB y RPM para ser aplicados a la sarta de perforación y con los cuales se podrán determinar los valores que generen mayor tasa de penetración durante la perforación.

ANTECEDENTES

Desde el inicio de las perforaciones petroleras se ha buscado de qué manera se puede aumentar u optimizar la tasa de penetración para de esta manera disminuir los tiempos de perforación. A lo largo de los más de 100 años que tienen las perforaciones de pozos petroleros se ha logrado establecer que los parámetros que influyen directamente en la tasa de penetración son el peso sobre la mecha y el número de revoluciones por minutos de la sarta de perforación y estas a su vez se ven influenciadas por la capacidad de limpieza del hoyo, el diseño del BHA más específicamente el tipo de mecha y el tipo de formación que se está perforando.

OBJETIVO GENERAL

Optimizar la ROP, en los campos petroleros del norte del estado Monagas, mediante el uso del programa computacional ROPO, de la empresa Schlumberger.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los parámetros de perforación que influyen la ROP.
- Realizar una metodología para el análisis de la información disponible.
- Recolectar datos en campo para establecer los parámetros de perforación utilizados hasta ahora y las ROP obtenidas con estos.
- Explicar el funcionamiento básico del programa computacional ROPO.
- Obtener las ROP utilizando el programa computacional ROPO para generar los parámetros de perforación que serán implementados.
- Comparar los valores de ROP y tiempo de perforación obtenidos usando los parámetros convencionales y los proporcionados por ROPO.
- Optimizar la perforación en las formaciones del norte del estado Monagas en función del aumento de la ROP.

ALCANCE

Se utilizará el programa computacional ROPO de la empresa Schlumberger, mediante el cual, se buscará optimizar la ROP de los pozos perforados en los campos petroleros ubicados al norte del estado Monagas, los cuales actualmente presentan valores muy bajos que alcanzan hasta tres pies por hora.

Se comenzará explicando el funcionamiento básico de ROPO, el cual, es un programa computacional que mediante algoritmos matemáticos es capaz de establecer o calcular los valores recomendados de WOB y RPM que se le deben aplicar a la tubería de perforación para mejorar la ROP.

ROPO ha sido utilizado con éxito en otros países, tal es el caso de Ecuador y México, logrando aumentar la ROP y disminuyendo con esto los tiempos de perforación, pero hasta los momentos no ha sido utilizado en Venezuela.

Mediante el uso del programa ROPO se podrán aplicar los valores arrojados por este en las perforaciones de pozos en el norte del estado Monagas, y de esta manera poder comparar los resultados obtenidos en las ROP cuando se usa ROPO y cuando no se usa, y determinar la eficiencia de su aplicación.

Al final, gracias a los resultados proporcionados por ROPO, y sí los mismos son eficientes, se podrá determinar los parámetros óptimos de perforación de las distintas formaciones en los capos del norte del estado Monagas.

JUSTIFICACIÓN

EL oriente de Venezuela, específicamente el norte del estado Monagas, se caracteriza por la perforación de pozos direccionales de más de 15.000 pies de profundidad, los cuales son todo un desafío para los ingenieros de perforación, debido a la compactación o cementación de la roca y a todo el peso ejercido por las formaciones que están por encima de estas, lo cual hace que las perforaciones en esta zona sean lentas, con ROP bajas, y con parámetros de perforación tales como WOP, RPM, galonaje de las bombas, etc., variables, los cuales deben ser ajustados constantemente por los ingenieros direccionales para poder cumplir así con la trayectoria planteada por PDVSA en el plan direccional.

Durante la perforación de los pozos, se atraviesan miles de pies de lutitas y arcillas las cuales por condiciones naturales tienden a derrumbarse y cerrar el pozo, a medida que están expuestas durante largo tiempo al lodo de perforación, de aquí que, a mayor velocidad de perforación, menor será el tiempo que estas rocas estén expuestas y menor será el riesgo de que el hoyo se cierre, y bien existan problemas de arrastre al sacar la tubería o no se pueda bajar el revestidor una vez se termine de perforar la sección del pozo.

LIMITACIONES

La poca información y experiencia con la que cuentan los ingenieros de perforación en el país, en cuanto al uso y características del programa ROPO, ya que el mismo no ha sido utilizado en Venezuela.

También están las limitaciones planteadas por el propio programa a utilizar (ROPO), el cual está diseñado para trabajar con BHA convencionales, con mechas PDC y no con mechas tricónicas, solamente cuando se está rotando, no recomendará ningún valor mientras se está deslizando. Esto limita los pozos y las veces en la cual se pueda utilizar el programa durante la perforación.

Por otra parte la eficiencia del programa puede verse reducida por:

- Ventana de lodo estrecha
- Plan direccional complejo
- Alto torque
- Atascamiento, choque y vibraciones
- Tendencias direccionales de la sarta
- Formaciones altamente estratificadas

CAPÍTULO II

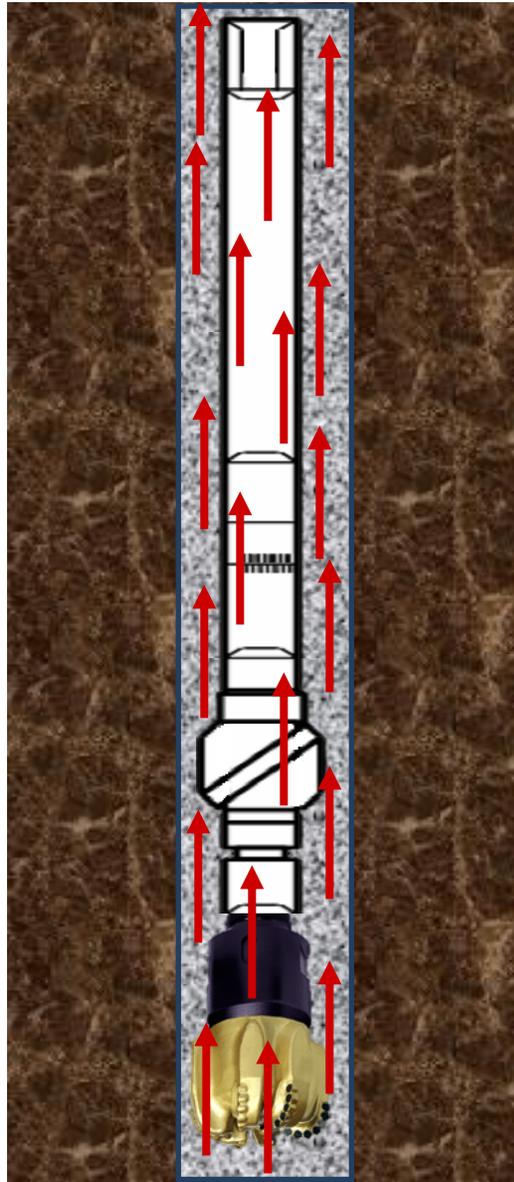
MARCO TEÓRICO

2.1 Perforación de pozos

La única manera de saber realmente si hay acumulaciones de petróleo en el lugar donde la investigación geológica propone, es mediante la perforación de un hoyo o pozo. La profundidad y longitud de un pozo depende de la ubicación en la cual se encuentre la estructura geológica y de las características de esta, de acuerdo con la profundidad proyectada del pozo, las formaciones que se van a atravesar y las condiciones propias del subsuelo, se selecciona el equipo de perforación más indicado.

2.2 Limpieza del hoyo

Durante la perforación de un pozo, los ripios o recortes de las formaciones que van siendo atravesadas por la mecha necesitan ser sacados a superficie, para así evitar que puedan caer por gravedad al fondo del hoyo, lo cual, perjudica el proceso de perforación. El encargado de la limpieza del hoyo es el lodo de perforación el cual al salir por la mecha a una cierta presión choca con el fondo del hoyo y comienza a subir por el espacio anular existente entre las paredes del hoyo y la tubería de perforación, llevándose consigo los ripios que están siendo cortados por la mecha en ese momento. Tal como se muestra en la figura 2.1.



↑ Flujo del lodo

Figura 2.1 Flujo del Lodo por el espacio anular.

2.3 Factores que afectan la limpieza del hoyo

La limpieza del hoyo durante la perforación puede verse afectada por distintos factores que pueden disminuir la eficiencia de la misma y causar que no todos los ripios que están siendo cortado por la mecha salgan a superficie en el tiempo correcto,

trayendo como consecuencia que parte de estos ripios puedan acumularse en el fondo del hoyo, embolando con ello la mecha y evitando que esta pueda perforar, o peor aún depositarse en cualquier lugar a lo largo del pozo, disminuyendo con así su diámetro, pudiendo con esto causar problemas de atascamiento a la hora de sacar la tubería del hoyo. Entre los factores que afectan la limpieza del hoyo, tenemos los siguientes.

- **Viscosidad de Embudo**

El lodo debe ser lo suficientemente viscoso y de gran fluidez en el anular para proveer adecuada limpieza al pozo, o sea, que los recortes o ripios sean llevados hasta superficie, a esto se le conoce como, capacidad de levantamiento del lodo.

La viscosidad de embudo se mide usando el viscosímetro de Marsh. La viscosidad de embudo se usa como indicador relativo de la condición del fluido. No proporciona suficiente información para determinar las propiedades reológicas o las características de flujo de un fluido. Debería usarse en el campo para detectar los cambios relativos en las propiedades del fluido. Además, ningún valor en particular de la viscosidad de embudo puede ser adoptado como valor representativo de todos los fluidos. Lo que produce buenos resultados en un área puede fallar en otra; sin embargo, se puede aplicar una regla general a los fluidos de perforación a base de arcilla. La viscosidad de embudo de la mayoría de los fluidos se controla a cuatro veces la densidad o menos. Sin embargo hay ciertas excepciones, como en las áreas donde se requiere el uso de fluidos de alta viscosidad. Los sistemas de polímeros e inversión inversa (base aceite o base sintético) no siguen necesariamente estas reglas.

- **Viscosidad Plástica**

Es la resistencia de un fluido a fluir, causada principalmente por la fricción mecánica entre las partículas suspendidas y por la viscosidad de la fase fluida. Es afectada por el tamaño, concentración y forma de las partículas suspendidas en el lodo. Todo aumento en la superficie total expuesta de los sólidos se reflejará en el aumento de los valores de viscosidad plástica. Esta propiedad se calcula midiendo los esfuerzos cortantes a 600 y 300 r.p.m. en el viscosímetro FANN.

Un aumento de la viscosidad plástica puede significar un aumento en el porcentaje en volumen de sólidos, una reducción del tamaño de las partículas de los sólidos, un cambio de la forma de las partículas o una combinación de estos efectos. Cualquier aumento del área superficial total de los sólidos expuestos se reflejará en un aumento de la viscosidad plástica. Por ejemplo, en una partícula sólida que se parte por la mitad, el área superficial expuesta combinada de los dos trozos será más grande que el área superficial de la partícula original. Una partícula plana tiene más área superficial expuesta que una partícula esférica del mismo volumen. Sin embargo, la mayoría de las veces, el aumento de la viscosidad plástica resulta del aumento en el porcentaje de sólidos. Esto puede ser confirmado mediante los cambios de densidad y/o el análisis en retorta.

Algunos de los sólidos contenidos en el fluido están presentes porque fueron añadidos intencionalmente. Por ejemplo, la bentonita es eficaz para aumentar la viscosidad y reducir la pérdida de fluidos, mientras que la barita es necesaria para la densidad. Como regla general, la viscosidad del fluido no debería ser más alta que la que se requiere para la limpieza del pozo y la suspensión de barita. Cuando un fluido no está cumpliendo estas funciones, lo más conveniente sería aumentar el punto cedente y los valores de bajo esfuerzo de corte (6 y 3 r.p.m.) y no la viscosidad plástica.

- **Punto Cedente**

Es la fuerza requerida para iniciar el flujo. Es la resistencia de un fluido a fluir, causada por la fuerza de atracción entre las partículas, producto de la interacción de sus cargas eléctricas. La magnitud de esta fuerza es una función del tipo y concentración de los sólidos y las cargas asociadas con ellos y de la concentración iónica de las sales contenidas en la fase fluida del lodo. Es una medida independiente del tiempo.

- **Fuerza Gel**

Cuando un fluido de perforación ha sido sometido a velocidades de corte cero o casi cero durante cierto tiempo, el fluido tiende a desarrollar una estructura de gel rígida o

semirígida. Esta propiedad de los fluidos se llama tixotropía. Esta propiedad permite que el fluido mantenga las partículas en suspensión cuando se ha detenido la circulación en el pozo.

La mayoría de los fluidos de perforación base agua demuestran esta propiedad, debido a la presencia de partículas cargadas eléctricamente o polímeros especiales que se enlazan entre sí para formar una matriz rígida. Las indicaciones de esfuerzo de gel tomadas con el viscosímetro FANN (VG) a intervalos de 10 segundos y 10 minutos, y a intervalos de 30 minutos para las situaciones críticas, proporcionan una medida del grado de tixotropía presente en el fluido. La resistencia del gel formado depende de la cantidad y del tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, de la temperatura y del tratamiento químico. Es decir que cualquier cosa que fomente o impide el enlace de las partículas, aumentará o reducirá la tendencia a gelificación de un fluido.

- **Velocidad de flujo en el anular**

Esta debe vencer la velocidad de asentamiento de las partículas, para obtener buena limpieza del hoyo y así evitar un aumento de la torsión, arrastre, presión hidrostática, atascamiento, disminución de la tasa de penetración o pérdidas de circulación.

2.4 Etapas en la perforación

Las etapas normales de una perforación, direccional u horizontal, son realizadas tomando en cuenta los tipos de pozo que serán construidos, el radio y el alcance que se van a plantear durante el proceso de perforación.

Los tipos de secciones de pozos a ser perforados son los siguientes:

- Pozo conductor.
- Pozo superficial.
- Pozo intermedio.

- Pozo productor.

En cada etapa se establecen las herramientas, técnicas, compañías de servicio responsable y procedimientos a seguirse durante la operación correspondiente.^[2]

2.5 Herramientas de subsuelo

Son todas aquellas herramientas utilizadas entre la mecha y la tubería de perforación, y las cuales se usan para facilitar y optimizar el proceso de perforación, proporcionando el peso sobre la mecha necesario para atravesar las formaciones en las direcciones e inclinaciones planificadas para el pozo, entre estas herramientas tenemos: motor de fondo, estabilizadores, porta mechas, tubería pesada, martillos para la hora de una pega y herramientas de medición de ser necesarias.

2.6 Mecha o Barrena

Es la herramienta de corte localizada en el extremo inferior de la sarta que se utiliza para cortar o triturar la formación durante el proceso de perforación. Se clasifican genéricamente de la siguiente manera:

- Barrenas Tricónicas
- Barrenas de Cortadores Fijos
- Barrenas Especiales^[3]

2.6.1 Barrena de compacto de diamante policristalino (PDC)

Las barrenas PDC pertenecen al conjunto de barrenas de diamante con cuerpo sólido y cortadores fijos. Su diseño de cortadores está hecho con diamante sintético en forma de pastillas (compacto de diamante), montadas en el cuerpo de los cortadores de la barrena.^[3]

2.7 Técnicas direccionales aplicadas en la perforación

Durante la perforación de un pozo direccional los ingenieros de perforación necesitan implementar varias técnicas para lograr construir el pozo con las características y

trayectoria deseadas. Para esto se basan en los dos modos que existen en la actualidad para perforar los pozos, uno de ellos es con la rotación completa de la sarta y el otro es con la rotación únicamente de la mecha y el resto de la sarta sin rotación.

2.7.1 Método de rotación

Es el método mediante el cual toda la sarta de perforación gira a unas determinadas revoluciones por minuto y junto con el peso aplicado sobre la mecha se logra atravesar las formaciones y construir el pozo. Cabe destacar que cuando se usa este método no se puede controlar la dirección de la perforación ya que, la mecha cortará las rocas en la dirección en la que le sea más fácil.

2.7.2 Método de deslizar

Mediante este método se atraviesan las formaciones subterráneas solamente girando la mecha de perforación y con el resto de la sarta estática (sin rotación), con este método se logra controlar la dirección del pozo y llevarlo por la trayectoria deseada. Para aplicar este método se debe contar con un motor de fondo el cual es el encargado de transmitir la fuerza torsional a la mecha para que solamente gire ella, también el motor debe tener una cierta inclinación, es decir, que no sea totalmente recto, ya que, con estose logra dar la dirección e inclinación deseada al pozo, como se muestra en la figura 2.2, en donde se observa que el pozo ya no es completamente vertical.

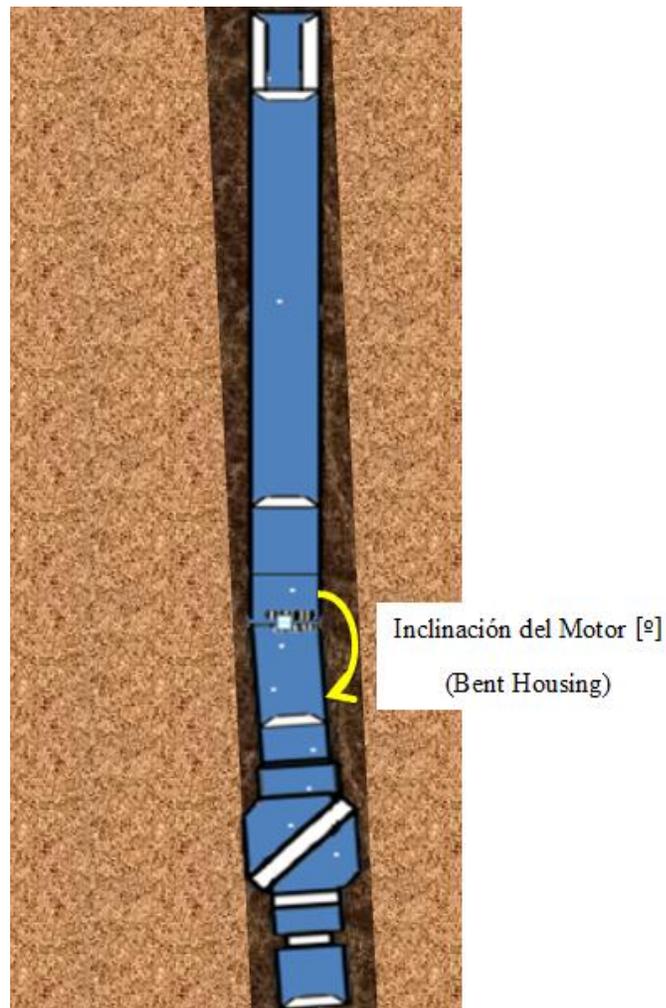


Figura 2.2 Motor de fondo con inclinación.

Esta trayectoria del pozo es lograda mediante el uso de herramientas MWD (*Measurement While Drilling*), las cuales son capaces de enviar a superficie la dirección e inclinación que lleva el pozo en determinados momentos, y también le indican a los perforadores direccionales la posición en la cual se encuentra la inclinación del motor y así poder ellos orientarlo para lograr la trayectoria de perforación deseada.

2.8 Parámetros operacionales

- **Profundidad del hoyo**

Es la profundidad hasta la cual se ha perforado el pozo, está por lo general se muestra en pies y no es más que la distancia que hay desde la mesa rotaria hasta la perforación más profunda realizada por la mecha en el hoyo.

Esta profundidad puede ser medida de dos maneras:

a) Profundidad medida/PD (*Measureddepth/MD*)^[12]

Es la distancia a lo largo de la trayectoria real del pozo, desde el punto de referencia en la superficie, hasta los puntos de registro direccionales. Esta profundidad siempre se conoce, ya sea contando la tubería o por el contador de profundidad de la línea de acero, figura 2.3.

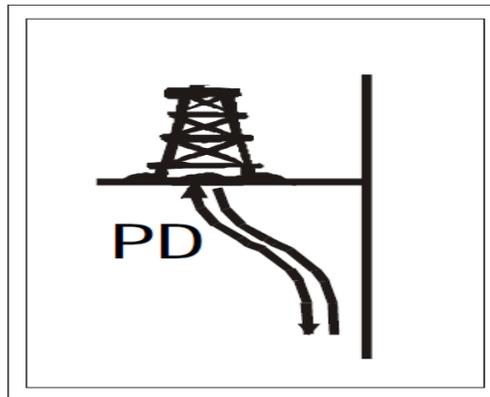


Figura 2.3 Profundidad desarrollada.^[12]

b) Profundidad vertical verdadera/PVV (*True vertical depth/TVD*)^[12]

Es la distancia vertical desde el nivel de referencia de profundidad, hasta un punto en la trayectoria del pozo, figura 2.4. Normalmente es un valor calculado.

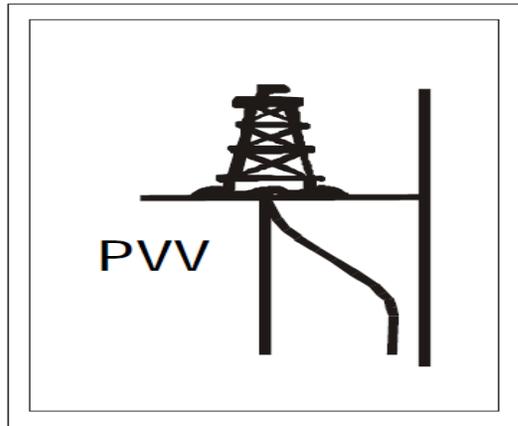


Figura 2.4 Profundidad vertical verdadera. ^[12]

- **Peso en el gancho**

Es el peso total de la tubería de perforación que está en el hoyo más el peso del *top drive*. Cabe destacar que la mayoría de los *top drive* usados actualmente en Venezuela tienen un peso entre 40.000 y 50.000 lb.

- **Peso sobre la mecha (WOB)**

Es la cantidad de peso que se deja caer sobre la mecha de perforación. Cuando la mecha está el fondo del hoyo se permite que el sistema de levantamiento del taladro no levante completamente el peso de la sarta, es decir que parte del peso de esta, se transmita a la mecha y la ayude en el proceso de perforación. Es por esto que cuando la sarta de tubería está totalmente en el aire el peso sobre la mecha es cero, o también puede estar la mecha en fondo, pero si la sarta tiene su peso total alzado por el sistema de levantamiento, el peso sobre la mecha también es cero. La eficiencia con que el peso aplicado llega a la mecha de perforación depende en gran manera del número de tubería extra pesada y barras de perforación dispuesta en el ensamblaje de la sarta.

Se podría decir que a mayor peso sobre la mecha más profundo y más grandes serán los cráteres causados por dientes de la mecha a la formación y mayor será la velocidad de perforación pero esto no siempre es así, existen muchos otros factores que influyen en el proceso.

En la actualidad existen mechas PDC denominadas bi-centricas, es decir que tienen dos centros, los cuales cambian dependiendo si se está o no aplicando peso sobre la mecha o si la misma está o no rotando. Por ejemplo, la figura 2.5 es una mecha bi-centrica 14 ½" x 17 ½", es decir que cuando no se le está aplicando peso a la mecha o se está rotando, puede ser mientras se repasa o se saca la sarta del hoyo, esta tendrá un diámetro de 14 ½", pero cuando se le aplique algún peso a la mecha o se rota, esta cambiara su centro y por tanto su diámetro, a 17 ½", es decir, que ella perfora hoyos de 17 ½".



Figura 2.5 Mecha PDC bi-centrica 14 ½" por 17 ½".

- **Velocidad de rotación en superficie(RPM)**

Es la velocidad a la cual gira la sarta de perforación, esta se expresa en revoluciones por minutos (rpm), y son controladas directamente por el perforador desde su consola, estas tienen un límite determinado por las características del taladro, la mecha, las formaciones a perforar, etc.

La velocidad de rotación influye junto con otros parámetros de perforación la tasa de penetración. A mayores velocidades de rotación es mayor número de impactos y cortes por unidad de tiempo que le ocasionan los dientes de la mecha a la formación, se podría decir entonces que a mayor RPM, mayor será la tasa de penetración, pero esto no es del todo cierto, ya que, se tiene que ver una relación entre la cantidad de ripios que la mecha está cortando y la cantidad de ripios que se están transportando a superficie, es decir, que para tener elevadas RPM y elevadas tasa de penetración también se tiene que tener una buena capacidad de limpieza del hoyo. Por otra parte en formaciones muy duras, altas RPM no ayudan mucho, ya que, los dientes de la mecha no logran perforar y cortar porciones de rocas, es por esto que se prefiere en estos casos bajas RPM y más peso sobre la mecha.

- **Tasa de penetración (ROP)**

Es la velocidad con la cual la mecha es capaz de atravesar las formaciones debajo de ella. Está expresada en pies/hora, y son muchos los parámetros que la afectan. Entre ellos tenemos, el peso sobre la mecha, las revoluciones por minuto de la tubería de perforación, el tipo de mecha, el tipo de formación, propiedades del lodo, entre muchos otros.

- **Estatus de la sarta**

Durante la construcción de un pozo la sarta puede estar en tres estados principales los cuales están directamente relacionados con la actividad que esté realizando en un momento determinado. Estas son:

a) En cuña: es cuando la sarta se encuentra anclada a la mesa rotaria por medio de unas cuñas, la sarta es colocada en cuña para hacer la conexión o desconexión de una nueva paraje de tubería. Esta condición deja a la sarta de tubería totalmente estática, sin ni siquiera darle la oportunidad de rotar. Tal como se muestra en la figura 2.6 en el panel de control de profundidad de la empresa Schlumberger y en la figura 2.7 en condiciones operacionales.

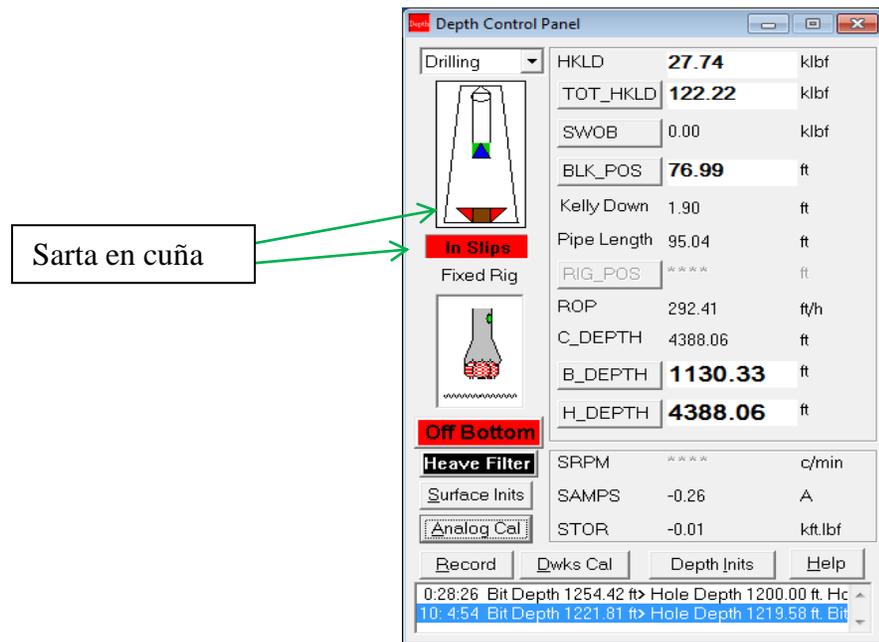


Figura 2.6 Sarta en cuña. ^[13]

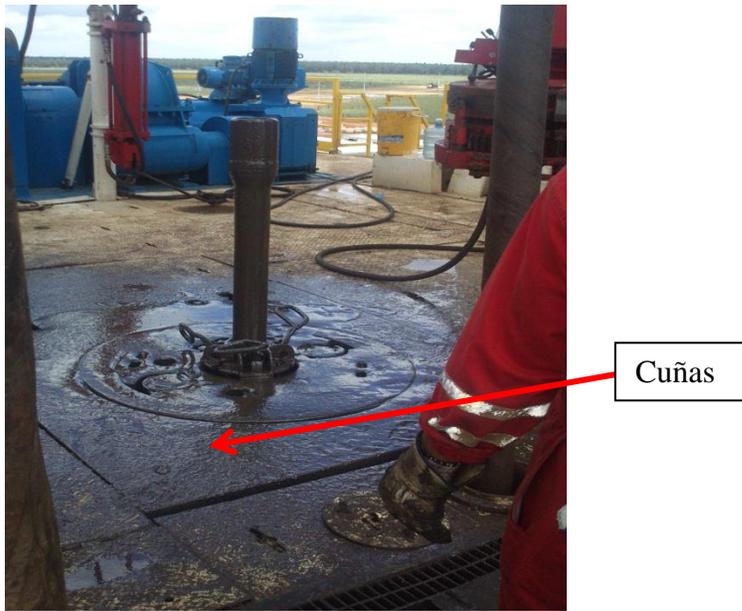


Figura 2.7 Sarta en cuña, taladro PDV-151.

b) Fuera de cuña en el aire: es cuando la sarta está sin las cuñas pero la mecha no está tocando fondo. Es la condición más común en la cual se encuentra la sarta, y se da cuando se está sacando o metiendo tubería en el hoyo, cuando se está repasando, cuando se están tomando los valores a una profundidad dada, cuando se está circulando, etc. Así como se muestra en la figura 2.10 en el panel de control de profundidad de la empresa Schlumberger.

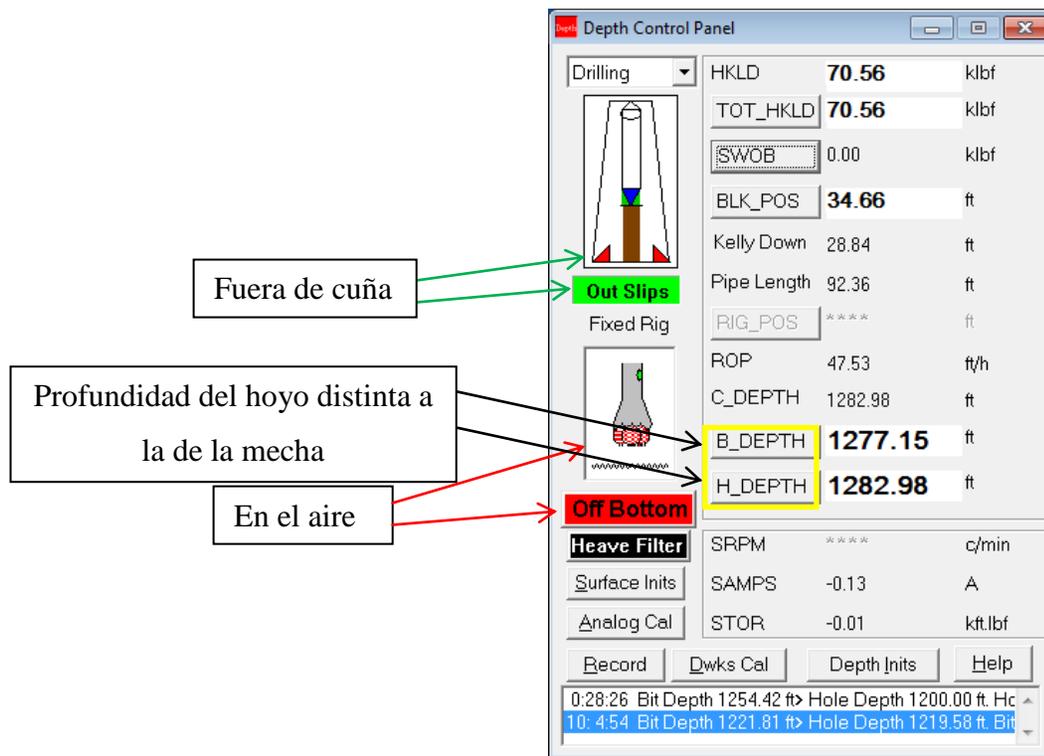


Figura 2.8 Sarta Fuera de cuña en el aire.^[13]

c) Fuera de cuña perforando: es cuando la sarta de tuberías se encuentra con la mecha en fondo y con las cuñas fuera de la mesa rotaria, es decir, sin cuñas. En este caso el la profundidad del hoyo debería ser igual a la profundidad de la mecha. Por otra parte la sarta podría estar rotando o deslizando. Esto dependerá de la manera como se necesite en ese momento perforar. Así como se muestra en la figura 2.9 en el panel de control de profundidad de la empresa Schlumberger.

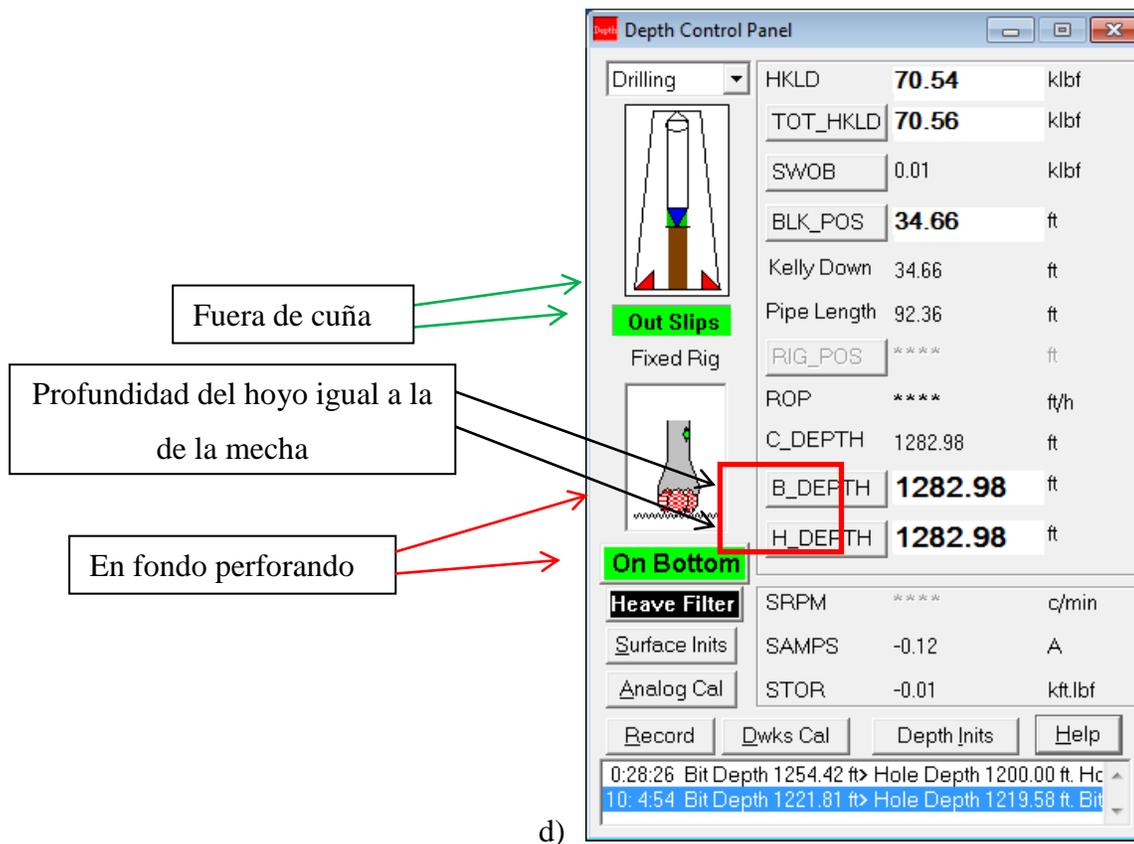


Figura 2.9 Sarta Fuera de cuña en el aire.^[13]

2.9 Evaluación de formaciones^[3]

Como minerales, las características individuales de cada roca varían mucho, tanto en apariencia como en composición. Aun la arcilla que es de grano fino y con un buen arreglo de sus granos parece ser una masa sin forma regular. La arenisca está compuesta por una parte de silicio y puede contenerkaolinita.

Es importante estudiar las propiedades y características físicas de los minerales que conforman a las rocas encontradas durante el proceso de perforación, así como su influencia en la selección de mechas y en la velocidad de penetración.

2.10 Propiedades físicas de las rocas^[3]

2.10.1 Clivaje

Son los bordes de separación en donde un material regularmente falla cuando se aplica una carga por compresión.

Términos tales como perfecto, desigual, duro y fácil se aplica a la habilidad para fracturarse de un mineral. Los minerales tienen diferentes niveles de clivaje en una o hasta tres direcciones.

2.10.2 Fractura

Son aquellos minerales sin planos de clivaje que se rompen de manera irregular cuando se perforan. Los términos usados para la descripción incluyen concoidal, tenue, parejo y fibroso.

2.10.3 Dureza

Se define como la habilidad de un material para ser rayado por otro. La escala de Mohs es la medida estándar. Utiliza el valor de 1 para el material más suave y el de 10 para el más duro.

2.10.4 Rocas sedimentarias

Para el caso de la perforación, las rocas sedimentarias cubren el 75% de la corteza terrestre y varían de centímetros a casi 12000 m de espesor.

2.11 Clasificación de las rocas según su característica

2.11.1 Brecha

Fragmentos angulares cementados de otras rocas que crean nueva roca compuesta cerca de las fallas.

2.11.2 Conglomerados

Se trata de una roca compuesta de fragmentos redondeados, menos angulares que las brechas, que se mantienen juntas por medio de un agente cementante como una lutita o arcilla.

2.11.3 Calizas

Están compuestas, principalmente, por carbonato de calcio o por materia orgánica como conchas o esqueletos, también como precipitados del agua de mar. Están formadas por grandes cantidades de materiales clásticos.

2.11.4 Margas

Son lutitas calcáreas con grandes cantidades de conchas porosas y mezcladas con arcilla.

2.11.5 Dolomita

Es una caliza en donde la mayor parte del calcio ha sido reemplazada por magnesio. Tiene una mayor porosidad que la caliza, aunque es más dura.

2.11.6 Esquisto

Es un tipo especial de caliza; es suave porosa, de color blanco o gris. En zonas donde está bien compactada, se vuelve más densa y tiene la perforabilidad de una caliza.

2.11.7 Pedernal

Material silíceo, denso y duro que se encuentra en forma de guijarros o en distintas capas dentro de otras rocas.

2.11.8 Lutita

Estratos compactados de lodo y arcillas conforman un lutita. Las lutitas arenosas contienen arena, lutita calcárea y carbonato de calcio.

2.11.9 Arenisca

Cuando una masa de arena se cementa se vuelve una arenisca. La mayoría de las areniscas se encuentran comprimidas con fragmentos de cuarzo cementados con carbonato de calcio, sílice o arcilla. En la medida en que los granos se tornan mas grandes, se aproxima al conglomerado.

2.12 Impacto geológico en la perforabilidad^[3]

La perforabilidad indica el grado de factibilidad de una roca para perforarse. El hecho de incrementar la perforabilidad implica la falla de la roca con menos fuerza y una mayor velocidad de perforación y, como resultado comprendemos por que la selección de las barrenas y los parámetros de operación se evalúan continuamente buscando la optimización. La tabla 2.1 muestra el impacto geológico en la perforabilidad.

Tabla 2.1 Impacto geológico en la perforabilidad.

CARACTERÍSTICA	CAMBIO	EFFECTO
CLIVAJE	INCREMENTO	INCREMENTO
DUREZA	INCREMENTO	DECREMENTO
GRAVEDAD ESPECÍFICA	INCREMENTO	DECREMENTO
TAMAÑO DEL CRISTAL	INCREMENTO	INCREMENTO
FORMA DEL CRISTAL	INCREMENTO ANGULARIDAD	EN INCREMENTO AUMENTA LA ABRASIVIDAD
POROSIDAD	INCREMENTO	INCREMENTO
PRESIÓN DE PORO	INCREMENTO	INCREMENTO

2.13 Selección de brocas de diamantes^[4]

Para seleccionar una broca de diamante se realizan los siguientes estudios:

2.13.1 Tipo de roca

Si se cuenta con datos precisos sobre las formaciones que deberán perforarse en el intervalo objetivo, se podrá seleccionar con más facilidad la estructura óptima de corte y la densidad que requiere la aplicación ya sea broca tricónica o de diamante.

2.13.2 Litología

Por lo general, la información litológica es la primera que se necesita para determinar la mejor selección. Definidos los tipos de rocas se asocian más con la mecánica de corte de las brocas de diamante, sin embargo para las aplicaciones de diamante quizás sean aún más importantes los tipos litológicos desfavorables, que seguramente provocarán fallas graves, el tipo de roca ayuda a determinar el tipo de corte necesario para vencer su resistencia, corte y molido.

2.13.3 Características litológicas

Para las mechas de diamante las características litológicas pueden indicar la densidad requerida para los cortadores, la configuración hidráulica y permite estimar la duración de la mecha y su coeficiente de penetración. Por otra parte indican los cambios en la dureza de la formación del intervalo objetivo, provocando con ello cargas desiguales en el perfil de la mecha a través de la transición de formación. Las vibraciones axiales de torsión y laterales son posiblemente factores en este medio ambiente. La calidad y la densidad específica de los cortadores constituirán el criterio de selección. Homogeneidad indica la consistencia de la formación. Existe más flexibilidad de selección con respecto a características agresivas de la broca, como menor densidad de los cortadores. Para las brocas tricónicas sólo basta escogerlas de acuerdo con la dureza de la roca.

2.13.4 Fracturados o nodulares

A este indicador se le debe prestar mucha atención, es una situación de alto impacto para la cual, no se recomiendan las brocas de diamante. Sin embargo determinadas estructuras de corte como las barrenas de diamante natural con fijaciones dorsales y las barrenas impregnadas pueden perforar eficazmente en estas aplicaciones.

2.13.5 Tendencias de desviación

Normalmente esto se relaciona con formaciones de buzamiento y perforación de transición. El tipo de calibre es el criterio de selección fundamental para estas aplicaciones.

2.13.6 Vibración

La vibración en el proceso de perforación ha demostrado tener una función fundamental en el rendimiento y la duración de las mechas de perforación. En realidad el control de las vibraciones forma en la actualidad parte integral de la tecnología y el diseño de las brocas, existen parámetros de selección de brocas que se refieren especialmente al control de la vibración, la selección del diámetro también desempeña una función importante para determinar el nivel de control de la vibración de acuerdo con el diseño de mecha ya sea tricónica o de diamante.

2.13.7 Selección por medio de Registros Geofísicos^[4]

Los registros geofísicos de los pozos son una importante fuente de información sobre las características de las formaciones que se perforan en un pozo. Existe una gran variedad de registros, cada uno diseñado para medir diferentes propiedades de las rocas.

Algunos de estos registros son utilizados cuando se evalúa principalmente una aplicación de broca de diamante. Los registros necesarios son: neutrones, rayos gamma, sísmico y densidad, a continuación se revisa cada uno de ellos.

a) Registro de neutrones

Mide la capacidad de las formaciones para atenuar los flujos de neutrones. Puesto que la masa atómica está muy cercana al hidrógeno, los neutrones no pueden fluir fácilmente a través de formaciones que tengan alto contenido de hidrógeno, lo cual permite medir el hidrógeno de la formación. Esta medida se puede usar para computar la porosidad de la formación.

b) Registro de rayos gamma

Detecta el grado de radiación gamma natural que emiten las formaciones, esto permite identificar los intervalos de lutita que emiten altos niveles de radiación, el registro diferencia las lutitas de las areniscas y de los carbonatos y es lo bastante preciso para detectar lechos delgados de lutitas y arcillas.

c) Registro sísmico

Depende de la propagación de las ondas acústicas a través de la formación. Las ondas generan un transmisor situado en la herramienta y unos receptores también puestos en la herramienta, vigilan las ondas de retorno y calculan el tiempo de desplazamiento mientras más corto sea el intervalo entre la emisión y la recepción de las ondas más densa es la formación.

d) Registro de densidad

Mide la densidad en masa de la formación. La herramienta de registro tiene una fuente de rayos gamma y algunos detectores. Formaciones de baja porosidad dispersan los rayos gamma y así pocas logran ser detectadas por la instrumentación de las herramientas, las formaciones de alta porosidad tendrán menor efecto de dispersión que los rayos, y así logran que mayor cantidad llegue a ser detectada.

2.13.8 Análisis de resistencia a la compresión^[4]

Es un método cualitativo, relativamente nuevo para calcular la dureza de la roca, muy útil para determinar cuándo se deben usar brocas PDC. Antiguamente, el análisis

dedureza de las rocas se basaba en el uso de registros de la velocidad de las ondas sonoras, obtenidos de registros sónicos, como medio para reemplazar la medición directa o el cálculo de la dureza. Recientemente se han desarrollado programas para obtener el valor correspondiente a la resistencia a la compresión de rocas no confinadas (a presión atmosférica), usando la información de la velocidad sónica para computar un valor correspondiente a la dureza de la roca no confinada. Aunque este enfoque es mejor que el del usar directamente las velocidades sónicas, el cálculo de la dureza de rocas no confinadas así obtenido es frecuentemente mucho más bajo que el de las rocas comprimidas (confinadas) que se perforan. La resistencia de la roca no confinada es su dureza a presión atmosférica.

2.14 Selección de la mecha PDC en función de la formación a perforar^[4]

La primera y más importante tarea para seleccionar y utilizar una broca en una aplicación específica es realizar la completa descripción de las formaciones que se han de perforar. El conocimiento de sus propiedades físicas puede demostrar algunos indicativos sobre el tipo de broca que se debe seleccionar en intervalos determinados. Si la formación es muy elástica, tiende a deformarse cuando se comprime en lugar de fracturarse, aunque la roca tenga resistencia a la compresión relativamente baja es posible que la barrena no genere recortes fácilmente, en estas situaciones cuando se perfora con brocas PDC se recomiendan cortadores grandes.

Las brocas PDC se desarrollaron primordialmente para perforar formaciones sedimentarias blandas a medianas que antes se perforaban con barrenas de dientes fresados y con brocas con insertos de carburo de tungsteno. En estas formaciones blandas, las brocas PDC han logrado ritmos de penetración hasta tres veces más altos que con brocas de rodillos o tricónicas.

El incremento de los ritmos de penetración se debe al mecanismo de corte por cizallamiento de las brocas PDC, a su más larga duración efectiva, a la resistencia de los diamantes a la abrasión y al hecho de que las brocas PDC carecen de piezas móviles que puedan fallar, la siguiente lista resume los principales tipos de

formaciones en orden creciente de dificultad para perforarlas, las formaciones que se consideran aptas para perforarse con brocas PDC son las de tipos 1 a 6, si bien en ciertas aplicaciones se pueden usar para perforar areniscas blandas (tipo 7) y algunas evaporitas (tipos 8, 9 y 10). Las formaciones de tipo 11 o de números más altos aún no se pueden perforar con brocas PDC.

1. Arcilla
2. Marla
3. Evaporita
4. Yeso
5. Lutita
6. Limo
7. Arenisca
8. Anhidrita
9. Caliza
10. Dolomita
11. Conglomerado
12. Horsteno
13. Rocas volcánicas

Debe recordarse que dentro de cada grupo de formaciones hay "subgrupos", algunos de los cuales no se pueden perforar con brocas PDC, al menos hasta ahora con la tecnología existente. La resistencia de la roca puede estar relacionada con la litología, se debe tener cuidado de no equiparar el nombre de la formación con el tipo de

roca, especialmente cuando se trata de lutitas. Algunas formaciones denominadas "lutitas" no coinciden con la definición.

2.15 Factores que afectan el desgaste de las mechas^[4]

Los factores que afectan en el desgaste de las brocas se pueden dividir en geológicos, operativos, de manejo y de transporte. Los dos últimos pueden obviarse, pero el primero debe ser bien estudiado antes de definir qué tipo de broca que se va a utilizar y esto permitirá minimizar su desgaste y determinar su rendimiento de operación sobre las formaciones que se van a perforar.

2.15.1 Factores Geológicos

El factor más importante para la selección y operación de una broca es el conocimiento de la geología del sitio que se va a perforar; es decir las propiedades físicas de la formación, entre las que se pueden mencionar:

2.15.1.1 Abrasividad

La composición de materiales abrasivos en la constitución de la roca (pirita, pedernal, magnetita), son la causa del desgaste prematuro en toda la estructura de una broca, el calibre es el parámetro más afectado.

2.15.1.2 Resistencia específica de la roca

Está relacionada con la litología y los eventos geológicos que se hayan experimentado. Existen rocas que fueron confinadas a gran profundidad y que posteriormente quedaron a profundidades someras debido a levantamientos tectónicos, por esto son más compactas que a las de tipos similares pero que no han cambiado de profundidad, la resistencia específica de la roca también depende de la cementación de los granos, forma y tamaño.

2.15.2 Factores operativos

Estos factores deben ser diseñados de acuerdo con la geología por atravesar y con la geometría del agujero, pueden ser modificados en el campo en función del desempeño observado. A continuación se mencionan los principales factores operativos así como las consecuencias inherentes a una inadecuada selección.

2.15.2.1 Peso sobre la mecha

A medida que la broca perfora los diamantes o cortantes se desgastan, por lo que generalmente se le aplica cada vez más peso, este es recibido por los conos o por la cara de la broca, este aumento de peso puede hacerse hasta lograr un ritmo de penetración aceptable o hasta llegar al límite prescrito en las recomendaciones de operación de la broca, en caso contrario la broca de conos o de diamante tendrá un desgaste prematuro.

2.15.2.2 Velocidad de rotación

La velocidad de rotación suele expresarse con el término "rpm", o sea revoluciones por minuto. La alta velocidad de rotación por sí sola, no limita el funcionamiento de las brocas principalmente a las de diamante ya que por su diseño pueden ser usadas con motor de fondo o turbina. En cuanto a las brocas de conos hay algunas especiales para altas velocidades de rotación, sin embargo hay otros factores que imponen un valor práctico máximo de rpm en ciertas aplicaciones, las causas de la limitación son la rigidez de perforación y el mecanismo impulsor. Para evitar velocidades críticas debe usarse el sentido común, la velocidad de rotación más adecuada es aquella que produzca un máximo ritmo de penetración, pero sin causar problemas, debe observarse que en formaciones blandas el aumento de la velocidad de rotación resulta en un aumento proporcional del ritmo de penetración, es posible que en algunas formaciones más duras ocurra lo contrario debido a que los dientes o cortadores no pueden perforar la roca si se sobrepasa cierto límite de velocidad de rotación y se afecta así el desgaste de las brocas.

Un caso particular son las brocas de conos diseñadas para ser usadas con motor fondo o turbina, en estas condiciones la velocidad de rotación es alta (los motores fondo dependiendo de su diámetro, tipo, gasto y marca, etc., pueden dar una velocidad de rotación de 50 hasta 600 rpm, mientras que las turbinas pueden dar una velocidad de rotación mayor a 1000 rpm), y el diseño específico consiste en mejoras en el sistema de rodamiento e hidráulica, recubrimiento de carburo de tungsteno para proteger de la abrasión las partes de la broca y mantener el sello durante condiciones de carga extrema: sello y grasa para operar en condiciones de alta temperatura permite operarlas con seguridad.

2.15.2.3 Limpieza en el fondo del pozo

La limpieza de fondo del pozo es importante debido a que el fluido de perforación limpia el pozo al llevar consigo durante su flujo a superficie los recortes de ripsos de formación, de esta manera evita que la barrenase embole y con ello disminuya su capacidad de perforación. Todo esto está muy relacionado a la velocidad de flujo y las propiedades del lodo de perforación, que a la final termina determinando la cantidad de ripsos que puede levantar a superficie. La cantidad de ripsos que el sistema es capaz de llevar a superficie debe ser siempre mayor o igual a la cantidad de ripsos que están siendo cortados por la mecha, nunca menor, ya que, esto causaría una mala limpieza del hoyo, y que parte de los ripsos cortados se queden en el fondo del hoyo.

2.16 Funcionamiento de ROPO

ROP *Optimizer* (ROPO) es una aplicación que hace recomendaciones en tiempo real de peso sobre la mecha y RPM en superficie para maximizar la velocidad instantánea (ROP) y con esto aumentar el rendimiento de perforación mejorando la relación tiempo vs profundidad.

La aplicación del programa no sustituye a la experiencia local, en decisiones tales como la selección de mecha, diseño BHA y la selección de las propiedades óptimas del lodo.

La columna que va a ser perforada no se carga en la aplicación en la fase de preparación del programa (es decir, la aplicación no está considerando las rocas que necesitarán ser perforadas para alcanzar la TD que se desea).

El programa realiza sus ajustes mediante el monitoreo de los parámetros que constantemente están llegando a los equipos computacionales de la cabina de trabajo, proveniente del fondo del hoyo y de los sensores de superficie.

Es importante que al utilizar ROPO hay que tener cierta comprensión de la ROP referencia de pozos vecinos para que el valor de aplicaciones se pueda evaluar.

ROPO es capaz solamente de recomendar valores mientras se perfora rotando, ya que mientras se perfora deslizándose las RPM en superficie son cero, debido a que, lo único que gira durante este método de perforación es la mecha gracias a la energía que le es transmitida desde el motor de fondo.

Tal como se puede ver en la figura 4.4, existen tres zonas lineales de ejecución, en la primera, con la aplicación de ciertas cantidades de peso sobre la mecha se obtienen ciertas cantidades de torque y en consecuencia pequeños valores en la tasa de penetración, esta tendencia se mantiene hasta que se alcanza el área de contacto máxima entre los dientes de la mecha y la formación, a partir de la cual, se entra en la segunda tendencia lineal, la cual con muy pocos aumentos en el peso sobre la mecha se logran aumentos considerables en cuanto a la tasa de penetración. Por último la tercera zona es alcanzada cuando la cantidad de partículas de formación cortadas por la mecha es mayor a la que el sistema puede extraer a superficie, una vez en esta zona, por más que se aumente el peso sobre la mecha no aumentará la tasa de penetración, por otra parte estos restos de cortes que no logran ser levantados a superficie se quedan en fondo, siendo esta zona muy peligrosa por la alta posibilidad de embolamiento de la mecha existente.

Profundidad de corte por revolución= ROP/RPM

Torque en la mecha

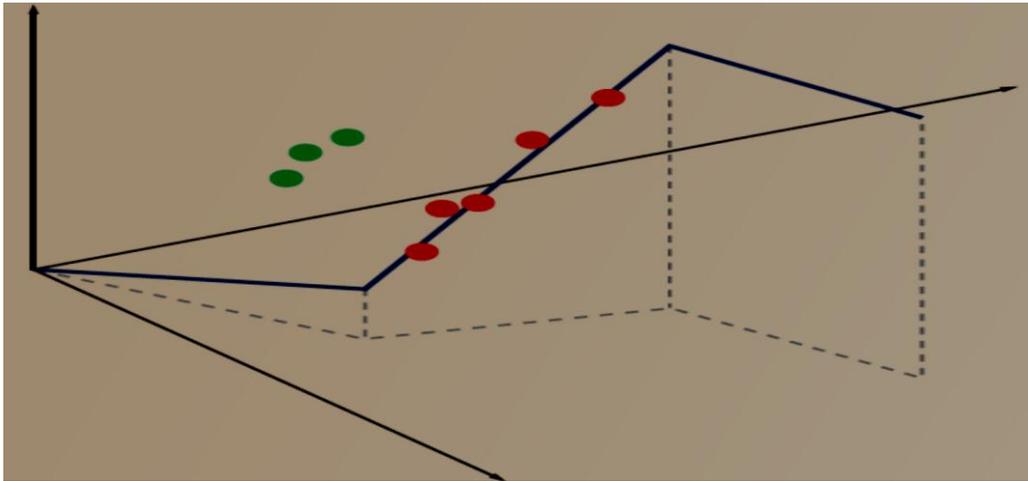


Figura 2.10 ROPOTechnology Watch_D&M. ^[12]

Una característica muy novedosa y de gran importancia con la que cuenta el programa, es la de poder generar al final de la perforación un archivo resumen, en el cual se plasma el porcentaje de cumplimiento o puesta en práctica de los valores recomendados por el programa por parte del perforador.

Otra parte importante para el uso de ROPO son los límites de operaciones que hay que establecerle antes de su uso, para que de esta manera el programa pueda ajustar su ventada de recomendación de valores.

2.17 Límites operacionales de ROPO

Antes de comenzar a usar ROPO durante la perforación es necesario asignarle una serie de valores mínimos y máximos de los cuales algunos vienen dados por las capacidades de los equipos del taladro y otros por los tubos o herramientas de perforación entre los cuales están los siguientes:

- Máximo WOB.
- Mínimo / Máximo RPM en superficie.
- Torque en superficie.
- ROP.

- Tasa de Flujo.
- Presión diferencial (BHA con motor de fondo).

El programa necesita obligatoriamente dos valores límites como mínimo para iniciar su ejecución, estos son: máximo WOB y máximo RPM, es decir, los valores máximos que podrá recomendar el programa durante la perforación.

CAPÍTULO III

3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación Geográfica del Área^[7]

El campo Orocuai está situado aproximadamente a 20 km. al Noroeste de la ciudad de Maturín, en el distrito Piar del estado Monagas. Geológicamente ubicado en el flanco Norte de la subcuenca de Maturín, en la Sub-Provincia septentrional de la cuenca Oriental de Venezuela. Este campo está limitado al Suroeste por el campo Jusepín y al Noreste por el campo Quiriquire, figura. 3.1.

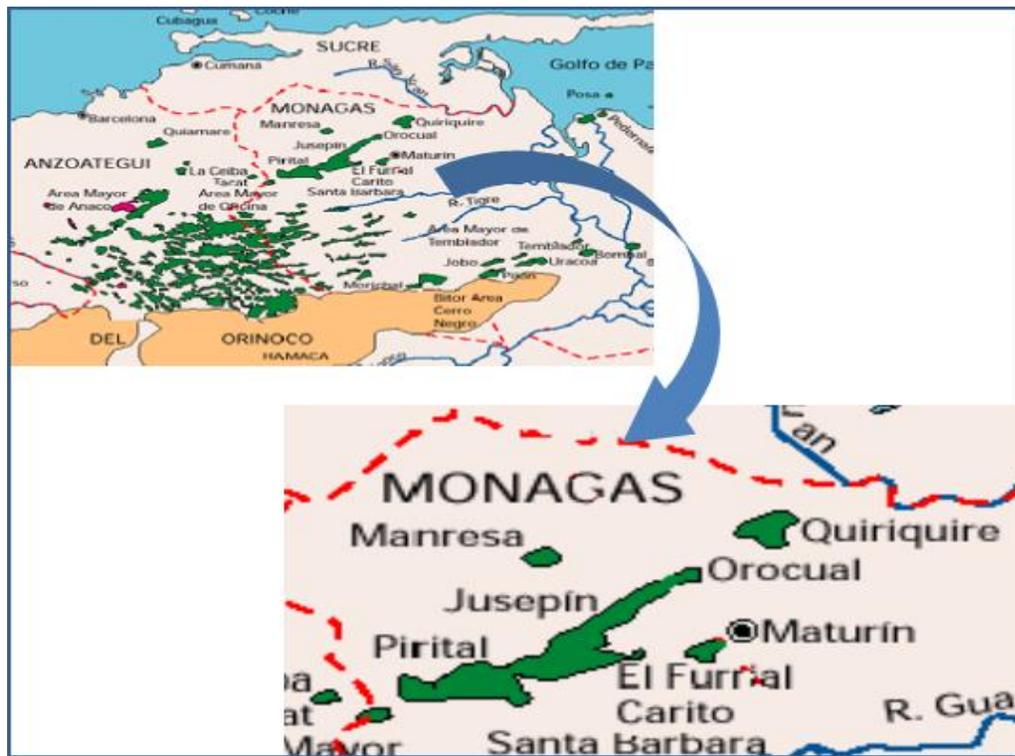


Figura3.1 Ubicación Geográfica del Campo Orocuál.^[7]

3.2 Generalidades del Campo^[7]

En la zona norte de Monagas se encontraron flujos de barro y de petróleo o gas en la superficie del terreno, y en 1912 los geólogos demostraron su interés por descubrir acumulaciones comerciales de petróleo, recomendando a las empresas que solicitaran concesiones petroleras al gobierno venezolano.

En 1918 la *CaribbeanPetroleumCompany* (Grupo Shell) perforó en el área de Orocuál, por indicación de los geólogos de campo, los pozos Molestia-1 y Molestia-2 (el pozo más profundo de Venezuela para aquella época, 3.240 pies). En abril de 1933, Shell encontró petróleo de la Formación Las Piedras a 3.040 pies. Volvió a perforar durante 1944 y en 1958 comenzó la explotación del campo Orocuál.

3.3 Descripción Geológica del Campo Orocuál^[7]

En el norte de Monagas, en la subcuenca de Maturín, se encuentra el campo petrolero Orocual; el cual está ubicado al sur del cinturón plegado conocido como el frente de deformación de la serranía del interior.

La Estratigrafía de la zona de Orocual (Campo Orocual), se caracteriza por presentar una secuencia sedimentaria que se extiende cronológicamente, desde el Cretáceo Tardío hasta el Reciente como se muestra en la figura. 3.2.

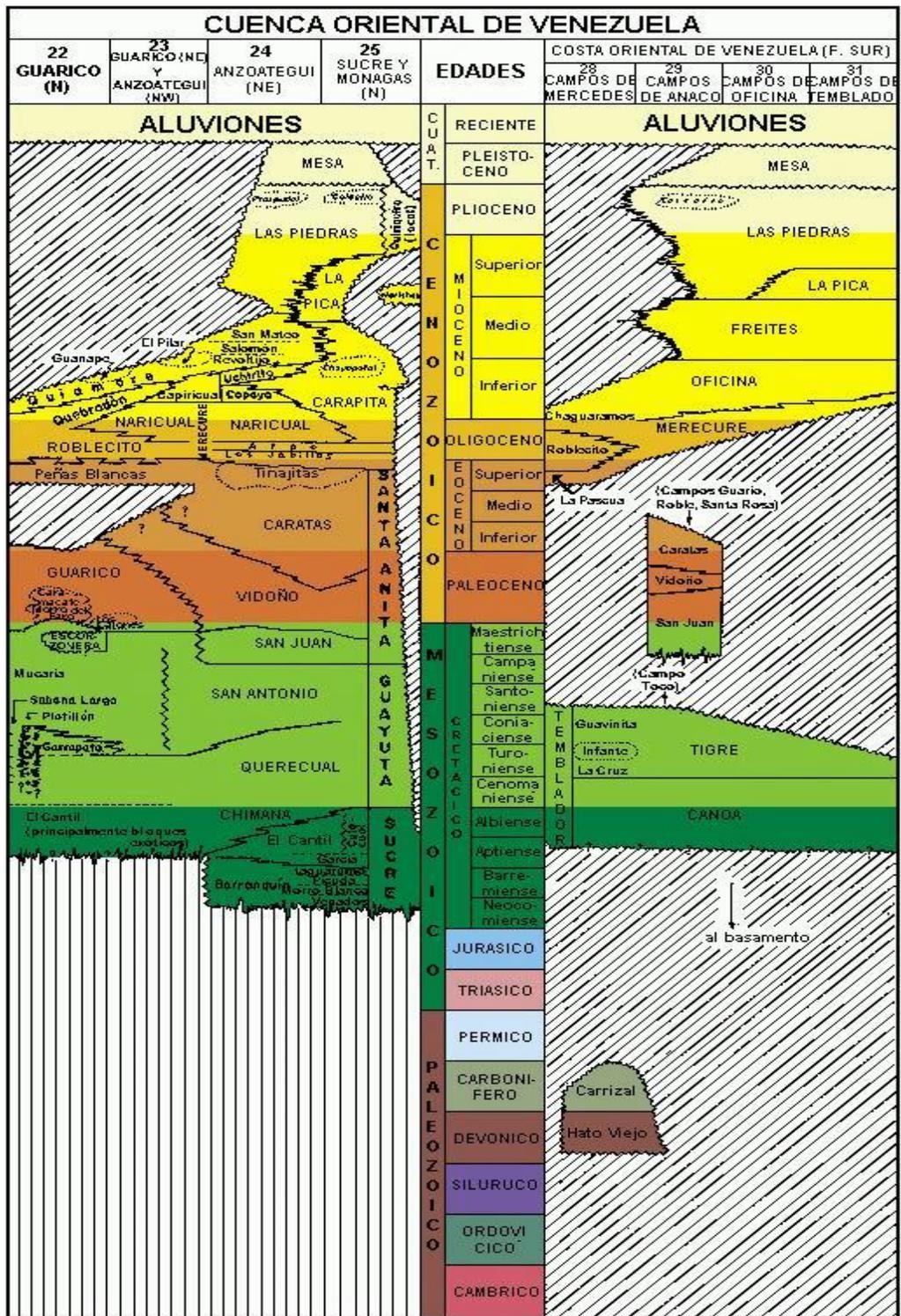


Figura 3.2 La Estratigrafía de la Cuenca Oriental de Venezuela. [7]

3.4 Correlación Estratigráfica de la Cuenca Oriental de Venezuela^[7]

Las Formaciones Los Jabillos y Areo (ambas del Grupo Merecure), se depositaron durante el Oligoceno, luego se encuentra la Formación Carapita del Oligoceno Tardío. En contacto discordante con Carapita se presenta la Formación Las Piedras del Plioceno, hacia el Sur del Campo, algunos pozos someros han penetrado la Formación La Pica, la cual se acuña entre la Formación Las Piedras y Carapita. Posteriormente, se depositó la Formación Mesa, del Pleistoceno.

3.4.1 Formación Las Piedras

El término Las Piedras fue establecido por Hedberg y Sass en un informe privado de la Mene Grande Oil Co. en 1936, quienes describieron la sección tipo original en el Pozo Las Piedras N° 1.

La Formación Las Piedras aflora en la porción septentrional de los estados Anzoátegui y Monagas. En el subsuelo se extiende al este hasta Pedernales, Territorio Delta Amacuro y Golfo de Paria. Hacia el sur, llega a las cercanías del río Orinoco en la faja petrolífera.

La sección tipo de la formación tiene 1.005 m de espesor, el cual aumenta hacia el eje de la subcuenca de Maturín, hasta un máximo probable de 1370 m. Hacia los flancos de la cuenca, el espesor disminuye aproximadamente a la mitad.

En la localidad tipo, la Formación Las Piedras consiste de areniscas micáceas, friables, de grano fino y colores gris claro a gris verdoso, interlaminada con lutitas gris a verdoso, arcillas sideríticas, grises, lutitas ligníticas y lignitos (Hedberg, 1950).

También se encuentran algunas calizas arenosas duras y de color verde. González de Juana (1946, Ortiz E., 1995), la formación se caracteriza por la presencia de arcillas y limolitas blandas, areniscas de granos finos a medios, ocasionalmente

conglomeráticas, y capas de lignitos. Es común la presencia de trazas de dolomitas y chert, unidad de edad del Plioceno.

El ambiente de depósito de la Formación Las Piedras fue definido por (González de Juana, 1946) como Fluvio Deltaico a Continental, de edad Pleistoceno, esta Formación es estéril de fósiles, aunque registra restos de plantas. El ambiente varió de un sector continental con depósitos fluviales al norte en la parte emergida de la Serranía a un sector litoral con depósitos de canales de desembocadura y barras litorales más hacia el sur.

Esta formación se caracteriza en general por una secuencia conglomerática, semi-consolidada, con intercalaciones de arcillas hidratables; las areniscas son cuarzo cristalino a beige, de granos fino a medio, ocasionalmente grueso a conglomerática, cemento silicio. Los cuerpos arcillosos se caracterizan por ser de color verdoso, plásticas, solubles; en parte se observan niveles subordinados de lignito negro hacia la parte superior.

Las arenas de la Formación Las Piedras son productoras de petróleo pesado en los campos de Orocuál, Manresa y Pirital, en el norte del estado Monagas. En el Campo Orocuál, dentro de la estructura de colapso las arenas son productoras de petróleo liviano, mediano y pesado; fuera de ésta estructura las arenas son productoras de petróleo pesado.

3.4.2 Formación Carapita

El nombre de Formación Carapita fue introducido y publicado originalmente por Hedberg (1937), tomando el nombre de la quebrada Carapita, tributaria del río Querecual, en el noreste de Anzoátegui.

En el subsuelo, la Formación Carapita consta de una litología casi exclusivamente de lutitas de color gris oscuro a negro, macizas, a menudo lustrosas, en general calcáreas y con un alto contenido de foraminíferos. Localmente pueden ser piríticas o glauconíticas (Stainforth, 1971).

En términos generales, las areniscas son escasas y sólo se presentan en las áreas donde la Formación Carapita pasa gradualmente a las formaciones Oficina al sur y Capiricual al oeste, o donde está presente el Miembro Chapapotal, constituido por areniscas lenticulares turbidíticas.

El espesor original de la formación en la mayor parte de la cuenca, oscila entre 4500 y 6500 pies (Stainforth, 1971). En la figura 3.3, se puede observar columna litológica del campo Orocuál.

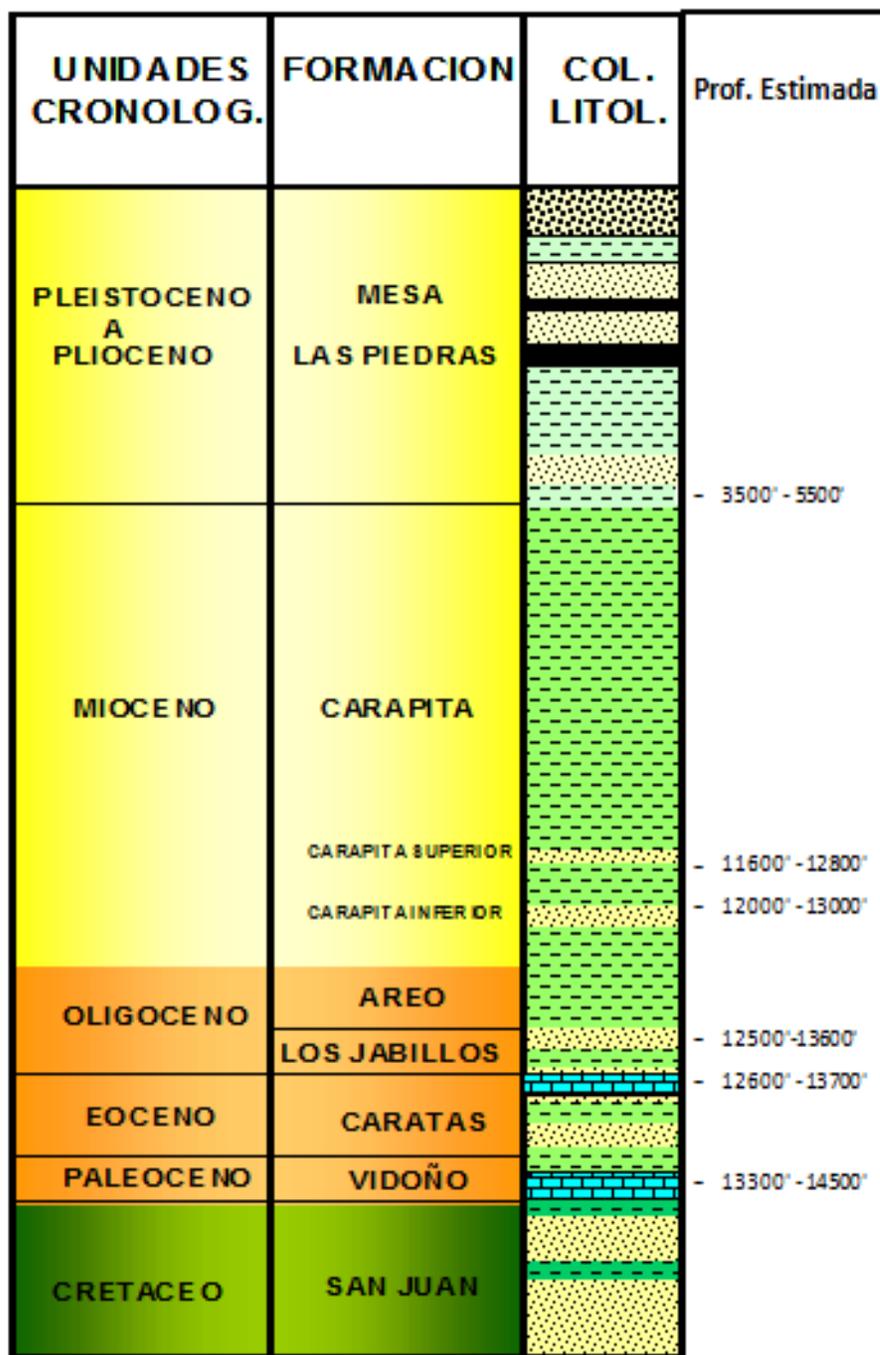


Figura 3.3 Profundidades estimadas de las formaciones del Campo Orocuál – Somero. ^[11]

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se exponen los aspectos metodológicos empleados para la consecución de los objetivos planteados en el proyecto. La metodología incluye el tipo y diseño de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y etapas de la investigación.

4.1 Tipo y Diseño de la Investigación

Según Arias ^[7], este proyecto de investigación científica se puede clasificar de acuerdo al grado de profundidad como exploratorio, y en cuanto al diseño de la investigación como Documental y de Campo debido a:

Exploratorio: ya que el estudio de la optimización de la tasa de penetración en el campo Orocual al Norte del estado Monagas mediante el uso del programa computación ROPO de la empresa Schlumberger no ha sido utilizado en Venezuela.

Documental: debido a que se revisó el material bibliográfico e información del uso del programa en otros campos del mundo.

Campo: en vista de que el estudio fue realizado con información y presencia en *situ* durante las perforaciones del pozo (1), se le dará este nombre al pozo debido a las políticas de privacidad de la empresa.

Por otra parte, la investigación de este Trabajo Especial de Grado es de forma cuantitativa, a un nivel evaluativo, ya que la intención es evaluar los resultados obtenidos en cuanto a la tasa de penetración al usar el programa ROPO durante las perforación del pozo 1, ubicado en el campo Orocual al norte del estado Monagas, mediante la aplicación de WOB y RPM recomendados por ROPO.

4.2 Población y Muestra

El área en estudio es el campo petrolero Orocuai al norte del estado Monagas. La investigación estará basada en la información recabada durante la perforación del pozo 1, perforado en el área.

4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Durante la investigación la información acerca del programa a utilizar fue suministrado por personal de la empresa Schlumberger, y en cuanto, a datos de los pozos fueron extraídos de la base de datos de la empresa y solicitados al cliente (empresa operadora), otros fueron tomados en campo durante las perforaciones.

4.4 Procedimiento

Para lograr los objetivos planteados se realizó la metodología detallada a continuación:

Etapa 1: Revisión Bibliográfica

En esta etapa de la investigación se realizó una revisión exhaustiva en la literatura que abarca los aspectos relacionados con la perforación de pozos tales como: taladros usados, y sistemas con los que cuenta, técnicas usadas para la perforación direccional, tipos de lodos usados, tipos de mechas y la influencia que tienen sobre ellas las distintas formaciones al ser perforadas.

Entre algunos de los trabajos especializados relacionados con el tema que fueron revisados se encuentran: trabajos previos relacionados con la investigación, informes técnicos de Schlumberger D&MeIPM, Trabajos Especiales de Grado, artículos SPE, entre otros.

Etapa 2: Desarrollo, elaboración y revisión de procedimientos

Se procedió a la redacción de los procedimientos numerados en los puntos de los objetivos específicos.

Etapa 3: Discusión de resultados

Los resultados fueron discutidos con los asesores y tutores industriales con la finalidad de mejorar los análisis efectuados.

Etapa 4: Conclusiones y recomendaciones

Luego de contar con las ROP obtenidas durante el uso de ROPO, los valores de WOB y RPM recomendados por el programa mientras se perforaba, y analizados los resultados, se realizaron las gráficas correspondientes a los valores de ROP con y sin el uso de ROPO para poder sustentar el objetivo general planteado en este trabajo especial de grado.

Etapa 5: Redacción y Presentación del Trabajo Especial de Grado

Esta etapa trata sobre la redacción del Trabajo Especial de Grado, considerando las normas de redacción, transcripción, estilo, organización y reglas de presentación de trabajos, establecidas por la Escuela de Petróleo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

4.5 Características del pozo donde se usará ROPO

El pozo 1, que se llamará así por políticas de privacidad de la empresa y del cliente, es un pozo tipo S con una profundidad objetivo que ronda los 14.800 ft y que está siendo perforado con el Taladro Alexis Cedeño en el campo Orocuai. En él se pondrá en ejecución de manera momentánea por aproximadamente 500 ft el programa computación ROPO desarrollado por la empresa Schlumberger, el cual tendrá como objetivo principal establecer si es posible optimizar la ROP en las perforaciones de esta zona, determinar la ventana de operaciones en la cual ROPO haya logrado su mejor desempeño y poder al final dar recomendaciones para próximos usos del programa.

Es importante mencionar que los parámetros establecidos están basados en la información actual. Más allá de una evaluación, se necesitaría actualizaciones en tiempo real si es posible en cuanto a los parámetros de perforación durante la ejecución del programa. Con la finalidad de expandir el conocimiento y lograr un estudio más comprensivo.

4.5.1 Diagrama de completación

El esquema del pozo 1 fue proporcionado por el cliente. El cual se muestra en la figura 4.1.

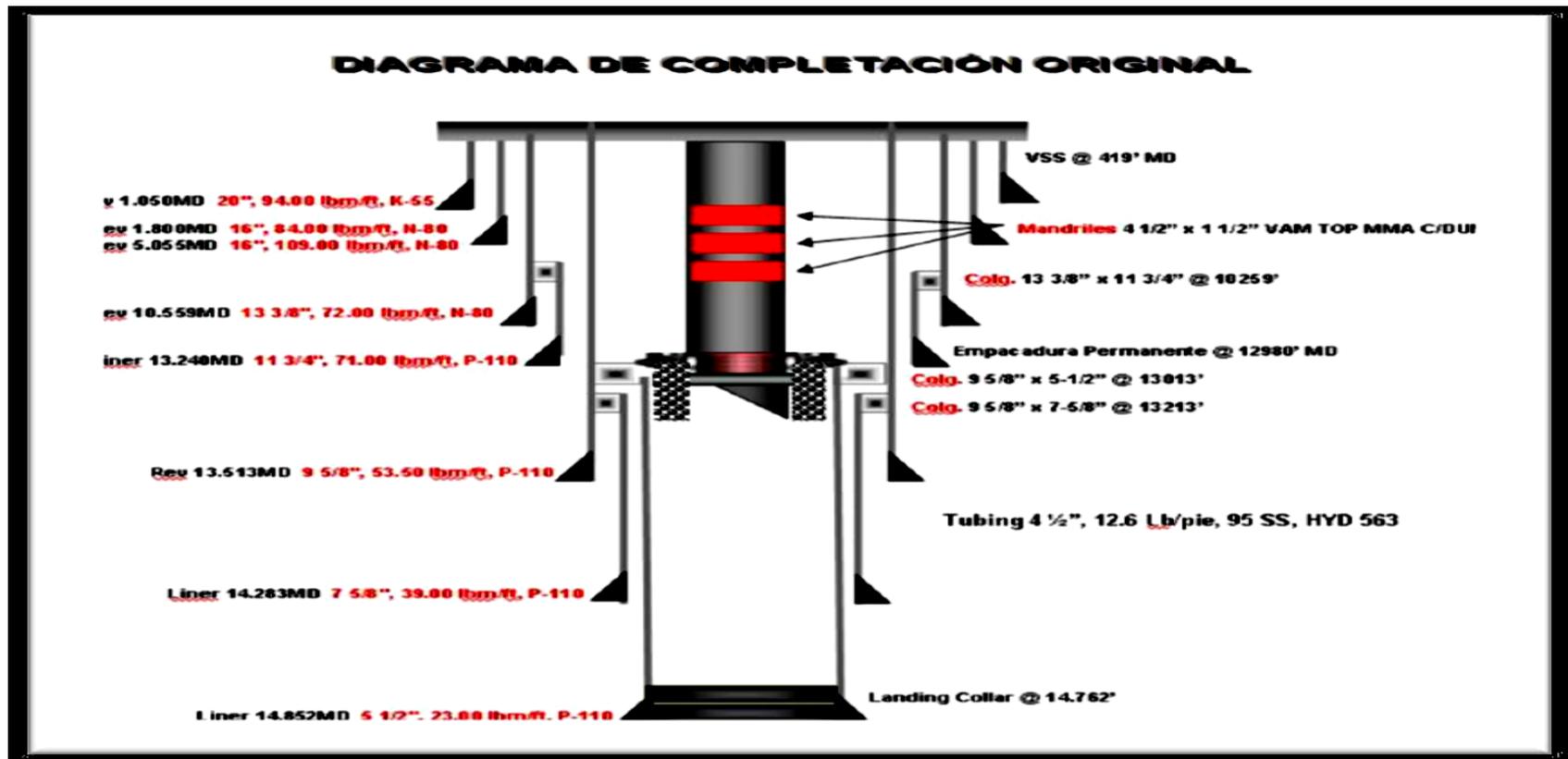


Figura 4.1 Diagrama de completación del pozo 1. [16]

4.5.2 Trayectoria del pozo

El pozo 1 fue perforado direccionalmente en el campo Orocuál dentro de los límites de explotación y producción de la Cuenca Oriental Sub Cuenta Maturín, al Norte de Monagas. Este pozo se está perforando para alcanzar de manera sencilla las arenas de la formación San Juan en el Yacimiento SJN-ORS-52, con el objetivo de continuar drenando las reservas recuperables de crudo y gas de 103,4 MMBN y 96,9 MMMPCN respectivamente.

El programa direccional de este pozo fue preparado para la perforación de la sección intermedia de 14 1/2" x 17 1/2" iniciándose a 5.006' MD, con un punto de inicio de aumento de ángulo (KOP) entre 5.400' y 5.500'. Alcanzando el inicio de la sección tangencial a 6.500' MD (6.493' TVD) a razón de 1.04°/100' con una máxima inclinación de 10,8° y dirección azimut de 36,2°, manteniendo estas mismas condiciones por 3.000 pies hasta llegar a la profundidad de 9.500' MD. Una vez finalizada la sección tangencial del pozo se procederá a seguir la construcción del pozo con el inicio de tumbiar inclinación llegando así a la profundidad de 12.587' MD (12.505' TVD) a razón de 0,3°/100'. Una vez que se ha alcanzado dicha profundidad se procederá al procedimiento de bajar el revestidor de 13 3/8" y luego continuar con la perforación de la siguiente sección para asentar un *liner* de 11 3/4" a la profundidad de 13.012' MD y posteriormente el revestidor de 9 5/8" a 13.513 ft. Luego seguirá la perforación de la sección de 8 1/2" asentando *liner* de 7 5/8" a 14.283' MD y finalmente el *liner* de 5 1/2" perforando la sección productora con hoyo de 6 1/2" a 14.873' MD. En la figura 4.2, se puede ver una vista de perfil de la trayectoria que tendrá el pozo 1. Donde la zona de colores rojo y verde son las de incremento y decrecimiento de ángulo respectivamente.

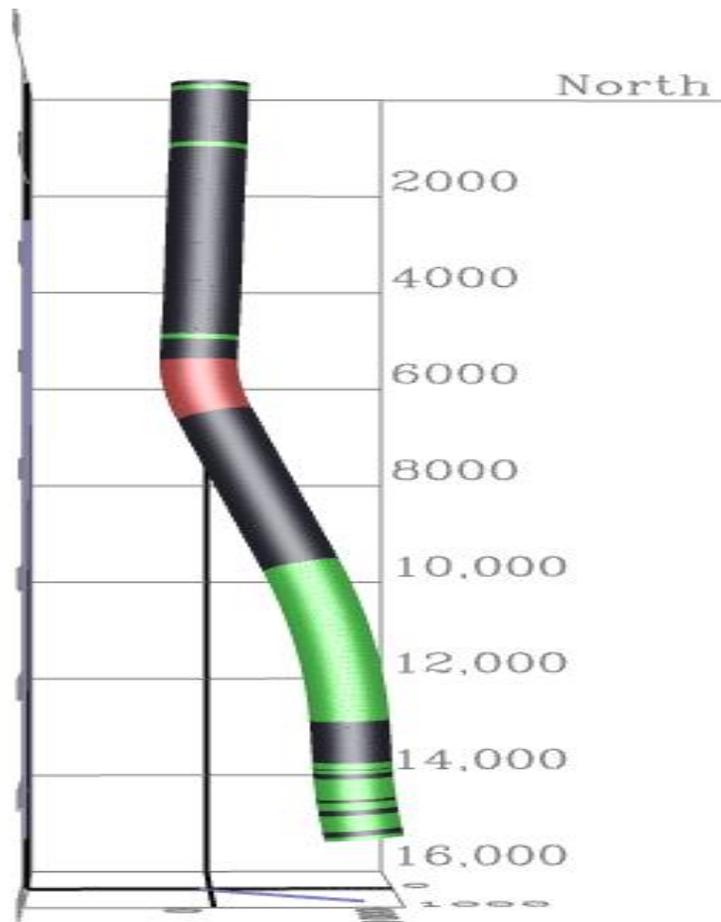


Figura 4.2 Vista de perfil de la trayectoria del pozo 1.^[16]

4.5.3 Análisis de riesgo

Este análisis de riesgo fue realizado y suministrado por el cliente para estar alerta a cualquier inconveniente que pudiese presentarse durante la perforación. Cabe destacar que para este pozo no existe riesgo de colisión.

A continuación se muestra la tabla 4.1 con los riesgos más importantes.

Tabla 4.1 Riesgos más importantes durante la perforación del pozo 1.

Riesgo	Descripción
Pega diferencial de Tubería	Los prognosis geológica estima a través formaciones con lentes de arenas susceptibles a pérdidas parciales de circulación (Formaciones Mesa-Las Piedras, y la Pica), conforme a ello podría caer el nivel de fluido, y consecuentemente, cerrarse el hoyo por disminución en el sobre-balance.
Inestabilidad/Cierre del hoyo	Arcillas reactivas con la fase acuosa del lodo
Pérdida de circulación	Aparte de los lentes de arena de baja presión, está el riesgo de los Corrimientos, donde se podría originar una pérdida de circulación parcial/severa.

4.5.4 Estado actual del pozo

El pozo 1 está perforado actualmente hasta 5.006 ft donde está asentada la zapata del segundo revestidor de diámetro externo de 16", el cual protege el hoyo de 22". Por encima de este se encuentra el revestidor de diámetro externo de 20", con una zapata asentada a 1.050 ft de profundidad el cual protege el hoyo de 26", y que llega hasta superficie. La zona que será perforada a continuación es la comprendida entre los 5.006 ft que es donde está asentada la zapata del segundo revestidor y llegara hasta los 12.587 ft aproximadamente con un diámetro de hoyo de 17,5" perforado con una mecha bi-céntrica de 14 ½" x 17 ½" y en el cual se bajará el tercer revestidor que tiene un diámetro externo de 16", tal como se puede observar en la figura 4.3.

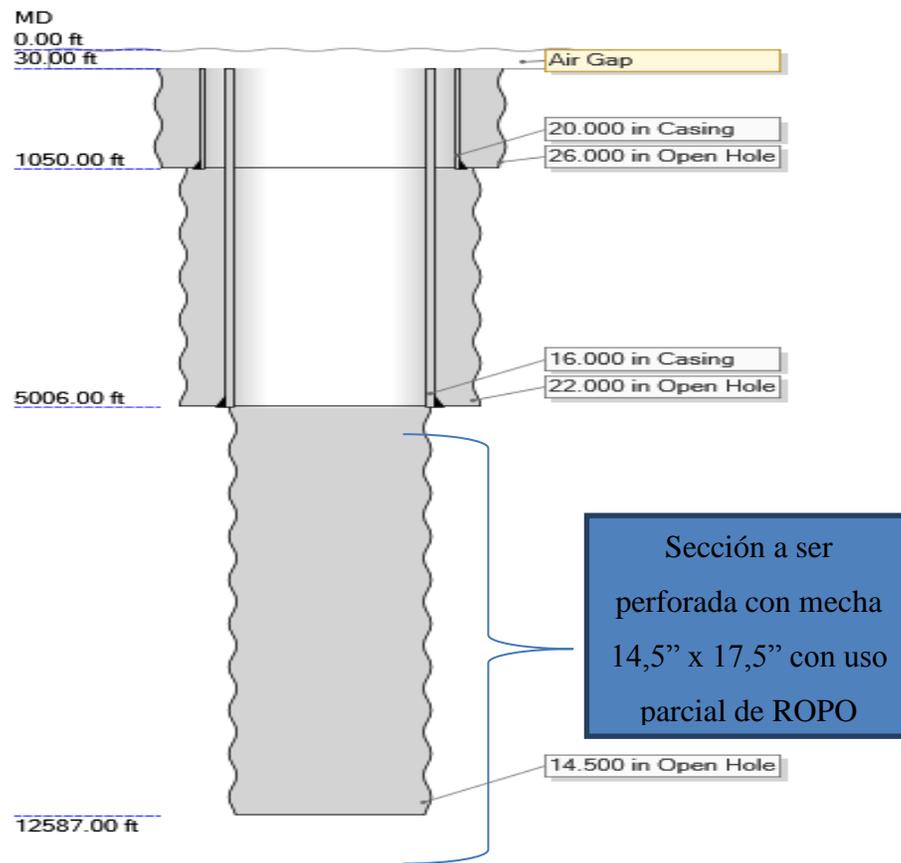


Figura 4.3 Condición del pozo 1, antes de perforar la zona donde se implementará el programa ROPO.

Esta sección del pozo pretende ser perforada con un lodo base aceite de densidad entre 14,7 y 16 libras/galón, el cual se pretende sea bombeado por dos de las tres bombas con las que cuenta el taladro, manteniendo la tercera como repuesto.

4.6 Funcionamiento de ROPO

ROPO es un programa desarrollado por la empresa Schlumberger en el cual tiene como función optimizar la tasa de penetración durante la perforación de pozos petroleros mediante la recomendación de valores en tiempo real de WOB y RPM basados en la relación lineal existente entre el peso sobre la mecha y la tasa de penetración en el uso de mechas PDC.

Tal como se puede ver en la figura 4.4, existen tres zonas lineales de ejecución, en la primera, con la aplicación de ciertas cantidades de peso sobre la mecha se obtienen ciertas cantidades de torque y en consecuencia pequeños valores en la tasa de penetración, esta tendencia se mantiene hasta que se alcanza el área de contacto máxima entre los dientes de la mecha y la formación, a partir de la cual, se entra en la segunda tendencia lineal, la cual con muy pocos aumentos en el peso sobre la mecha se logran aumentos considerables en cuanto a la tasa de penetración. Por último la tercera zona es alcanzada cuando la cantidad de partículas de formación cortadas por la mecha es mayor a la que el sistema puede extraer a superficie, una vez en esta zona, por más que se aumente el peso sobre la mecha no aumentará la tasa de penetración, por otra parte estos restos de cortes que no logran ser levantados a superficie se quedan en fondo, siendo esta zona muy peligrosa por la alta posibilidad de embolamiento de la mecha existente.

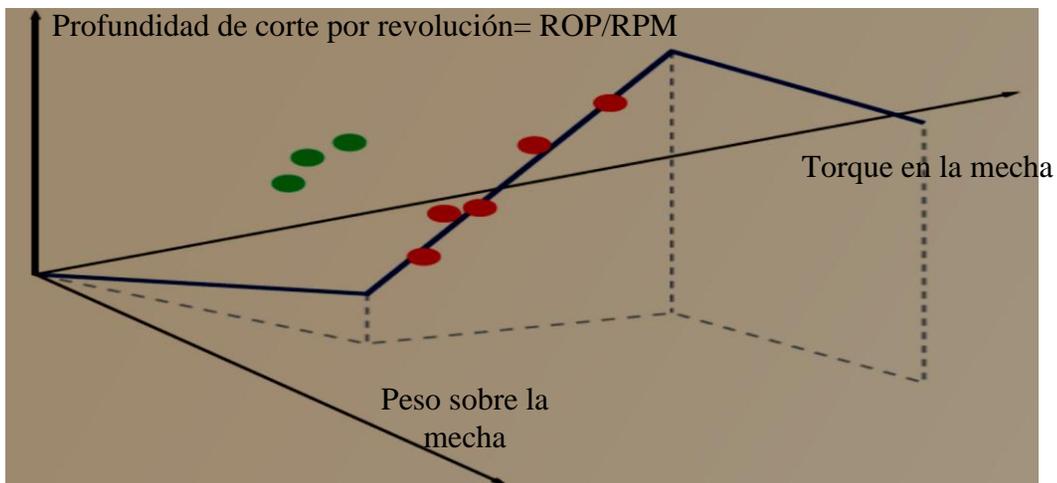


Figura 4.4 ROPOTechnology Watch_D&M.^[12]

Una característica muy novedosa y de gran importancia con la que cuenta el programa, es la de poder generar al final de la perforación un archivo resumen, en el cual se plasma el porcentaje de cumplimiento o puesta en práctica de los valores recomendados por el programa por parte del perforador.

Otra parte importante para el uso de ROPO son los límites operaciones que hay que establecerle antes de su uso, para que de esta manera el programa pueda ajustar su ventana de recomendación de valores.

4.7 Límites operacionales de ROPO

Antes de comenzar a usar ROPO durante la perforación es necesario asignarle una serie de valores mínimos y máximos de parámetros de perforación los cuales algunos vienen dados por las capacidades de los equipos del taladro y/o por los tubos o herramientas de perforación entre los cuales están los siguientes:

- Máximo WOB.
- Mínimo / Máximo RPM en superficie.
- Torque en superficie.
- ROP.
- Tasa de Flujo.
- Presión diferencial (BHA con motor de fondo).

El programa necesita obligatoriamente dos valores límites como mínimo para iniciar su ejecución, estos son: máximo WOB y máximo RPM, es decir, los valores máximos que podrá recomendar el programa durante la perforación.

Cada uno de estos valores límites establecidos pueden ser modificados durante la perforación, de ser necesario. Por otra parte la calidad de los valores límites introducidos al principio está muy relacionada con la experiencia de los ingenieros de campo en las perforaciones de pozos en el área y más aun con el uso del programa, es decir, que mientras más perforaciones se tengan en el área y mejor aun usando ROPO mejores serán los valores límites suministrados al programa y en consecuencia más precisas serán las recomendaciones arrojadas por este. En la tabla 4.2 se observará un resumen de los distintos límites establecidos previo al uso del programa y los cuales

se explicarán más adelante, cuál fue el criterio y de qué manera se llegó al valor de cada uno de ellos.

Tabla 4.2 Límites de los parámetros de perforación establecidos inicialmente para el uso de ROPO.

Parámetro	Valor
Máximo WOB	20.000 lb-f
Mínimo / Máximo RPM en superficie	5 – 200 RPM
Torque en superficie	30.000 lb-f
Tasa de flujo	400 – 800 galón/min
ROP	-

4.7.1 Máximo WOB

Este valor se puede establecer tomando como referencia datos de pozos vecinos perforados en el área, o de perforaciones superiores en la misma formación.

Durante la perforación este parámetro puede ser monitoreado desde la cabina de los ingenieros de perforación, gracias a un sensor de peso con el que cuenta Schlumberger, el cual es colocado en la línea muerta del taladro. Tal como se muestra en la figura 4.5. Gracias a la información de la sección perforada anteriormente en el pozo 1, es decir, la de hoyo de 22” de diámetro externo, la cual se perforó con un peso sobre la mecha promedio de 12.000 lb-f, se estableció un límite inicial para la sección de 17 ½” a perforar a continuación de 20.000 lb-f.



Figura 4.5 Sensor de peso.^[13]

De los dos parámetros que recomienda el programa para ser aplicados a la perforación, este es el más difícil de mantener, ya que, depende muy estrechamente de la experiencia y la capacidad que pueda tener el perforador del taladro para atravesar las distintas litologías manteniendo los pesos sobre la mecha recomendados por ROPO.

4.7.2Mínimo/máximo RPMen superficie

El valor mínimo de RPM puede ser establecido siguiendo la referencia de otras perforaciones en el área, y la máxima RPM se puede establecer bien sea por las referencias de otros pozos si se desea mantener condiciones y parámetros similares de perforación, o bien se puede establecer por la capacidad máxima de RPM en superficies que pueden suministrar los equipos del taladro, más específicamente el *top drive*. Este segundo parámetro es monitoreado por los ingenieros de perforación mediante la información suministrada por la consola del perforador, la cual, indica el

número de vueltas por minutos que el *top drive* está suministrándole a la tubería de perforación.

A su vez es mucho más fácil de mantener con respecto al peso sobre la mecha, ya que, para esto solo se le indica al *top drive* con el número de vueltas por minutos con las que se quiere trabajar en superficie y este las mantiene automáticamente, hasta que no se le indique algo distinto.

El *top drive* con el que cuenta el taladro Alexis Cedeño, para la fecha de la perforación del pozo 1 es un NOV, modelo tds-4, capaz de suministrar en superficie hasta 260 RPM.

El límite establecido en un principio como valor máximo fue de 200 RPM, y tomando en cuenta la perforación de otros pozos en el área y la perforación de la sección anterior de 26" de este pozo, se decidió establecer el límite mínimo en 5 RPM. El *Top Drive* utilizado es igual al mostrado en la figura 4.5.



Figura 4.6. *Top Drive* NOV, tds-4.^[17]

4.7.3 Torque en superficie

Este se establece mediante el límite de torque que pueden soportar las tuberías de perforación, herramientas de fondo o el torque mínimo aplicado para apretar las conexiones en el ensamblaje de fondo o tuberías de perforación, ya que de superar este límite puede existir un riesgo de desenrosque o desconexión en alguna de las juntas, lo cual se quiere evitar a toda costa. La conexión a la cual menos torque se le aplicará durante la perforación del pozo es la que se encuentra entre la mecha y el motor de fondo; la cual será de 36.000 lb-f, por lo que el límite se establecerá en 30.000 lb-f ya que se debe cumplir con un margen de seguridad.

4.7.4 ROP

Este valor no es más que la cantidad de pies perforados por hora, y su límite se establece tomando en cuenta los equipos de superficie en cuanto al control de sólidos y la capacidad de remoción y transporte de ripios desde el fondo del hoyo hasta superficie y los problemas que trae consigo una mala limpieza de hoyo, es decir, la ROP máxima está dada por el valor de este parámetro a partir del cual, los ripios que están siendo cortados por la mecha por unidad de tiempo son mayores a los que el sistema puede llevar a superficie. Esta situación se puede detectar rápidamente con la densidad equivalente de circulación, la cual debe ser monitoreada constantemente. Como regla general se tiene que, esta no puede ser una unidad mayor a la densidad estática del lodo de perforación; es decir, que con un lodo de perforación de 14,7 lpg., cuando la densidad equivalente de circulación alcance valores superiores a 15,7 lpg., estamos en presencia de una mala o deficiente remoción de ripios del hoyo, y debemos tomar las medidas necesarias para mitigarlo.

Este parámetro puede ser monitoreado de manera directa por cálculos internos que realiza el *software* con los que cuenta la empresa Schlumberger. Para este caso de estudio no estableceremos ningún límite para la tasa de penetración, ya que, el objetivo principal de este estudio de investigación es poder determinar la mayor efectividad o beneficio que podría tener el uso de ROPO para aumentar este parámetro.

4.7.5 Tasa de flujo

Este parámetro significa la cantidad lodo de perforación que entra al sistema de tubería por unidad de tiempo, por lo general está dado en galones/minutos, para este caso de estudio sus límites se establecen tomando en cuenta dos factores, el primero de ellos es con respecto al motor de fondo el cual necesita una mínima cantidad de fluido que debe pasar por el interior de él mientras perfora para su correcta lubricidad. El segundo está dado por la herramienta MWD (Measurements While Drilling), la cual en este caso de estudio fue un modelo *Telescope*, que tiene entre sus funciones, indicar la dirección e inclinación que lleva el pozo.

Esta herramienta tiene una capacidad de flujo mínima y máxima a partir de la cual sus mecanismos electrónicos internos se encienden y apagan. Por lo general la tasa de flujo mínima para lubricar correctamente el motor está por debajo de la tasa de flujo mínima de encendido de la electrónica del *Telescope*. En el caso de estudio durante la perforación del pozo 1, se utilizarán ensamblaje de fondo con *Telescope* de diámetro externo 8.25", los cuales tienen como rango de flujo 400 gal/min como valor mínimo y 800 gal/min como valor máximo. Estos datos son extraídos de la hoja mantenimiento de la herramienta que envía desde la base de operaciones junto con ella, una vez se le realiza el mantenimiento y es enviada al taladro donde se va a utilizar.

4.8 Monitoreo de parámetros durante la perforación

Una vez se tienen establecidos los límites en los cuales el programa ROPO trabajará por aproximadamente 500 ft durante la perforación de la sección de 17 1/2" del pozo 1, es necesario establecer y conocer cuáles y de qué manera se hará seguimiento a los

parámetros necesarios para lograr los objetivos planteados en este trabajo de investigación, y poder determinar la mejor manera posible, la factibilidad del empleo de ROPO en la perforaciones de los campos del Norte del estado Monagas.

A continuación se nombran y explican los distintos parámetros que serán monitoreados durante la perforación y la forma en que se hará.

4.8.1 Torque en superficie

El torque en superficie es un parámetro muy importante, puesto que nos da una idea del torque al cual está siendo sometida la tubería a lo largo del pozo. Y nos puede ayudar a identificar problemas de mala limpieza o inestabilidad del hoyo, ya que un aumento significativo en el torque de la tubería, puede significar que algo está de una u otra manera impidiendo la rotación normal que debería tener la sarta de perforación por la fuerza de rotación que se le está aplicando por medio del *top drive*. Valores muy elevados de torque podrían hacer fallar alguno de los elementos de la sarta de perforación o destorquear alguna conexión de la sarta, causando que el fluido de perforación saliera por esta zona e impidiendo que llegue de manera eficiente al motor de fondo y a su vez a la mecha de perforación, o aun peor que se destorquee completamente la conexión y parte de la sarta se vaya al fondo hoyo.

Este valor se puede monitorear mediante un sensor de torque con el que cuenta Schlumberger (*rotary torque*), pero el cual no fue instalado en el taladro Alexis Cedeño. Por esta razón usaremos el sensor de torque con el que cuenta el taladro y el de la cabina de registro de lodo, que en este caso pertenece a la empresa *Geoservice*, recientemente comprada por Schlumberger.

4.8.2 Choques y vibraciones

Es un parámetro muy importante para seguir durante la perforación del pozo 1, ya que indica la cantidad de veces que el ensamblaje de fondo entra en contacto con las paredes o el fondo del hoyo de manera brusca. Existen dos tipos de choques, los axiales o transversales y los laterales. El primero de ellos ocurre cuando la mecha

llega de manera brusca al fondo del hoyo a una zona de derrumbe o a un lugar de hinchamiento de arcillas donde el diámetro del hoyo se vea disminuido y lo cual impide que la mecha o cualquier otra herramienta del ensamblaje de fondo tal como un estabilizador o camisa estabilizada del motor tenga problemas para pasar por esta área de manera normal frenando bruscamente la sarta de perforación. El segundo de los choques es el transversal y ocurre cuando el ensamblaje de fondo pierde la excentricidad del hoyo causando que parte del BHA entre en contacto con la formación de manera brusca.

Estos choques activan los acelerómetros del *Telescope* y hacen que envíen una señal de choque a superficie, la cual tiene varios niveles de intensidad que van del uno al tres, también tienen la capacidad de determinar el tiempo de duración.

Choques nivel 3 prolongados por más de 20 minutos pueden causar serias fallas a los componentes electrónicos de la herramienta MWD. Es por ello que una vez se envían las señales de choque a superficie el *software* activa una alarma la cual tiene una velocidad de repique dependiendo de la intensidad de los choques y la cual no se detendrá hasta que sean eliminados o mitigados los choques.

Por otro lado tenemos las vibraciones las cuales pueden ocurrir cuando se están perforando formaciones duras y la mecha se encuentra teniendo problemas para cortarlas, lo cual, genera que cuando el perforador intente cargarle peso a la mecha, esta naturalmente tiende a rebotar de la formación en su negación a ser cortada por la mecha. Este problema tiene el mismo principio de monitoreo y alarma de los choques, y puede ser mitigado o eliminado, aumentando el peso sobre la mecha y disminuyendo el número de revoluciones por minutos de la sarta de perforación.

4.8.3 Arrastre

Es un problema o fenómeno que se genera en los pozos con mala limpieza o por hinchamiento de arcillas, y se produce mientras la tubería está siendo sacada del hoyo, bien sea durante un repaso o durante un viaje de tubería. Este puede ser detectado por

aumentos en el peso de la sarta de tubería mientras se extrae del hoyo, es decir, si se conoce el peso del ensamblaje de fondo, se conoce el número de parejas que están dentro del hoyo y se conoce cuánto pesan estas parejas, se puede conocer el peso total de la sarta de perforación.

Este cálculo puede ser realizado por un *software* con el que dispone Schlumberger y mediante su sensor de peso podemos monitorear constantemente su valor. Por experiencia se sabe que durante los viajes de tubería el *software* tiende a errar los valores del peso de tubería, así que es necesario verificar y ajustar constantemente. Para aumentar la confiabilidad de los resultados, también se monitorean los valores de peso de tuberías registrados por el sensor del taladro en la consola del perforador, y también los valores registrados por la cabina de registro de lodo.

4.8.4 Pesos de la tubería

Este parámetro fue explicado detalladamente en el punto anterior y no es más que el peso que tiene toda la sarta de perforación, y el cual depende de los materiales con la que están construidas cada una de las herramientas de fondo, los tubos de perforación y el número de ellos que están dentro del hoyo siendo levantados por el *top drive*.

4.8.5 WOB

Es la cantidad de peso que dejamos caer sobre la mecha, del peso total de la sarta de perforación, es decir si tenemos una sarta con un peso de 100.000 lb-f, y se deja caer sobre la mecha el 10% del peso la sarta, tendríamos un peso sobre la mecha de 10.000 lb-f y el peso de la sarta sería de 90.000 lb-f respectivamente. Este es un parámetro de vital importancia en su monitoreo, ya que, es uno de los que recomienda ROPO para ayudar a optimizar la tasa de penetración. Debemos asegurar de que los perforadores cumplan el mayor tiempo posible los valores de WOB recomendados por el programa, para que así podamos evaluar con mayor exactitud la eficiencia de este y el estudio sea lo más confiable posible.

El *software* de Schlumberger es capaz de calcular el peso existente sobre la mecha en todo momento, y está relacionado directamente con el peso total de la sarta de perforación, en consecuencia es de vital importancia para el éxito del estudio monitorear minuciosa y continuamente el peso de la sarta. Para tener un mayor nivel de exactitud con respecto al valor de WOB compararemos nuestros valores con los registrados por los sensores del taladro y de la cabina de registro de lodo.

4.8.6 RPM en superficie

Es un parámetro que indica el número de vueltas que da la sarta de perforación por unidad de tiempo en superficie y se expresa en revoluciones por minutos, Schlumberger no cuenta con un sensor para monitorear este parámetro, pero cuenta con la capacidad de monitorear las RPM del ensamblaje de fondo gracias a sensores instalados en su herramienta MWD, y por experiencia se conoce que los valores de este con los de superficie no son iguales, pero si las condiciones del pozo son buenas deberían ser muy parecidas.

Para aumentar la confiabilidad y exactitud de los resultados del estudio se reportaran los valores de RPM registrados por la cabina de registro de lodo, siendo antes comparados con los registrados por el sensor del taladro.

Este es el otro de los dos valores que recomienda ROPO a parte del WOB y es muy importante su monitoreo constante. A cambio del peso sobre la mecha, este es mucho más fácil de lograr que los perforadores cumplan con los valores recomendados por el programa, ya que, con solo indicarle al *top drive* el número de vueltas que desea que se le sea suministrada a la sarta de perforación, este la mantiene automáticamente, hasta que no se le indique lo contrario.

4.8.7 Emboladas de las bombas

Este parámetro no es más que la cantidad de emboladas o las idas y vuelta que da la camisa de las bombas por minutos y gracias a ellos es que puede impulsar el lodo a las líneas de flujo, con ellas se puede determinar la tasa de flujo de cada bomba y en

consecuencia la del sistema. Monitorear este valor es importante para saber en todo momento que la herramienta tiene señal o no, ya que esta se enciende y se apaga en un rango de flujo determinados, y, si la herramienta pierde señal esta no enviará ningún tipo de información a los equipos y *software* de superficie, dejándonos sin conocimiento de lo que está ocurriendo en el fondo del hoyo, ya que esta la envía a través de pulso de lodo cuando se encuentra encendida. Otra función importante es para saber si el motor está siendo lubricado de manera eficiente y así proteger sus elementos externos y extender de esta manera sus horas de bombeo antes de tener que ser llevado a mantenimiento.

Schlumberger cuenta con sensores contadores de emboladas, pero en la actualidad no están siendo instalados en los taladros durante las perforaciones de los pozos. Por esta razón seguiremos los valores arrojados por los sensores del taladro y la cabina de registro de lodo.

4.8.8 Tipo de perforación y profundidad de la misma

Durante la perforación del pozo 1, en la sección de 17 ½” se contarán con dos modos de perforación, uno en el cual solo la mecha gira por la fuerza que le transfiere el motor de fondo, y el resto de la sarta o tubería de perforación al igual que todo el ensamblaje de fondo permanece sin rotar, a este modo de perforación se le conoce en campo como perforar deslizando. El segundo modo es cuando toda la sarta de perforación, incluyendo el ensamblaje de fondo y la mecha rotan, a este modo de perforación se le conoce en campo como perforar rotando.

Es muy importante conocer en qué modo se está perforando en todo momento ya que ROPO solo recomienda valores de WOB y RPM cuando se está perforando rotando, del resto se encuentra inactivo, esto debido a que las RPM en superficie mientras se perfora deslizando son cero, y durante esta forma de perforación la ROP pasa a un segundo plano, en este caso lo más importante es la dirección en la que se perfora el pozo.

Por otra parte se puede evaluar el funcionamiento básico correcto del programa y los medios que lo integran por medio de este principio y así detectar algunos problemas. Sí el programa recomienda valores mientras se está perforando deslizando o sino recomienda valores cuando se está perforando rotando. Un problema que podría ocurrir durante la perforación es que los acelerómetros con los que cuenta el *Telescope* fallen y no permitan que los equipos de superficie detecten que la herramienta está rotando y por tanto que se está perforando rotando, en superficie sabríamos que estamos rotando porque le estamos aplicando una cierta cantidad de vueltas a la tubería de perforación pero el programa no tendría manera de saberlo, también puede darse el caso contrario pero menos posible, en el que se esté perforando deslizando y por fallas en los acelerómetros de la herramienta MWD, los programas de superficie detecten que estamos perforando rotando.

Otro error que podría darse, es que, por error humano o por falla del sensor de profundidad en algún momento durante la perforación se deje de detectar que se está perforando, y por tanto la profundidad del hoyo no cambie, a esto se le conoce como perforar sin registrar, y lo cual sería un gran problema si ocurriese y no se detectara con la mayor prontitud posible, ya que, en todo ese espacio perforado no se tendrán valores ROP. Se puede detectar por medio de ROPO si se está perforando rotando, en vista que, si ocurre este hecho el programa dejará de recomendar valores, pero si se está perforando deslizando no podremos saberlo mediante ROPO porque el programa no estará recomendando valores en ese momento.

4.8.9 Características del lodo

Es muy importante estar monitoreando las características del lodo constantemente, puesto que, depende de él en gran medida la eficiencia en la remoción del sistema de los ripios cortados por la mecha y la estabilidad del hoyo para evitar derrumbes e hinchamientos de arcillas reactivas. Durante este trabajo de investigación se observaran características como: densidad, punto cedente, viscosidad plástica y porcentaje de sólidos, esto se realizará mediante los reportes de lodos suministrados

tres veces al día, en este caso por la empresa Halliburton, encargada de todo lo referente al lodo durante la perforación del pozo 1.

4.9 Todo listo para el uso de ROPO

Una vez que se tenían clara las características del pozo, los límites que debíamos establecerle a ROPO para garantizar su buen funcionamiento durante su ejecución, también conocer de qué manera observamos cada uno de los parámetros importantes para poder generar un buen trabajo de investigación, solo quedaría comenzar a perforar el pozo 1 (llamado así por políticas de privacidad de la empresa), en la sección de 17 ½”, utilizar ROPO cuando fuese posible y así determinar si este programa podría ayudar a optimizar la tasa de perforación en esta zona.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la ejecución del programa computación ROPO de la empresa Schlumberger, en cuanto a las ROP alcanzadas durante la perforación del pozo 1 en la sección 17 ½”, así como el razonamiento, comparación y discusión de los mismos.

Para lograr el mejor resultado investigativo posible se decidió comparar los resultados de las perforaciones en el pozo 1, sección 17 ½” cuando se utilizó ROPO, con los resultados de las perforaciones en el mismo pozo, en la misma sección pero mientras no se utilizaba el programa, ya que, este no fue utilizado durante toda la sección, y que mejor manera de comparar resultados de perforación, en un mismo pozo, en donde se tienen los mismos equipos de superficie, los mismos tipos de lodos, las mismas propiedades de formación, el mismo talento humano en cuanto al personal del taladro, entre otras cosas.

5.1 Ensamblajes de fondo usados en la sección

Durante la perforación del pozo 1, llamado así por políticas de privacidad de Schlumberger y la empresa operadora, en la sección 17 ½” comprendida entre 5.006 y 12.387 pies aproximadamente, se debieron utilizar 3 BHA, por distintos motivos, los cuales se presentan a continuación.

En cada una de las tablas de BHA que se muestran a continuación podremos observar algunas características importantes de las herramientas tales como; el nombre de la pieza o herramienta en la columna número dos, en la número tres a quien le pertenece la herramienta, luego el serial de la herramienta, después diámetro interno y externo de la misma, en la columna cinco el máximo diámetro externo, en la columna siete se observa el diámetro de la conexión de la herramienta, tanto arriba como

abajo, en la columna ocho el tipo de rosca de la conexión, en la nueve, si la conexión es tipo caja o tipo pin, luego la longitud de la herramienta, en la columna once la longitud acumulada hasta esa pieza, y por último en la doce el peso acumulado hasta esa pieza.

En el **BHAN° 1**, se utilizó para perforar entre los 5.006 y 5.500 pies de profundidad y se debio que cambiarlo por problemas en la mecha. Este contaba con una mecha bicéntrica 14 1/2" x 17 1/2" serial JG4765 propiedad de Schlumberger y un motor de fondo A962M2752XP (BH: 1,5°, Factor: 0.11 rpm/gal) serial 3242 de Schlumberger, como se muestra en la tabla 5.1 y la figura 5.1.

Tabla 5.1 Ensamblaje de fondo número uno utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 1/2”.

	Descripción	Propietario	Número de Serial	OD (in)	Máx OD (in)	Tamaño Inf. (in)	Tipo Inf.	Género Inf.	Longitud (pie)	Longitud Acum. (pie)	Peso Acum. (1000 lbm)
				ID (in)		Tamaño sup. (in)		Tipo Sup.			
1	Mecha Bicéntrica 14 1/2" x 17 1/2"	Smith	JG-4765	9,000	14,500				1,76	1,76	0,6
				3,750		7,625	Regular	Pin			
2	A962M5640XP (BH: 1.5 deg. Factor: 0.11 rpm/gal)	Schlumberger	3242	9,670	14,125				30,49	32,25	6,8
				7,880		7,625	Regular	Box			
3	Top Sub	Schlumberger	CAAP12320-20-1	9,640	9,640				4,16	36,41	7,7
				2,500		7,625	Regular	Pin			
4	Crossover (7 5/8" Reg Pin x 6 5/8" Reg Box)	Schlumberger	TRD-55666	9,470	9,470				3,90	40,31	8,6
				2,810		6,625	Regular	Box			
5	Short Monel (2 joints)	Schlumberger	74502	8,250	8,250				9,99	50,30	10,2
				2,750		6,625	Regular	Box			
6	Crossover (6 5/8" Reg Pin x 6 5/8" FH Box)	Schlumberger	1AL00657-4/2	8,250	8,250				1,57	51,87	10,4
				2,810		6,625	FH	Box			
7	LSS MWD	Schlumberger	W7172-1	8,380	8,380				1,03	52,90	10,6
				4,130		6,625	FH	Pin			
8	MWD - Telescope	Schlumberger	G1754	8,410	8,410				25,23	78,13	14,2
				4,250		6,625	FH	Box			
9	USS MWD	Schlumberger	E2723-2	8,270	8,270				1,48	79,61	14,4
				4,250		6,625	Regular	Box			
10	Estabilizador 14 1/4"	Schlumberger	XP-3027-8	8,050	14,000				8,17	87,78	15,8
				2,500		6,625	Regular	Box			
11	Monel (3 joints)	Schlumberger	SDB74472	8,360	8,360				30,43	118,21	20,8
				2,750		6,625	Regular	Pin			
12	3 x 8" DC (3 joints)	PDVSA	PDVSA	8,000	8,000				92,95	211,16	34,7
				2,813		6,625	Regular	Box			
13	Hydraulic Jar	Schlumberger	81173E	8,050	8,050				32,12	243,28	38,4
				3,000		6,625	Regular	Pin			
14	2 x 8" DC (2 joints)	PDVSA	PDVSA	8,000	8,000				61,79	305,07	47,6
				2,813		6,625	Regular	Box			
15	Crossover (6 5/8" Reg Pin x 4 1/2" XH Box)	PDVSA	PDVSA	8,000	8,000				4,11	309,18	48,2
				2,875		4,500	XH	Box			
16	6 x 6 1/4" DC (2 Parejas) (6 joints)	PDVSA	PDVSA	6,250	6,250				181,00	490,18	63,0
				2,875		4,500	XH	Box			
17	Crossover (4 1/2" XH Pin x 5 1/2" FH Box)	PDVSA	PDVSA	7,000	7,000				4,04	494,22	63,5
				2,750		5,500	FH	Pin			
18	15 x 5 1/2" HWDP (5 Parejas) (15 joints)	PDVSA	PDVSA	5,500	7,250				459,38	953,60	91,8
				3,250		5,500	FH	Box			
19	Crossover (5 1/2" FH Pin x HT55 Box)	Schlumberger	1AL00657-4/2	8,250	8,250				3,72	957,32	92,4
				2,810		5,500	HT50	Box			
20	432 x 5-1/2" DPS (144 Parejas) (432 joints)	PDVSA	PDVSA	5,428	5,875				13691,96	14649,28	412,8
				4,778		5,500	HT50	Box			

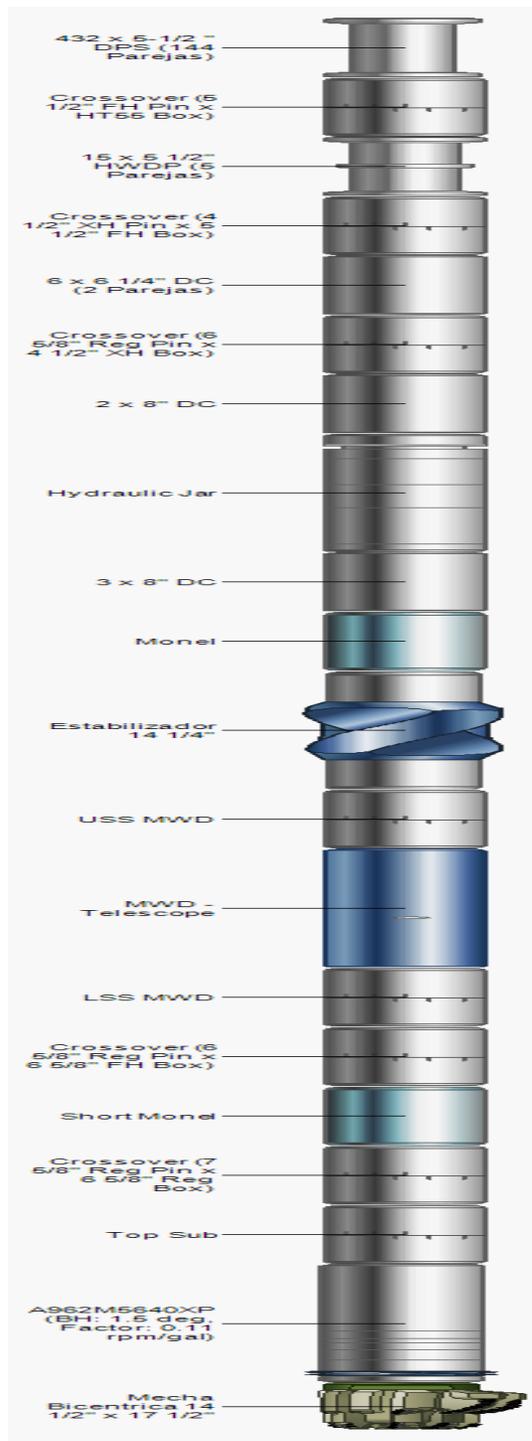


Figura 5.1 Ensamblaje de fondo número uno utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 1/2”.

El **BHAN° 2** fue utilizado para perforar entre 5.500 y 10.800 pies aproximadamente. Conto con una mecha bi-céntrica 14 1/2" x 17 1/2" serial JG4766 también propiedad de Schlumberger la cual reemplaza la utilizada en el BHA 1, que fue cambiada por desgaste, por otra parte se agregó un segundo estabilizador de 14 1/2" serial 697014 de Schlumberger, esto debido a que el nuevo motor de fondo A962M5640XP (BH: 1.5 deg, Factor: 0.11 rpm/gal) serial 7159 no cuenta con la camisa estabilizadora la cual cumple la misma función de un estabilizador. Esto puede verse en la tabla 5.2 y la figura 5.2.

Tabla 5.2 Ensamblaje de fondo número dos utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 $\frac{1}{2}$ ".

	Descripción	Propietario	Número de Serial	OD (in)	Máx OD (in)	Tamaño Inf. (in)	Tipo Inf.	Género Inf.	Longitud (pie)	Longitud Acum. (pie)	Peso Acum. (1000 lbm)
				ID (in)		Tamaño Sup. (in)	Tipo Sup.	Género Sup.			
1	Mecha Bicéntrica 14 1/2" x 17 1/2" (TFA: 1.48)	Schlumberger	JG4766	9,000	14,500	7,625	Regular	Pin	1,79	1,79	0,6
				3,750							
2	A962M5640XP (BH: 1.5 deg, Factor: 0.11 rpm/gal)	Schlumberger	07159	9,670	9,670	7,625	Regular	Box	30,49	32,28	6,8
				7,880							
3	Top Sub	Schlumberger	CAAP12320-20-1	9,640	9,640	7,625	Regular	Pin	4,16	36,44	7,7
				2,500							
4	Estabilizador 14 1/2"	Schlumberger	697014	9,500	14,500	7,625	Regular	Pin	5,95	42,39	8,7
				2,500							
5	Crossover (7 5/8" Reg Pin x 6 5/8" Reg Box)	Schlumberger	TRD-55666	9,470	9,470	7,625	Regular	Pin	3,90	46,29	9,6
				2,810							
6	Short Monel (2 joints)	Schlumberger	74502	8,250	8,250	6,625	Regular	Pin	9,99	56,28	11,2
				2,750							
7	Crossover (6 5/8" Reg Pin x 6 5/8" FH Box)	Schlumberger	1AL00657-4/2	8,250	8,250	6,625	Regular	Pin	1,57	57,85	11,4
				2,810							
8	LSS MWD	Schlumberger	W7172-1	8,380	8,380	6,625	FH	Pin	1,03	58,88	11,6
				4,130							
9	MWD - Telescope	Schlumberger	G1754	8,410	8,410	6,625	FH	Box	25,23	84,11	15,2
				4,250							
10	USS MWD	Schlumberger	E2723-2	8,270	8,270	6,625	REG	Box	1,48	85,59	15,4
				4,250							
11	Estabilizador 14 1/4"	Schlumberger	XP-3027-8	8,050	14,000	6,625	Regular	Pin	8,17	93,76	16,8
				2,500							
12	Monel	Schlumberger	SDB74472	8,360	8,360	6,625	Regular	Pin	30,43	124,19	21,8
				2,750							
13	3 x 8" DC (1 Pareja) (3 joints)	PDVSA	PDVSA	8,000	8,000	6,625	Regular	Pin	92,95	217,14	35,7
				2,813							
14	Hydraulic Jar	Schlumberger	81173E	8,050	8,050	6,625	Regular	Pin	32,12	249,26	39,4
				3,000							
15	2 x 8" DC (2 joints)	PDVSA	PDVSA	8,000	8,000	6,625	Regular	Pin	61,79	311,05	48,6
				2,813							
16	Crossover (6 5/8" Reg Pin x 4 1/2" XH Box)	PDVSA	PDVSA	6,250	8,000	4,500	XH	Pin	4,11	315,16	49,2
				2,875							
17	6 x 6 1/4" DC (2 Parejas) (6 joints)	PDVSA	PDVSA	7,000	6,250	4,500	XH	Pin	181,00	496,16	64,0
				2,875							
18	Crossover (4 1/2" XH Pin x 5 1/2" FH Box)	PDVSA	PDVSA	5,500	7,000	5,500	FH	Pin	4,04	500,20	64,5
				2,750							
19	15 x 5 1/2" HWDP (5 Parejas) (15 joints)	PDVSA	PDVSA	8,250	7,250	5,500	FH	Pin	459,38	959,58	92,8
				3,250							
20	Crossover (5 1/2" FH Pin x HT55 Box)	Schlumberger	1AL00657-4/2	5,428	8,250	5,500	HT50	Pin	3,72	963,30	93,4
				2,810							
21	432 x 5-1/2" DPS (144 Parejas) (432 joints)	PDVSA	PDVSA	4,778	5,875	5,500	HT50	Box	13691,96	14655,26	413,8

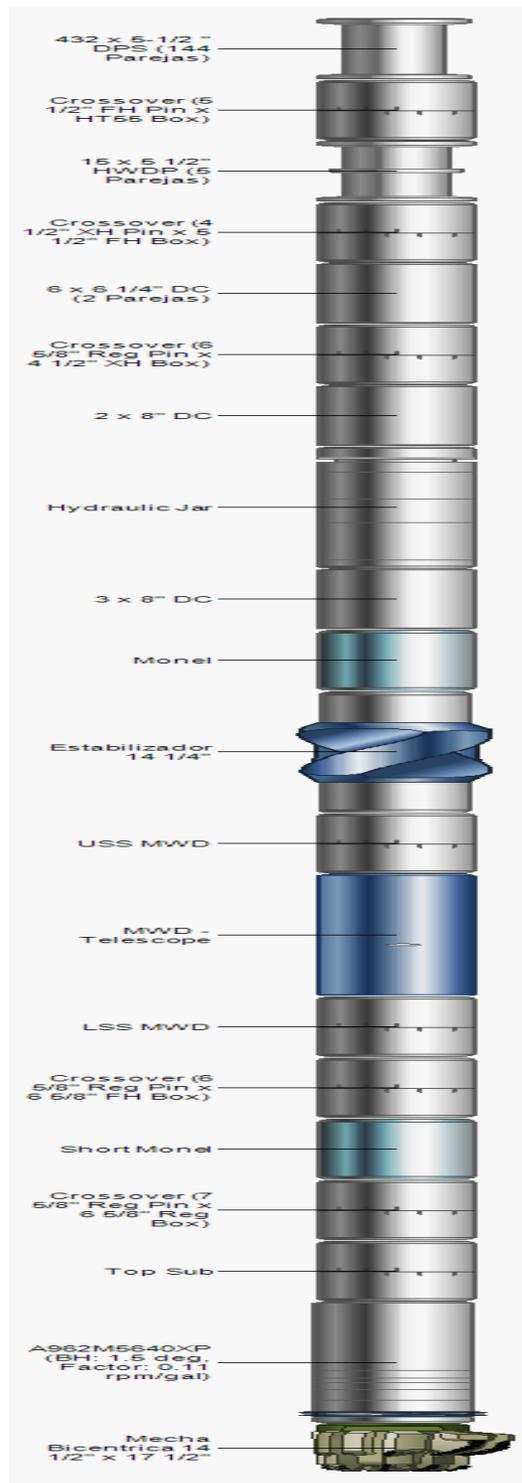


Figura 5.2 Ensamblaje de fondo número dos utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 1/2".

El BHA³ se utilizó para perforar entre 10.800 y 12.550 pies aproximadamente. En este caso se cambió solo la mecha bi-céntrica 14 1/2" x 17 1/2" serial JG4766 de la empresa Smith reemplazada por bi-céntrica 14 1/2" x 17 1/2" serial JG6459 también de la empresa Smith desde hace poco propiedad de Schlumberger, la cual al igual que en el segundo BHA se cambió por desgaste. También se aprovechó para cambiar el motor de fondo reemplazándose el A962M5640XP (BH: 1,5°, Factor: 0,11 rpm/gal) serial 07159 propiedad de Schlumberger por otro también de Schlumberger A962M7848GT (BH: 1,5°, Factor: 0.11 rpm/gal) serial 02606 por estar próximo a cumplir sus horas de circulación límite.

Tabla 5.3 Ensamblaje de fondo número tres utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 1/2".

Descripción	Propietario	Número de Serial	OD (in)	Máx OD (in)	Tamaño Inf. (in)	Tipo Inf.	Género Inf.	Longitud (pie)	Longitud A cum. (pie)	Peso Acum. (1000 lbm)	Cum. Weight (1000 lbm)
			ID (in)		Tamaño sup. (in)		Género Sup.				
1 Mecha Bicéntrica 14 1/2" x 17 1/2" (TFA: 1.31)	Schlumberger	JG6459	9,000	17,500	7,625	REG	Pin	0,000	1,79	1,79	0,6
			3,750				Pin	0,00			
2 A962M7848GT (BH: 1.5 deg. Factor: 0.11 rpm/gal)	Schlumberger	02606	9,500	9,938	7,625	REG	Box	0,000	30,51	32,30	6,8
			7,880				Box	0,00			
3 Top Sub	Schlumberger	CABP94953 6-4-30	9,500	9,500	7,625	Regular	Pin	0,000	4,10	36,40	7,7
			2,500				Box	0,00			
4 Estabilizador 14 1/2"	Schlumberger	697014	9,500	14,500	7,625	Regular	Pin	9,500	5,95	42,35	8,7
			2,500				Box	1,55			
5 Crossover (7 5/8" Reg Pin x 6 5/8" Reg Box)	Schlumberger	TRD-55666	9,470	9,470	7,625	REG	Pin	0,000	3,90	46,25	9,5
			2,810				Box	0,00			
6 Short Monel	Schlumberger	74502	8,250	8,250	6,625	REG	Pin	0,000	9,99	56,24	11,1
			2,750				Box	0,00			
7 LSS MWD	Schlumberger	W7191-3	8,020	8,020	6,625	FH	Pin	0,000	1,66	57,90	11,3
			4,130				Pin	0,00			
8 MWD - Telescope	Schlumberger	E9307	8,125	8,125	6,625	FH	Box	0,000	25,17	83,07	15,0
			4,250				Box	0,00			
9 USS MWD	Schlumberger	W7052-2	8,270	8,270	6,625	FH	Pin	0,000	1,41	84,48	15,2
			4,250				Box	0,00			
10 Estabilizador 14 1/4"	Schlumberger	XP-3027-8	8,050	14,000	6,625	Regular	Pin	8,050	8,17	92,65	16,5
			2,500				Box	2,89			
11 Monel	Schlumberger	SDB74472	8,360	8,360	6,625	Regular	Pin	0,000	30,43	123,08	21,6
			2,750				Box	0,00			
12 3 x 8" DC (1 Pareja)	PDVSA	PDVSA	8,000	8,000	6,625	Regular	Pin	0,000	92,95	216,03	35,4
			2,813				Box	0,00			
13 Hydraulic Jar	Schlumberger	81173E	8,050	8,050	6,625	Regular	Pin	8,050	32,12	248,15	39,1
			3,000				Box	2,55			
14 2 x 8" DC	PDVSA	PDVSA	8,000	8,000	6,625	Regular	Pin	0,000	61,79	309,94	48,4
			2,813				Box	0,00			
15 Crossover (6 5/8" Reg Pin x 4 1/2" XH Box)	PDVSA	PDVSA	8,000	8,000	4,500	XH	Pin	0,000	4,11	314,05	49,0
			2,875				Box	0,00			
16 6 x 6 1/4" DC (2 Parejas)	PDVSA	PDVSA	6,250	6,250	4,500	XH	Pin	6,750	181,00	495,05	63,8
			2,875				Box	3,12			
17 Crossover (4 1/2" XH Pin x 5 1/2" FH Box)	PDVSA	PDVSA	7,000	7,000	4,500	XH	Pin	0,000	4,04	499,09	64,2
			2,750				Box	0,00			
18 15x 5 1/2" HWD (5 Parejas)	PDVSA	PDVSA	5,500	7,250	5,500	FH	Pin	0,000	459,38	958,47	92,5
			3,250				Box	0,00			
19 Crossover (5 1/2" FH Pin x HT55 Box)	Schlumberger	1AL00657-4/2	8,250	8,250	5,500	FH	Pin	0,000	3,72	962,19	93,1
			2,810				Box	0,00			
20 432 x 5-1/2" DPS (144 Parejas)	PDVSA	PDVSA	5,428	5,875	5,500	HT50	Pin	0,000	13691,96	14654,15	413,5
			4,778				Box	0,00			

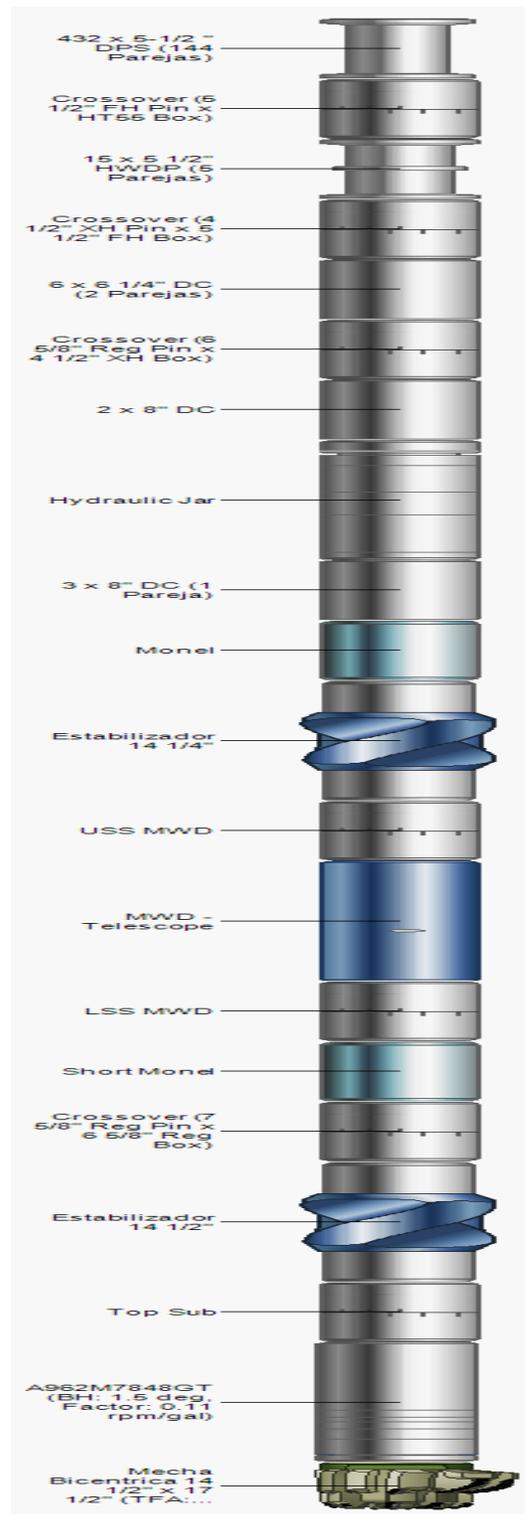


Figura 5.3 Ensamblaje de fondo número tres utilizado durante la perforación del pozo 1, sección 17 1/2".

La configuración de estabilizadores presentes en los tres BHA en donde el estabilizador inferior o delantero es de mayor diámetro que el superior o el trasero, en este caso 14,5” el inferior y 14” el superior, está demostrada que ayuda en la construcción de ángulos durante la perforación, pero aun así fue usada durante toda construcción de la sección, lográndose los objetivos de dirección y rumbo del pozo en las distintas etapas de construcción de ángulo desde los 5.500 ft hasta los 6.500 ft , mantenimiento de ángulo en la tangente hasta 9.500 ft y durante decrecimiento de ángulo hasta los 12.387 ft.

Esto debido a la poca diferencia de diámetro existente entre los estabilizadores el cual es de solo ½” y el espaciamiento de 50 ft entre los dos, la cual le da una gran maniobrabilidad al BHA en las distintas condiciones de construcción del pozo.

5.2 WOB y RPM promedio usados durante la perforación en modo rotacional de la sección 17 ½” del pozo 1

A continuación mostraremos los distintos valores de WOB y sus respectivos valores de RPM promedio utilizados durante la perforación rotacional en la sección 17 ½” del pozo 1 y el promedio de ROP alcanzado con cada valor, para así poder visualizar de qué manera influenciaron estos parámetros durante la perforación, tal como se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Valores en lb-f de peso sobre la mecha aplicados durante la perforación rotacional del pozo 1 en la sección 17 ½”.

Valor de WOB (lb-f)	Valor de RPM Promedio	ROP promedio (ft/hr)	Pies perforados (ft)
5000	40	13,77	82
6000	40	19,93	320
7000	40	17,51	69
8000	41	33,99	409
10000	43	30,94	282
11000	43	31,08	95
12000	42	27,53	320
13000	46	25,95	122

En la tabla anterior se puede ver que fueron ocho los valores de WOB implementados únicamente durante la perforación rotacional, los cuales están entre 5.000 y 13.000 lb-f, evidenciándose que los mayores valores de ROP promedio están entre 8.000 y 11.000 lb-f, con valores de RPM respectivos entre 41 y 43 vueltas por minuto. Se puede notar que los valores promedios de RPM no varían mucho a lo largo de la perforación teniendo como valor mínimo 40 RPM y como máximo valor de RPM 46. En la figura 5.4, se puede observar los valores de ROP alcanzados con cada valor de WOB.

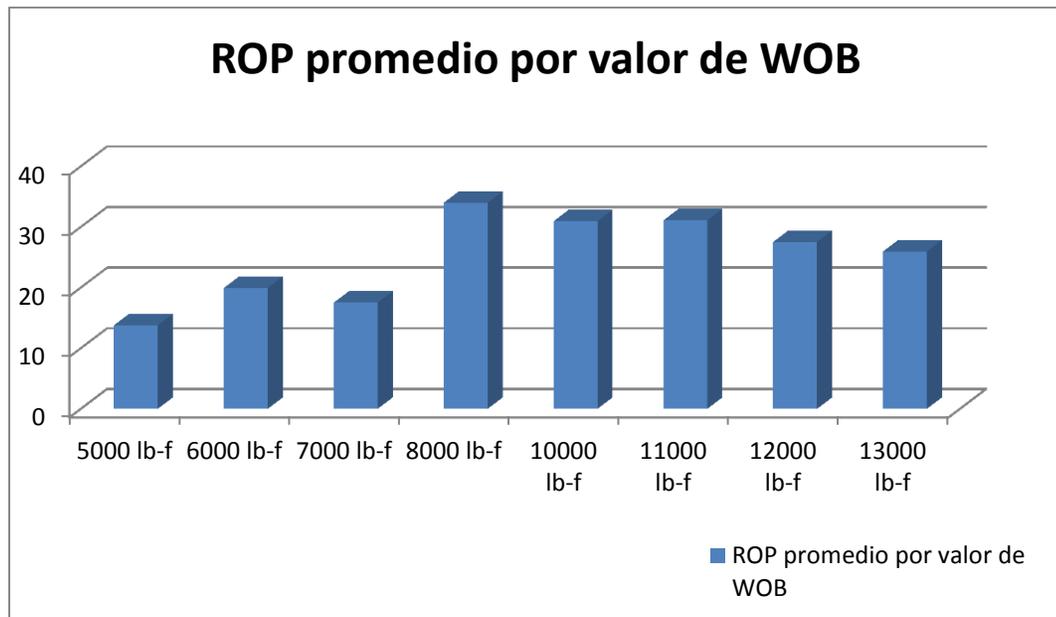


Figura 5.4 ROP promedio por cada valor de WOB aplicado durante la perforación del pozo 1 en la sección de 17 ½”.

Esto podría deberse a que el segundo punto de cambio de linealidad del principio en el cual se basa el programa ROPO este alrededor de los 8.000 ó 9.000 lb-f para este caso de perforación, y a partir del cual sin importar que tanta fuerza se aplique sobre la mecha las ROP no se verán beneficiadas sustancialmente. Esto debido a que el área de contacto de los dientes de la mecha ha alcanzado su máximo óptimo y están cortando la cantidad máxima de ripios por revolución.

5.3 WOB y RPM promedio usados durante el uso de ROPO en la perforación en modo rotacional de la sección 17 ½” del pozo 1

Durante la implementación de ROPO en la perforación del pozo 1, los valores recomendados por el programa, estuvieron entre 8.000 y 12.000 lb-f en los momentos donde se perforaba rotando, y los cuales fueron aplicados de la manera siguiente, como se muestra en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Valores de peso sobre la mecha usados durante la implementación de ROPO en la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.

Valor de WOB (lb-f)	Valor de RPM Promedio	ROP promedio (ft/hr)	Pies perforados (ft)
8000	53	44,20	61
10000	55	52,04	220
11000	51	27,04	38
12000	57	23,35	195

Los demás valores de WOB aplicados durante el resto de la perforación no fueron aplicados en este caso, ya que ROPO no los recomendó.

Los valores de WOB están asociados a ciertos valores de RPM promedio, los cuales están entre 51 y 57 revoluciones por minuto como valores mínimos y máximos respectivamente. En la tabla anterior se evidencia que los valores recomendados de peso sobre la mecha por ROPO respecto a los pies perforados son, en primer lugar 10.000 lb-f con una perforación de 220 pies y unas RPM promedio asociadas de 55, en segundo lugar 12.000 lb-f y una RPM promedio de 57 con una perforación asociada de 195 pies. En cuanto a las ROP que es lo que se busca mejorar en este estudio de investigación, tenemos que 10.000 lb-f de peso sobre la mecha fue con lo que se logró generar mayor tasa de penetración con un promedio de 52,04 pies por hora.

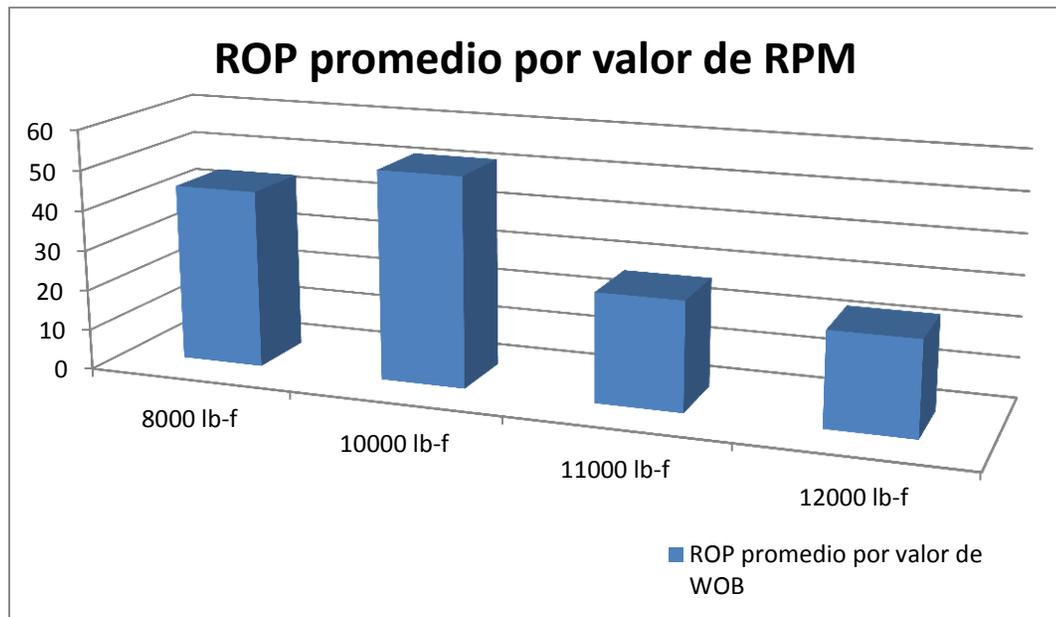


Figura 5.5 ROP promedio por cada valor de número de revoluciones por minuto aplicado durante la perforación del pozo 1 en la sección de 17 ½”.

Durante estos períodos de perforación se observó de manera muy expedita el cumplimiento de los valores de pesos sobre la mechas recomendados por ROPO a ser seguidos por el perforador, estando el mayor tiempo posible junto al perforador y estando pendiente que no aplicara ni más ni menos peso a la mecha del recomendado por el programa, ya que tienden a distraerse muchas veces durante la perforación, pero aun así, no es tan fácil mantener el peso constante sobre la mecha. Esto podremos evaluarlo con más precisión cuando analicemos más adelante el reporte del porcentaje de seguimiento de los valores recomendados generado por el mismo ROPO.

5.4 RPM usados durante la perforación de la sección 17 ½” del pozo 1

Las revoluciones por minuto en superficie aplicadas durante la perforación del pozo sin la utilización de ROPO se muestran en la tabla 5.6, donde se evidencia que los valores implementados son múltiplos de cinco, lo cual acostumbran hacer los perforadores direccionales de ir asignando valores de RPM a la sarta de perforación

de cinco en cinco, por otro parte, el rango de estos valores están entre 35 y 55RPM como valores mínimo y máximo respectivamente.

Tabla 5.6 Valores de revoluciones por minutos en superficie usados en la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.

Valor de RPM	Valor de WOB promedio (lb-f)	ROP promedio (ft/hr)	Pies perforados (ft)
35	9,3	24,99	217
40	7,9	27,02	1153
45	11,4	33,95	122
50	10,0	72,71	90
55	12,1	42,63	318

Se puede evidenciar en la tabla anterior que el valor de revoluciones por minuto con la que se obtuvo la máxima tasa de penetración durante la perforación fue de 50 RPM y 10,0 lb-f de WOB promedio con una ROP promedio asociada de 72,71 ft/hr, pero con la desventaja que solo fue implementada en 90 de los 1840 pies perforados rotando que se tienen en el pozo 1. También se evidencia que en algunos casos cuando las RPM aumentan los valores de ROP también lo hacen, esto nos obliga a plantear la pregunta de por qué no aumentar las RPM, y así aumentamos la tasa de penetración, pero en algunos casos cuando se superaban las 50 RPM, comenzábamos a tener problemas de choques y vibraciones en las herramientas de fondo, esto debido a que a mayor número de vueltas por minuto, si los dientes de la mecha no están lo suficientemente afianzados al fondo del hoyo y a una profundidad adecuada y sobre todo en presencia de formaciones muy duras y compactadas, la tubería de perforación comienza a presentar este tipo de problemas, que en vez de contribuir al aumento de la ROP, lo afecta. El valor más utilizado de RPM fue el de 40, con un WOB promedio de 7,9 lb-f perforándose con estos parámetros 1153 pies.

5.5 RPM usados durante el uso de ROPO en la perforación de la sección 17 ½” del pozo 1

Las RPM en superficie aplicadas gracias a las recomendaciones dadas por ROPO siguen manteniendo la misma estructura de ser múltiplos de cinco, presentes en la perforación convencional sin el uso del programa, y se hizo con la finalidad de no afectar el modo de trabajo al que están acostumbrado los perforadores del taladro. Para esto se decidió redondear por arriba por abajo al múltiplo de cinco más cercano al valor recomendado por ROPO. Los valores aplicados se muestran en la tabla 5.7 presentada a continuación.

Tabla 5.7 Valores de revoluciones por minutos en superficie usados durante el uso de ROPO en la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.

Valor de RPM	Valor de WOB promedio (lb-f)	ROP promedio (ft/hr)	Pies perforados (ft)
50	8,3	34,60	164
55	10,7	45,99	179
60	11,6	38,68	171

Los demás valores de RPM aplicados durante la perforación no fueron utilizados en este caso, debido a que el programa no los recomendó.

Los valores de RPM en superficie recomendados por ROPO estuvieron entre 50 y 60 vueltas por minuto, siendo el valor que proporcione una mayor ROP el de 55 RPM y 10,7 lb-f de WOB con una ROP promedio asociada de 45,99 ft/hr, con estas propiedades se lograron perforar 179 de los 514 pies perforados con el programa, teniendo los otros dos valores de RPM pies perforados muy parecidos al de 55 RPM. Los valores promedios de WOB aplicados, estuvieron entre 8,3 y 11,6 lb-f como valor mínimo y máximo respectivamente.

5.6 Características del lodo en la perforación de la sección 17 ½” del pozo 1

Durante la perforación del pozo 1, tanto en condiciones normales como mientras se utilizaba ROPO se monitorearon algunas propiedades del lodo tales como, punto cedente, viscosidad plástica, porcentaje de sólidos y densidad estática. Esto con el fin de poder establecer de qué manera era afectada la ROP durante la perforación debido a los cambios presentes en el lodo. O si por el contrario las propiedades del mismo cambiaban considerablemente con los cambios de ROP. En la tabla 5.8, que se presenta a continuación se mostrarán los valores promedios arrojados del seguimiento.

Tabla 5.8 Valores promedios de las propiedades del lodo a la salida del pozo durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.

Uso o no de ROPO	Densidad (lpg)	Punto cedente (lb/100 ft ²)	Viscosidad plástica (cps)	Porcentaje de sólidos (%)
Perforación sin ROPO	15,41	11,30	26,19	34,22
Perforación con ROPO	15,5	10,67	25,33	37,33

Tabla 5.9 Tasa de flujo promedio empleada durante la perforación del pozo 1, sección 17 ½”.

Uso o no de ROPO	Tasa de flujo (gal/min)
Perforación sin ROPO	719
Perforación con ROPO	714

Se puede notar en las tablas anteriores que la diferencia entre el punto cedente y la viscosidad plástica mientras se perforó con el uso de ROPO y sin el uso de él no es significativo. Sin embargo existe una pequeña diferencia en el porcentaje de sólido el cual puede deberse a las mayores velocidades de cortes de ripios durante el uso del ROPO evidenciado en las mayores tasas de penetración, y con ello la menor tasa de flujo que se obtuvo en estas circunstancias, lo cual, limita la velocidad en la que los ripios cortados por la mecha llegan a superficie y por tanto se mantienen mayor

tiempo en el lodo aumentando así el porcentaje de los mismo en el lodo una vez llega a los tanques de retorno.

5.7 Tiempos de perforación totales de la sección 17 ½” del pozo 1

En la tabla 5.10 se puede evidenciar los tiempos totales implementados para perforar la tercera sección del pozo 1, es decir, la de 17 ½” en la cual se perforaron 6.765 pies en ellos se atravesó casi por completo la formación Carapita, y para lo cual fueron necesarias 441,18 horas de perforación lo cual equivale a un poco más de 18 días y en donde fueron necesarios tres ensamblajes de fondo.

De estas 441,18 horas totales de perforación, 269,44 horas fueron haciendo perforaciones deslizando y las 171,74 restantes perforaciones rotando, representando un 61,07 % y 38,93% respectivamente. Durante la perforación deslizando se logró una ROP promedio de 11,2 ft/hora y mientras se perforó rotando se alcanzó una ROP promedio igual a 30,6 ft/ hr.

Tabla 5.10 Tiempos de perforación y ROP promedio durante la realización del pozo 1, sección 17 ½”.

Horas de perforación	Pies perforados (ft)	ROP promedio (ft/hr)	Porcentaje de perforación (%)	Modo de perforación
269,33	3205	30,6	61,07	Rotando
171,74	3560	11,2	38,93	Deslizando
441,18	6765	20,9	100	Totales

Esta diferencia tan grande entre los tiempos de perforación rotando y deslizando se debe a la dificultad que se presentó durante la perforación para poder llevar el pozo a través de la trayectoria indicada y requerida por el cliente, en la cual el margen de error era muy poco. Esta dificultad puede deberse a lo que los ingenieros direccionales llaman problema de excentricidad de las mechas bi-céntricas, y se refieren a que es muy difícil mantener la dirección del pozo con este tipo de mechas, ya que, sus aletas más grande al no estar en todo el perímetro de la cara de la mecha

dificulta determinar cuál será la dirección que tomara el pozo durante la perforación, de aquí que, se requieran muchos pies perforados con métodos de deslizamiento para poder corregir la dirección del pozo, y poder así regresarlo a la trayectoria planteada, cosa que no puede hacerse mientras se perfora rotando.

5.8 Tiempos de perforación mientras se usó ROPO

En la tabla 5.11, se muestran los tiempos necesarios para perforar parte de la formación Carapita desde los 8.946 pies hasta los 9.933 pies atravesando lutitas de grano muy fino, mientras se empleaba el programa ROPO para que recomendara los valores de WOB y RPM a utilizar mientras se perforaba rotando.

ROPO pudo ser utilizado por aproximadamente tres días, comenzando el primer día a las 7:40 am y terminando a las 7:39 tres días después, en los cuales pudo recomendar valores en diez oportunidades aproximadamente, trabajando con total normalidad y sin ningún tipo de imprevisto.

Tabla 5.11 Tiempos de perforación mientras se usó ROPO.

Hora de inicio	Hora final	Prof. de inicio (ft)	Prof. final (ft)	Pies perforados (ft)	ROP (ft/hr)	Modo de perforación
07:40	11:10	8946,00	9040,00	94,00	26,85	Rotando
12:11	19:12	9040,00	9135,00	95,00	13,53	Deslizando
20:00	21:18	9135,00	9198,00	63,00	48,46	Rotando
21:37	00:35	9198,00	9229,00	31,00	10,44	Deslizando
01:30	05:43	9229,00	9299,00	70,00	16,59	Deslizando
05:45	06:01	9299,00	9322,00	23,00	86,25	Rotando
07:07	08:30	9322,00	9360,00	38,00	27,47	Rotando
09:00	13:39	9360,00	9417,00	57,00	12,26	Deslizando
14:30	17:38	9417,00	9493,00	76,00	20,92	Rotando
20:59	23:08	9493,00	9519,00	26,00	12,09	Deslizando
00:07	02:57	9519,00	9612,00	93,00	24,26	Rotando
03:54	04:49	9612,00	9648,00	36,00	40,0	Rotando
05:00	11:35	9648,00	9705,00	57,00	8,66	Deslizando
12:38	19:14	9705,00	9774,00	69,00	10,45	Deslizando
19:18	20:25	9774,00	9799,00	25,00	22,29	Rotando
22:15	05:05	9799,00	9867,00	68,00	9,96	Deslizando
05:07	05:38	9867,00	9892,00	25,00	48,39	Rotando
06:49	07:39	9892,00	9933,00	41,00	49,2	Rotando

Durante estos tres días en los cuales se implementó ROPO se pudieron perforar un total de 987 pies de los cuales 514 pies fueron rotando representando un 52,08 % del total perforado y 473 pies deslizando para un 47,92 % restante. Durante las perforaciones rotando se logró alcanzar una ROP promedio de 39,41 ft/hr, mientras cuando se deslizo se alcanzó una ROP promedio de 11,75 ft/hr, para totalizar una ROP promedio de 25,25 %, tal como se muestra en la tabla 5.12.

Tabla 5.12 Tiempos de perforación mientras se usó ROPO.

Pies perforados (ft)	ROP promedio (ft/hr)	Porcentaje de perforación (%)	Modo de perforación
514	39,41	52,08	Rotando con ROPO
473	11,75	47,92	Deslizándose sin ROPO
987	25,25	100	Totales

5.9 Porcentaje de cumplimiento por parte de los perforadores de las recomendaciones de WOB y RPM dadas por ROPO durante su uso

La tabla 5.13 que se presenta a continuación es quizás una de las de mayor importancia, ya que nos indica que porcentaje de cumplimiento o seguimiento de los valores recomendados por ROPO por parte de los perforadores del taladro durante las perforaciones. Es una pequeña tabla que el mismo ROPO genera automáticamente al concluir su uso en la perforación.

Tabla 5.13 Porcentaje de cumplimiento de los valores recomendados por ROPO por parte de los perforadores del taladro.

Parámetro	Cumplimiento en (%)	Cumplimiento en (hr)
WOB	56	7,30/13,04
RPM	97	12,65/13,04

Se puede observar en la tabla anterior que el porcentaje de cumplimiento del peso sobre la mecha esta por el orden del 56 % el cual parece bajo, pero realmente es alto, en comparación con otros valores de seguimiento registrados en el continente americano durante la utilización de ROPO donde seguimientos superior al 50% se consideran satisfactorios según los expertos, en vista de la dificultad que conlleva para el perforador mantener el peso sobre la mecha constante, tal como se ha explicado en puntos anteriores. Por otra parte el seguimiento de las RPM se cumplió en un 97%, siendo un valor bastante alto para la región, en el cual a partir de 90% de seguimiento se considera aceptable.

5.10 Comparación final de la perforación utilizando ROPO y sin el uso de él

A continuación se presenta la tabla 5.14, la cual muestra un promedio de los valores relevantes recabados durante este estudio de investigación, mientras se perforó el pozo 1, sección 17 ½” en modo rotacional con y sin el uso del programa ROPO de la empresa Schlumberger.

Tabla 5.14 Promedios y valores resaltantes durante la perforación rotacional del pozo 1 sección 17 ½”.

Modo de perforación	WOB (lb-f)	RPM (v/min)	ROP (ft/hr)	Cumplimiento de valores recomendados (%)	Pies perforados (ft)	Tiempo de perforación (hr)
Sin ROPO	9000	45	30,6	-	3205	269,33
Con ROPO	10250	55	39,41	76,5%	514	13,04

En la tabla anterior se muestra que el valor de ROP promedio obtenido durante el uso de ROPO alcanzo los 39,41 ft/hr, siendo superior a los 30,6 ft/hr alcanzados como ROP promedio durante la perforación sin el uso de ROPO, estos dos valores se lograron mientras se perforaba rotando, lo cual evidencia el factibilidad y optimización de la ROP que se puede obtener con el uso del programa. En la siguiente tabla se podrán observar las ganancias en tiempo que se logró con el uso de ROPO.

Tabla 5.15 Tiempo ganado mediante el uso de ROPO durante la perforación rotacional del pozo 1 sección 17 ½”.

Tiempo de perforación (hr)	Pies Perforados (ft)	Tiempo de no haberse utilizado ROPO (hr)	Tiempo ganado Con ROPO (hr)	Porcentaje de ganancia (%)
13,04	514	16,79	3,75	22,33

En la tabla 5.15, se puede observar que los 514 pies perforados usando ROPO se lograron atravesar en 13,04 horas, lo cual se hubiera logrado en 16,79 horas sin el usodel programa, tomando como base la ROP promedio que se tuvo mientras no se utilizó ROPO a lo largo de la perforación rotacional, la cual, fue de 30,6 ft/hr. Esto

representa una ganancia del 22,33%, lo cual se traduce en una reducción o ganancia en los tiempos de perforación de 3,75 horas.

Esta ganancia aunque es significativa está por debajo del promedio de ganancia que tiene el uso de ROPO en campos de la región del continente, en donde se encuentra por el orden del 45 %. Esto puede deberse a que es la primera vez que se corre el programa en campos venezolanos y no se cuentan con valores al respecto. ROPO tienen la característica que a medida que más se usa, se ajusta de mejor manera a las perforaciones de la región, ya que los datos de entrada establecidos como límites, podrían ser de mayor calidad y en mayor cantidad lo cual irá aumentando la eficiencia del uso del programa.

Otra causa posible puede ser la elevada profundidad a la que fue usada el programa, la cual estuvo entre los 9.000 y 10.000 pies, y aunque los pozos en esta región del país pueden alcanzar profundidad de hasta 21.000 pies, la compactibilidad creciente de la formación a medida que se va profundizando el hoyo puede afectar el funcionamiento del programa y disminuir su eficiencia.

Es cuestión de seguir investigando el uso del programa en estos campos venezolanos, mediante trabajos de investigaciones futuras, para poder evaluar mayores rangos de perforación y poder determinar las áreas o profundidades en las cuales ROPO es sustancialmente eficiente y así establecer su uso en estas áreas, tal como se ha establecido en otros países, como es el caso de Ecuador donde el programa solo se usa en 10 ó 20% del pozo, porque son las áreas donde realmente se ha demostrado ser eficiente el programa.

Por otra parte vale destacar, que el estudio puede realizarse de manera muy económica, casi sin gasto extra para la empresa, ya que la misma, cuenta con todos los equipos de superficie y sensores para poder recibir y procesar la data enviada desde el fondo del pozo y poder ser aprovechada para el uso del programa.

Uno de los proyectos más importantes en los cuales está trabajando el segmento *Drilling and Measurement* de Schlumberger Venezuela es la integración de los datos en tiempo real, que reciben los sensores de la empresa *Geoservice* la cual brinda los servicios de registro de lodo y que recientemente fue adquirida por la empresa Schlumberger. Esto sin duda ampliará la capacidad de monitoreo con la que actualmente cuenta el segmento, pudiendo aumentar así el rango de acción del programa, tal como ya se logró en Ecuador, donde ya está realizada esta integración de datos.

5.11 Ventana operacional con la cual se puede lograr optimizar la ROP

El rango de valores de WOB y RPM que a lo largo de este estudio lograron demostrar que pueden mejorar u optimizar las ROP durante la perforación de pozos similares en los campos de esta zona, se muestra en la tabla 5.16.

Tabla 5.16 Ventana operacional de WOB y RPM en superficie que pueden optimizar la ROP.

WOB (lb-f)	RPM (v/min)
8000-11000	45-55

Durante la aplicación de los valores de WOB y RPM en superficie se lograron alcanzar los mayores valores de ROP durante la perforación del pozo 1, los cuales podrían aplicarse en otros pozos con características similares a ser perforados en un futuro en la zona, siempre y cuando las propiedades mecánicas del pozo y los equipos de superficie del taladro a utilizar lo permitan.

CONCLUSIONES

- Se pudo comprobar que el uso del programa ROPO es viable en cuanto a la optimización de la ROP con ganancias en tiempo de perforación por encima del veinte por ciento en esta zona.
- Se podrían ahorrar muchas horas de perforación y con ello, disminuir los costos de totales de las perforaciones de estos pozos, alrededor de dos mil dólares por cada hora, a medida que el programa se utilice de manera más cotidiana.
- La formación Carapita brinda una gran oportunidad para desarrollar el uso de ROPO, ya que cuenta con un espesor de hasta ocho mil pies en algunas zonas del campo, formada por miles de pies de lutitas de grano fino y solo pequeñas intercalaciones de arena, lo cual favorece el buen desenvolvimiento del programa.
- Carapita fue atravesada en aproximadamente dieciocho días efectivos de perforación, de los cuales más de once fueron perforados rotando, lo que podría significar ahorros de hasta dos días y medios de perforación efectiva, con el uso de ROPO durante perforación de toda la formación.
- La eficiencia de ROPO puede ser mucho más elevada a medida que utilicemos el programa una mayor cantidad de veces y que los ingenieros de campo tanto de Schlumberger como de las empresas operadoras se familiaricen con el modo de trabajo del programa.

- Los ahorros en los tiempo de perforación puede significarle a Schlumberger como empresa desarrolladora del proyecto y específicamente al segmento *Drilling & Measurements*, notables beneficios, tales como mayor eficiencia en la realización del trabajo, menos costos de mantenimiento en las herramientas al perforar mayor número de pies por menores horas de circulación de las herramientas de fondo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda hacer constante seguimiento de los parámetros recomendados por ROPO por parte de los perforadores del taladro para asegurar así el máximo cumplimiento de los mismos.
2. Aplicar los valores más elevados recomendados por ROPO de WOB y RPM mientras no se esté utilizando el programa siempre y cuando las condiciones mecánicas y direccionales del pozo lo permitan.
3. Ampliar el rango de estudios a través de otras investigaciones en cuanto a profundidades perforadas con el uso de ROPO en los campos de formaciones consolidadas en el Oriente del país, para determinar los intervalos de profundidad de mayor eficiencia para el programa.
4. Aumentar el nivel de información acerca del programa en los ingenieros de campos pertenecientes al segmento.
5. Implementar el programa en otros pozos, y en las distintas etapas de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

- 1- PDVSA Aprendamos de Petróleo (s.f). 2 El Taladro de Perforación.
- 2- PEMEX Perforación y Mantenimiento de pozos (s.f). Guía Práctica para el Diseño de la Perforación Direccional y Control de la Desviación.
- 3- Richard S.(s.f). Barrena e Hidráulica de Perforación.
- 4- Santiago A. “Metodología de la Perforación de un Pozo Vertical Utilizando Brocas PDC en el Pozo AUCA 52”. Universidad Tecnológica Equinoccial. Ecuador, Mayo 2006.
- 5- SEFLU, Libro de Trabajos Técnicos. “III seminario de Fluidos de Perforación y Terminación de Pozos”, Maturín, Octubre (1996).
- 6- Arias, F. G. (1999). El proyecto de investigación, guía para su elaboración. Caracas: EPISTEME C.A. / ORIAL EDICIONES.
- 7- **Gustavo C.** “Estudio de la Optimizacion de Productos Quimicos Durante la Perforación en la Macolla 1 y 2 en el Area de Orocuál Somero del Estado Monagas”. Universidad de Oriente. Puerto La Cruz, Julio (2007).
- 8- Ascanio K. Y Damas O., “Evaluación de Fluidos de Perforación”, (1998).
- 9- IMCO, “**Tecnología Aplicada a Lodos**”. IMCO Services Halliburton, Houston Texas,1981.
- 10- Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela. PDVSA Intevep, 2011.
- 11- PDVSA. Ingeniería de Definición ORS – SJNS7; W19; Alll.
- 12- Oilproduction.net. Diseño de la Perforación de Pozos. Junio, 2014.
- 13- Schlumberger software. ProgramaHSPM. Drilling and Measurement.
- 14- ROPO Technology Watch_D&M.
- 15- D&M Sistema de Superficie. Central de entrenamiento.
- 16- DDProgram. D&M_Schlumberger.
- 17- www.nov.com/.../top_drive...top_drives/tds-4.