

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA PETROLERA**



PROYECTO DE GRADO

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA
DIRECCIONAL DE ROTACIÓN CONTINUA RSS Y EL MOTOR DE
FONDO**

POSTULANTE: Univ. Kevin Cruz Chuquimia

TUTOR: Ing. Fernando Cuevas Banda

LA PAZ – BOLIVIA

2021



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a mi mamá, por su esfuerzo para sacarme adelante, por su amor incondicional, apoyo sincero en las buenas y en las malas, su cuidado, su atención y los valores que me dio para alcanzar mis sueños.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios porque me llena de bendiciones, me guía a lo largo de mi vida, me sostiene y me fortalece.

Me siento agradecido con Dios de haberme dado a los mejores padres. Gracias a mi papá y mi mamá por su amabilidad, su confianza y gracias a ellos tengo la oportunidad de obtener un título profesional.

También quiero agradecer a cada uno de mis familiares hermanas, abuelos, tíos, tías, primos por su cariño, confianza, y apoyo que me brindaron para seguir adelante con mis estudios. Soy muy feliz las veces que puedo reunirme con ellos.

Y finalmente quiero agradecer a mis amigos de la carrera de Ingeniería petrolera por todo su apoyo en avanzar juntos hasta culminar los estudios y pasar buenos momentos con ellos. A mis docentes por haber compartido sus conocimientos y experiencias a lo largo de mi preparación profesional, por sus consejos e impulso de animarme en avanzar y superarme.

RESUMEN EJECUTIVO

Las operaciones de desarrollo y extracción de pozos petroleros deben innovarse con el paso del tiempo, en busca de una producción más rápida, por lo que se plantea perforar y completar los pozos en tiempos menores. Estas necesidades precisan la aplicación de nueva tecnología para optimizar procesos, garantizando la reducción de riesgos y problemas operacionales.

Una de las nuevas tecnologías es el uso del sistema RSS el cual generó alta expectativa en la optimización de los resultados al reemplazar a los sistemas convencionales en el campo de estudio; no obstante, existe incertidumbre con respecto a su eficiencia en varios aspectos asociados.

Otra herramienta que es bastante usada por sus beneficios es el Motor de Fondo, por tanto, surge la necesidad de analizar técnica y económicamente, la aplicación de ambas herramientas y sus resultados, mediante el estudio de parámetros como ROP, RPM, GPM, etc.; ventajas y desventajas de estos mecanismos.

El presente análisis comparativo, presenta una prospección de los pozos perforados del campo los Sauces; clasificándolos acorde a herramientas y esquema mecánico, comparándolos de forma cualitativa y cuantitativa. Finalmente se plantea el análisis comparativo de costos, independientemente para sistema direccional, y por último los costos de las tarifas diarias; teniendo un total promediado para cada caso, determinando la factibilidad de la perforación con cada herramienta, y el porcentaje de ahorro.

Al realizar la evaluación técnico económica a través de ratios financieros dan como resultado que el VAN para el proyecto considerando los flujos de efectivo a 5 años, proporciona un valor de 14 588 877,54 \$ y la TIR un valor igual a 40,5 % indicando que la implementación del Proyecto es factible y altamente rentable

ÍNDICE DEL CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN EJECUTIVO	iii
ACRÓNIMOS	xiii
GLOSARIO	xv
CAPITULO I.....	1
GENERALIDADES	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Planteamiento del problema.....	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Justificación del Proyecto.....	4
1.5.1. Justificación económica.....	4
1.5.2. Justificación Técnica.....	4
1.6. Alcance	4
1.6.1. Alcance temático	4
1.6.2. Alcance geográfico	4
1.6.3. Alcance temporal	4
1.7. Metodología	5
1.7.1. Tipo de estudio	5

1.7.2. Método de Investigación	5
1.7.3. Fuentes de información.....	5
CAPITULO II.....	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1. Perforación.....	6
2.1.1. Depósitos de hidrocarburos	6
2.1.2. Tipos de pozos	7
2.1.2.1. Pozo exploratorio	8
2.1.2.2. Pozos productores	8
2.1.2.3. Pozos de desarrollo	8
2.1.2.4. Pozos de avanzada.....	8
2.2. Perforación direccional.....	8
2.2.1. Perfiles direccionales.....	10
2.2.2. Planeación direccional de la trayectoria de pozo tipo Slant.....	11
2.2.3. Diseño del armado de fondo BHA	15
2.2.3.1. Configuración de los ensambles de fondo.....	15
2.2.3.2. Punto neutro.....	16
2.2.3.3. Factor de flotación	17
2.2.3.4. Determinación de la longitud de los porta mechas.....	18
2.2.3.5. Determinación de la longitud de las barras pesadas	18
2.2.4. Herramientas direccionales	19
2.2.4.1. Motor de fondo	19
2.2.4.2. Sistema de rotación continua	19
2.2.5. Tipos de BHA.....	20
2.2.5.1. BHA tipo Fulcrum	20

2.2.5.2.	BHA tipo Pendular.....	20
2.2.5.3.	BHA empacado.....	20
2.3.	Tecnologías de perforación direccional.....	20
2.3.1.	Motores de fondo.....	21
2.3.1.1.	Motores tipo turbina	21
2.3.1.1.1.	Principio de funcionamiento	21
2.3.1.2.	Motores de fondo de desplazamiento positivo	21
2.3.1.2.1.	Principio de funcionamiento	22
2.3.1.2.2.	Mecanismos de perforación	23
2.3.1.2.3.	Partes del motor de desplazamiento positivo	24
2.3.2.	Perforación con motor de fondo.....	26
2.3.2.1.	Perforación direccional convencional.....	26
2.3.2.2.	Perforación direccional con motor de fondo.....	26
2.3.3.	Denominación del motor de fondo	29
2.4.	Sistema de rotación continua	30
2.4.1.	Perforación con Powerdrive.....	30
2.4.2.	Componentes del Power Drive	31
	31
2.4.2.1.	Bias Unit.....	31
2.4.2.2.	Arreglo del Cross Over.....	32
2.4.2.3.	Unidad de control	33
2.4.3.	Principio de funcionamiento.....	33
2.4.4.	Mecanismos de perforación.....	34
2.4.4.1.	Sistema “Point The Bit”	34
2.4.4.2.	Sistema “Push The Bit”	34

2.4.4.2.1. Partes del Sistema de rotación continua “PUSH THE BIT”	35
CAPITULO III.....	36
MARCO REFENCIAL	36
3.1. Antecedentes del campo Los Sauces	36
3.1.1. Ubicación geográfica del campo.....	36
3.1.2. Secuencia estratigráfica	38
3.1.3. Sistema petrolero.....	41
3.1.4. Datos de la formación y del fluido.....	42
3.1.5. Datos del pozo.....	42
3.1.6. Tipos de RSS usados en pozos del campo Los Sauces	43
3.1.7. Diámetros de trabajo del Power Drive X6.....	43
3.1.8. Tipo de BHA utilizado en la perforación de pozos del campo Los Sauces	44
CAPITULO IV.....	47
MARCO PRÁCTICO	47
4.1. Análisis de perforación con motor de fondo	47
4.1.1. Análisis y resultados de perforación con motor de fondo y sistema RSS (Power Drive).....	47
4.1.1.1. Secuencia operativa de la perforación con motor de fondo.....	47
4.1.1.2. Diseño de la trayectoria direccional del pozo LSC-X5D	48
4.1.2. Secuencia operativa de la perforación con powerdrive	49
4.1.2.1. Diseño de la trayectoria direccional del pozo LSC-9D	50
4.1.3. Problemas y riesgos operacionales	52
4.2. Propuesta de esquema mecánico con sistema RSS y motor de fondo, comparación de resultados teóricos con reales	56

4.2.1.	Parámetros operacionales	56
4.2.1.1.	Profundidades y topes.....	56
4.2.1.2.	Diseño de BHA con motor de fondo para la sección de 12 ¼”	57
4.2.1.3.	Diseño de BHA con sistema RSS para sección de 12 ¼”	59
4.2.1.4.	Programa de fluidos de perforación	60
4.2.1.4.1.	Objetivos del fluido durante la perforación del pozo LSC-9D	60
4.2.1.4.2.	Características de los fluidos de perforación.....	60
4.2.1.5.	Parámetros a tomar en cuenta con cada herramienta	61
4.2.1.5.1.	Parámetros a tomar en cuenta con motor de fondo	61
4.2.1.5.2.	Parámetros a tomar en cuenta en pozos perforados con RSS ...	65
4.3.	Resultados obtenidos con cada herramienta	67
4.3.1.	Resultados ventajas y desventajas de perforación con motor de fondo 67	
4.3.1.1.	Ventajas	68
4.3.1.2.	Desventajas.....	68
4.3.2.	Resultados ventajas y desventajas de perforación con el sistema RSS 69	
4.3.2.1.	Ventajas	70
4.3.2.2.	Desventajas.....	71
4.4.	Resultados comparativos de ROP de pozos en el campo Los Sauces	71
4.4.1.	ROP para pozos perforados	71
4.4.2.	ROP para pozo LSC-X5D.....	74
4.5.	Resultado RPM, Tiempo y profundidad (Intervalo) de perforación	74
4.6.	Velocidad de RIH-POOH (Corrida de tubería, sacada de tubería), para tubería de perforación (DP) (POOH) y Casing (RIH)	75
4.6.1.	POOH promedio para tubería de perforación (DP).....	75

4.6.2. RIH Promedio para tubería de revestimiento (CGS).....	76
4.7. Resultados de torque y arrastre obtenidos al analizar la perforación del Pozo LSC-X5D	77
4.8. Análisis de resultados obtenidos.....	78
4.8.1. Análisis de las velocidades de perforación (ROP) obtenidos	78
4.8.2. Análisis de viajes de sacada e introducir la tubería de perforación ...	78
4.8.3. Análisis de la hidráulica de cada pozo.....	80
4.9. Aspectos de medio ambiente y seguridad industrial	80
4.9.1. Aspectos de medio ambiente.....	81
4.9.2. Aspectos de seguridad industrial	81
CAPITULO V	83
EVALUACIÓN ECONÓMICA	83
5.1. Análisis de costos	83
5.1.1. Análisis de costos para cada herramienta.....	83
5.3.1. Flujo de caja	86
5.3.1.1. Valor Actual Neto (VAN)	86
5.3.1.2. Tasa Interna de Retorno (TIR).....	88
CAPITULO VI.....	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
6.1. Conclusiones	89
6.2. Recomendaciones	92
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estratigrafía	41
Tabla 2. Sistema petrolero LSC-9D.....	42
Tabla 3. Diámetros Power Drive X6	43
Tabla 4. BHA Utilizados en el campo Los Sauces	45
Tabla 5. Escalas de riesgo	53
Tabla 6. Riesgos y problemas operacionales Sección de 17 1/2”	53
Tabla 7. Riesgos y problemas operacionales Sección de 12 ¼”	54
Tabla 8. Topes propuestos para el Pozo LSC-9D	57
Tabla 9. BHA con motor de fondo-Sección 12 ¼”	58
Tabla 10. BHA con sistema RSS-Sección 12 ¼”.....	60
Tabla 11. Parámetros manejados con motor de fondo.....	62
Tabla 12. Resumen de DLS para el pozo LSC-X5D	64
Tabla 13. Parámetros manejados con el sistema RSS	65
Tabla 14. DLS para sistemas RSS.....	67
Tabla 15. Valores promedio de ROP en Los Sauces	72
Tabla 16. Torque desde superficie motor-12 ¼”.....	77
Tabla 17. Torque desde superficie RSS-12 ¼”	77
Tabla 18. Tiempo de perforación en la sección 12 ¼”.....	83
Tabla 19. Análisis de costos.....	85
Tabla 20. Flujo de caja	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pozo petrolero	7
Figura 2. Pozo direccional.....	9
Figura 3. Perfiles direccionales	11
Figura 4 Geometría de la trayectoria para $R < D_h$	12
Figura 5 Geometría de la trayectoria para $D_h > R$	14
Figura 6 Configuraciones de ensamble de fondo.....	16

Figura 7 Comportamiento de un bloque de aluminio sumergido en agua	17
Figura 8. Motor tipo turbina	22
Figura 9. Mecanismos de perforación con motor PDM	23
Figura 10. Motor PDM	25
Figura 11. Teoría de los tres puntos de apoyo	27
Figura 12. BHA con motor de fondo	28
Figura 13. Componentes del power drive.....	31
Figura 14. Conformación de Bias Unit.....	32
Figura 15. Componentes principales del arreglo del Cross Over	32
Figura 16. Mayores componentes de la Unidad de Control	33
Figura 17. Modo Point the Bit.....	34
Figura 18. Modo Push The Bit.....	35
Figura 19. Mapa estructural con ubicación del pozo LSC-9D.....	37
Figura 20. Power Drive X6	44
Figura 21. BHA usados en el campo Los Sauces	46

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. ROP con motor de fondo para LSC-X5D (Ft/h)	74
Gráfico 2. ROP con RSS para LSC-9D (Ft/h).....	74
Gráfico 3. POOH Promedio Sección 12 1/4" (m/h).....	76
Gráfico 4. RIH Promedio para Casing Sección 12 1/4" (Ft/h).....	76

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.A. Tramos y profundidades perforadas del pozo LSC-9D	94
Anexo 2.B. Tramos y profundidades perforadas del pozo LSC-X5D.....	95
Anexo 3.A. Esquema TVD (Profundidad Vertical Verdadera) Vs Sección vertical del pozo LSC-9D	96

Anexo 4.B. Esquema TVD (Profundidad Vertical Verdadera) Vs Sección vertical del pozo LSC-X5D	97
Anexo 5. Fluidos por sección	98
Anexo 6. ROP Planeado-Motor de fondo	99
Anexo 7. ROP Planeado-RSS	100
Anexo 8. Datos técnicos del pozo LSC -X5D	101
Anexo 9. Datos técnicos del pozo LSC -9D	102
Anexo 10.A. Curva de profundidad Vs Tiempo pozo LSC-9D	103
Anexo 11.B. Curva de profundidad Vs Tiempo pozo LSC-X5D	104
Anexo 12. Presión de Poro y gradiente de Fractura para el pozo lsc-9D	105
Anexo 13. Torque desde superficie durante la perforación sección 12 1/4" con motor de fondo	106
Anexo 14. Torque en el backreaming para el pozo Lsc-X5D sección 12 1/4"	107
Anexo 15. Torque desde superficie durante la perforación pozo RSS Sección 12 1/4"	108
Anexo 16. Torque en el backreaming para el pozo LSC-9D	109
Anexo 17.A. Costos de la perforación del pozo LSC-9D	110
Anexo 18.B. Costos de la etapa de producción del pozo LSC-9D	111

ACRÓNIMOS

API: Sigla de “American Petroleum Institute”, Este instituto controla las relaciones de Estados Unidos con el mundo del petróleo y tiene editadas multitud de normativas para regular todos estos aspectos.

BHA: “Bottom Hole Assembly”. Ensamblaje de fondo, conformado por tubería y herramientas para las diferentes operaciones en los pozos.

BUR: “Build up Rate”, rata de construcción de ángulo.

Csg: “Casing”, Tubería de Revestimiento.

DLS: “Dog Leg Severity”, Tasa de severidad de cambio de ángulo.

DP: “Drill Pipe”, Tubería de perforación.

EPP: “Equipo de Protección Personal”

GPM: (Galones por Minuto, GPM), Cantidad de galones de fluido bombeados en un minuto.

HSI: Parámetro de hidráulica, que representa la potencia consumida por la broca.

Inc In/Inc Out: Inclinación de entrada/ Inclinación de salida.

KOP: “Kick off Point”, Punto de inicio de construcción de ángulo.

Lbm: “Libras masa”, es una fuerza gravitacional ejercida sobre una libra con una aceleración gravitacional constante.

Lbf: “Libras fuerza”, es la fuerza ejercida por la gravedad

LPG: abreviatura de la densidad, libras por galón, más correctamente escrita como lbm/gal.

LSC: “Los Sauces” sigla referida al campo petrolero Los Sauces, Santa Cruz-Bolivia.

LSS: “Long Spacing Sonic” herramienta para tomar registros sónicos

LWD: “Logging while drilling” Medición de propiedades de una formación, durante la perforación.

Md: “Measured depth”, Profundidad total medida, en pies.

Mwd: “Measurements while drilling”, evaluación de propiedades físicas mientras se perfora.

PD: “Power Drive”, herramienta de perforación.

PDC: “Polycrystalline Diamond Compact” material de trépanos con insertos de diamante compacto policristalino fabricados de manera industrial

PDM: “Positive Displacement Motor”, Motor de desplazamiento positivo.

POOH: “Pull out of hole”, extracción de tubería del pozo.

Psi: “Pound square inch”. Medida de presión, Libra por pulgada cuadrada.

RIH: “Run in hole”, Corrida de tubería en el pozo.

ROP: “Rate of penetration”, Velocidad de penetración del hoyo.

RPM: Velocidad de rotación de la tubería (Revoluciones por minuto).

RSS: “Rotary Steerable System”, Sistema de Rotación Continua.

TVD: “True vertical Depth”, profundidad vertical verdadera.

WOB: “Weight on Bit” Peso sobre la broca, es la cantidad de fuerza hacia abajo ejercida sobre la broca y normalmente se mide en miles de libras.

GLOSARIO

Arcillolita: Roca compacta, conformada por partículas de tamaño similar al de la arcilla. Arenisca: Roca sedimentaria, conformada por granos de arena compactos, que determinan su dureza.

Back Reaming: Proceso de bombeo y rotación del BHA, de manera simultánea a su sacada a superficie.

Espiralamiento: geometría del pozo en espiral, causando un entrapamiento el cual no permite seguir perforando.

Empaquetamiento: acumulación de los recortes alrededor del conjunto de fondo (BHA) y/o columna de perforación.

Hidráulica del pozo: el comportamiento y efectos de las propiedades reológicas del fluido de perforación dentro de su circulación en el pozo.

Gyro: Dispositivo para obtener datos de trayectoria de equipos de perforación.

Lutita: Roca sedimentaria, conformada por partículas de tamaño similar al de la arcilla y limo.

Reología del lodo de perforación: termino que se utiliza para indicar las propiedades del fluido (viscosidad, presión de circulación, tasa de flujo)

Side Track: Perforación secundaria de un pozo, desviándolo de su trayectoria original.

Sarta de perforación: la combinación de la columna de perforación, el arreglo de fondo de pozo y cualquier otra herramienta utiliza en la perforación de pozos.

Tortuosidad: una medida de la complejidad geométrica de la trayectoria del pozo.

Yacimiento: Un cuerpo de roca del subsuelo que exhibe un grado suficiente de porosidad y permeabilidad para almacenar y transmitir fluidos.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

La perforación es un factor determinante durante el proceso de extracción de hidrocarburos, debido a que se crea la comunicación entre la superficie y el yacimiento a través de las diferentes herramientas empleadas.

La aplicación de la perforación direccional se ha extendido por su amplio alcance y ventajas, para lo cual es preciso usar tecnología que permita optimizar el rendimiento de la perforación lo que incluye incremento de ROP, manejo de sólidos y limpieza, y la disminución de posibles tiempos no productivos; tomando en cuenta la mitigación de los problemas operacionales a los que se debe afrontar y los riesgos durante las operaciones.

En las operaciones de perforación direccional se ha implementado el Sistema de Rotación Continua como una innovación al uso del Motor de Fondo; con el fin de aumentar la eficiencia de un proyecto de perforación. Sin embargo, al analizar la información referente a planeación y diseño de los pozos con ambos sistemas, surge la necesidad de comparar su eficiencia y rendimiento, determinando las potencialidades y vulnerabilidades de cada uno, en especial a lo que el factor costo-beneficio se refiere.

En esta investigación el análisis se realizó en los pozos perforados en el campo Los Sauces, desarrollado por YPFB Andina. El campo Los Sauces está ubicado en el departamento de Santa Cruz de la Sierra.

1.2. Antecedentes

Las operaciones de desarrollo y extracción de pozos petroleros deben innovarse con el paso del tiempo, en busca de una producción más rápida, por lo que se plantea perforar y completar los pozos en tiempos menores. Estas necesidades

precisan la aplicación de nueva tecnología para optimizar procesos, garantizando la reducción de riesgos y problemas operacionales.

El uso del sistema RSS generó alta expectativa en la optimización de los resultados al reemplazar a los sistemas convencionales alrededor del mundo; no obstante, existe incertidumbre con respecto a su eficiencia en varios aspectos asociados que el presente proyecto pretende resolver para el caso de Bolivia.

Por tanto, surge la necesidad de analizar técnica y económicamente, la aplicación de ambas herramientas y sus resultados, mediante el estudio de parámetros como ROP, RPM, GPM, etc.; ventajas y desventajas de cada mecanismo.

1.3. Planteamiento del problema

Ya que la perforación es un aspecto de suma importancia en la extracción de hidrocarburos, es necesario tomar como precedente para nuestro país nuevas estrategias que optimicen resultados.

En ese sentido las operaciones de perforación direccional implementan el sistema de perforación direccional se ha implementado el Sistema de Rotación Continua como una innovación al uso del Motor de Fondo para aumentar la eficiencia de un proyecto de perforación.

Al analizar la información referente a planeación y diseño de los pozos con ambos sistemas, surge la necesidad de comparar su eficiencia y rendimiento, para de este modo determinar las potencialidades y vulnerabilidades de cada uno.

Este análisis dará como resultado un impacto directo en cuanto a inversiones se refiere, es conocido que la industria hidrocarburífera es una de las más costosas, en consecuencia, lo que se pretende es disminuir costos y maximizar ganancias.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar un análisis comparando la aplicación, costos, prestaciones y tiempos de perforación direccional entre los Sistemas de Motor de fondo y Direccional de Rotación continua (RSS), en el desarrollo de los pozos del campo los Sauces, para la optimización de las operaciones.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar las diferentes características y propiedades de la perforación con Motor de fondo y Sistema de Rotación Continua.
- Comparar ventajas y desventajas del uso de cada herramienta en los pozos perforados.
- Establecer la eficiencia de ambos sistemas en la reducción de pega de tubería (mecánica y diferencial), limpieza de hoyo y diferentes problemas operativos.
- Analizar los ROP alcanzados durante la perforación, viajes de calibración, corridas de revestimiento y otros aspectos que se vieran directa o indirectamente relacionados con el uso de las dos tecnologías.
- Determinar la factibilidad de aplicación de cada herramienta en las secciones de construcción de los pozos.
- Realizar un estudio comparado técnico y de costos, de los dos métodos aplicados.

1.5. Justificación del Proyecto

1.5.1. Justificación económica

Para el presente proyecto se planteará el análisis comparativo de costos, independientemente para sistema direccional, y por último los costos de las tarifas diarias; teniendo un total promediado para cada caso, determinando la factibilidad de la perforación con cada herramienta, y el porcentaje de ahorro.

1.5.2. Justificación Técnica

El presente análisis comparativo, presenta una prospección de los pozos perforados del campo citado; clasificándolos acorde a herramientas y esquema mecánico, comparándolos de forma cualitativa y cuantitativa.

1.6. Alcance

1.6.1. Alcance temático

La presente investigación se enfocará en fundamentos teóricos enfatizados en la comparación del sistema direccional de rotación continua RSS Vs el motor de fondo para la optimización de operaciones.

1.6.2. Alcance geográfico

La presente investigación será respecto al campo Los Sauces localizado en el departamento de Santa Cruz de la Sierra.

1.6.3. Alcance temporal

La presente investigación, se desarrollará desde el mes de mayo hasta octubre de la gestión 2019, se realizará la recolección de información para su posterior análisis, evaluación y propuesta.

1.7. Metodología

1.7.1. Tipo de estudio

El tipo de estudio que se va a realizar es de tipo descriptivo ya que se orienta a recolectar información relacionada con el proyecto, haciendo una descripción de las herramientas aplicadas en la perforación direccional, así también es de tipo explicativo porque se está desarrollando en un tiempo determinado para la cuantificación de los resultados y solo se presentara un informe final de los resultados.

1.7.2. Método de Investigación

La metodología para el desarrollo del proyecto se basará principalmente en la investigación documental en el marco del método inductivo - deductivo, por que partirá de lo general a lo particular, y se hace un análisis de los posibles problemas que puedan emerger Durante la perforación.

Además, se realizará un estudio de la documentación del Pozo a través de revisión de archivos, informes y todo tipo de estudios que se haya realizado.

1.7.3. Fuentes de información

La fuente primaria recurrirá de información de las entidades gubernamentales como la Agencia Nacional de Hidrocarburos, Ministerio de Hidrocarburos y Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos, además de reglamentos nacionales y normas internacionales.

También se recurrirá a fuentes secundarias como son informes, revistas, manuales, proyectos bibliográficos y páginas web relacionadas al tema propuesto

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Perforación

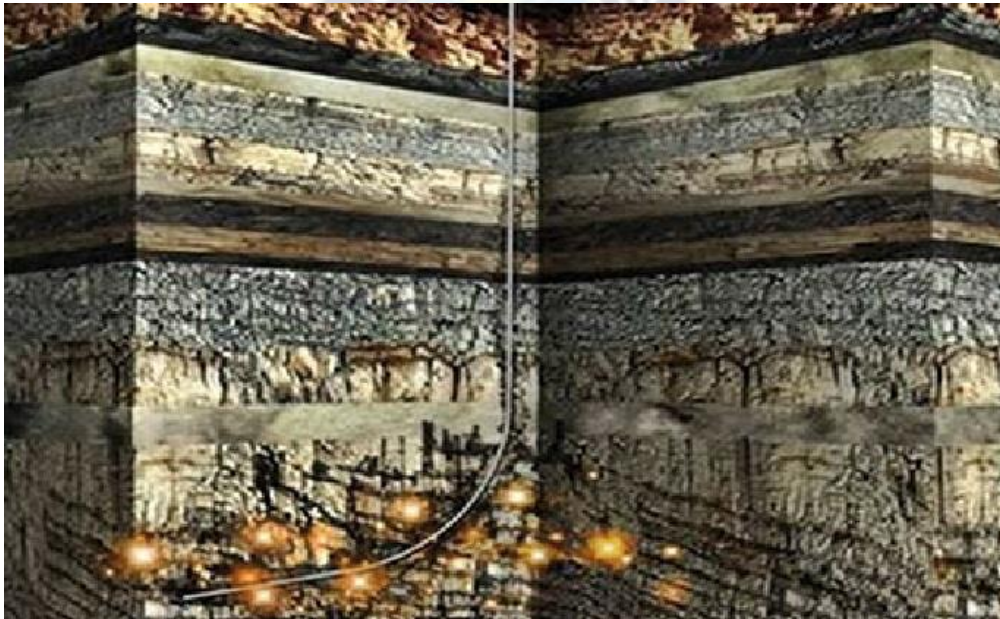
El ícono más reconocible de la industria del petróleo y el gas es una torre que sobresale por su altura en la locación del pozo. El equipo de perforación representa la culminación de un proceso de exploración intensivo; sólo puede validarse un área prospectiva mediante la perforación de un pozo. Una vez que las compañías petroleras adquieren los derechos de perforación en un área prospectiva, sus geocientíficos transmiten las coordenadas de la zona productiva potencial y los objetivos de la evaluación de formaciones a sus ingenieros de perforación y éstos los traducen en objetivos de perforación. El departamento de perforación planifica una trayectoria que maximice la exposición del pozo a las zonas productivas y diseña los arreglos de fondo de pozo (BHA's) para lograr ese recorrido. Los ingenieros preparan un plan detallado para cada etapa del proceso de perforación. Esta prognosis de perforación designa una localización en la superficie y la profundidad total (TD) del pozo, y especifica el tamaño de la barrena, las densidades anticipadas del lodo y los programas de entubación necesarios para alcanzar la TD. En lo que respecta a los pozos desviados, la prognosis establece la localización del fondo del pozo (BHL) y la profundidad de deflexión inicial y el acimut para el punto de comienzo de la desviación (KOP). La prognosis sirve además como base para presupuestar y obtener la autorización para las erogaciones requeridas por la perforación (AFE). (Schlumberger, 2017)

2.1.1. Depósitos de hidrocarburos

La única manera de saber realmente si hay hidrocarburos en el sitio, donde la investigación sísmica y geológica propone que se podría localizar un depósito de hidrocarburos, es mediante la perforación de un pozo petrolero. Un pozo petrolero es una obra de ingeniería encaminada a poner en contacto un yacimiento de hidrocarburos con la superficie. Es una perforación efectuada en el subsuelo con barrenas de diferentes diámetros y con revestimiento de tuberías, a diversas

profundidades, para la prospección o explotación de yacimientos. La perforación es un proceso que consiste en hacer un agujero mediante la rotación de la sarta de perforación y la aplicación de una fuerza de empuje en el fondo. La perforación rotatoria consiste en realizar un agujero por medio de un movimiento rotatorio y una fuerza de empuje de la barrena sobre la roca, convirtiéndola en recortes. El movimiento rotatorio se puede generar y aplicar en la superficie a través de una máquina rotatoria y se transmite por medio de la sarta de perforación, o bien, en forma hidráulica mediante la acción de un motor de fondo, el cual está conectado a la barrena. (Petrolera, 2014)

Figura 1. Pozo petrolero



Fuente: <https://www.lacomunidadpetrolera.com>

2.1.2. Tipos de pozos

Se pueden caracterizar de la siguiente manera según la etapa u objetivo que buscan:

2.1.2.1. Pozo exploratorio

Es aquel pozo que se perfora en zonas donde no se había encontrado antes petróleo ni gas. Puede perforarse en un campo nuevo o en una nueva formación productora dentro de un campo existente. (Petrolera, 2014)

2.1.2.2. Pozos productores

Son aquellos que permiten extraer los fluidos de las formaciones productoras, mientras los no Productores (Secos), una vez terminados no producen ni petróleo ni gas en cantidades suficientes como para ser económicamente rentable. (Petrolera, 2014)

2.1.2.3. Pozos de desarrollo

Son aquellos pozos perforados con la finalidad de explotar, extraer y drenar las reservas de un yacimiento. El objetivo principal al perforar un pozo de desarrollo es aumentar la producción del campo, razón por la cual, se perforan dentro del área probada; sin embargo, algunos pueden resultar secos. (Petrolera, 2014)

2.1.2.4. Pozos de avanzada

Después de la perforación de un pozo exploratorio en un área inexplorada que resulta productor, se perforan los pozos de avanzada con el objetivo principal de establecer los límites del yacimiento. (Petrolera, 2014)

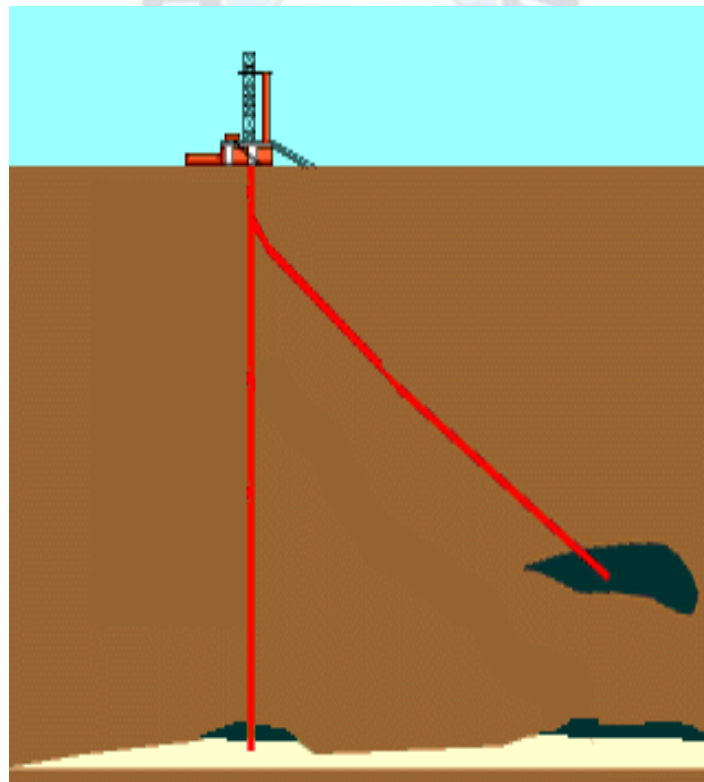
2.2. Perforación direccional

La Perforación direccional es una técnica que permite desviar la trayectoria de un pozo de manera planeada e intencional, alejándola de su trayectoria vertical; desde la superficie hacia un objetivo fijo, siendo éste el yacimiento, y creando una comunicación entre ambos. Para esto se tiene en cuenta las coordenadas superficiales y del objetivo (Pemex, s.f.).

La perforación direccional es aplicable cuando se tienen varios obstáculos o impedimentos para colocar el taladro en superficie directamente sobre el objetivo para realizar la perforación. Además, se usa para evadir obstáculos naturales tales como domos salinos, que impiden el paso directo de las herramientas de perforación. La perforación direccional también es usada en la remediación de pozos con herramientas atascadas y que no se puedan recuperar y seguir perforando, con el uso del denominado "Side track". También se habla de perforación direccional al crear pozos de alivio. (Schlumberger, 2000)

Para obtener un pozo direccional es necesario realizar un plan de perforación previo, en cuyo diseño se debe considerar una serie de parámetros, tales como coordenadas de superficie y objetivo, profundidad, diseño de colisión y espaciamiento entre pozos, ángulos, etc.

Figura 2. Pozo direccional



Fuente: Schlumberger Fundamentos de perforación Direccional

2.2.1. Perfiles direccionales

Durante el plan de perforación de un pozo direccional se debe diseñar la trayectoria del mismo que va de la mano con los estudios geológicos, número de secciones y diseño de los ensamblajes de fondo a usar en cada una.

La trayectoria del pozo estará en función de parámetros geológicos, profundidad vertical, desplazamiento horizontal, espaciamiento entre pozos; y de igual manera la inversión puesta para el proyecto de perforación.

El control de la desviación es el proceso de mantener el pozo dentro de límites preestablecidos de ángulo, desplazamiento horizontal desde eje vertical (Bourgoyne et al, 1991).

Entre los parámetros a considerar para determinar el tipo de trayectoria con el que se va a trabajar se tiene:

- Características del objetivo: Mediante identificación de las formaciones, así como las propiedades geológicas y litológicas de la arena de interés.
- Profundidad vertical (TVD): Determinación de la profundidad de la arena productora.
- Ubicación superficial de los equipos de perforación.
- Desplazamiento horizontal.
- Profundidad del KOP: Determinación del inicio de la desviación del pozo, de acuerdo a las formaciones a perforar.
- Velocidad de construcción: Determinar la trayectoria con la velocidad de trabajo más factible para construir el pozo.
- Formaciones: Establecer las características de la columna estratigráfica a perforar y la dureza de las diferentes formaciones, lo cual influirá de manera importante en el diseño de la trayectoria.

Existen varias clasificaciones para los pozos direccionales, tanto por su función o limitaciones geológicas, entre otras. Sin embargo, los perfiles que generalmente se conocen son:

Figura 3. Perfiles direccionales

PERFIL DIRECCIONAL	CARACTERÍSTICAS
VERTICAL	Tienen una desviación de 3 a 80°.
TIPO “J”	Se construye un KOP a cierta profundidad donde empieza la desviación incrementando el ángulo, hasta cierto punto establecido para llegar al objetivo, manteniendo la sección tangencial.
TIPO SLANT	Tiene la misma configuración que el Tipo “J”, con la diferencia que al final de la sección se tiene un ligero drop.
TIPO S	Mantiene la sección tangencial hasta cierta profundidad, en la cual se tumba el ángulo hasta tener de nuevo una sección vertical. Se aplica para objetivos con gran profundidad, y un desplazamiento vertical bajo.
HORIZONTALES	El ángulo de inclinación puede llegar a 90° con respecto a la horizontal. Este tipo de perforación es factible para: <ul style="list-style-type: none"> • Aumentar la recuperación de hidrocarburos e incrementar la producción. • Evitar problemas de conificación. • Reducir número de pozos.

Fuente: [es.slideshare.net/Perforación Direccional](https://es.slideshare.net/Perforación-Direccional)

2.2.2. Planeación direccional de la trayectoria de pozo tipo Slant

En la figura 4 y 5 se muestran trayectorias sencillas de incremento y mantenimiento del ángulo, la cual intercepta un objetivo a una profundidad vertical verdadera (TVD)

y a un desplazamiento horizontal (Dh). El punto de desviación se encuentra a una profundidad KOP, con un ritmo de incremento del ángulo de inclinación (BUR) , el cual está en grados sexagesimales por unidad de longitud.

El radio de curvatura, R, se calcula de la siguiente manera:

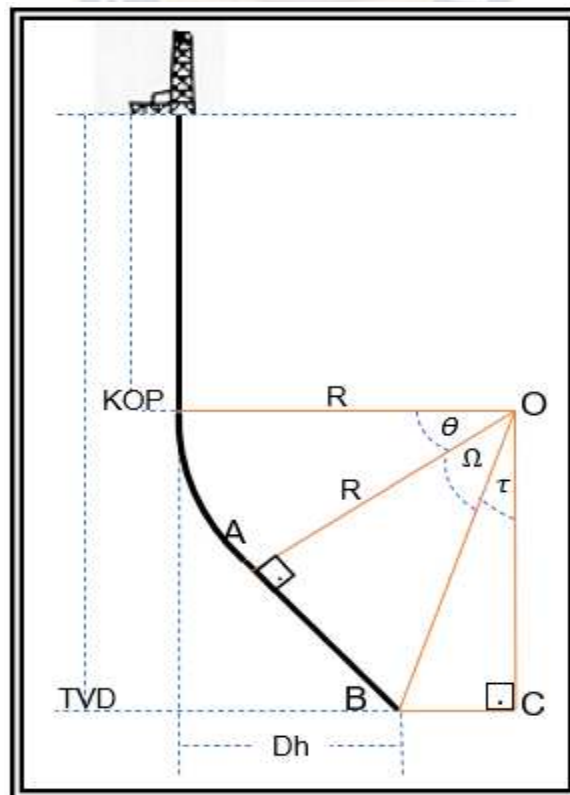
$$R = \frac{1}{BUR} * \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

Donde:

BUR: incremento del ángulo de inclinación por unidad de profundidad [$^{\circ}$ /ft],[$^{\circ}$ /m]

1er caso.- cuando el desplazamiento horizontal es menor al radio de curvatura ($R > Dh$), el ángulo de inclinación máximo, θ , se lo puede hallar de la siguiente manera:

Figura 4 Geometría de la trayectoria para $R < Dh$



Fuente: Diseño de la perforación de pozos, Pemex

De la figura 4 obtenemos que:

$$\theta = 90 - \tau - \Omega \quad (2)$$

El ángulo τ puede ser encontrado considerando el triángulo OBC, donde:

$$\text{Tan } \tau = \frac{BC}{CO} = \frac{R - Dh}{TVD - KOP}$$

Despejando τ tenemos:

$$\tau = \arctan\left(\frac{R - Dh}{TVD - KOP}\right) \quad (3)$$

El ángulo Ω puede ser encontrado considerando el triángulo OAB, donde:

$$\text{Cos } \Omega = \frac{OA}{BO}$$

$$\text{Cos } \Omega = \frac{R}{BO} \quad (4)$$

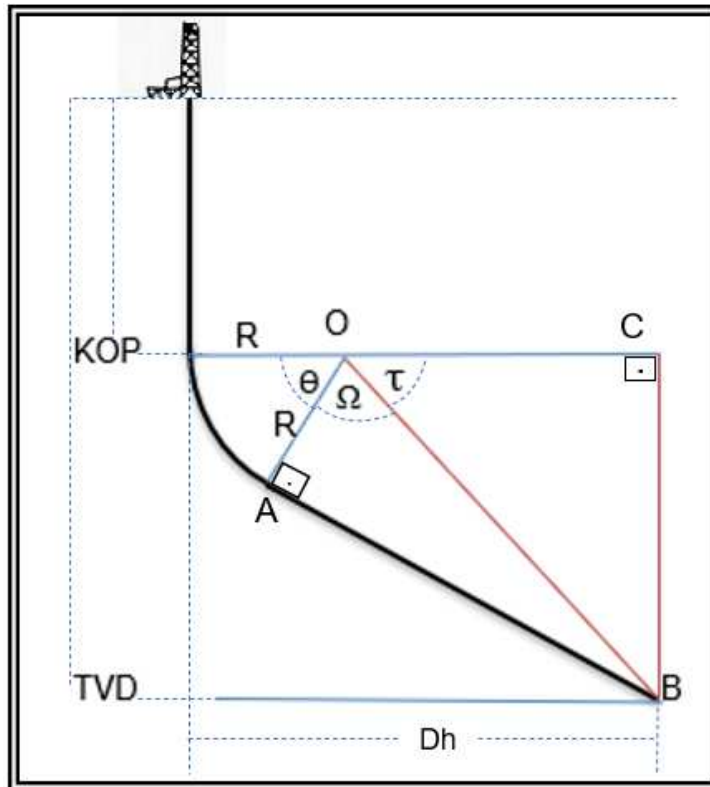
La distancia BO la obtenemos por el teorema de Pitágoras, donde:

$$BO^2 = BC^2 + CO^2 = (R - Dh)^2 + (TVD - KOP)^2$$

$$BO = \sqrt{(R - Dh)^2 + (TVD - KOP)^2} \quad (5)$$

2do caso.- cuando el desplazamiento horizontal es mayor al radio de curvatura ($R < Dh$), el ángulo de inclinación máximo, θ , se lo puede hallar de la siguiente manera:

Figura 5 Geometría de la trayectoria para $Dh > R$



Fuente: Diseño de la perforación de pozos, Pemex

De la figura 5 obtenemos que:

$$\theta = 180 - \tau - \Omega \quad (6)$$

El ángulo τ puede ser encontrado considerando el triángulo OBC, donde:

$$\tan \tau = \frac{BC}{CO} = \frac{TVD - KOP}{Dh - R}$$

Despejando τ tenemos:

$$\tau = \arctan\left(\frac{TVD - KOP}{Dh - R}\right) \quad (7)$$

El ángulo Ω puede ser encontrado considerando el triángulo OAB, donde:

$$\cos \Omega = \frac{OA}{BO}$$

$$\cos \Omega = \frac{R}{BO} \quad (8)$$

La distancia BO la obtenemos por el teorema de Pitágoras, donde:

$$BO^2 = BC^2 + CO^2 = (TVD - KOP)^2 + (Dh - R)^2$$

$$BO = \sqrt{(TVD - KOP)^2 + (Dh - R)^2} \quad (9)$$

Donde:

R: Radio de curvatura [m],[ft].

Dh: desplazamiento horizontal [m],[ft].

TVD: profundidad vertical verdadera [m][ft]

KOP: Profundidad a la que se inicia la desviación de la trayectoria [m],[ft]

2.2.3. Diseño del armado de fondo BHA

2.2.3.1. Configuración de los ensambles de fondo

Existen tres tipos de configuraciones de ensambles de fondo (BHA), los cuales permiten mantener el punto neutro (punto en la sarta de perforación donde los esfuerzos de tensión y compresión son igual a cero) por debajo de la sección de la tubería de perforación. (Figura 6) La selección del tipo de configuración se hace en función de la severidad de las condiciones de operación a las que estará sometida la sarta de perforación, determinada en pozos de correlación.

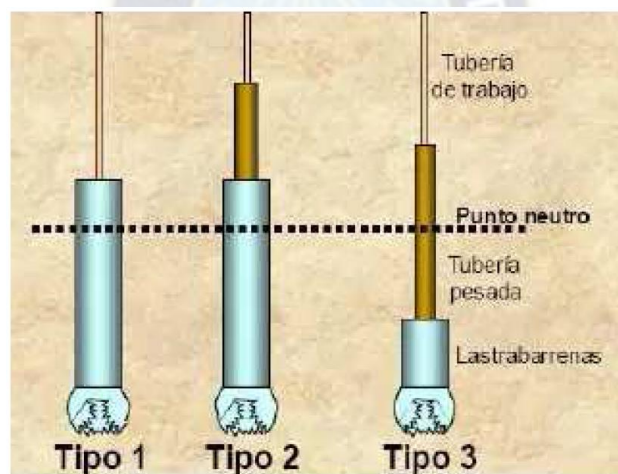
A continuación se mencionan cada una de las configuraciones de ensambles de fondo:

Tipo 1: Es la configuración más simple y está compuesta por porta mechas (drill collar) y tubería de perforación. El peso sobre el trepano se aplica con los porta mechas y el punto neutro es localizado en los porta mechas.

Tipo 2: Esta configuración utiliza barras pesadas por arriba de los porta mechas , como transición entre porta mechas y tubería de perforación. En este arreglo, el peso sobre barrena también se aplica con los porta mechas y el punto neutro es localizado dentro de la longitud de los mismos.

Tipo 3: Esta configuración utiliza porta mechas únicamente para lograr el control direccional, mantener la verticalidad del pozo o reducir la vibración de la sarta de perforación. El peso sobre el trepano se aplica con los porta mechas y las barras pesadas, el punto neutro se localiza en las barras pesadas. Esta configuración permite manejar el aparejo de fondo en forma rápida y sencilla, reduce la posibilidad de pegadura por presión diferencial y fallas en las conexiones. En la perforación direccional moderna, este arreglo es el más recomendado.

Figura 6 Configuraciones de ensamble de fondo



Fuente: Rivera, diseño de sarta de perforación, 2015

2.2.3.2. Punto neutro

Es el punto teórico en el cual los esfuerzos de tensión son iguales a los de compresión (igual a 0).

Existen tres casos sobre la posible posición del punto neutro en la sarta de perforación, los cuales se mencionan a continuación.

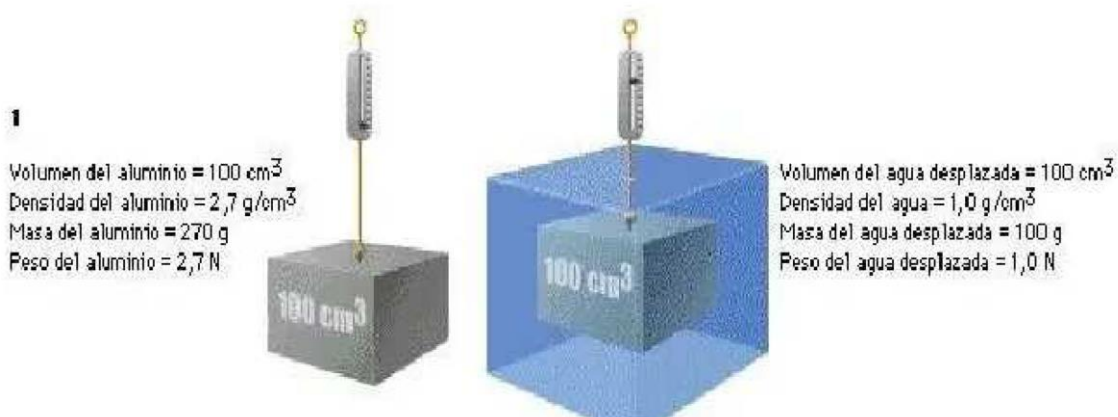
- **Si el WOB > Peso del BHA:** El punto neutro se encuentra en la sección de tubería de perforación.

- **Si el WOB = Peso del BHA:** El punto neutro se encuentra en el tope del ensamble de fondo (entre la tubería de perforación y los porta mechas o barras pesadas).
- **Si el WOB < Peso del BHA:** El punto neutro se encuentra en el ensamble de fondo (en los porta mechas o barras pesadas).

2.2.3.3. Factor de flotación

Para explicar el concepto de factor de flotación nos basaremos en el Principio de Arquímedes el cual establece que cuando un objeto se sumerge total o parcialmente en un líquido, este experimenta un empuje hacia arriba al peso del líquido desalojado. La mayoría de las veces se aplica al comportamiento de los objetos en agua, y explica por qué los objetos flotan y se hunden y por qué parecen ser más ligeros en este medio. Las tuberías (tubería de perforación, porta mechas, barras pesadas) tienen un peso, el cual se determina en superficie y se conoce como “peso en el aire” y está dado en (lb/ft). Al sumergir una sección de tubería dentro del pozo (el cual está lleno de fluido de perforación) la tubería “flota” y su peso es menor al “peso en el aire”. A este peso de la tubería sumergida en el fluido de perforación se le conoce como “peso flotado”.

Figura 7 Comportamiento de un bloque de aluminio sumergido en agua



Fuente: Rivera, diseño de sarta de perforación, 2015

El “peso flotado” se obtiene del producto del peso en superficie de la tubería por un factor de flotación el cual se determina de la siguiente manera:

$$ff = 1 - \frac{\rho_L}{\rho_a} \quad (10)$$

Donde:

ff: Factor de flotación

ρ_L : densidad del lodo en LPG [lb/gal]

ρ_a : densidad del acero (65,5 lb/gal)

2.2.3.4. Determinación de la longitud de los porta mechas

A continuación se presenta la metodología para el cálculo de la longitud de los porta mechas:

1. Calcular el factor de flotación (FF), con la ecuación 10.
2. Calcular la longitud mínima de los porta mechas (LDC) con la ecuación 11.

$$L_{DC} = \frac{WOB * FS}{\cos(\theta) * ff * W_{DC}} \quad (11)$$

Donde:

L_{DC} : longitud de los porta mechas (Drill collars) [ft]

WOB: peso requerido sobre el trepano en libras [Lb]

FS: factor de seguridad que puede variar entre 10%,15%,20%.

Θ : ángulo de desviación [°]

Ff: factor de flotación

Wdc: peso en el aire de la porta mechas por unidad de longitud [Lb/ft]

2.2.3.5. Determinación de la longitud de las barras pesadas

Cuando la tubería pesada se utiliza para reducir los niveles de esfuerzo en la zona de transición, entre los porta mechas y la tubería de perforación, y adicionalmente para proporcionar peso a la barrena, la mínima longitud de la barra pesada (L_{HWDP}) se calcula con la siguiente ecuación.

$$L_{HWDP} = \frac{WOB * FS}{\cos(\theta) * ff * W_{HWDP}} \quad (12)$$

Donde:

L_{HWDP}: longitud de las barras pesadas (Heavy Weight Drill Pipe) [ft]

WOB: peso requerido sobre el trepante en libras [Lb]

FS: factor de seguridad que puede variar entre 10%,15%,20%.

Θ: ángulo de desviación [°]

Ff: factor de flotación

W_{HWDP}: peso en el aire de la barra pesada por unidad de longitud [Lb/ft]

2.2.4. Herramientas direccionales

Las herramientas direccionales más representativas en la actualidad son Motores de Fondo y Sistemas de Rotación Continua.

2.2.4.1. Motor de fondo

Es una herramienta que genera rotación a la broca sin rotar el resto de la sarta de perforación. Dicha rotación se produce mediante la circulación del fluido de perforación en el interior del motor de fondo. Se tienen los siguientes tipos de motor:

- **TURBINA**: Presenta diferentes etapas. Empleados en formaciones duras y de alto arrastre, permitiendo incrementar el ROP.
- **MOTOR DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO (MDP)**: Funciona puramente en base a la circulación del fluido de perforación por el interior del motor. El rotor con sus lóbulos rotará al ser ubicado de manera excéntrica en el interior de un estator.

2.2.4.2. Sistema de rotación continua

Es un sistema de última tecnología, en el cual se rota toda la sarta de perforación para la construcción del ángulo; sin necesidad de deslizar. Se clasifica en:

- Empuje de la broca (Push the bit)
- Direccionamiento de la broca (Point the bit) (Salazar, 2011).

Ambas herramientas (Motor de Fondo y Sistema de Rotación continua).

2.2.5. Tipos de BHA

De manera generalizada se tienen tres configuraciones de BHA que varían de acuerdo a las necesidades del pozo, sea para mantener, construir o tumbar ángulo. De esta manera se tienen:

2.2.5.1. BHA tipo Fulcrum

Tipo de BHA usado para empezar la construcción del ángulo (KOP). Junto con ciertas herramientas como estabilizadores o collares de perforación se obtiene el denominado efecto fulcro, para lograr la curvatura esperada; la cantidad y clase de estabilizadores depende del diseño y programa de perforación. La distancia entre el estabilizador y la broca, y la flexibilidad de la tubería sobre dicho estabilizador determinará la tasa de construcción. (Salazar, 2011).

2.2.5.2. BHA tipo Pendular

Su principio se basa en la gravedad. A través de la supresión del estabilizador cercano a la broca, y su ubicación sobre los collares, genera un apoyo del BHA creando una caída angular. (Salazar, 2011).

El efecto gravitacional se produce sobre los collares de perforación, forzando a la broca hacia la parte inferior de las paredes del hoyo por el peso del estabilizador, tumbado el ángulo a lo largo de la perforación. (Coloma, 2008).

2.2.5.3. BHA empacado

Mantiene la sección tangente, conservando el ángulo de inclinación. Requiere un cierto número de estabilizadores para brindar rigidez al BHA y mantener su trayectoria. Al tener tres puntos de apoyo (estabilizadores) se tiene una mejor eficacia en el efecto del BHA empacado, y mejorando su acción al reducir la distancia entre ellos. (Coloma, 2008).

2.3. Tecnologías de perforación direccional

2.3.1. Motores de fondo

Son herramientas que tienen la capacidad de dirigir la broca hacia una dirección determinada, con el fin de crear un ángulo. Existen dos tipos de motor de fondo: Los motores de desplazamiento positivo, y las turbinas.

2.3.1.1. Motores tipo turbina

Transforma la energía hidráulica en mecánica para la rotación de la broca, y son capaces de generar potencias altas, por lo que son muy eficientes en formaciones duras, sin embargo, su aplicación es limitada para brocas tricónicas (fundamentalmente por el caudal, velocidades altas y cargas axiales), además de tener un costo elevado. También se debe ubicar una malla en la parte superior, para evitar el ingreso de material en la turbina, y al momento del control de pérdida de fluido de perforación causaría un taponamiento en la malla de la turbina.

Se debe monitorear estrictamente el torque y velocidad para optimizar la potencia y garantizar una buena perforación. (Bourgoyne et al, 1991).

2.3.1.1.1. Principio de funcionamiento

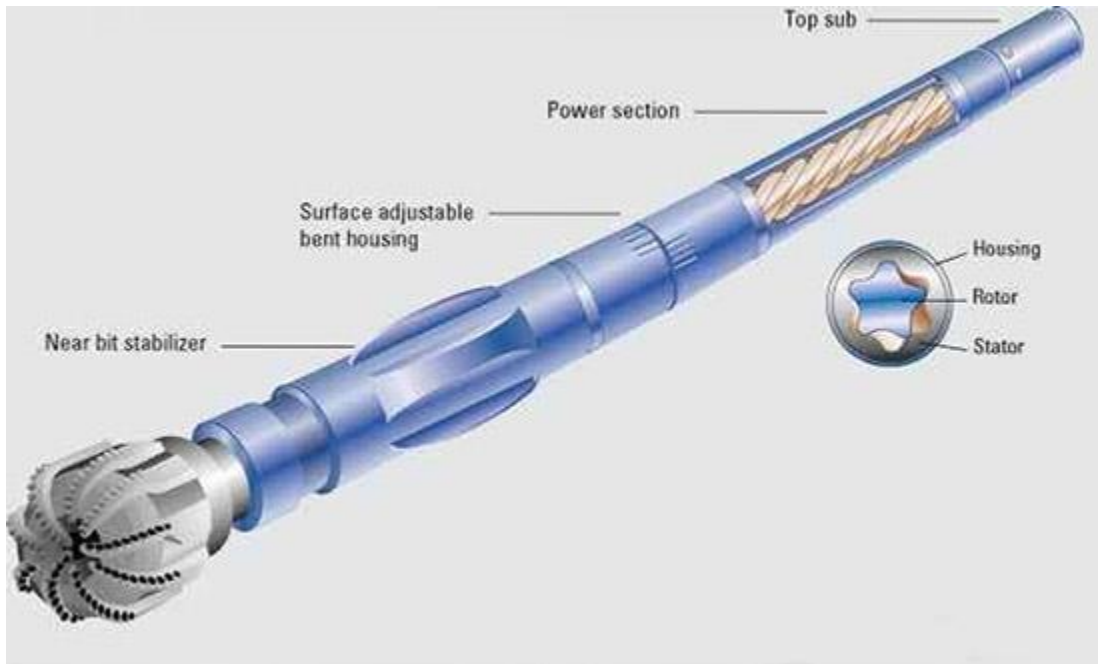
El fluido de perforación entra al top sub y pasa por los estatores y rotores (un rotor y un estator forman una etapa). La parte inferior de la turbina es la parte del cojinete de empuje (Bourgoyne et al, 1991).

2.3.1.2. Motores de fondo de desplazamiento positivo

Los motores de desplazamiento positivo, han sido usados preferentemente frente a otros sistemas, debido a su gran variedad de beneficios.

Los motores de desplazamiento positivo, a través del flujo de lodo de perforación, convierten la energía hidráulica (presión hidráulica del fluido de perforación) en energía mecánica rotativa (torque) que acciona un eje que hace girar la broca, sin necesidad de rotación desde la superficie. (Cougar Drilling Solutions, 2012).

Figura 8. Motor tipo turbina



Fuente: <https://www.google.com/search?q=motor+tipo+turbina+petrolera>

2.3.1.2.1. Principio de funcionamiento

Básicamente el motor de fondo trabaja con el principio llamado “ángulo de inclinación”, en el cual el desplazamiento de la broca se produce por el codo desviador, bent sub o bent housing permitiendo iniciar y conservar la dirección o cambios de dirección que se produzca. La acción del codo determina la tasa de construcción y su severidad.

Al producirse el flujo, después de la liberación del fluido por la válvula de descarga, el pistón baja por la presión diferencial, cerrando los puertos y dirigiendo el fluido a lo largo del estator. Debido a la excentricidad del rotor con relación al estator el fluido, se entrega un torque al rotor, haciéndolo girar y permitiendo el paso del fluido de etapa a etapa.

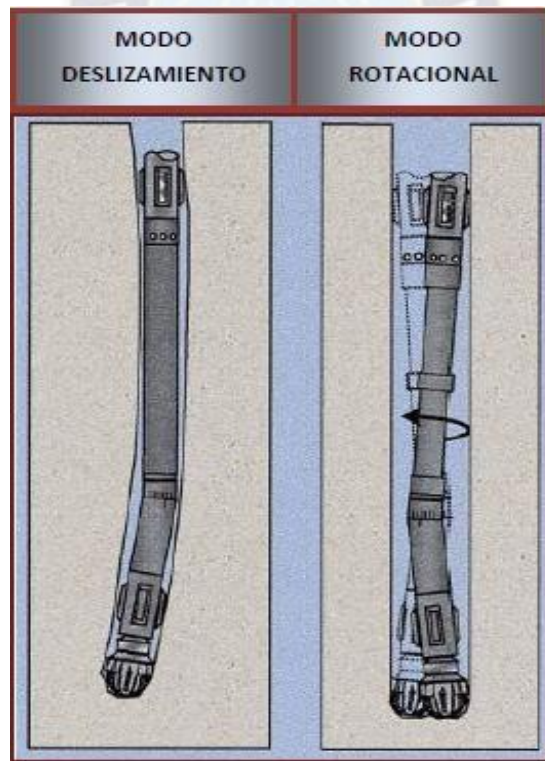
La rotación del estator se transmite a la broca mediante una junta universal, hacia un sub rotatorio al cual la broca está conectada. Los soportes de empuje y radial

son usados para resistir cargas axiales y normales en la broca y los subs rotatorios (Bourgoyne et al, 1991).

2.3.1.2.2. Mecanismos de perforación

- **Deslizando:** Perforación con la rotación únicamente del motor, sin necesidad de rotación adicional en superficie. Con este mecanismo se inicia la construcción de la parte inclinada del pozo. Se realiza después de rotar la tubería, controlando el ángulo y determinando la orientación. La construcción de ángulo depende de la ubicación de los estabilizadores y los codos en la sarta, produciendo una carga lateral en la broca permitiendo el direccionamiento de la sarta.

Figura 9. Mecanismos de perforación con motor PDM



Fuente: Schlumberger Directional Drilling

No obstante, al deslizar se presentan ciertos riesgos, causados por la falta de rotación del BHA, por lo que se trata de disminuir los procesos de slide. Varios riesgos son: limpieza inadecuada del hoyo al perder capacidad de transporte de los cortes generados hacia la superficie, aumenta la probabilidad de pega de tubería (stuck pipe), aumento de la tortuosidad, generando restricciones.

- **Rotando:** Perforación con rotación del motor, complementada con rotación de superficie. Se aplica en la parte tangencial para mantener el ángulo de inclinación. La energía de superficie junto con la del motor incrementan el ROP y reducir el riesgo de pega o atascamiento de tubería (Facultad de ingeniería – UBA, s.f)

2.3.1.2.3. Partes del motor de desplazamiento positivo

Crossover Sub: Dispositivo roscado para acoplar el motor con la tubería.

Sección de poder o potencia: Sección conformada por el rotor y el estator En esta sección la energía hidráulica (presión del lodo) se transforma en energía mecánica (torque y rotación), generando rotación del rotor y la broca.

- **Estator:** Conformado por un tubo de acero y el elastómero, tiene forma de hélice. El estator es una parte vulnerable, debido a la constante exposición a fricción y deformación producida por el giro del rotor. También se hallan expuestos a los diversos químicos presentes en el fluido de perforación, por lo que pueden sufrir daños.

Para evitar los daños en el estator, es necesario tomar en consideración el llamado “punto de anilina”, que es la temperatura a la cual los hidrocarburos aromáticos, parte del fluido de perforación (fundamentalmente fluidos base aceite, aquellos con presencia de hidrocarburos aromáticos) y la anilina (C₆H₅NH₂) del elastómero reaccionan formando una sola fase; deteriorando sus propiedades mecánicas y expandiéndolo, causando una variación en el ajuste estator/rotor.

- **Rotor:** Vástago en forma de hélice.

Ambos, rotor y estator tienen forma de hélice, que forman los llamados lóbulos, pero el rotor tiene un lóbulo menos que el estator, formando el llamado “lóbulo medio”, formando cavidades por donde pasa el fluido, a medida que el rotor gira. De modo que se puede relacionar la configuración de los lóbulos del rotor/estator del motor de la siguiente manera:

$$n_{est} = n_r + 1 \quad (13)$$

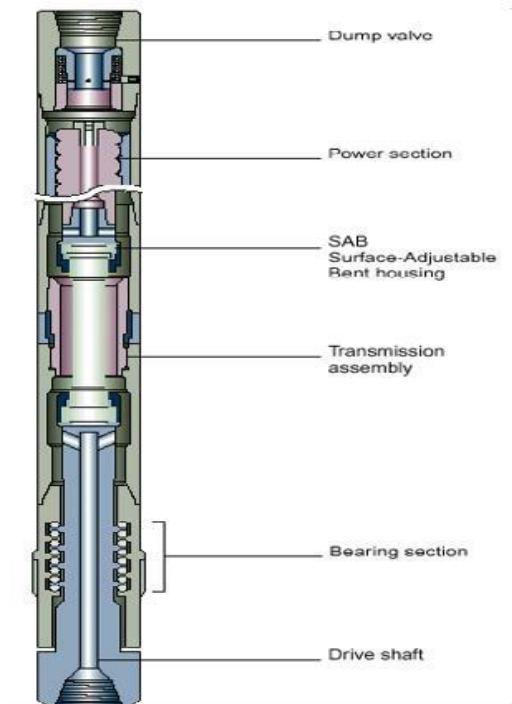
Dónde:

n_{est} : Número de lóbulos del estator

n_r : Número de lóbulos del rotor

Al tener mayor número de lóbulos se va a tener mayor torque. Y las relaciones de lóbulos rotor/ estator más usadas son: 3:4, 4:5 y 7:8, y se las aplica de acuerdo al diseño del motor y a la sección a perforar, considerando el tipo de formación y sus características.

Figura 10. Motor PDM



Fuente: Schlumberger Directional Drilling

Sección de rodamientos: Transmite el esfuerzo de perforación, velocidad rotacional y torque, generado por la sección de poder desde la sección de transmisión hacia la broca. Es decir que esta sección soporta el peso durante la perforación.

La sección de rodamientos posee bolas (cojinetes lubricados por lodo) que giran en una pista que generalmente es de carburo de tungsteno.

La sección de rodamientos se halla compuesta por: cojinetes de empuje (soportan el peso), cojinetes radiales (absorben cargas laterales), eje conductor (transmite carga axial y torsional a la broca). (Salazar, 2011).

Sección de transmisión: Se ubica en la parte interna del Bent housing, por debajo de la sección de poder. Su función principal es transmitir la energía generada por la sección de poder hacia el eje conductor, ensamblaje de rodamientos y a la broca.

Elimina la vibración producida por el movimiento excéntrico del rotor. Cuenta con un eje conductor de la rotación, convirtiendo el movimiento excéntrico en movimiento concéntrico.

Además, permite tener mayor eficiencia del sello rotor/estator y minimiza su desgaste.

2.3.2. Perforación con motor de fondo

2.3.2.1. Perforación direccional convencional

Se aplica solamente el mecanismo de deslizamiento, con el uso del Bent sub o Bent housing sobre el motor para la desviación del pozo. Se usa para la construcción de KOP, Sidetracks y correcciones de trayectoria.

2.3.2.2. Perforación direccional con motor de fondo

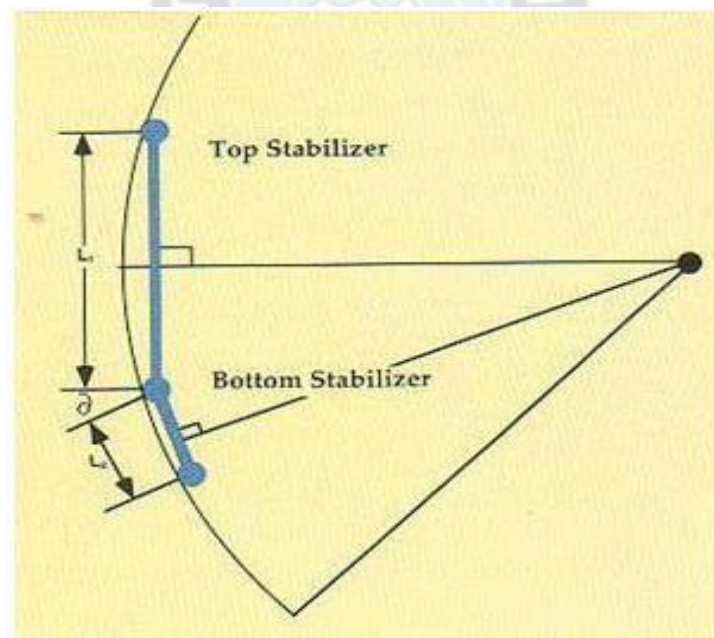
Es la aplicación de ambos mecanismos de perforación con un motor de fondo, es decir se desliza y rota de acuerdo a las necesidades.

Al realizar ambas operaciones puede utilizarse el mismo BHA con el mismo motor para las secciones tangencial y horizontal, sin necesidad de sacar el BHA a superficie para modificarlo o ajustarlo. (Salazar, 2011).

En el BHA se tiene una serie de estabilizadores (de acuerdo al diseño) para aumentar o mantener el ángulo. Las características físicas de los estabilizadores, como son la forma en espiral o cuchilla ayudan a la definición del hoyo perforado y según la teoría de los tres puntos de contacto se tienen:

- Broca
- Un estabilizador cercano a la broca en el motor (Camisa estabilizada del motor).
- Un estabilizador cercano a la broca sobre el motor.

Figura 11. Teoría de los tres puntos de apoyo



Fuente: <https://www.slb.com>

Se debe tomar en cuenta:

$$\text{Radio } (R) = \frac{L_1 + L_2}{2 \sin \theta} \quad (15)$$

$$\text{Build-up Rate (BUR)} = \frac{2\theta}{L_1 + L_2} \quad (16)$$

Dónde:

θ : Ángulo de deflexión del motor (°)

L_2 : Distancia desde la broca a la camisa estabilizada del motor [ft]

L_1 : Distancia desde la camisa estabilizadora del motor al segundo estabilizador en el BHA [ft]

BUR: Capacidad de generación de curva [°/100ft]

De esta manera para construcción de ángulo la distancia entre estabilizadores será mayor, dando mayor flexibilidad al BHA para dar dirección a la broca. Y al tener estabilizadores menos distanciados se logra conservar el ángulo. (Schlumberger, 2016).

Figura 12. BHA con motor de fondo



Fuente: Schlumberger Directional Drilling

El BHA de la figura anterior es necesario para obtener mediciones de acimut e inclinaciones durante de la perforación hasta el objetivo, además de la obtención de registros de Gamma Ray y resistividad. (Schlumberger, 2016)

Dicho BHA consta de un motor de fondo y un solo estabilizador sobre él, además del uso de la perforación rotando, lo cual permitió conservar el ángulo hasta llegar al objetivo.

2.3.3. Denominación del motor de fondo

MOTOR DE FONDO A962M5640XP:

- A: designación previa a D&M (Drilling and Measurements), denominada “Anadrill”.
- 962: Diámetro del cuerpo del motor, en este caso 9 5/8” o 9.625”.
- M: “Mud Lubricated”, es decir el Motor se halla lubricada por lodo de perforación en la sección de rodamientos.
- 5-6: Determinan el número de lóbulos del rotor y estator, respectivamente, se pueden hallar combinaciones 2-3, 4-5,5-6, 7-8; refiriéndose a la velocidad con la que el rotor gira dentro del estator.
- 40: Número de vueltas completas que da cada lóbulo a lo largo de la extensión del rotor, en este caso cada uno de los 5 lóbulos del rotor gira 4 vueltas completas de extremo a extremo del rotor.
- XP: “Extra Power”, denominación que muestra una alta eficiencia.

De este modo los Motores usados fueron:

Para la sección de 17 1/2”, el A962 (5:6), como características tiene un gpm de 600-1200, Velocidad de rotación de 600-1500 gpm.

Para la sección de 12 ¼”, A825 (7:8) con 300-900 gpm y 45-145 RPM. (Schlumberger, 2016)

2.4. Sistema de rotación continua

Son sistemas de perforación que tienen la capacidad de perforar direccionalmente con toda la sarta de perforación rotando, eliminando la perforación por deslizamiento. Este sistema de perforación fue creado para obtener un control direccional más eficiente, mejorar la limpieza, aumentar la tasa de penetración (ROP), y reducir el riesgo de atascamiento y pega de tubería.

La perforación con el sistema de rotación continua reduce la tortuosidad y espiralamiento, obteniendo pozos más limpios, más largos, más rápidos, y con menos problemas.

Además, puede trabajar combinado con el motor de fondo para obtener más potencia y RPM, optimizando la perforación considerablemente, reduciendo vibración del equipo de survey, mayor velocidad para el sistema LWD. (Polanco et al, 2016).

2.4.1. Perforación con Powerdrive

Es la potencia para perforar más rápido, el sistema rotativo direccional de alto rendimiento Power Drive posee una sección de potencia con alto esfuerzo de torsión, totalmente integrada que transforma la potencia hidráulica del lodo en potencia mecánica esta energía combinada con el esfuerzo de torsión y la rotación del trepano de perforación proporcionada por la cabeza rotativa superior del equipo de perforación, incrementa significativamente el esfuerzo de torsión útil y la velocidad de rotación útil y la velocidad de rotación en el trepano. La capacidad de esfuerzo de torsión adicional posibilita un mayor peso sobre el trepano lo que se traduce en mayor velocidad de penetración y conduce a una operación de perforación más eficaz desde el punto de vista de su costo. Características:

- Mejora el flujo de los recortes de perforación más allá del BHA por qué no se crean cuellos de botella
- La ROP se incrementa debido a la eficiente remoción de los recortes

- Se reducen los problemas de atascamiento mecánico por presión diferencial
- Direccionamiento preciso y sensible e independiente de la formación o del calibre del pozo

2.4.2. Componentes del Power Drive

Los componentes más importantes de esta herramienta son:

- El Bias Unit.
- El Estabilizador Espiral.
- El Cross Over que alberga el filtro y al arreglo del Choke.
- La Unidad de Control

Figura 13. Componentes del power drive



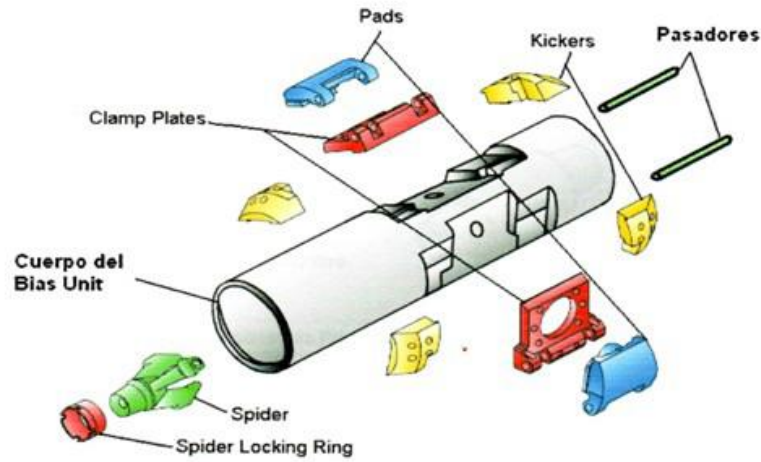
Fuente: Schlumberger Directional Drilling

2.4.2.1. Bias Unit

Los componentes más importantes del Arreglo del Bias Unit son:

- El cuerpo del Bias Unit.
- Los Clamp Plates.
- Los Pasadores.
- Los Kickers.
- Los Pads.
- El Spider.
- El Spider Locking Ring.

Figura 14. Conformación de Bias Unit



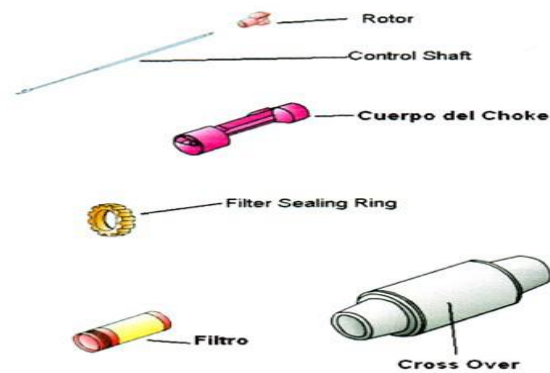
Fuente: Schlumberger Directional Drilling

2.4.2.2. Arreglo del Cross Over

Los componentes más importantes encontrados dentro del Croes Over son:

- El Control Shaft.
- El rotor.
- El cuerpo del Choke.
- El filtro.
- El anillo de Sello.
- El Cross Over

Figura 15. Componentes principales del arreglo del Cross Over

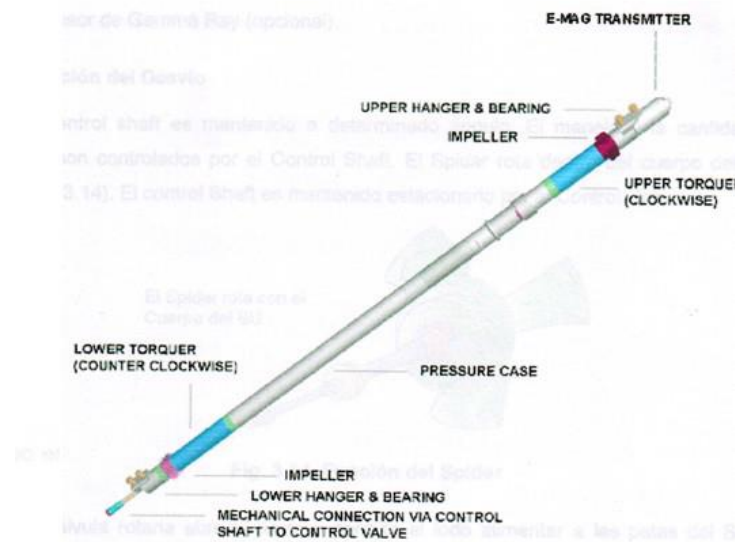


Fuente: Schlumberger Directional Drilling

2.4.2.3. Unidad de control

La unidad de control tiene la función de controlar la orientación de la válvula rotaria del Bias Unit. Sosteniendo el rotor geoestacionariamente respecto de la formación en cada uno de los pads de Bias, los cuales se extenderán hasta un punto específico, permitiendo que el pozo sea desviado en la dirección requerida.

Figura 16. Mayores componentes de la Unidad de Control



Fuente: Schlumberger Directional Drilling

2.4.3. Principio de funcionamiento

Los sistemas de rotación continua (RSS), constan de una parte mecánica y una electrónica.

Dentro de la perforación en el país se trabaja con esta tecnología en dos empresas de servicios, las cuales nombran a sus equipos de la siguiente manera.

- *Schlumberger: Power Drive (Push the Bit).*
- *Halliburton: Geo Pilot (Point the Bit).*

2.4.4. Mecanismos de perforación

2.4.4.1. Sistema “Point The Bit”

Se aplica una fuerza para modificar la dirección de la trayectoria, a través de un eje. El eje desplaza la alineación del eje de la herramienta y el pozo, generando una desviación.

Elementalmente se cambia la orientación de la herramienta, y este cambio de trayectoria se produce por un codo que se halla dentro del collar, y gracias al control de un servomotor y su giro opuesto al movimiento de la sarta, el ángulo de orientación de la herramienta se mantiene geostacionario, mientras el collar gira. (Polanco et al, 2016).

La sección de direccionamiento consta de un motor que dirige la broca en su punto de pivote, hacia la trayectoria deseada.

Figura 17. Modo Point the Bit

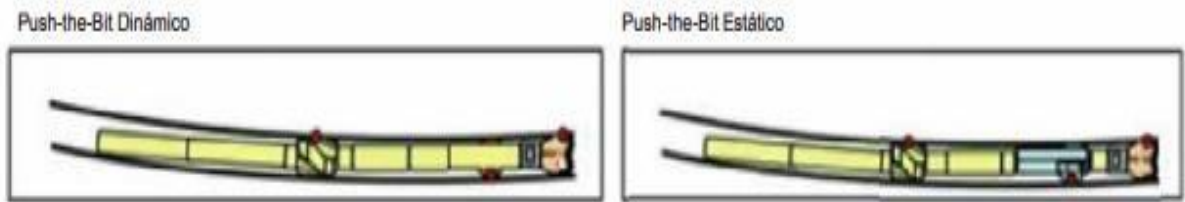


Fuente Revista de Investigación “Nupeter”, 2017

2.4.4.2. Sistema “Push The Bit”

Genera un empuje contra las paredes del pozo a través de tres cojinetes o pads que se accionan por el lodo, estos pads generan una fuerza lateral contra la formación. Cada pad aplica estas fuerzas laterales contra la parte inferior del pozo para aumentar el ángulo, y para disminuir el ángulo las almohadillas generan la fuerza creando un empuje en la parte alta.

Figura 18. Modo Push The Bit



Fuente: Schlumberger Directional Drilling

2.4.4.2.1. Partes del Sistema de rotación continua “PUSH THE BIT”

- **Parte mecánica:** Consta de tres elementos llamados pads, los cuales se hallan distribuidos de manera radial a 120 grados el uno del otro, dichos elementos tienen la capacidad de abrirse mediante un mecanismo de pistón, activado por el fluido de perforación, con una fuerza de aproximadamente 10000-20000 N, para golpear lateralmente la pared de la formación en una dirección constante definida por el usuario, consiguiendo de esta manera por acción- reacción un desvío en la trayectoria direccional en el sentido contrario de la apertura de los pads. (Schlumberger, 2016).
- **Parte electrónica:** Se encarga de que los pads se abran uno a la vez en el mismo punto lateral, contrario a la dirección de desvío de la trayectoria del pozo; independientemente del número de revoluciones transmitidas por la rotación del Top Drive en superficie.

CAPITULO III

MARCO REFENCIAL

3.1. Antecedentes del campo Los Sauces

El campo Los Sauces fue descubierto en marzo del 2001 con la perforación del pozo LSC-X1.

El único reservorio productor en este campo pertenece a los niveles más someros del Carbonífero es decir a la Formación San Telmo y es conocido como Arenisca La Peña productor de gas y condensado de 59° API.

En la actualidad el campo tiene 4 pozos perforados de los cuales 2 están ubicados en la Culminación Sur y 1 en la Culminación Norte, en el sector sur del área de contrato se tiene el pozo LSC-X4D, y a la fecha se realiza la perforación del pozo LSC-X5D.

Posteriormente se propone la perforación del pozo LSC-9D (pozo dirigido) con el objetivo de continuar con el desarrollo de las reservas del reservorio Iquiri-1 (Devónico) en el área sudeste de la estructura.

El pozo alcanzará el objetivo en una posición estructural favorable de acuerdo al mapa estructural del reservorio actualizado con datos duros de los pozos vecinos.

La profundidad final propuesta es de +/- 3650 mTVD Aproximadamente. Como objetivo secundario se propuso la investigación de los reservorios Cajones y San Telmo Wm es esta posición de la estructura.

3.1.1. Ubicación geográfica del campo

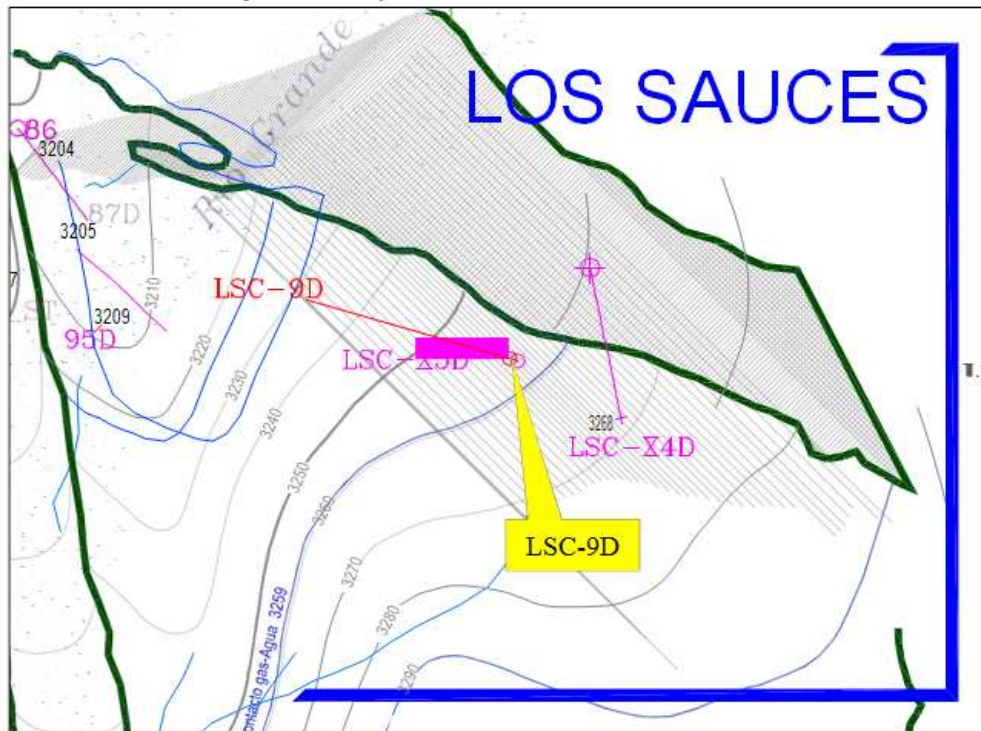
Con el descubrimiento del campo Los Sauces, en merced a la declaratoria de comercialidad respectiva, el área de contrato se extiende hacia el sur en forma contigua al campo Río Grande (10 Parcelas), incluyendo en el mismo pequeños Leads y prospectos exploratorios, (como por ejemplo los leads Los Junos, Los Tojos y el prospecto Los Tabanos).

El sector sur del área de contrato Los Sauces, donde se encuentra el proyecto se ubica a unos 60 km al SE de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

La estructura (Denominada como Tábanos) consiste en un plegamiento anticlinal al Sur-Este de la estructura de Río Grande de menor dimensión; esta estructura presenta hundimientos definidos y flancos de buzamientos suaves para los niveles del Carbonífero, para el devónico la estructura es una continuación de la estructura de Río Grande.

De acuerdo a información actual, el proyecto pozo LSC-09D se ubica en una posición estructural favorable y buenas expectativas de éxito.

Figura 19. Mapa estructural con ubicación del pozo LSC-9D



Fuente: Programa de perforación YPFB – ANDINA, 2016

3.1.2. Secuencia estratigráfica

La estructura (Denominada como Tábanos) consiste en un plegamiento anticlinal al Sur-Este de la estructura de Rio Grande de menor dimensión, comparten la misma secuencia estratigráfica, cuyos reservorios de mayor importancia se detalla a continuación.

Formación Cajones

El reservorio Cajones está compuesto por una serie de delgados niveles arenosos calcáreos con intercalaciones pelíticas, depositadas como un ciclo progradante en un ambiente lagunar o marino somero.

Formación Yantata

Constituida por potentes bancos de Areniscas, en la parte superior se intercalan con niveles de Arcilitas y Limolitas, hacia la base se hace más arenoso y de matriz arcilloso.

Formación Ichoa

La Formación Ichoa es una intercalación de Areniscas con niveles pelíticos en la base y hacia el tope se hace mas arenoso hasta llegar a la formación Yantata que es concordante con esta.

Formación Elvira

Esta formación se encuentra discordante con la formación San Telmo. La secuencia litológica de esta formación es de dominio psamítico. Las areniscas mayormente se recuperan como grano suelto. Esta conformada por bancos de arenisca de espesor considerable, que intercala con arcillas y limolitas de reducido espesor. Por la forma de presentarse de la muestra la mayor parte de las arcillas vienen de la matriz de la arenisca.

Formación San Telmo Ws

El reservorio San Telmo Ws es una unidad arenosa separada de la infrayacente Wm por una intercalación arcillosa de 3 a 8 m de espesor.

Este reservorio está compuesto por paquetes que varían desde arenas gruesas y macizas hasta arenas más finas con intercalaciones arcillosas. Las primeras son interpretadas como areniscas de canal y las segundas representan depósitos de planicies de inundación. En general alcanzan espesores de hasta 20 metros.

Formación San Telmo Wm

El reservorio San Telmo Wm se caracteriza por estar compuesto de numerosos cuerpos de arena que fueron depositados en un ambiente fluvial muy complejo. Antiguamente esta unidad fue subdividida en W medio y W inferior, actualmente descartada por no existir un criterio coherente o marker que satisfaga dicha subdivisión.

Si bien toda la secuencia se caracteriza en general por su baja resistividad, un análisis más detallado de la misma permite distinguir dos sectores, el superior y el inferior, con resistividades más altas que el sector medio. La mayoría de la producción proviene del sector superior con resistividad más alta. No ha sido posible distinguir un contacto definido gas-agua dentro del área del campo.

Formación San Telmo X

El reservorio San Telmo X, consiste de una serie de delgados niveles arenosos intercalados con niveles pelíticos, siendo por lo general la zona superior más arcillosa que la inferior. Las arenas son de difícil correlación y distribución muy irregular y se les atribuye un origen fluvial.

Toda la secuencia se caracteriza por su baja resistividad. El nivel fue probado en muy pocos pozos, pero nunca puesto en producción. Carece de historial y datos de presión y ha sido interpretado como una zona productora de gas de baja resistividad.

Formación Escarpment Y-3

El reservorio Escarpment Y-3 que suprayace al anterior está considerado como el más importante ya que del mismo proviene el porcentaje de producción más alto del campo. Ha sido también interpretado como un depósito de ambiente sedimentario muy similar al anterior es decir fluvio-glacial a glacimarino.

Comprende una serie de niveles arenosos que mantienen una distribución regular en todo el campo y está integrada en general por una secuencia grano-decreciente donde se observan potentes bancos de areniscas limpias en su parte basal y areniscas un poco más sucias con intercalaciones pelíticas hacia el tope de la unidad. El contacto gas-agua original se encuentra en la cota de -2490 m.

Formación Escarpment Z-1

Los paquetes arenosos bastante limpios y relativamente uniformes fueron interpretados como depósitos de origen fluvio glacial o glacimarino.

Un importante porcentaje de la producción del campo proviene de este reservorio cuyo contacto gas-agua original está claramente definido en la cota de -2560 m.

Formación Iquiri -1

El reservorio pertenece a la Fm Iquiri, que es una formación monótona, bien definida, preponderantemente pelítica (60%), representadas por lutitas de color negruzco, son carbonosas de aspecto bituminoso, laminadas escamosas planares, tabulares, fisiles, quebradizas y micáceas. Alternan una serie de niveles delgados de areniscas gris blanquecinas de grano fino a medio, subredondeado ha redondeado, buena selección, cemento silíceo. La formación Iquiri corresponde a los pisos superiores del devónico donde se observa el desarrollo de facies arenosas importantes dentro de una serie que se acentúa y se incrementa del tope hacia la base.

Tabla 1. Estratigrafía

ERA	SISTEMA	FORMACIÓN	RESERVORIO	ESPESOR	REPRESENTACIÓN	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA
Cen	Terciario	Petaca		120 m		Areniscas, Limolitas, Arcillitas
Mesozóico	Cretácico	Cajones	Cajones A	340 m		Areniscas, Limolitas, Yeso
			Cajones B		Areniscas, Limolitas, Yeso	
			Cajones C		Areniscas, Arcillitas, Chert	
		Yantata	305 m		Areniscas, Limolitas, Arcillitas	
		Ichoa	230 m		Areniscas, Limolitas	
Paleozoico	Car-Per-Tri	Elvira		384 m		Areniscas, Limolitas, Calizas
	Carbonífero	San Telmo		240 m		Arcillitas, Diamictitas, Areniscas
			San Telmo Ws		Areniscas, Arcillitas	
			San Telmo Wm		Areniscas, Arcillitas, Diamictitas	
			San Telmo WX		Arcillitas, Areniscas	
	Mandiyuti	Escarpment	Escarpment Y3	211 m		Areniscas, Arcillitas
			Escarpment Z1		Areniscas	
	Carbonífero	Taiguati		185 m		Areniscas
		Chorro		40 m		Areniscas
	Machareti	Tarija		65 m		Areniscas, Diamictitas
		Tupambi		200 m		Areniscas, Arcillitas
Devónico	Iquiri	Iquiri - 1	125 m		Lutitas, Limolitas, Areniscas	

Fuente: Programa de perforación YPFB – ANDINA, 2016

3.1.3. Sistema petrolero

El sistema petrolero presente en LSC-9D es el mostrado en la tabla a continuación:

Tabla 2. Sistema petrolero LSC-9D

Roca generadora:	Nombre: Los Monos e Iquiri (Devónico)
Roca reservorio:	Nombre: Areniscas, Reservorio Iquiri-1 (Devónico) y San Telmo Wm (Carbonífero)
Roca sello:	Nombre: Niveles pelíticos Iquiri y San Telmo
Roca sobrecarga:	Nombre: Columna estratigráfica suprayacente.
Tipo de trampa:	Descripción: Estructural y estructural/estratigráfico
Reservorios:	Descripción: Areniscas

Fuente: Programa de perforación YPFB – ANDINA, 2016

3.1.4. Datos de la formación y del fluido

En los datos de Yacimiento se puede encontrar:

- Tipo de Arena
- Tope de la Formación TVD (pies)
- Base de la Formación TVD (pies)
- Espesor Total (pies)
- Dureza de la Roca (psi)
- Permeabilidad del petróleo (md)
- Temperatura del Reservorio (° F)
- Presión del Reservorio (psi)
- Porosidad (%)
- Saturación de agua inicial (%)
- Presión de Burbuja (psi)

3.1.5. Datos del pozo

En los datos del pozo se puede encontrar:

- Daño Total
- Radio de Invasión (asumido) (pulg)
- Presión de fondo fluyente (psi)
- Desviación del pozo (°)

- Diámetro del pozo (pulg)
- Densidad del Cemento (ppg)
- Diámetro del Casing (pulg)
- Peso del Casing (lbs/pie)
- Grado del Casing

3.1.6. Tipos de RSS usados en pozos del campo Los Sauces

- *Power Drive X6*: Para direccionamiento de pozos, aplicado en la sección de 12 ¼". (PD 900 X6) Permite registrar datos de inclinación y azimut en tiempo real, y de igual manera en la sección de 16" se aplica el PD 1100 X6. (YPFB – ANDINA, 2016).

3.1.7. Diámetros de trabajo del Power Drive X6

Tabla 3. Diámetros Power Drive X6

SISTEMA	DIÁMETRO HERRAMIENTA	DIÁMETRO POZO
PD 1100	11 ¾"	17 ½"
PD 900	9 ½"	12 ¼"
PD 675	6 ¾"	8 ½"
PD 475	4 ¾"	5 7/8"

Fuente: Programa de perforación YPFB – ANDINA, 2016

De este grupo de *Power Drive* los más utilizados son el PD 900 y el PD 1100, que presentan las siguientes características:

PD 900:

- Trabaja con tamaño de hoyo de 15 ½"- 28".
- Lodos base agua y base aceite.
- Tiene una tasa máxima de construcción de 3°/100'.
- GPM de 300-2000, configuraciones de baja, media y alta.

- Presión máxima: 20000 psi.
- Máxima RPM: 220 en hoyos de 15 ½” a 18 ½”, y 125 RPM en hoyos de 20-28”.

PD 1100:

- Tamaño de hoyo de 12-14 ¾”.
- Lodos base agua y base aceite.
- Tasa máxima de construcción de 5°/100’.
- Caudal de 300-2000 gpm, con configuraciones de flujo de baja, media y alta.
- Presión máxima: 20000 psi.
- Máxima RPM: 220. (Petroamazonas, 2016).

Figura 20. Power Drive X6



Fuente: Programa de perforación YPFB – ANDINA, 2016

3.1.8. Tipo de BHA utilizado en la perforación de pozos del campo Los Sauces

A lo largo del desarrollo de los pozos del campo Los Sauces se usaron varios diseños de sarta, de las cuales se tienen cuatro tipos más representativos:

Tabla 4. BHA Utilizados en el campo Los Sauces

TIPO DE BHA SECCIÓN 17 ½”	TIPO DE BHA SECCIÓN 12 ¼”
MOTOR A962M5640XP 15 ¾” OD	MOTOR A962M7848 12” OD
PENDULAR	MOTOR A962M5640 12” OD
MOTOR A9625640XP 15 ¾” OD	MOTOR A962M5640 XP 12” OD
BIT SUB	PD 900 X6 12 ¼”

Fuente: Programa de perforación de YPFB – ANDINA, 2016

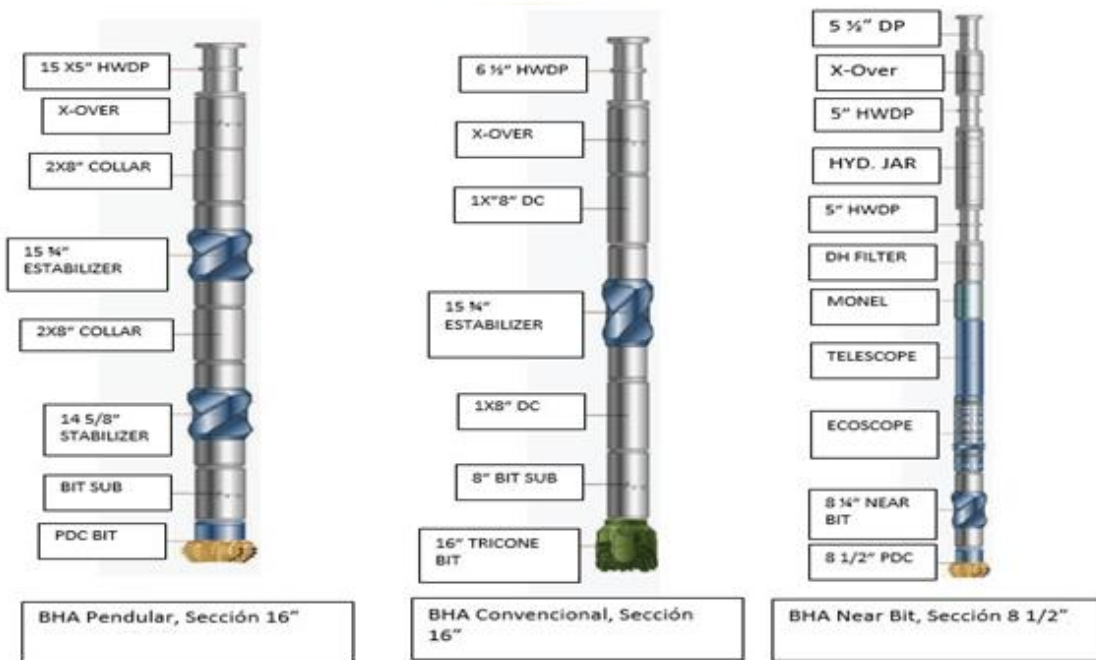
Cabe mencionar que también se trabajó con sartas combinadas en una sola sección, llegando a usar hasta 3 BHA por sección, sea para obtener mejores resultados o para combatir complicaciones durante la perforación, como se observa en la figura 13, de esta manera se usa:

- **BHA CONVENCIONAL:** También llamado estabilizado, específicamente del cemento de la sección anterior y su respectiva limpieza. Fue usado en el pozo LSC-9D para la limpieza en el punto de Sidetrack.
En la sección de 16” se usa este tipo de BHA para perforación vertical.
- **BHA CON MOTOR DE FONDO:** Los BHA con motor de fondo pueden ser usados en todas las secciones, en el campo Los Sauces se hicieron uso en la perforación de las tres secciones en los primeros pozos, variando el diseño y uso solamente para la sección de 16”, 12 ¼” y 8 ½”.
- **BHA CON POWER DRIVE:** Herramienta usada en los BHA de 12 ¼” y en ciertos casos en la sección de 16”. Para el manejo de Power Drive, se trabaja con varios comandos, los cuales permiten aplicar los diferentes modos de perforación, de acuerdo a las necesidades, de esta forma se tiene el modo manual, magnético y gravimétrico; de acuerdo a la inclinación del pozo y manejo del tool face.
Además se tienen los comandos “Absolute Command” y “Hold On”, que se usan para el direccionamiento y mantenimiento de ángulo respectivamente.
- **SARTA PENDULAR:** BHA usado en la sección de 16”, en el cual se hacen uso de dos estabilizadores, de los cuales el superior tiene mayor diámetro

que el inferior. Usualmente para la sección de 16" se usan estabilizadores de 14 5/8" y 15 3/4", y se usan cuando la sección es vertical.

- **BHA LISO:** BHA usado en la sección de 8 1/2", su característica principal es el uso de un solo estabilizador ubicado cerca de la broca, por lo que toma el nombre de "Near Bit". El cual es usado en zonas de producción, con el objetivo de tumbar ángulo o disminuir la construcción.

Figura 21. BHA usados en el campo Los Sauces



Fuente: Programa de perforación YPF – ANDINA, 2016

CAPITULO IV

MARCO PRÁCTICO

4.1. Análisis de perforación con motor de fondo

Para el análisis de la perforación con motor de fondo, se tiene los pozos LSC-X5D y LSC-9D, los cuales fueron perforados en ambas secciones de análisis (17 1/2" y 12 1/4"), o al menos la sección de 12 1/4" con motor de fondo; debido a que la sección de 12 1/4" tuvo una perforación más extendida, y en la cual se hallaron las formaciones más problemáticas.

Se analizaron los pozos perforados, y adicionalmente se realizaron el diseño de un pozo, para el cual se analizaron y calcularon profundidades, BHA, parámetros, curva de tiempos y costos; permitiendo realizar una comparación más efectiva.

4.1.1. Análisis y resultados de perforación con motor de fondo y sistema RSS (Power Drive)

4.1.1.1. Secuencia operativa de la perforación con motor de fondo

El pozo fue perforado con motor de fondo en la sección de 17 1/2" y tuvo como objetivo mantener la verticalidad hasta aproximadamente 759 m, la construcción del ángulo KOP se inició a los 1011,21 [m], orientando el motor con Gyro Toolface, Este tramo se perforó rotando y deslizando.

En la sección de 12 1/2" se perforó con un motor A 962M5640 de diámetro externo de 12" con un estabilizador de 11 3/4" de 1.88 metros, distanciado del motor por un float sub y formando un BHA tipo Fulcrum. (ver tabla 10).

Se formó la curva de desvió hasta los 1030 m aproximadamente. También se perforó la zona tangencial, combinando rotación y deslizamiento, manteniendo un ángulo de 14,64°.

Las formaciones de la parte tangencial tendieron a reducir el ángulo de inclinación, por lo que se realizan más slides de control, llegando hasta 30 m por parada. Se atravesaron las formaciones de: (arcilla), y el tope de (Lutita), en donde se trabajó

con parámetros controlados. En la perforación con motor se asentó el casing de 9 5/8" hasta 2700 m (zapato).

4.1.1.2. Diseño de la trayectoria direccional del pozo LSC-X5D

A continuación se muestran los cálculos para obtener el ángulo de desviación teórico del pozo, teniendo como datos programados (ver anexo 6.A) :

KOP = 1000 m

TVD = 3655 m

Coordenadas UTM en superficie $X_1 = 518.671,87$ $Y_1 = 7'985.167,35$

Objetivo tope de formación Iquiri $X_2 = 517.941,72$ $Y_2 = 7'985.359,45$

BUR = 2°/100 ft

- Radio de curvatura, de la ecuación (1) tenemos:

$$R = \frac{1}{BUR} = \frac{1}{2^\circ/100 [ft]} = \frac{100 [ft]}{2^\circ} = 50 [ft]/1^\circ$$

$$= \frac{50 [ft]}{1^\circ} * \frac{180^\circ}{\pi} * \frac{0,3048 [m]}{1 ft}$$

$$\boxed{R = 873,19 [m]}$$

- Cálculo del Desplazamiento Horizontal a partir de las coordenadas UTM:

$$Dh = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}$$

$$Dh = \sqrt{(518.671,87 - 517.941,72)^2 + (7'985.167,35 - 7'985.359,45)^2}$$

$$\boxed{Dh = 755 [m]}$$

- Angulo máximo de desviación, de la ecuación (2) tenemos que:

$$\theta_{Teórico} = 90^\circ - \Omega - \tau$$

Reemplazando datos en la ecuación (3)

$$\tau = \arctan\left(\frac{R - Dh}{TVD - KOP}\right) = \arctan\frac{873,19 - 755}{3655 - 1000}$$

$$\tau = 2,55^\circ$$

Calculando la distancia AB, de la ecuación (5) tenemos:

$$D_{AB} = \sqrt{(R - Dh)^2 + (TVD - KOP)^2}$$

$$D_{AB} = \sqrt{(873,19 - 755)^2 + (3655 - 1000)^2}$$

$$D_{AB} = 2657,63 [m]$$

Calculamos el ángulo Ω de la ecuación (4):

$$\Omega = \arccos\left(\frac{R}{D_{AB}}\right) = \arccos\left(\frac{873,19}{2657,63}\right)$$

$$\Omega = 70,82^\circ$$

Reemplazando los datos obtenidos en la ecuación (2):

$$\theta_{Teórico} = 90^\circ - \Omega - \tau = 90 - 70,82 - 2,55$$

$$\theta_{Teórico} = 16,63^\circ$$

Porcentaje de diferencia entre el ángulo teórico y real $\theta_{Real} = 14,64^\circ$

$$Df = 100 - \frac{\theta_{real}}{\theta_{teórico}} * 100\%$$

$$Df = 100 - \frac{14,64}{16,63} * 100\%$$

$$Df = 11,96 \%$$

Podemos observar que la construcción del ángulo de desviación tuvo una diferencia del 11,96% del ángulo planeado.

4.1.2. Secuencia operativa de la perforación con powerdrive

En el pozo LSC- 9D se usó PowerDrive en la sección de 12 ¼" y se inició el KOP a 850 m, se utilizaron trepano PDC con arreglo direccional MWD-Telescope-Receiver para la perforación y mantenimiento de dirección. En este pozo se usó un BHA

convencional. (ver tabla 12). En la construcción del ángulo de desviación se alcanzó un valor promedio de 34,74°.

Se formo la curva de desvió hasta los 1500 m aproximadamente y se continuo con la zona tangencial hasta los 2966 m. Se perforaron las formaciones de Cajones, Yanata, Ichoa y Elvira hasta llegar al tope de la formación San Telmo. Para el tramo intermedio se asentó y cemento casing de 9 5/8”.

En este pozo al iniciar la perforación, se tuvo altos riesgos de colisión con otros pozos añadido a la tendencia natural de ciertas formaciones a incrementar o reducir el ángulo saliéndose del plan, siendo los retos más considerables para la perforación, debido a que se requieren controles y correcciones óptimos de trayectoria.

4.1.2.1. Diseño de la trayectoria direccional del pozo LSC-9D

A continuación se muestran los cálculos para obtener el ángulo de desviación teórico del pozo, teniendo como datos programados (ver anexo 6.B) :

KOP = 850 [m]

TVD = 3656 [m]

Coordenadas UTM en superficie $X_1 = 516\ 620,12$ $Y_1 = 7\ 985\ 095,70$

Objetivo tope de formación Iquiri $X_2 = 515\ 060$ $Y_2 = 7\ 985\ 550$

BUR = 2°/100 [ft]

- Radio de curvatura, de la ecuación (1) tenemos:

$$R = \frac{1}{BUR} = \frac{1}{2^\circ/100 [ft]} = \frac{100 [ft]}{2^\circ} = 50 [ft]/1^\circ$$

$$= \frac{50 [ft]}{1^\circ} * \frac{180^\circ}{\pi} * \frac{0,3048 [m]}{1 [ft]}$$

$$\boxed{R = 873,19 [m]}$$

- Desplazamiento Horizontal, a partir de las coordenadas UTM tenemos:

$$Dh = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}$$

$$Dh = \sqrt{(516620,12 - 515060)^2 + (7985095,70 - 7985550)^2}$$

$$Dh = 1624,92 [m]$$

- Angulo máximo de desviación de la ecuación (6)

$$\theta_{Teórico} = 180^\circ - \Omega - \tau$$

Calculamos el ángulo τ de la ecuación (7)

$$\tau = \arctan\left(\frac{TVD - KOP}{Dh - R}\right) = \arctan\frac{3656 - 850}{1624,92 - 873,19}$$
$$\tau = 75^\circ$$

Obtenemos el valor de la distancia AB de la ecuación (9):

$$D_{AB} = \sqrt{(TVD - KOP)^2 + (Dh - R)^2}$$
$$D_{AB} = \sqrt{(3656 - 850)^2 + (1624,92 - 873,19)^2}$$
$$D_{AB} = 2904,95 [m]$$

Obtenemos el ángulo Ω de la ecuación (8):

$$\Omega = \arccos\left(\frac{R}{D_{AB}}\right) = \arccos\left(\frac{873,19}{2904,95}\right)$$
$$\Omega = 72,51^\circ$$

Reemplazamos los datos obtenidos en la ecuación (6):

$$\theta_{Teórico} = 180^\circ - \Omega - \tau = 180 - 72,51 - 75$$

$$\theta_{Teórico} = 32,49^\circ$$

Porcentaje de diferencia entre el ángulo teórico y real $\theta_{Real} = 14,64^\circ$

$$Df = 100 - \frac{\theta_{real}}{\theta_{teórico}} * 100\%$$
$$Df = 100 - \frac{34,74}{32,49} * 100\%$$

$$Df = 6,9 \%$$

Podemos observar que la construcción del ángulo de desviación tuvo una diferencia del 6,9% del ángulo planeado.

4.1.3. Problemas y riesgos operacionales

El análisis de riesgos durante las operaciones de perforación de un pozo, es un factor muy importante, ya que permite determinar el impacto que tendría la ocurrencia de dichos eventos a lo largo de los trabajos. Durante el diseño y programa de perforación de un pozo se realiza la evaluación de riesgos, mediante una matriz de riesgos, la cual relaciona la probabilidad y severidad de cada evento.

Cabe definir los términos utilizados, de este modo se tiene:

- Riesgo: probabilidad de ocurrencia de una amenaza o evento, se obtiene al relacionar la probabilidad y severidad.
- Probabilidad: Porcentaje de ocurrencia de un evento.
- Severidad: Magnitud de daño que genera la ocurrencia del evento.

En la matriz de riesgos de perforación se obtienen y reconocen los problemas puntuales operativos, tanto mecánicos (herramientas) y formacionales, después se procede a priorizar los eventos más relevantes y significativos. Posteriormente se evalúa la probabilidad de ocurrencia en un pozo diseñado, y se analiza la severidad de ocurrencia considerando daños de equipos, tiempo y costos; finalmente se da puntuación de severidad y probabilidad en rangos de 1-5; para finalmente relacionar ambos valores en la matriz de riesgos, obteniendo un valor de riesgos cuyos valores se indican a continuación, y se observa en la Tabla 6.

- 16 a 25: Intolerable, no se debe aplicar la operación sin revisión previa.
- 9 a 15: Indeseable, realizar todos los esfuerzos para reducir el riesgo.
- 5 a 8: Aceptable, proceder con cautela y mejora continua.
- 1 a 4: Seguro.

Tabla 5. Escalas de riesgo

		Severidad				
		1	2	3	4	5
Probabilidad	1	1	2	3	4	5
	2	2	4	6	8	10
	3	3	6	9	12	15
	4	4	8	12	16	20
	5	5	10	15	20	25

Fuente: Elaboración propia en base a ISO 45001

Obtenidos dichos valores de riesgo se detallan las medidas de contingencia y soluciones para enfrentar los problemas, así como para tener un control de ocurrencia.

Tabla 6. Riesgos y problemas operacionales Sección de 17 1/2"

RIESGO OPERACIONAL	ACCIÓN TOMADA	RIESGO MOTOR	RIESGO RSS	PROBABILIDAD-SEVERIDAD MOTOR	PROBABILIDAD-SEVERIDAD RSS
Presencia de Arcilla Embotellamiento.	Píldoras	3	6	3 - 1	3 - 2
Pérdida de circulación, fracturas.	Píldoras.	3	9	3 - 1	3 - 3
Canalización de fluido.	Píldoras y Bajo Caudal.	3	6	3 - 1	3 - 2
Puntos apretados, Pega geométrica.	Píldoras Rotación.	3	16	3 - 1	4 - 3
Formación de Camas de recortes de Empaquetamiento.	Control ROP, óptimo HSI.	9	4	3 - 3	1 - 4

Colisión con pozos aledaños.	Corrección y control de trayectoria.	6	4	2 - 3	1 - 4
Incremento - Pérdida de inclinación por interacciones geológicas.	Corrección dirección-inclinación. Estabilizar	6	6	3 - 2	3 - 2

Fuente: Elaboración propia, 2019

Tabla 7. Riesgos y problemas operacionales Sección de 12 ¼"

RIESGO OPERACIONAL	ACCIÓN TOMADA	RIESGO MOTOR	RIESGO RSS	PROBABILIDAD-SEVERIDAD MOTOR	PROBABILIDAD-SEVERIDAD RSS
Derrumbes Empaquetamiento.	Aumento de la densidad.	3	9	3 - 1	3 - 3
Vibración torsional, S&S.	Control de RPM.	2	9	2 - 1	3 - 3
Restricción	Rotación, bombeo de píldoras.	6	1	3 - 2	4 - 3
Daños en herramientas direccionales.	Cambio de BHA.	6	8	2 - 3	2 - 4
Atrapamiento-pérdida de herramientas en fondo.	Pesca, martilleo, bombeo de píldoras, rotación.	2	10	2 - 1	2 - 5

Empaquetamiento, pega geométrica de tubería.	Optimización de limpieza, rotación, control ROP.	9	8	3 - 3	2 - 4
Trabajo con alto ángulo- Diámetro del hoyo.	Consideración de parámetros	4	9	2 - 2	3 - 3

Fuente: Elaboración propia, 2019

La Tabla 6 y 7 se muestra los principales riesgos que se presentaron en los pozos del campo Los Sauces, y cuyo análisis se basó en la probabilidad y severidad de ocurrencia del evento.

La tabla 5 muestra de manera comparativa los valores de Probabilidad- Severidad para cada herramienta, y como resultado y con sus respectivos colores (pertenecientes a la matriz de riesgos) se halla el riesgo obtenido para cada evento analizado.

De esta manera se observa que ciertos fenómenos como puntos apretados presentan un mayor riesgo en el caso del sistema RSS, debido a la configuración del hoyo y la corrida de tubería, teniendo un menor espaciamiento y generando problemas al momento de sacar tubería de perforación y Casing, teniendo un valor de riesgo de 9, que se muestra como indeseable de acuerdo a la matriz de riesgo.

En tanto a la formación de camas de recortes y empaquetamiento el riesgo aumenta para el caso del motor, debido al deslizamiento donde al no haber rotación continua, se tiene problemas de limpieza, teniendo un valor de 9.

En tanto a problemas de vibración, el riesgo aumenta con el sistema RSS, al ser una característica propia de los sistemas de rotación continua, y se tiene un valor de 9.

En cuanto a daño o entrapamiento de herramientas direccionales en fondo, el riesgo aumenta en el caso del Sistema RSS, debido a que la severidad de su pérdida es mayor, en comparación con Motores, a causa de su costo y funcionamiento.

4.2. Propuesta de esquema mecánico con sistema RSS y motor de fondo, comparación de resultados teóricos con reales

4.2.1. Parámetros operacionales

El pozo planteado LSC-9D es un pozo Direccional tipo “J modificado”, de acuerdo al diseño manejado a lo largo del proyecto, para proyectar la perforación con las herramientas de estudio, analizando la conveniencia de aplicación de dichos equipos considerando tiempos, costos, parámetros y riesgos.

Se elaboro un escenario de perforación basado en los esquemas planteados para los pozos LSC, de acuerdo a topes, profundidades, rop y torque para posteriormente presentar los resultados de la perforación de cada pozo y describir las ventajas y desventajas.

Cada caso cuenta con la planeación del tiempo, que se puede observar más adelante en las respectivas curvas de tiempo (Ver Anexo 6), teniendo para el caso del motor de fondo 18.75 días, y para sistema RSS 12.23 días. Como objetivo principal como para todos los pozos del campo es la arenisca Iquiri-1, y objetivo secundario la arena San Telmo ws.

El diseño de tubería de revestimiento incluye un Casing conductor piloteado de 20” a 35 m, un Casing superficial de 13 3/8” a 800 m, Casing intermedio de 9 5/8” a 2966 m, y un Liner de producción de 7” a 4161 m. (Ver anexo 1)

4.2.1.1. Profundidades y topes

En la Tabla 9. Se muestran los topes de las formaciones perforadas, se puede observar que el tope de la formación San Telmo es la profundidad de asentamiento de la cañería de 9 5/8”, donde se inicia el tramo productor.

Tabla 8. Topes propuestos para el Pozo LSC-9D

Descripción	MD(mt)	Incl(°)	Azimut (°)	TVD (mt)	TVDSS (mt)	Vsec (mt)
F. CHACO	0,00	0,00	0,00	0,00	336,00	0,00
20" conductor	35,00	0,00	324,00	35,00	301,00	0,00
13 3/8" casing	800,00	0,00	324,00	800,00	-434,00	0,00
KOP	830,00	0,00	324,00	830,00	-464,00	0,00
Tope CAJONES	1496,00	31,26	286,39	1465,00	-1129,00	173,93
EOC	1582,66	34,74	284,76	1538,12	-1202,12	212,96
Base CAJONES	1759,00	34,74	284,76	1683,00	-1347,00	322,41
Tope SAN TELMO	2954,00	34,74	284,76	2665,00	-2321,00	902,25
9 5/8" casing	2966,16	34,74	284,76	2677,94	-2311,94	1003,12
Base SAN TELMO	3108,00	34,74	284,76	2791,00	-2447,00	1032,24
F. ESCARPMENT	3182,00	34,74	284,76	2852,00	-2508,00	1132,75
	3387,00			3021,00	-2677,00	1249,90
Tope IQUIRI	3894,00	34,74	284,76	3437,00	-3093,00	1528,27
Base IQUIRI	4063,00	34,74	284,76	3576,00	-3232,00	1625,74
7" Liner	4161,02	34,74	284,76	3656,87	-3320,87	1681,78

Fuente: Elaboración a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

4.2.1.2. Diseño de BHA con motor de fondo para la sección de 12 ¼"

En la tabla 10 se puede observar el BHA que se tuvo en el programa de la perforación del pozo LSC-X5D, en la sección de 12 ¼" con motor de fondo.

Cálculos efectuados para el diseño del BHA:

Datos del pozo Densidad del lodo = 9,2 LPG
 WOB requerido = 8500 Lb
 FS = 1,20
 Angulo de desviación = 16,63

- Factor de flotación, de la ecuación (10):

$$ff = 1 - \frac{D_L}{Da}$$

$$ff = 1 - \frac{9,2}{65,5}$$

$$ff = 0,86$$

- Longitud necesaria de los Drill collar (DC) para suplir las 8500 lb sobre el trepano (WOB), de la ecuación (11):

$$L_{DC} = \frac{WOB * FS}{\cos(\theta) * ff * W_{DC}}$$

$$L_{DC} = \frac{8500 * 1,20}{\cos(16,63) * 0,86 * 149,76}$$

$$L_{DC} = 82,65 \text{ ft}$$

Número de piezas de Drill Collar:

$$N_{DC} = 82,65 \text{ ft} * \frac{1 \text{ pieza}}{30 \text{ ft}}$$

$$N_{DC} = 2,75 \approx 3 \text{ piezas de Drill Collar}$$

- Longitud total de las barras pesadas o Heavy Weight Drill Pipe (HWDP), de la ecuación (12):

$$L_{HWDP} = \frac{WOB * FS}{\cos(\theta) * ff * W_{HWDP}}$$

$$L_{HWDP} = \frac{8500 * 1,20}{\cos(16,63) * 0,86 * 50,38}$$

$$L_{HWDP} = 245,70 \text{ ft}$$

Número de piezas de barras pesadas

$$N_{HWDP} = 245,70 \text{ ft} * \frac{1 \text{ pieza}}{30 \text{ ft}}$$

$$N_{HWDP} = 8,19 \approx 8 \text{ piezas de barras pesadas}$$

Tabla 9. BHA con motor de fondo-Sección 12 ¼"

Componente Name	Steel Grade	Length mt	Cum. Length mt	ID in	OD in	Max OD in	Nom. Weight Lbm/ft
12 ¼" PDC Bit	G-105	0,30	0,30	3,250	8,000	12,250	259,49
A962M5640XP 12" Stab	G-105	9,50	9,80	7,850	9,630	12,000	198,31
Float Sub	G-105	0,80	10,60	2,810	8,250	8,250	160,00
11 ¾" Stabilizer	G-105	1,88	12,48	2,500	8,250	12,125	188,00
Pony Monel	G-105	2,13	14,61	2,840	8,340	8,500	163,68
TeleScope 825 NF	P550	7,69	22,30	5,109	8,250	8,250	124,95
8" NMDC Monel	G-105	8,67	30,97	3,250	7,813	8,125	133,59
2x8" Drill Collar	G-105	17,74	48,71	3,000	8,000	8,000	149,76
Crossover	G-105	1,05	49,76	2,813	8,000	8,125	138,85
8x5" HWDP	G-105	73,83	123,59	3,000	5,000	6,500	50,38
Drilling Jar	G-105	9,67	133,26	2,750	6,500	6,500	72,5
5x5" HWDP	G-105	46,31	179,57	3,000	5,000	6,500	50,358

Fuente: Datos de YPFB – ANDINA, 2016

4.2.1.3. Diseño de BHA con sistema RSS para sección de 12 ¼”

Para el caso del pozo LSC-9D se armó el siguiente BHA (tabla 11) en la sección de 12¼” con sistema RSS (Power Drive).

Cálculos efectuados para el diseño del BHA:

Datos de la planeación: Densidad del lodo = 9,2 LPG

WOB requerido = 8000 Lb

FS = 1,20

Angulo de desviación = 32,49

- Factor de flotación, de la ecuación (10):

$$ff = 1 - \frac{D_L}{D_a}$$

$$ff = 1 - \frac{9,2}{65,5}$$

$$ff = 0,86$$

- Longitud necesaria de los Drill collar (DC) para suplir las 8500 lb sobre el trepano (WOB), de la ecuación (11):

$$L_{DC} = \frac{WOB * FS}{\cos(\theta) * ff * W_{DC}}$$

$$L_{DC} = \frac{8000 * 1,20}{\cos(32,49) * 0,86 * 149,76}$$

$$L_{DC} = 88,34 \text{ ft}$$

Número de piezas de Drill Collar

$$N_{DC} = 88,34 \text{ [ft]} * \frac{1 \text{ pieza}}{30 \text{ [ft]}}$$

$$N_{DC} = 2,94 \approx 3 \text{ piezas de Drill Collar}$$

- Longitud total de las barras pesadas o Heavy Weight Drill Pipe (HWDP), de la ecuación (12):

$$L_{HWDP} = \frac{WOB * FS}{\cos(\theta) * ff * W_{HWDP}}$$

$$L_{HWDP} = \frac{8000 * 1,20}{\cos(32,49) * 0,86 * 50,38}$$

$$L_{HWDP} = 262,69 [ft]$$

Número de piezas de barras pesadas

$$N_{HWDP} = 262,69 [ft] * \frac{1 \text{ pieza}}{30 [ft]}$$

$$N_{HWDP} = 8,76 \approx 9 \text{ piezas de barras pesadas}$$

Tabla 10. BHA con sistema RSS-Sección 12 ¼"

Componente Name	Steel Grade	Length m	Cum Length m	ID in	OD in	Max OD in	Nom. Weight Lbm/ft
12 ¼" PDC Bit	G-105	0,30	0,30	3,250	8,000	12,250	259,49
PD 900 X6 RA	G-105	4,19	4,49	5,125	9,000	11,960	180,97
Receiver Sub Stab 12 1/8"	G-105	1,88	6,37	2,500	8,250	12,125	166,30
LSS		0,33	6,70	4,250	8,313	8,313	92,36
Telescope 825 NF	P550	7,69	14,39	5,109	8,250	8,250	124,95
USS		0,46	14,85	4,250	8,313	8,313	132,521
8" NMDC Monel	G-105	8,67	23,52	3,250	7,813	8,125	133,59
3x8" Drill Collar	G-105	26,60	50,12	3,000	8,000	8,000	149,76
Crossover	G-105	1,05	51,17	2,813	8,000	8,125	138,85
9x5" HWDP	G-105	83,06	134,23	3,000	5,000	6,500	50,38
Drilling Jar	G-105	9,67	143,90	2,750	6,500	6,500	72,5
5x5" HWDP	G-105	46,31	190,21	3,000	5,000	6,500	50,38

Fuente: Datos de YPFB – ANDINA, 2016

4.2.1.4. Programa de fluidos de perforación

4.2.1.4.1. Objetivos del fluido durante la perforación del pozo LSC-9D

- Perforar sección de 17 1/2" hasta 800 m, punto de asentamiento de casing, manteniendo parámetros controlados para evitar pérdidas de circulación.
- Atravesar formaciones de Cajones, Yanata, Ichoa y Elvira en sección de 12 ¼" hasta 2966 m, punto de casing 9 5/8", cuidando la limpieza al trabajar con una alta inclinación y ROP.

4.2.1.4.2. Características de los fluidos de perforación

Las características generales del fluido de perforación se describen en el anexo 3

Fluido Bentonítico (Sección 17 1/2”):

Se usa fluido disperso para atravesar las arcillas jóvenes de Yecua, altamente reactivas y dispersables y también intervalos de areniscas, iniciando la perforación en Petaca. (YPFB-Andina S.A, 2016). Al inicio de la perforación en Yecua se alcanza una densidad de 9.0 lb/gal, valor que incrementa hasta 9.2 lb/gal en el punto de asentamiento del revestidor.

GPM crítico: 600 gpm, tomar en cuenta la presencia de gumbo, optimizar la limpieza.

Fluido Baradrill-N (Sección 12 1/4”):

Se atraviesan las formaciones de Cajones, Yanata, Ichoa y Elvira.

Se inicia perforando con una densidad de 9.1 lb/gal, la misma que se incrementa hasta 9.4 lb/gal en el punto de asentamiento del revestidor.

Fluido Baradrill-N (Sección 8 1/2”):

Se atraviesan principalmente las areniscas de Iquiri-1 y San Telmo donde se mantiene la inclinación hasta el final de la sección. Este fluido debe asegurar la limpieza y estabilidad del agujero perforado, así como asegurar una buena corrida del Liner.

4.2.1.5. Parámetros a tomar en cuenta con cada herramienta

4.2.1.5.1. Parámetros a tomar en cuenta con motor de fondo

Tabla 11. Parámetros manejados con motor de fondo

SECCIÓN	ROP PROM	ROP NETA	RPM ROTARIA	RPM MOTOR	RPM TOTAL	WOB	PSI	GPM	HORAS NETAS
17½"	-	10,14	40-50	110-126	150-177	4-35	2950 - 3400	1000 - 1150	70,08
12 ¼"	4,34	4,32	40-50	115	155-165	15-50	3350	1050	450,00

Fuente: Datos de YPFB – ANDINA, 2016

ROP:

El análisis de ROP por formación se halla detallado en el anexo 4

En la tabla 12 se muestra la rata de penetración promedio por sección, teniendo para la sección de 17½" 10,14 m/h (neta), se planea perforar 711 m de los cuales se rota y desliza de la siguiente manera:

- Rotando: 512 m. perforados en 50.45 horas, con un ROP neto de 10,14 [m/h] y un porcentaje neto de la sección de 72%.
- Deslizado: 199 m. perforados en 19.63 horas, resultando un ROP neto de 10,13 [m/h], obteniendo un porcentaje de la sección del 28%.
- ROP Instantáneo: Se trabaja de acuerdo a manejo de sólidos y limpieza, en casos que no se requiera mayor control se manejan valores máximos de hasta 10 [m/h]; mientras que en casos severos se manejan valores máximos de 10-12 [m/h]

Para la sección de 12 ¼" se tiene un ROP promedio de 4,34 m/h, y se resume de la siguiente manera:

Se Perfora manteniendo la tangente hasta 2703 m MD, rotando se mantiene inclinación y se desliza para controlar la tendencia a crecer la inclinación y dirección a la izquierda. ROP instantánea de 4/6, con 1050 gpm.

- Rotando: 1749.6 m en 405 horas, ROP de 4.32, representando el 90% de la sección.
- Deslizado: 194.4 m en 45 horas, ROP de 4.32, representando el 10% de la sección.

En esta sección el deslizamiento es menor, ya que se tiene la sección tangencial. Se controla no alcanzar ROP muy elevadas, para evitar empaquetamiento.

RPM: En ambas secciones, 17½” y 12 ¼”, se trabaja con un RPM dada por la Rotaria de 40-50.

En la sección de 17½” se tiene un RPM de trabajo de motor de 110-126 RPM, sumando un total de 150-176 RPM.

En la sección de 12 ¼” se manejan valores muy similares que en la sección de 17½”.

Galones por minuto GPM:

En la sección de 17½” se trabaja con caudal moderado, y se lo incrementa progresivamente con la regla de 35 m / 100 gpm, es decir que de acuerdo se va perforando 35 m se van aumentando paulatinamente 100 gpm. Con el fin de mejorar el ROP y mantener constante el diferencial de presión

Existe el riesgo de pérdidas de circulación superficiales, motivo por el cual se manejan gpms bajos, alcanzando gradualmente los 900 gpm a 800m aproximadamente, en el cual se incrementa de 800-1000 gpm.

Se termina con 900-1100 gpm en la vertical. Se trabaja con caudales bajos los primeros 100m, es decir en las zonas arenosas y para manejar el problema de gumbo.

Para la sección de 12 ¼” previo a entrar en San Telmo se reduce el gpm a 880 aproximadamente, y se vuelve a incrementar previo al ingreso en Escarpment, hasta 1000 gpm.

HSI

En la sección de 17 ½” se atraviesa la formación de Chaco (Primeros 800 metros aproximadamente) se trabaja con valores altos de HSI para incrementar el lavado uniforme de las paredes del pozo durante la perforación de la sección.

En la sección de 12 ¼” se atraviesa las formaciones de Cajones y Petaca (arcillas), por lo que se maneja un HSI óptimo superior a 2.5, con un alto caudal, con la mayor cantidad de RPM posible, que en conjunto con el bombeo de píldoras minimizan la formación de camas de recortes.

DLS- INCLINACIÓN:

Tabla 12. Resumen de DLS para el pozo LSC-X5D

Desde [m]	Hasta [m]	DLS
0.00	48.00	0°/30
48.00	759.00	0°/30
759.00	1485.0	2°/30 Construye
1485,0	2703	2.4°/30 Tangente
2703	3425	0.55°/30 Tangente
3425	3750	0.6°/30 Tumba

Fuente: Datos de YPFB – ANDINA, 2016

TORQUE:

Dentro de la primera parte de la sección de 17 ½”, en la cual se trata de mantener la vertical y en la cual se trabajan con parámetros controlados, se maneja un torque muy bajo, de aproximadamente 2-5 Klbs-ft.

En la sección de 12 ¼” aumenta un poco el valor de torque, llegando hasta 14 Klbs-ft. En los pozos con mayor ángulo, el torque aumenta, y al comparar el torque aplicado en rotación y deslizamiento, se planifica manejar valores de 4-15 klbs-ft y 8-15 Klbs-ft, respectivamente.

WOB:

Un alto WOB se usa generalmente en la construcción de ángulo. Sin embargo, el WOB es una de las limitaciones operacionales del Motor, debido a que al tener una carga excesiva sobre la broca puede detener la rotación, al limitar el torque.

En la sección de 17 ½”, en la parte vertical se manejan bajos valores de WOB (5-15 Klbs) trabajando con valores máximos de este rango (15 Klbs) deslizando, y al iniciar la construcción del KOP se eleva de 15-35 Klbs.

En 12 ¼” se maneja el menor WOB posible, para controlar ROP, evitando embotamiento de la broca y no sobrecargar el anular de cortes.

Para esta sección, en el pozo de mayor inclinación se trabaja con 15-35 Klbs, debido a los requerimientos formacionales.

4.2.1.5.2. Parámetros a tomar en cuenta en pozos perforados con RSS

Tabla 13. Parámetros manejados con el sistema RSS

SECCIÓN	ROP PROM.	ROP NETA	RPM ROTARIA	RPM MOTOR	RPM TOTAL	WOB	PSI	GPM	HORAS NETAS
17½	-	10,25	140	-	140	5-18	970-2450	100-1200	74.64
12 ¼	6.37	7,38	70-140	-	70-140	15-40	2300-4100	1000-1200	293.52

Fuente: datos de YPFB – ANDINA, 2016

ROP:

En el anexo 5 se puede ver el ROP planeado por formación para la sección de 12 ¼ del pozo LSC-9D.

En la sección de 12 ¼ ” con Power Drive se tiene una ROP neta de 10,25 m/h, siendo considerablemente mejor al anterior. Con el fin de erosionar las zonas o

secciones y garantizar la limpieza del agujero manteniendo un caudal entre 500/600 gpm.

Al perforar con Power Drive se maneja un ROP controlado de máximo 7.38 ft/h, con el fin de corregir azimut e inclinación del intervalo anterior por aspectos de colisión.

En la sección de 12 ¼": se manejan dos modos para construir ángulo y mantener tangente de la siguiente manera:

- Absolute command: 600 m en 109.5 horas, ROP de 5.48 [m/h], con 27.7% total del intervalo.
- Inclination Hold: 1566 m en 184.02 horas, ROP de 6.37, con un 72.3% de la sección.

RPM:

Con Power Drive se maneja un RPM de 140 desde 800 m hasta 2966 m. Se maneja un RPM se debe manejar un RPM máximo de 120.

En la sección de 12 ¼": se trabaja con 140 RPM con el manejo de Power Drive.

GPM:

Sección 17 ½": Maneja un gpm de hasta 1200, que en comparación con otros pozos con diferente diseño mecánico es considerablemente mayor.

En la sección de 12 ¼" se maneja un gpm promedio de 700-1200. En el inicio de Cajones e Ichoa no es necesario bajar el gpm, trabajando con aproximadamente 1000 gpm, lo cual se mantiene hasta acabar la sección tangente, empezar a tumbar el ángulo y llegar a punto de casing con 1000 gpm.

HSI:

En la sección de 12 ¼" se maneja un HSI de 3-4, junto al manejo de Power Drive esperando buenos resultados en cuanto a limpieza del hoyo, adicionado las prácticas de perforación recomendadas (ROP controlada, bombeo de píldoras,

acondicionamiento de fluido), se reduce el riesgo de empaquetamiento, restricciones y riesgos de pega de tubería.

DLS-INCLINACIÓN:

Tabla 14. DLS para sistemas RSS

Desde [m]	Hasta [m]	DLS
0.00	800.00	0°/30
800.00	1400.00	2°/30 Construye
1400.00	2966.00	0.5°/30 Tangente
2966.00	4161.00	0.5°/30 Tangente

Fuente: Datos de YPFB – ANDINA, 2016

TORQUE

Sección 17 ½”: Maneja torque de 2-4 Klbs-ft de torque, valores ligeramente similares a los manejados en la perforación con Motor de fondo.

Sección 12 ¼”: Se trabaja con un torque de 4-12 Klbs-ft.

4.3. Resultados obtenidos con cada herramienta

4.3.1. Resultados ventajas y desventajas de perforación con motor de fondo

Se observa un avance muy bueno, manteniendo valores de presión diferencial óptima (Sin pérdida de energía significativa en tubería).

Uno de los desafíos que enfrenta la herramienta de motor de fondo en la sección de 12 ¼”, es la de tener un comportamiento variable con respecto al diseño de perforación:

1. Dar verticalidad con un mínimo de desviación durante los primeros 48-759 m. de perforación, hasta que empiece a construir KOP.
2. Desde el inicio de KOP, la respuesta debe ser óptima para incrementar el ángulo de acuerdo al plan.

3. Y al final de la sección brindar una sección tangencial óptima que es alrededor de 1900 m, manteniendo el ángulo constante y el pozo lo más homogéneo posible.

Además de presentarse un riesgo considerable de Colisión entre pozos, por lo que fue necesario corregir la inclinación y tomar Gyros de manera muy cautelosa, y el Motor de Fondo da una respuesta efectiva para el distanciamiento entre pozos.

4.3.1.1. Ventajas

- Al tener el motor de fondo una mayor severidad DLS permite corregir el riesgo de colisión de manera más rápida.
- La rotación individual del motor de fondo permite realizar rotaciones más eficientes con un mínimo desgaste.
- Reduce el desgaste, fatiga y vibración de la tubería de perforación.
- Versatilidad en la construcción de curvas de radio medio y largo.
- El diámetro final del pozo es ligeramente mayor al de la broca, brindando espaciado extra que facilita sacada y corrida de tubería, evitando pega.
- La configuración rotor- estator y número de lóbulos brinda variaciones en torque y RPM, que pueden aplicarse de acuerdo a las necesidades y características del pozo.

4.3.1.2. Desventajas

- Debido al principio de funcionamiento los motores de fondo generan una caída de presión interna entre 800 y 1000 psi, la cual adicionada a la caída de presión de los demás componentes del BHA exigen una reducción en el gpm (para balancear la caída de presión). Como consecuencia se opera con una potencia hidráulica restringida, disminuyendo la ROP. Este aspecto lo hace vulnerable, en especial en las zonas de Elvira y Cajones, en donde se requiere el trabajo con el máximo diferencial posible.
- Espiralamiento, debido a que el codo del conjunto de perforación hace que la barrena gire de manera excéntrica con respecto al eje del BHA

(Schlumberger, 2016). Aumentando el torque y arrastre, produciendo dificultades al bajar el revestidor.

- El deslizamiento incrementa el riesgo de empaquetamiento y atrapamiento de tubería, debido a que el BHA (excepto el motor y broca) se halla estático, comprometiendo la limpieza y generando acumulación de sólidos en el anular. Además, se incrementa el tiempo de operación.

4.3.2. Resultados ventajas y desventajas de perforación con el sistema RSS

El RSS en LSC-9D se usó para obtener menos tiempo de perforación, y ayudar a obtener buenas correlaciones geológicas.

RSS cumple con varias funciones en una sola corrida:

- Tolera altas revoluciones por minuto mientras mantiene buen control-trayectoria.
- Minimiza la tortuosidad.
- Mantener el diseño hidráulico planteado.
- Se tiene un pozo con gran exactitud, casi el mismo del diseño con respecto a ángulo.
- Versatilidad para manejar direccionalmente el plan, Las RPM ayudan a la limpieza, información en tiempo real ya que las mediciones se las realiza más cerca de la broca.

Como resultado final se enfatiza un excelente desempeño del PD900 en campos donde ya se utilizó en el exterior, los comandos de la herramienta fueron recibidos y ejecutados sin problemas, cumpliendo además satisfactoriamente con el plan direccional. Se recomienda el uso del PD para pozos con inclinaciones mayores a 30°, ya que permite trabajar con altos gpm y altas RPM, permitiendo tener una mejor limpieza del pozo aún con ROP elevadas.

4.3.2.1. Ventajas

- Cuenta con el sensor Gamma Ray que ofrece las lecturas muy cerca de la broca, permitiendo la correlación de topes formacionales en tiempo real, para lo cual se debe tener en cuenta el ROP para tener una buena densidad de datos de las medidas Gamma Ray.
- Durante el desarrollo de un perfil direccional, el BHA se halla rotando todo el tiempo; a diferencia del motor de fondo, en el cual el BHA deja de rotar para deslizar, incrementando el riesgo de empaquetamiento.
- Con el sistema RSS se pueden alcanzar altas revoluciones (120-150 rpm), dependiendo esto de la capacidad del taladro de perforación en uso; en cambio el motor de fondo el número de revoluciones para rotar el BHA depende del ángulo con el que esté ensamblado el motor, que restringe la rotación proporcionada por el top drive a bajas revoluciones (40-100 rpm) (Schlumberger, 2018).
- Las propiedades del fluido de perforación, en conjunto con la velocidad de rotación del BHA determinan la capacidad de transporte de recortes de perforación hacia la superficie. Por lo cual al tener mayor RPM con el sistema RSS se optimiza la limpieza del agujero.
- Con los sistemas RSS se tiene 100% de control direccional, eliminando el deslizamiento; y teniendo un mayor ROP.
- En relación al motor de fondo, se reduce considerablemente los riesgos empaquetamiento o pega de tubería.
- En tanto a la caída de Presión, los sistemas RSS generan una caída de presión de máximo 100 psi, lo que permite optimizar la hidráulica con relación del caudal, aumentar la potencia hidráulica.
- Durante la limpieza de zonas inestables o de arcillas reactivas, en donde se tiende a incrementar o perder ángulo, según sea el caso; el sistema RSS tiene una mayor ventaja frente al motor de fondo, ya que independientemente de los parámetros de hidráulica y penetración, permite optimizar la limpieza ya que el sistema de rotación continua evita que se acumulen los sólidos y se

generen las denominadas camas de sólidos. Mientras que el motor de fondo al deslizar, pierde eficiencia en la limpieza y se tiende a acumular los sólidos, siendo más dificultoso el manejo de ciertas arcillas.

- Resumiendo todo se tiene una disminución considerable en tiempos de ejecución.

4.3.2.2. Desventajas

Se produce un fenómeno denominado Stick & Slip, que principalmente se producen en los sistemas de rotación continua, cuando por efectos de fricción la broca deja de rotar. Cuando la sarta sigue en movimiento, y al liberarse la broca tiende a torcerse al rotar con mayor velocidad; y puede generarse una deformación de la tubería o herramientas.

- En varios pozos del campo analizado se evidenció problemas de sacada de BHA a superficie, llegando a considerar el aumento de la densidad del fluido de perforación hasta 12.5 ppg, al trabajar en la sección de 12 ¼”.
- Se observó restricciones y aumento en el riesgo de pega geométrica, debido a la configuración y diámetro resultante. Con el Power Drive el diámetro final del hoyo es casi el mismo de la broca, es decir al sacar tubería o bajar Casing se tiene menos espacio, generando restricciones.
- Además, se tiene cierta tortuosidad en el resultado final, debido al espiralamiento producido por la rotación continua.

4.4. Resultados comparativos de ROP de pozos en el campo Los Sauces

4.4.1. ROP para pozos perforados

El ROP para la sección de 17 ½” tiene valores similares, debido a que en esta sección se usa perforación con motor de fondo; teniendo un aumento significativo en el pozo LSC-9D, al tener la presencia de RSS en su perforación.

Al considerar cada estado mecánico, se tienen intervalos de perforación similares, por lo que los resultados de ROP son comparables. Para el análisis respectivo se realiza la siguiente tabla resumen.

Tabla 15. Valores promedio de ROP en Los Sauces

Sección	VALORES PROMEDIO		COMENTARIOS	
		ROP PROMEDIO		ROP NETO
1 (17 ½")	Motor	-	10.14	El ROP es menor al alcanzado con RSS, y en esta sección se llegó a un ROP de 10.14 [m/h] para motor y 10.25 [ft/h] para RSS, variando el tiempo de perforación, 70.08 [h] y 74.64 [h], para cada herramienta respectivamente, debido a que el tiempo de perforación para motor aumente por el deslizamiento, teniendo un total de 19.63 [h] deslizadas, siendo el 30% del tiempo total. Mientras que en el sistema RSS se cambiaron los comandos de mantener y construir ángulo, con un 35% y 65% respectivamente, pero manteniendo la velocidad, sin tiempo adicional.
	RSS	-	10.25	

2 (12¼")	Motor	4.34	4.32	De igual manera, se tienen valores de ROP menores para el caso de Motor. Siendo los pozos LSC-X5D (Motor) y el LSC-9D (RSS) de análisis, teniendo un ROP neto de 4.32 [m/h] para el primer caso, y 7.38 [m/h] para el segundo. En el caso de perforación de RSS, a pesar de tener varios conatos de pega, especialmente en San Telmo, el tiempo de perforación y ROP superan al motor.
	RSS	6.37	7.38	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

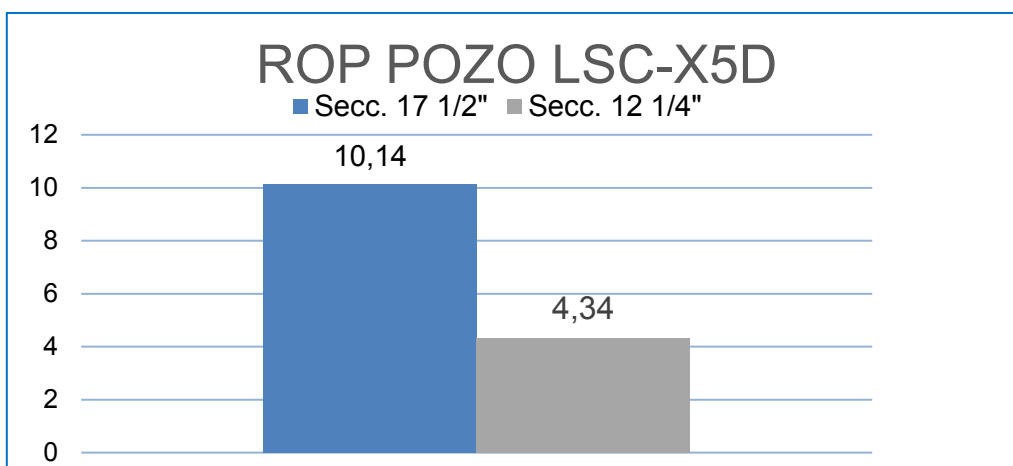
Teniendo en cuenta que los pozos analizados en la sección de 17 ½" fueron perforados con Motor de Fondo y considerando la profundidad, se tienen valores similares, teniendo un incremento considerable de ROP promedio y neto en el pozo LSC-X5D

Mientras que para la sección de 12 ¼" la perforación con Power Drive, que son los últimos perforados, LSC-9D presentan un ROP (Promedio y Neto), mucho mayor que los perforados con Motor de fondo.

Con el análisis del pozo LSC-9D, que fue analizado con ambas herramientas, y al tener las mismas características de perforación (profundidad, topes, litología, riesgos, etc.), se compara resultando en un ROP (Neto y Promedio), considerablemente mayor para el caso del manejo del RSS, teniendo una optimización en tiempo, teniendo en la sección de 17 ½ " un total de 70.08 para el caso del motor, y de 74.64 horas para el sistema RSS (Tabla 16 y 17); y para la sección de 12 1/4", se tienen tiempos de 450 para motor y 293.52 horas para el sistema RSS (Tabla 16 y 17).

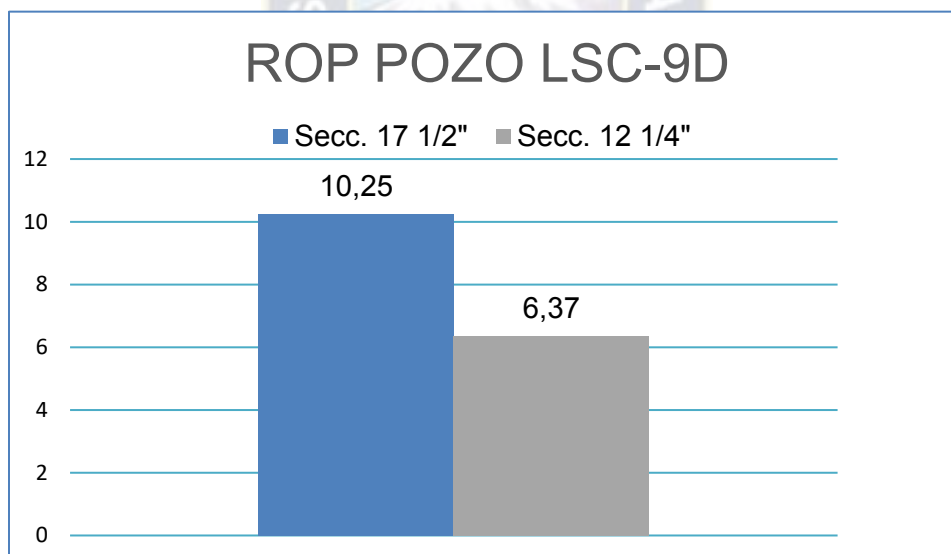
4.4.2. ROP para pozo LSC-X5D

Gráfico 1. ROP con motor de fondo para LSC-X5D (m/h)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

Gráfico 2. ROP con RSS para LSC-9D (m/h)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

4.5. Resultado RPM, Tiempo y profundidad (Intervalo) de perforación

Para la sección de 12 1/4" al realizar la comparación entre los dos pozos se vio que se hubo incremento del ROP en el pozo LSC-9D. La presencia de la herramienta

power drive dentro del diseño del BHA presenta valores dentro del promedio, valores que se ajustan a los valores de trabajo de las herramientas.

Para esta sección de análisis se nota un mayor tiempo de perforación al trabajar con motor de fondo los cambios son considerables para la comparación. Se tuvo una menor profundidad perforada en el caso de motor de fondo, pero fue considerado ya que se atravesó las mismas formaciones litológicas.

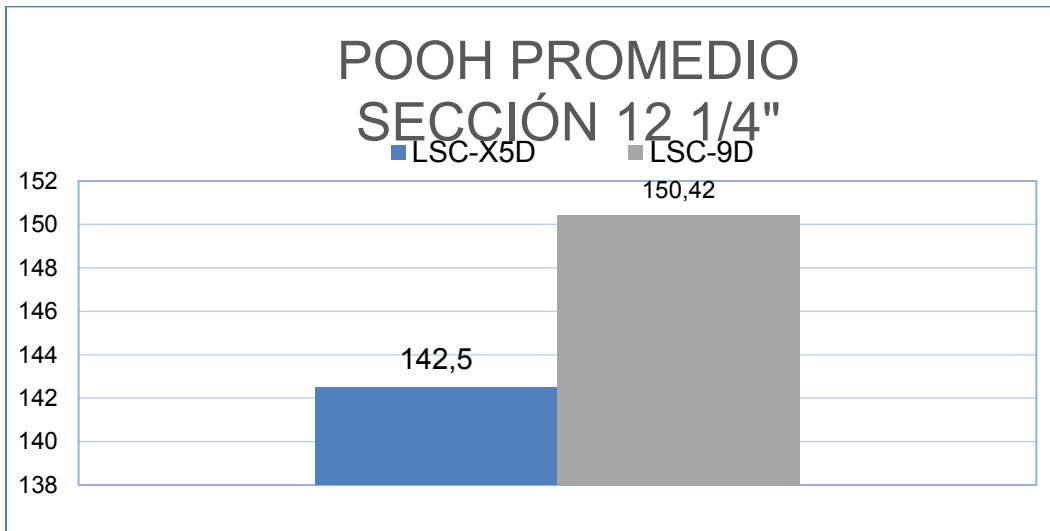
Al analizar la sección de 12¼", se comparan los pozos LSC-X5D (1944 m) con motor, y el pozo LSC-9D (2166 m) con RSS, la diferencia en el tiempo de perforación también es notable, teniendo para el caso del motor un total de 450 horas, y para el RSS 293,52 horas de perforación, con una diferencia de casi 150 horas.

4.6. Velocidad de RIH-POOH (Corrida de tubería, sacada de tubería), para tubería de perforación (DP) (POOH) y Casing (RIH)

4.6.1. POOH promedio para tubería de perforación (DP)

El POOH hace referencia a la velocidad de salida de tubería, en este caso de tubería de perforación. Como resultado se observa en el gráfico 3 un valor mucho mayor para el motor de fondo en este caso, es decir que fue más fácil sacar la tubería de perforación y BHA hacia superficie, invirtiendo menor tiempo en los pozos con motor de fondo, y teniendo más restricciones al momento de sacar la tubería con el sistema RSS, debido a la configuración del hoyo.

Gráfico 3. POOH Promedio Sección 12 1/4" (m/h)

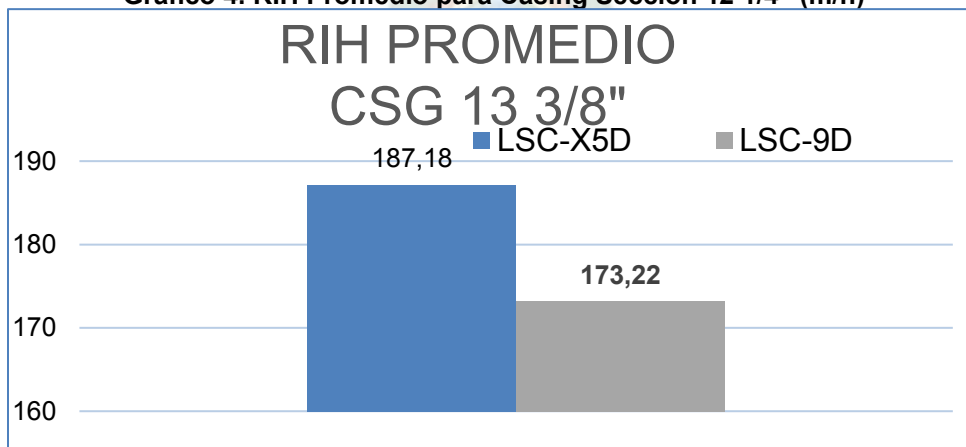


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

4.6.2. RIH Promedio para tubería de revestimiento (CGS)

De manera opuesta al caso de la tubería de revestimiento, se tiene un valor considerablemente mayor para el caso del motor de fondo, que relacionándolo con los resultados de POOH, y el análisis de reportes diarios se da una velocidad menor en el caso del RSS debido a la configuración del hoyo, y los constantes riesgos de empaquetamiento y pega durante la sacada de tubería; y la presencia constante de puntos de apoyo y restricciones al momento de bajar la tubería de revestimiento.

Gráfico 4. RIH Promedio para Casing Sección 12 1/4" (m/h)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

4.7. Resultados de torque y arrastre obtenidos al analizar la perforación del Pozo LSC-X5D

En la tabla 16 se tienen los valores del torque necesario para rotar a 2703 m (punto de Casing de 13 3/8”), y en los casos extremos cuando se necesite hacer back reaming. También, se pueden observar en el anexo 10 los respectivos torques para hoyo abierto y entubado.

Además, se observa el torque que se tendría al correr la tubería en hoyo abierto, y se observa que, al aumentar la profundidad, a su vez incrementa el torque, y que este se halla muy por debajo del límite.

Tabla 16. Torque desde superficie motor-12 ¼”

Escenario	Máximo torque en Superficie 1000 /lbf-ft]
Perforación rotando @ 2703	15,0
Deslizando	-
Backreaming	16,5

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

Como se observa para la sección de 12 ¼” se necesita más torque para rotar la tubería, así como el torque para Backreaming aumenta significativamente. Lo que de igual manera se puede observar en el anexo 11.

De acuerdo a la tabla 17 y a los anexos 12 y 13 se observan los valores de torque necesario para rotación en punto de casing, que varía ligeramente con respecto al caso del motor, obteniendo curvas muy similares.

Tabla 17. Torque desde superficie RSS-12 ¼”

Escenario	Máximo torque en Superficie 1000 /bf-ft]
Perforación rotando @ 2966	12,6
Deslizando	-
Backreaming	16,25

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

Concluyendo que el torque es muy similar para ambas herramientas, dependiendo fundamentalmente de la formación y sus características.

4.8. Análisis de resultados obtenidos

4.8.1. Análisis de las velocidades de perforación (ROP) obtenidos

Como se puede observar en la primera parte de los resultados, de manera técnica y de acuerdo a la perforación y limpieza del hoyo el sistema RSS sí ha tenido una optimización con respecto a ROP [m/h] y limpieza del agujero; todo esto resumido en una reducción considerable de tiempo neto de perforación para cada intervalo.

En el caso del motor de fondo el tiempo aumenta debido al mecanismo de perforación denominado “deslizamiento o slide”, en el cual la velocidad de perforación disminuye, cumpliendo con el objetivo principal de construir ángulo. Y muy a pesar de su eficiencia en construcción de ángulo; ya que cumple de manera satisfactoria con el plan direccional; se aumenta el riesgo de pega de tubería, además de reducir la eficiencia de perforación en cuanto a velocidad y limpieza del hoyo.

Y de igual manera, al momento de realizar las curvas de tiempos, que junto con el análisis de la perforación de los pozos reales se logró ver la diferencia entre ambos ROP, teniendo valores considerablemente favorables para el caso del RSS, ya que para el caso del Motor se consideró los “slides”, correcciones de trayectoria y todas las medidas de contingencia para los riesgos presentes en ambos casos, como son la presencia de arcilla reactiva en ciertos tramos superficiales, y en el tope de San Telmo, lo que obliga a optimizar ciertos parámetros como el caudal.

4.8.2. Análisis de viajes de sacada e introducir la tubería de perforación

En esta optimización del sistema RSS se tiene una necesidad marcada de incrementar los viajes de calibración, para la sección de 12 1/4” principalmente, esto se analizó durante el diseño de la curva del tiempo, debido a que se tiene un límite para el tiempo de perforación y rotación de tubería, siendo recomendado un tiempo de hasta 20-30 horas continuas para lo cual se requiere un viaje de calibración.

Cabe mencionar el caso de sacada de tubería, que tuvo valores mucho más favorables para el caso del motor de fondo, debido a la configuración del hoyo; en el caso del RSS la configuración del hoyo tiende a tener alta tortuosidad y menor calibre debido a la rotación continua, lo que incrementa la probabilidad de tener puntos de apoyo y puntos apretados que dificulten la sacada de tubería, pudiendo llegar a atascamientos o incluso empaquetamiento o pega geométrica, y para contrarrestar dichos fenómenos se usa la circulación o Back Reaming. Y en este mismo aspecto la herramienta RSS se vuelve más vulnerable de daños al momento de tener más contacto con las paredes del hoyo al salir.

De igual manera la velocidad de corrida de Tubería de revestimiento fue un factor favorable para el caso del Motor de Fondo, debido de igual manera a la configuración del hoyo y tortuosidad. Dicha tortuosidad en el caso del sistema RSS se produce debido a que los pads no siempre golpean en la dirección requerida, causando la creación de cavernas o espirales, además que el agujero tiene casi el mismo diámetro de la broca, lo que en principio parece beneficioso hasta que se tienen problemas en sacada de tubería y corrida de casing.

Muy a pesar de los beneficios de la rotación en cuanto a limpieza de hoyo y reducción de pega, en los casos reales estudiados, al trabajar con sistema RSS se observaron casos marcados de riesgos recurrentes y conatos de pega, como es el caso del pozo LSC-9D.

Análisis del manejo de desviación por el powerdrive y el motor de fondo

Otro aspecto de discusión, es el manejo del DLS para cumplir con el plan direccional, como se dijo previamente, ambas herramientas cumplen con los requerimientos direccionales de manera óptima, sin embargo se tiene un punto a favor del Motor de fondo, debido a su versatilidad al momento de aumentar o disminuir ángulo de manera drástica, ya sea para construcción, para corregir la trayectoria para evitar colisión, o para contrarrestar la pérdida o incremento de ángulo natural de las formaciones, ya que el Motor no tiene un mayor desgaste al

cambiar dicha inclinación; mientras que el RSS en situaciones severas requiere trabajar al máximo, llegando a forzar demasiado a la herramienta.

4.8.3. Análisis de la hidráulica de cada pozo

En cuanto al caudal y otros parámetros de perforación el beneficio es en el caso del sistema RSS, debido a que tiene una gran versatilidad con el manejo de RSS en cuanto a GPM y RPM, ya que para el caso del caudal debido a la rotación continua y altos RPM dados desde superficie no se requiere reducirlo, incluso en arenas no consolidadas, optimizando la limpieza. Y en el caso de los RPM o velocidad de rotación se trabaja en el caso del Motor de Fondo de acuerdo a las limitaciones de la herramienta de mano con el caudal; mientras que para el sistema RSS se lo maneja de acuerdo a las limitaciones del taladro (específicamente del Top Drive), más no de la herramienta.

Otro parámetro que cabe mencionar es el beneficio que brinda el sistema RSS con respecto al hidráulica, debido a la interacción de las altas RPM con la formación, y junto con la rotación continua, se crean un medio turbulento en torno al fluido transportador de los cortes, evitando así que dichos sólidos queden adheridos, formando camas de recortes aumentando el riesgo de empaquetamiento. Al manejar altos caudales se mejora el ROP en zona de arcilla y arenas no consolidadas, además de mejorar mucho la limpieza en zonas de arcillas reactivas, reduciendo riesgos de pega, es decir tiene un impacto positivo en el HSI. En lo que concierne a plan direccional, ambas herramientas cumplen con los objetivos requeridos, como se puede observar en los anexos.

4.9. Aspectos de medio ambiente y seguridad industrial

Para cada caso existen Normas internacionales a tomar en cuenta así como también Normas que se exigen en el país.

4.9.1. Aspectos de medio ambiente

Tomando en cuenta la norma internacional ISO 14001 en su punto A.8.2 de preparación y respuesta ante emergencias, indica que:

Es responsabilidad de cada organización estar preparada para responder a situaciones de emergencia de una manera apropiada a sus necesidades particulares. Para información sobre la determinación de situaciones de emergencia, véase el capítulo A.6.1.1.

Cuando se planifica el proceso de preparación y respuesta ante emergencias, la organización debería considerar:

- a) El método más apropiado para responder a una situación de emergencia;
- b) Los procesos de comunicación interna y externa;
- c) Las acciones requeridas para prevenir o mitigar los impactos ambientales;
- d) Las acciones de mitigación y respuesta a tomar para diferentes tipos de situaciones de emergencia;
- e) La necesidad de evaluación postemergencia, para determinar e implementar acciones correctivas;
- f) La prueba periódica de las acciones planificadas de respuesta ante emergencias;
- g) La formación de las personas de respuesta ante emergencias;
- h) Una lista de las personas clave y de los servicios de emergencia, incluidos los detalles de contacto (por ejemplo, departamento de bomberos, servicios de limpieza de derrames).
- i) Las rutas de evacuación y puntos de encuentro;
- j) La posibilidad de asistencia mutua por parte de organizaciones vecinas.

4.9.2. Aspectos de seguridad industrial

Para mantener un control y precautelar la integridad de los activos fijos y el personal de trabajo es necesario contar con un “Plan de contingencias” el cual tendrá en

contenido todos los procedimientos que el personal deberá tener en cuenta si ocurre algún tipo de problema o contingencia.

El personal debe contar con las siguientes consideraciones:

- Se cuenta con inducciones y capacitaciones.
- Todo el personal debe contar con el EPP adecuado.
- Se deben realizar como mínimo dos simulacros al año.
- Se deben cumplir con los requerimientos que exigen las leyes del país.

El área de seguridad industrial trabajará bajo la norma internacional vigente ISO 45001 la cual brinda las directrices necesarias para gestionar el control de los procesos que se llevan a cabo en planta.

Para tal efecto se deberá construir una matriz IPER (Identificación de peligros y evaluación de riesgos) de este modo disminuir la probabilidad de lesiones y en el peor de los casos muerte.

Todos los sucesos pequeños o de magnitud deberán ser debidamente documentados y evaluados para poder manejar efectivamente su incidencia y nivel de significancia.

CAPITULO V
EVALUACIÓN ECONÓMICA

5.1. Análisis de costos

5.1.1. Análisis de costos para cada herramienta

Como primera consideración para el análisis de los costos del pozo LSC-9D se diseñó la curva de Profundidad Vs Tiempo, en el cual se puede analizar el tiempo total que se demorará en la perforación de cada sección de dicho pozo, de acuerdo al uso de cada herramienta

De este modo se tienen los siguientes tiempos para cada una de las secciones:

Tabla 18. Tiempo de perforación en la sección 12 ¼”

Herramienta	Tiempo Sección 12¼”	
	[h]	[d]
Motor	450	18,75
RSS	293,52	12,23

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

Para la sección de 8 ½” se tiene un total de 245,04 horas [10,21 días], y se considera el mismo para ambos casos al no haber analizado la perforación de dicha sección.

A la par para el análisis de costos de los pozos perforados y sus parámetros, se debe clasificar los pozos de acuerdo a su estado mecánico, teniendo:

5.2. Costo métrico total de la perforación con Power Drive

Intervalo de perforación----- (800– 2966) m.
 Longitud tramo perforado-----2166 m
 Tiempo de rotación total-----293,52 hrs.
 Tiempo de maniobras-----14,4 hrs.(1 viaje).
 Costo horario alquiler equipo de perforación+ servicios-----2500 \$us/Hra.

Costo horario del Power drive-----	325.69 \$us/Hra.
Cargo horario direccional (D)-----	20 \$us/Hra.
Costo trepano (Ctrep., 1 trepano) -----	15000 \$us.

$$COSTO METRICO (CM) = \frac{Cep(Tr - Tm) + Ctrep + (C.POWER DRIVE + D)Tr}{TRAMO PERFORADO}$$

$$COSTO METRICO (CM) = \frac{2500(293,52 - 14,4) + 15000 + (325,69 + 20)293,52}{2166}$$

$$COSTO METRICO (CM) = 375,93 \$us/m$$

Costo de la sección de 12 ¼” perforada para 2166 m

$$COSTO METRICO Total = 814.264,38 \$us$$

Como se puede observar el costo métrico del equipo con RSS usado en la sección de 12 ¼” en estudio se obtiene un total de 814 264,38 \$us

5.3. Costo métrico total con motor de fondo

Intervalo de perforación-----	(759-2703) m.
Longitud tramo perforado-----	1944 m
Tiempo de rotación total-----	450 hrs.
Tiempo de maniobras-----	13,64 hrs.(1 viaje).
Costo horario alquiler equipo de perforación+ servicios-----	1700 \$us/Hra.
Costo horario del motor de fondo-----	350.46 \$us/Hra.
Cargo horario direccional (D)-----	20 \$us/Hra.
Costo trepano (Ctrep., 1 trepano) -----	20000 \$us.

$$COSTO METRICO (CM) = \frac{Cep(Tr - Tm) + Ctrep + (C.POWER DRIVE + D)Tr}{TRAMO PERFORADO}$$

$$COSTO METRICO (CM) = \frac{1700(450 - 13,64) + 20000 + (350,46 + 20)450}{1944}$$

$$COSTO METRICO (CM) = 477,63 \$us/m$$

Costo de la sección de 12 ¼” perforada para 1944 m

$$COSTO METRICO Total = 928.512,72 \$us$$

Como se puede observar el costo métrico del equipo con Motor de fondo usado en la sección de 12 ¼” en estudio se obtiene un total de 958 512,72 \$us

De esta manera se realizó el cálculo del costo para el servicio direccional, puramente con la información de costos de la empresa encargada de dar el servicio, obteniendo los siguientes resultados, tanto para el pozo diseñado como para los pozos perforados con su respectivo estado mecánico:

Tabla 19. Análisis de costos

SERVICIO DIRECCIONAL	COSTO METRICO	COSTO TOTAL	PORCENTAJE DE DIFERENCIA
SISTEMA RSS	375,00 \$US/m	814.264,38 \$	14,3%
MOTOR DE FONDO	477,63 \$us/m	928.512,72 \$	12,52%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

La tabla 19 muestra los costos promedios para cada estado mecánico, para cada herramienta, así como la diferencia y el porcentaje de gasto comparando las herramientas.

Como se puede observar el Servicio Direccional tiene una tarifa diaria, y al analizar ambos casos se tiene una diferencia de \$114 248,34 de gasto extra con el sistema de Motor de fondo, siendo un 12,30% de gasto adicional. Mientras que para el sistema RSS se tiene un ahorro del 14,03% en comparación y respecto a su costo total.

5.3.1. Flujo de caja

A continuación, se realizó la evaluación económica del proyecto mediante la realización de un flujo de caja, el cual muestra el estado de ingresos y egresos del proyecto, así como también si el proyecto es capaz de generar los ingresos necesarios para que sea rentable.

Se utilizarán los denominados indicadores económicos, los cuales miden la factibilidad y rentabilidad de un determinado proyecto, estos indicadores son: VAN (Valor Actual Neto) que es la sumatoria de los beneficios actualizados de un proyecto a una tasa de actualización determinada, y el TIR (Tasa Interna de Retorno) el cual se define como la tasa de rendimiento financiero del proyecto. El TIR es aquella tasa de actualización que aplicado al flujo neto hace que el Van sea cero.

Para este efecto se realizó el análisis para 5 Años,

Tabla 20. Flujo de caja

Año	Producción diaria [MPCD]	Ingreso [dólares] = \$2.59/MPC*365*Prod. día	Costo de perforación	Costo de producción	costos operativos = 12,6341%*Ingreso	Egresos totales al mes	Flujo de caja Neto
0	0	0	6570189	1968475	0	-8538664	-8538664
1	6000	5672100	0	0	-716618,7861	4955481,21	-3583182,79
2	7000	6617450			-836055,2505	5781394,75	2198211,96
3	7000	6617450			-836055,2505	5781394,75	7979606,71
4	7000	6617450			-836055,2505	5781394,75	13761001,5
5	7000	6617450			-836055,2505	5781394,75	19542396,2

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de YPFB – ANDINA, 2016

5.3.1.1. Valor Actual Neto (VAN)

También llamado Valor Presente Neto (VPN), Valor Neto Descontado (VND), Beneficio Neto Actual (BNA) y en varias calculadoras financieras como Net Present Value (NPV), se calcula como:

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t}$$

Dónde:

$-I$ = Inversión inicia

F_t = Flujo de caja en el instante

n = Ultimo flujo de caja

r = Costo de oportunidad del capital

$$VAN = -8538664 + \frac{-3583182,79}{1 + 0,13} + \frac{2198211,96}{(1 + 0,13)^2} + \frac{7979606,71}{(1 + 0,13)^3} + \frac{13761001,5}{(1 + 0,13)^4} + \frac{19542396,2}{(1 + 0,13)^5}$$

$$VAN = 14'588.877,54 \$$$

El VAN mide la riqueza equivalente que aporta el proyecto medido en dinero del período inicial ($t=0$), calculando el valor presente de los flujos futuros de caja proyectados para el negocio. Por tanto, para el proyecto permite determinar si el flujo proyectado a 5 años es rentable.

El resultado del VAN para el proyecto considerando los flujos de efectivo a 5 años, proporciona un valor de **\$ 14'588.877,54** indicando que la implementación del Proyecto es factible.

5.3.1.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno de un proyecto mide la rentabilidad promedio anual que genera el capital que permanece invertido en él, esta tasa iguala el valor presente de los flujos (VAN) a cero.

Si la TIR es mayor que el coste de oportunidad del capital, entonces el capital del proyecto evaluado genera una rentabilidad mayor que la que puede ser generada por la mejor alternativa de inversión. En ese caso es recomendable apostar por el proyecto.

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = 0$$

$$-8538664 + \frac{-3583182,79}{1 + TIR} + \frac{2198211,96}{(1 + TIR)^2} + \frac{7979606,71}{(1 + TIR)^3} + \frac{13761001,5}{(1 + TIR)^4} + \frac{19542396,2}{(1 + TIR)^5} = 0$$

Resolviendo la ecuación, para el Proyecto el valor de la **TIR es de 40,5%** lo que implica que es rentable

VAN	14'588.877,54 \$
TIR	40,5 %

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- ✓ Se puede concluir que la perforación direccional con el sistema RSS se desempeñó de mejor manera en la optimización del ROP y limpieza del hoyo principalmente. Los inconvenientes se pudieron observar en la sacada de la sarta de perforación donde se pudieron observar puntos de apoyo y aprisionamiento por la configuración del hoyo en el caso del pozo LSC-9D.
- ✓ Para la perforación de un pozo y establecer las características y propiedades del de la perforación con Motor de fondo y Sistema de Rotación Continua se utilizan diferentes tipos de BHA, los cuales deben ser diseñados para cumplir con diferentes funciones variables durante el proceso, de acuerdo a los diseños mecánicos analizados se tiene: Para la sección de 17 1/2", mantener la verticalidad; para luego iniciar la construcción del ángulo controlando que se ajuste al plan, mientras se brinda un ROP óptimo y buena limpieza del hoyo. Para la sección de 12 1/4" se sigue construyendo ángulo, y se llega a la tangente, para lo cual la herramienta debe tener una buena respuesta direccional, continuando con buen ROP y limpieza. Mientras se realiza esto, controlar a la vez los parámetros, de acuerdo a la litología de cada formación.
- ✓ Cada formación tiene diferentes características y respuestas para cada pozo, de esta manera se observó la presencia de carbón, limolita, o arcilla reactiva como ejemplo, que dificultan la perforación reduciendo o incrementando el ángulo de inclinación; o a su vez comprometiendo la limpieza del hoyo, por lo que se debe tener medidas de contingencia para solventar dichas situaciones.
- ✓ En cuanto a la comparación de ambas herramientas, ambas tienen una serie de ventajas y desventajas al momento de la perforación, sin embargo, al analizar la respuesta direccional las dos herramientas tienen una excelente respuesta y resultado, al compararlo con el programa de perforación.

- ✓ En ambos casos se tiene una serie de riesgos inherentes en la perforación y es necesario establecer la eficiencia de ambos sistemas, para lo cual cada herramienta tiene diferentes respuestas, como es el caso del GPM y RPM, lo cual es de mayor beneficio en el caso del RSS, optimizando la perforación.
- ✓ Se ha tenido una mejora significativa en el tema de tiempos y costos, que se ven marcadas en el análisis de resultados, y los resultados han sobrepasado las expectativas.
- ✓ El diseño propuesto muestra el estudio en sí de la aplicación del sistema RSS de ambas secciones, a pesar que en la perforación de pozos se tiene la aplicación de BHA convencionales; mostrando optimización de tiempo y costos.
- ✓ En el diseño de las curvas de tiempo se pudo analizar la diferencia en el manejo de tiempo para cada sección, teniendo que aplicar medidas de contingencia para los diferentes riesgos que se pudieran presentar. De esta manera para el Motor de fondo se tienen menores ROP, mayores tiempos; para el sistema RSS se tiene la necesidad de mayor número de viajes de calibración, mayor ROP, mayor GPM, principalmente.
- ✓ La velocidad de rotación (RPM) se halla en función de las limitaciones o funcionamiento de cada herramienta, estando para el motor en función del diseño de dicha herramienta, y para RSS de acuerdo a la capacidad del taladro.
- ✓ En ciertos parámetros como GPM, RPM y ROP, el sistema RSS presentó un resultado satisfactorio, ya que al realizar la caracterización de ambas herramientas para igualar la capacidad del RSS, el motor debía funcionar a su más alta capacidad de GPM, para así aumentar RPM y limpieza.
- ✓ Al tener una optimización de tiempos de perforación y por ende de terminación del pozo, se tendrá una producción temprana, teniendo a su vez ganancias adelantadas al plan; pudiendo recuperar y ganar las inversiones.
- ✓ Durante el transcurso de la perforación, aumenta progresivamente el índice de dificultad de la perforación (DDI), por lo cual es necesario tener en

cuenta planes de contingencia y diseños nuevos de BHA para contrarrestar dicho aspecto.

- ✓ Los costos que se tomaron en cuenta para el análisis comparativo fueron los costos diarios por metros de perforación de la sección de 12 ¼" siendo es el tramo de estudio, diseños no tan exactos, debido a que se tuvo información generalizada, sin tomar en cuenta los costos de toda la sarta de perforación, sin embargo, con respecto al costo métrico total de las herramientas se tuvo una diferencia de \$114.248,34.
- ✓ Se realizó un estudio técnico económico donde se obtienen los datos a partir datos financieros y de producción anuales, resultando el VAN = \$ 14'588.877,54 y la TIR = 40,5 % resultados que indican que el proyecto es factible y rentable.
- ✓ Es así que al haber analizado tanto técnicamente y a nivel de costos se concluye que el Sistema RSS ha cumplido con las expectativas en tanto a eficiencia de perforación, reducción de riesgos, tiempos, costos y problemas operacionales con respecto al motor de fondo, a pesar de ciertas desventajas observadas y analizadas, que seguramente con el perfeccionamiento de las operaciones se tendrá un avance mucho mejor, con resultados excelentes para el desarrollo de pozos petroleros en el país.

6.2. Recomendaciones

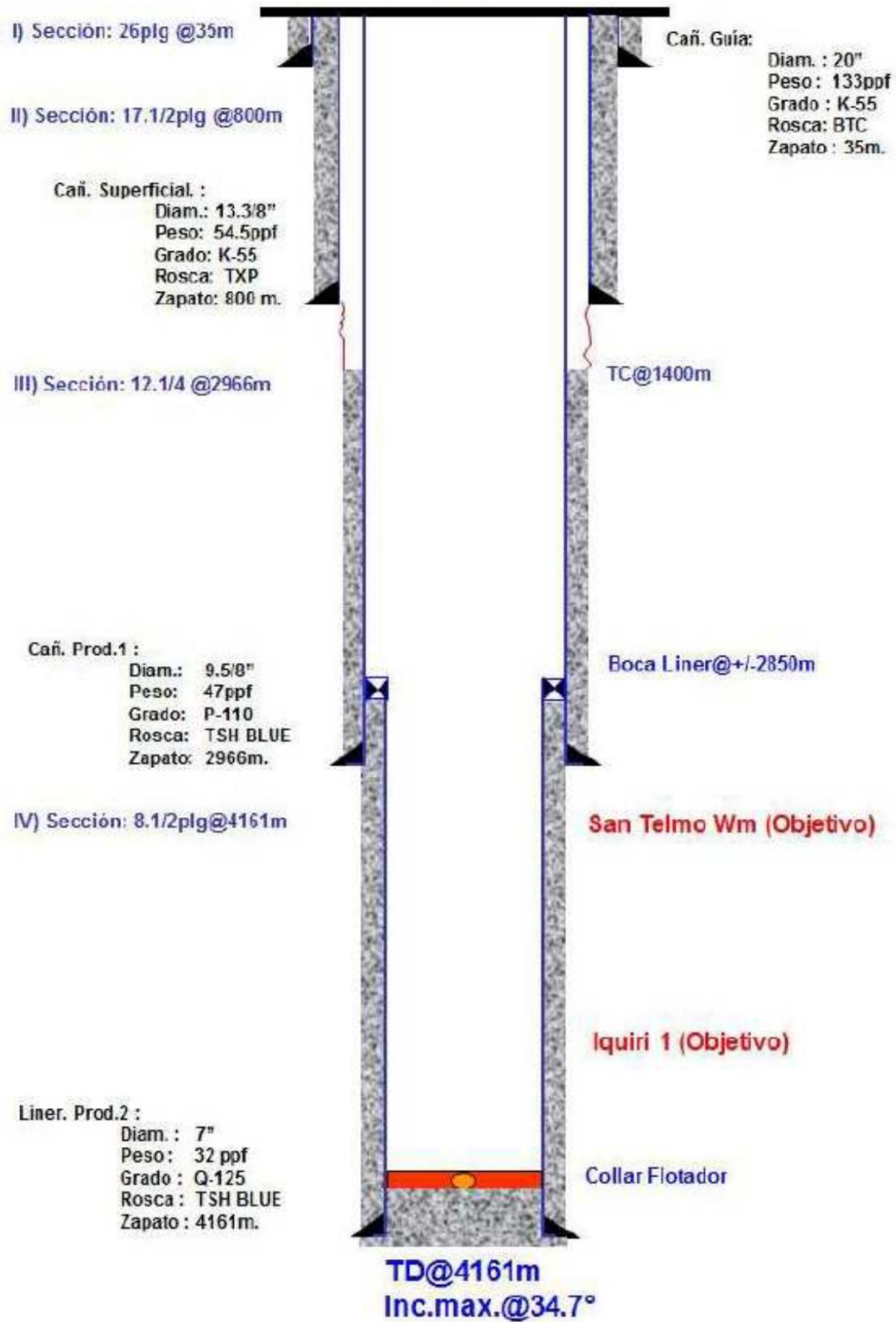
- ✓ A pesar de los buenos resultados técnicos y económicos de los sistemas RSS, no se deja de lado el uso de Motores de Fondo por su versatilidad y sus ventajas direccionales, y en general operacionales, los cuales con buenas maniobras y parámetros dan un resultado confiable y eficiente.
- ✓ Ambos sistemas son confiables y recomendables en la aplicación de la perforación, así como el manejo de riesgos e inconvenientes operacionales, estando de acuerdo al criterio de los operadores encargados de los programas de perforación.
- ✓ Sin embargo, la aplicación del sistema RSS es recomendada para pozos de alta inclinación, debido a los buenos resultados; además el uso de dicha herramienta en todas las secciones optimizaría el tiempo y resultados de una manera significativa.
- ✓ Tener en cuenta las potencialidades de cada herramienta para el diseño, así como los requerimientos y exigencias estatales, con el fin de obtener las ventajas y resultados esperados.
- ✓ No poner en riesgo las operaciones, las herramientas o al personal con el fin de obtener un menor tiempo en la operación, la confiabilidad de los resultados y su eficiencia, representa muchas veces mayor tiempo y costo.
- ✓ Incluir un análisis de riesgos en el programa de perforación, determinando la probabilidad y severidad de ocurrencia de ciertos eventos que pudieran ocurrir, para tomar decisiones y acciones frente para solventarlos.
- ✓ Analizar estudios de factibilidad para cada pozo, de acuerdo a sus características propias; y tomar en consideración el ángulo de inclinación al que se desea llegar.

BIBLIOGRAFÍA

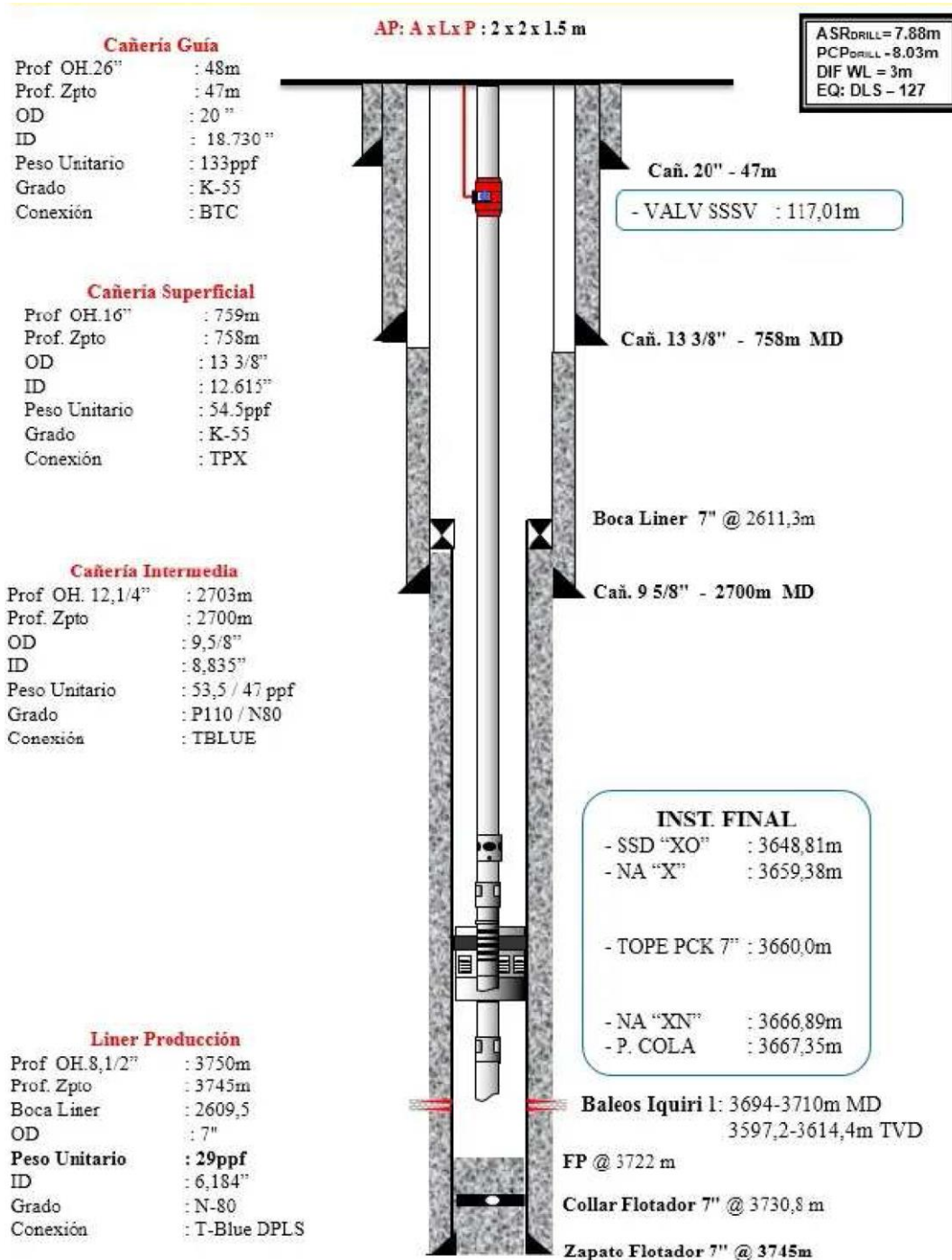
- Pemex, Diseño de la perforación de pozos; servicios de perforación y workover.
- Bourgoyne A., Millheim K., Chenevert M., Young F., Applied Drillin, 1991
- Engineering SPE Book, Texas, USA.
- Schlumberger, Oilfield review - Nuevas Tecnologías Power drive, 2004.
- YPFB Andina, Informe anual, 2016
- Montaña, G., Aplicación de la tecnología con power drive en la perforación del pozo SBL-8 del campo sábalo, 2015.
- Rivera, P., Diseño de sarta de perforación pozo mecapetec 118, 2015.
- Salazar, O., *Perforación Direccional*. Instituto Politécnico Nacional. México D.F., 2011.
- Santos, O., *Estudio de los problemas operacionales durante la perforación de los pozos direccionales en la plataforma "Drago Norte 2"*, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2015.
- Schlumberger, "Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional", 2000
- Schlumberger, "Perforación en el modo deslizamiento con torsión", 2016.
- Hernández C. Fabio D., Aplicación de la teoría de perforación direccional, México, 2018.
- Trujillo P. Diana I. Estudio de factibilidad para la implementación de pozos tipo Slim Hole en el activo Shushufindi, Quito, 2015.
- Arévalos F. Diego V., Optimización de la perforación direccional y horizontal en el campo auca sur, Ecuador 2010.

ANEXOS

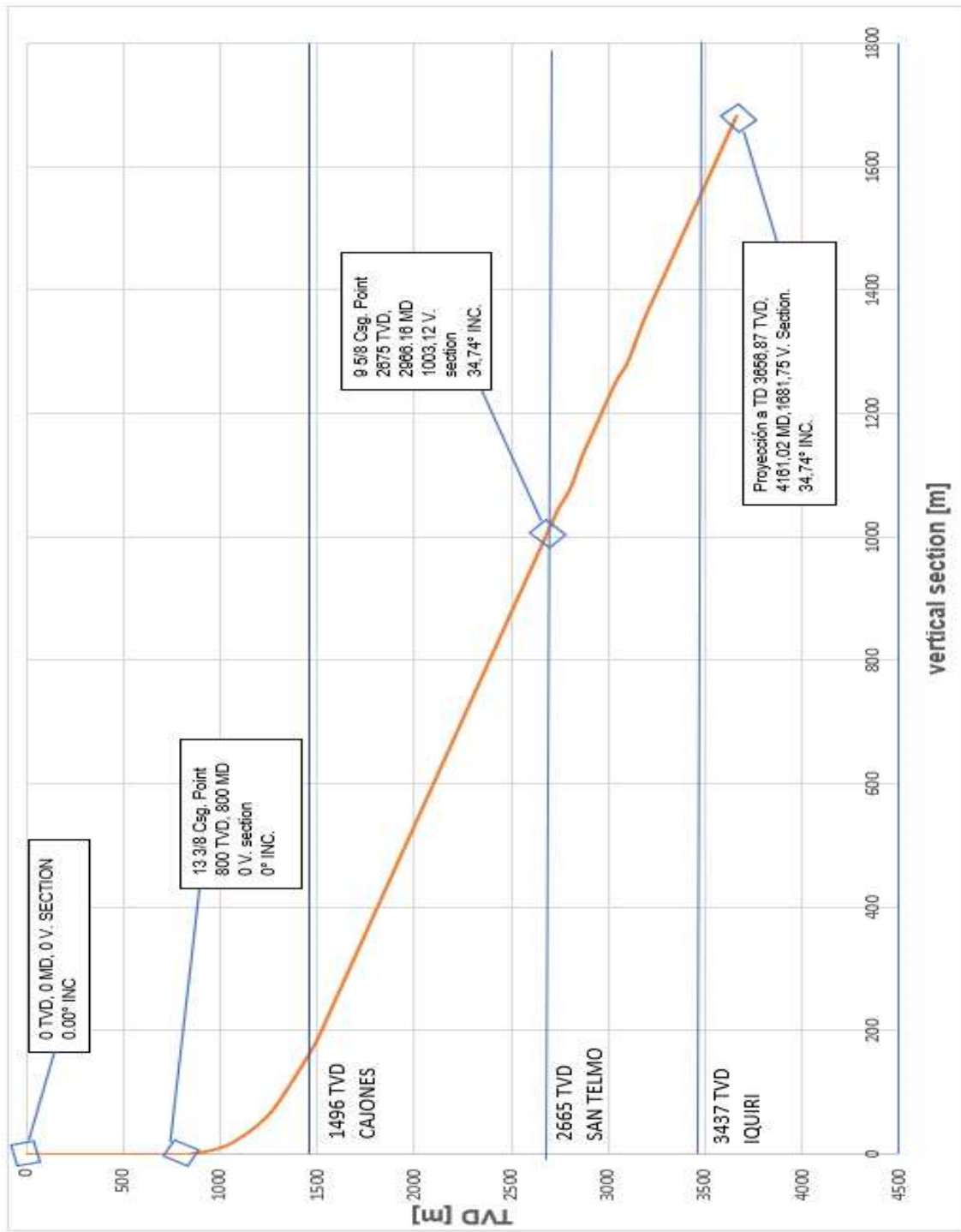
Anexo 1.A. Tramos y profundidades perforadas del pozo LSC-9D



Anexo 2.B. Tramos y profundidades perforadas del pozo LSC-X5D

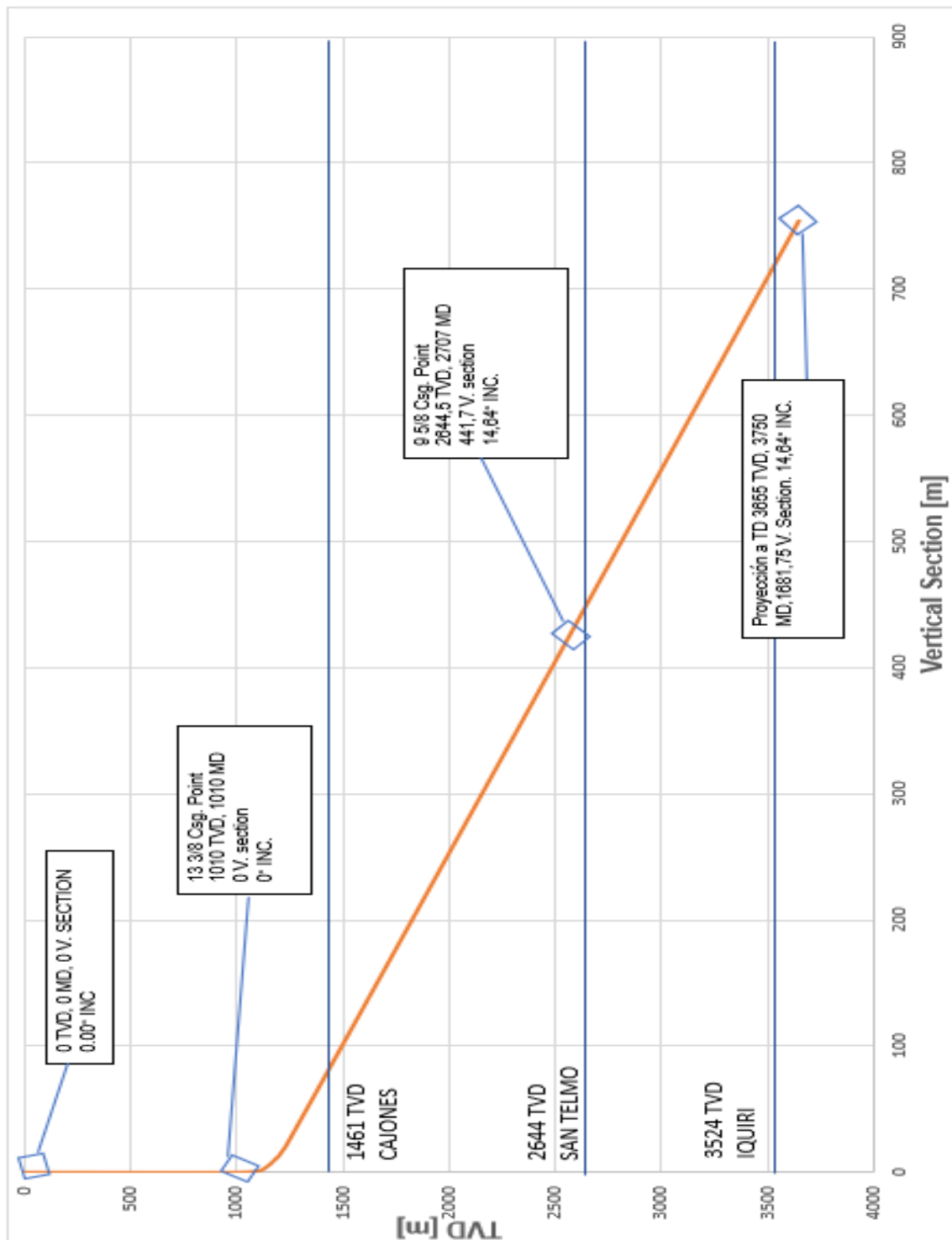


Anexo 3.A. Esquema TVD (Profundidad Vertical Verdadera) Vs Sección vertical del pozo LSC-9D



Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 4.B. Esquema TVD (Profundidad Vertical Verdadera) Vs Sección vertical del pozo LSC-X5D



Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 5. Fluidos por sección

INTERVALOS		1	2	3	4
Definición	Unidad				
Diámetro Agujero	Pulg	26	17 1/2	12 1/4	8 1/2
Final Sección	m	35	800	2966	4161
Longitud Perforada	m	35	765	2166	1195
Diámetro Cañería/Liner	Pulg	20	13 3/8	9 5/8	7
Factor Lavado	%	20	20	15	15
Max. Desviación	°	0	0	35	35
Max. BHST	°F	100	110	176	210
Días Actividad	Días	0.94	3.11	12.23	10.21
Total Días	Días	2.12	5.82	18.32	19.25
PROGRAMA DE FLUIDOS					
Sistema		Bentonítico Extendido	Bentonítico Extendido	BARADRIL-N	BARADRIL-N
Volumen a Preparar	bbl	1100	1500	3600	2500
PROPIEDADES RECOMENDADAS					
Densidad	ppg	8.7-9.0	9.0-9.2	9.1-9.4	9.3-9.8
Viscosidad Embudo	Seg/qt	45-70	45-75	50-70	50-75
VP	cP	15-30	20-40	15-25	20-35
PC	lb/100ft ²	20-35	20-40	25-40	20-30
Lect. (R6/R3)		12-22/10-20	12-22/10-20	10-16/8-14	10-16/8-14
Filtrado API/HPHT	cc/30 min	<15/NA	<15/NA	<4.5/<12	<4/<12
Inhibidor/Lubricante	ppb	NA	-/3	>4/4	5/4
MBT	ppb	<20	<20	<8	<5
Sólidos de Perforación	%	<3	<3.5	<4	<4
pH		10-11	10-11	9-10	9-10

Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 6. ROP Planeado-Motor de fondo

FORMACION	TOPE	metros PERFORADO	TIEMPO [h]	ROP [m/h]
Yecua-Petaca	1017,05	463,47	114,37	4,05
Cajones	1480,52	347,18	80,23	4,33
Yanata	1827,70	226,37	51,8	4,37
Ichoa	2054,07	233,24	40,6	5,5
Elvira	2287,31	419,95	100,1	4,2
San Telmo	2707,26	224,34	62,9	3,6
Escarpment	2931,60	686,81	-	-
Iquiri	3618,41	131,59	-	-

Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 7. ROP Planeado-RSS

FORMACIÓN	TOPE	metros PERFORADOS	TIEMPO [h]	ROP [m/h]
Yecua-Petaca	1092	404	73,7	5,48
Cajones	1496	336	48,02	7,0
Yanata-Ichoa	1832	575	85,6	6,7
Elvira	2407	547	86,2	6,3
San Telmo	954	228	-	-
EscarPMENT	3182	712	-	-
Iquiri	3894	267	-	-

Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 8. Datos técnicos del pozo LSC -X5D

Nombre del Campo	Los Sauces	
Nombre del Pozo	LSC-X5D	
Área de Contrato	Los Sauces	
País	Bolivia	
Departamento	Santa Cruz	
Provincia	Chiquitos	
Operador	YPBF Andina S.A.	
Coordenadas UTM (m)	X	Y
Coordenadas de Superficie (Aproximadas)	516953.117	7985799.99
	Z	Zt: 336.29 m.s.n.m Aprox
		Zsr: 344.17 m.s.n.m Aprox
Coordenadas propuestas Formación Iquiri-1	517.941,72	7'985.359,45
Tipo de pozo	Dirigido	
Reservorio Objetivo	Formación Iquiri-1	
Profundidad final propuesta	3750m (MD) 3655 m (TVD)	
Producción estimada	Condensado 47 BPD, 54°API; Gas 2.86 MPCD; presión: 2940 psi	

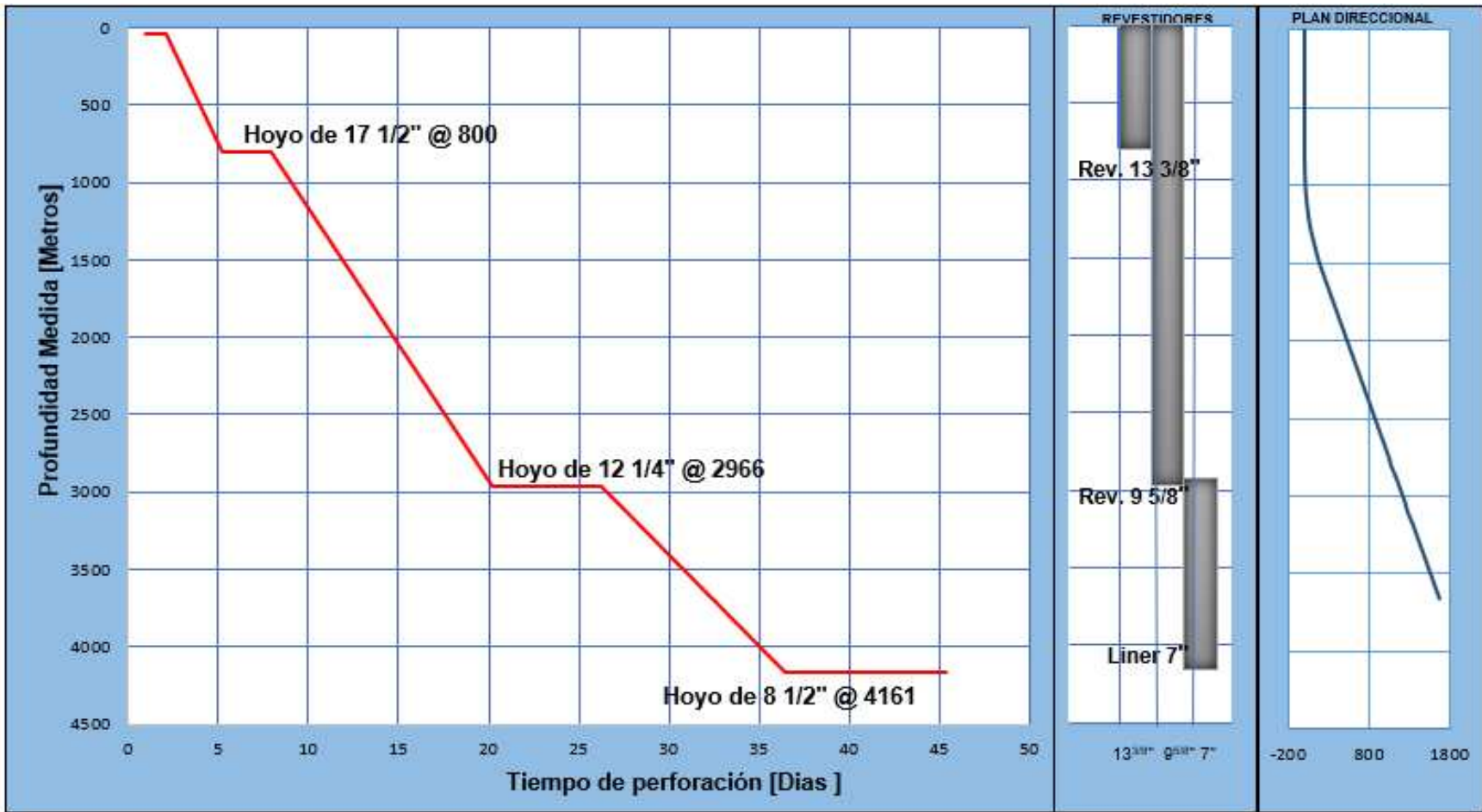
Fuente: YPFB Andina -2016

Anexo 9. Datos técnicos del pozo LSC -9D

Nombre del Campo	Los Sauces		
Nombre Del Pozo	LSC-9D		
Área de Contrato	Los Sauces		
País	Bolivia		
Departamento	Santa Cruz		
Provincia	Andrés Ibáñez		
Operador	YPFB ANDINA S.A.		
Coordenadas UTM (m)	X	Y	Z
Coordenadas de Superficie (Aproximadas)	516620.12	7985095.70	Zt: 336.3 m.s.n.m. Aprox.
			Zsr:344.2 m.s.n.m.Aprox.
Coordenadas propuestas Tope Formación Iquiri-1	515060	7985550	-3232.0 m.s.n.m. Aprox.
Tipo de pozo	Dirigido		
Profundidad Final Propuesta	4161 m (MD), 3656m (TVD)		
Reservorio/ Producción. Inicial	Iquiri		
Reservorio/Reserva estimada	Iquiri / 8.4 BCF de Gas, 125.0 MBBL de condensado, 50.3 MBBL de Gasolina y 159.0 MBBL de GLP.		

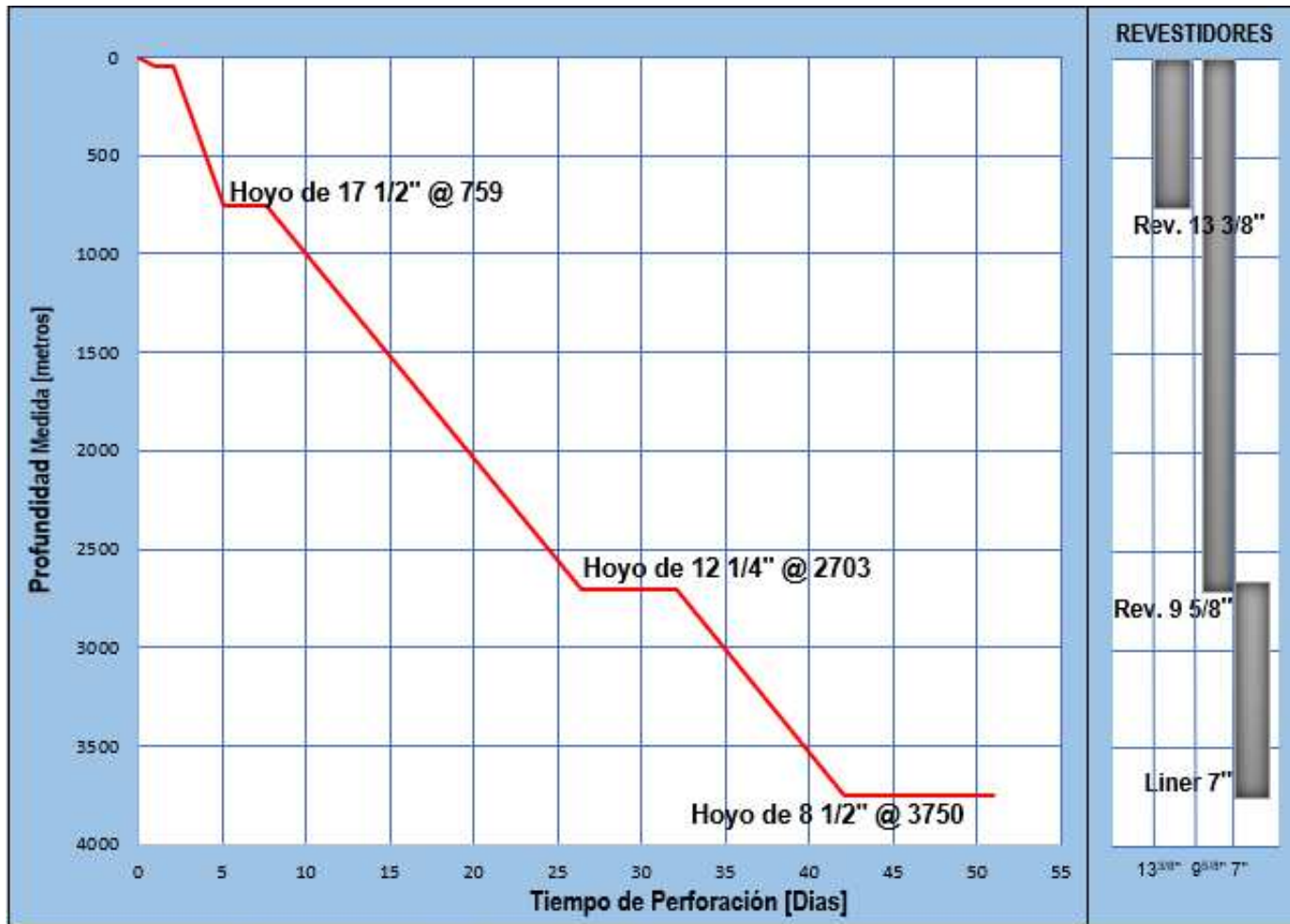
Fuente: YPFB Andina -2016

Anexo 10.A. Curva de profundidad Vs Tiempo pozo LSC-9D



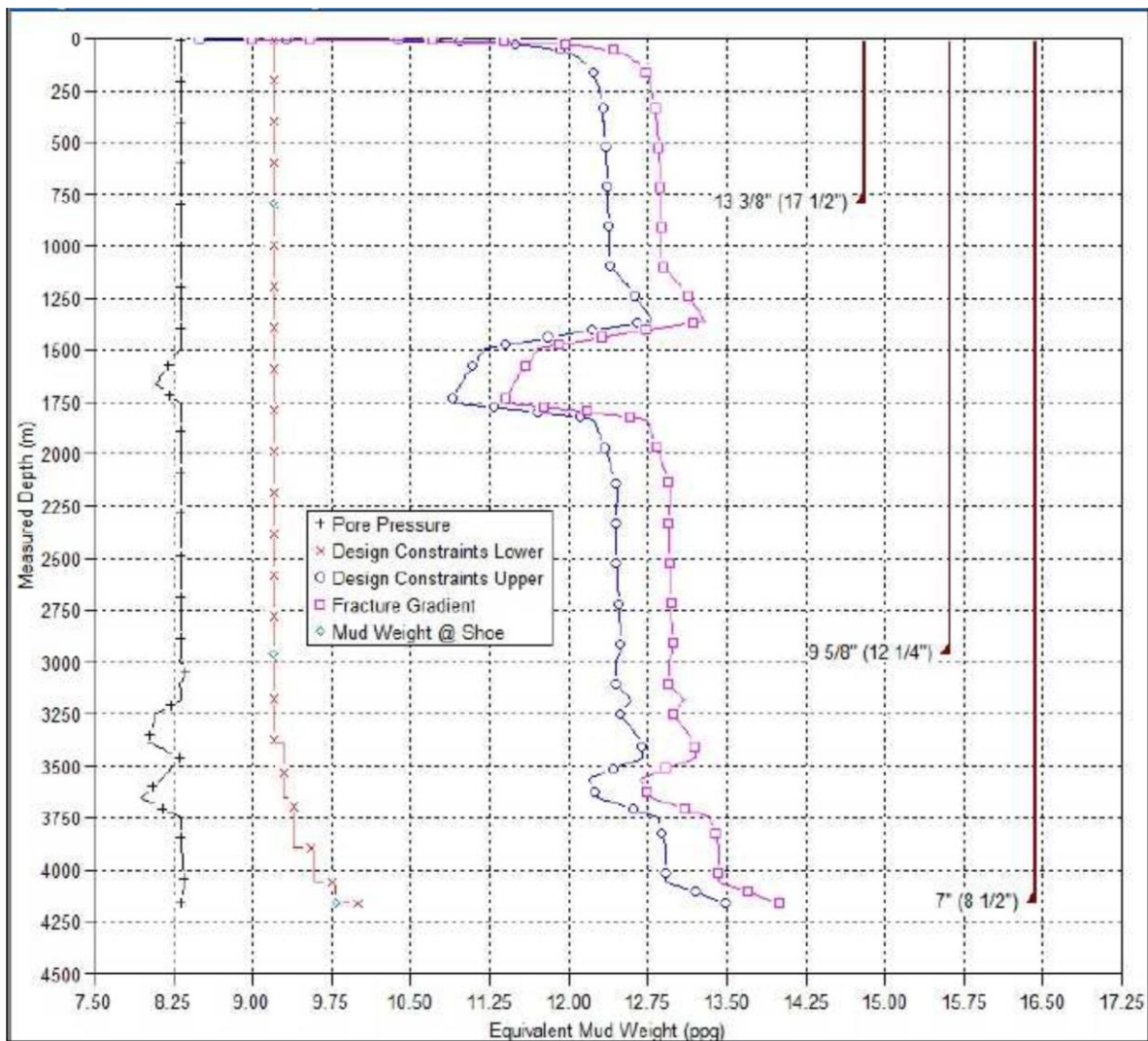
Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 11.B. Curva de profundidad Vs Tiempo pozo LSC-X5D



Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

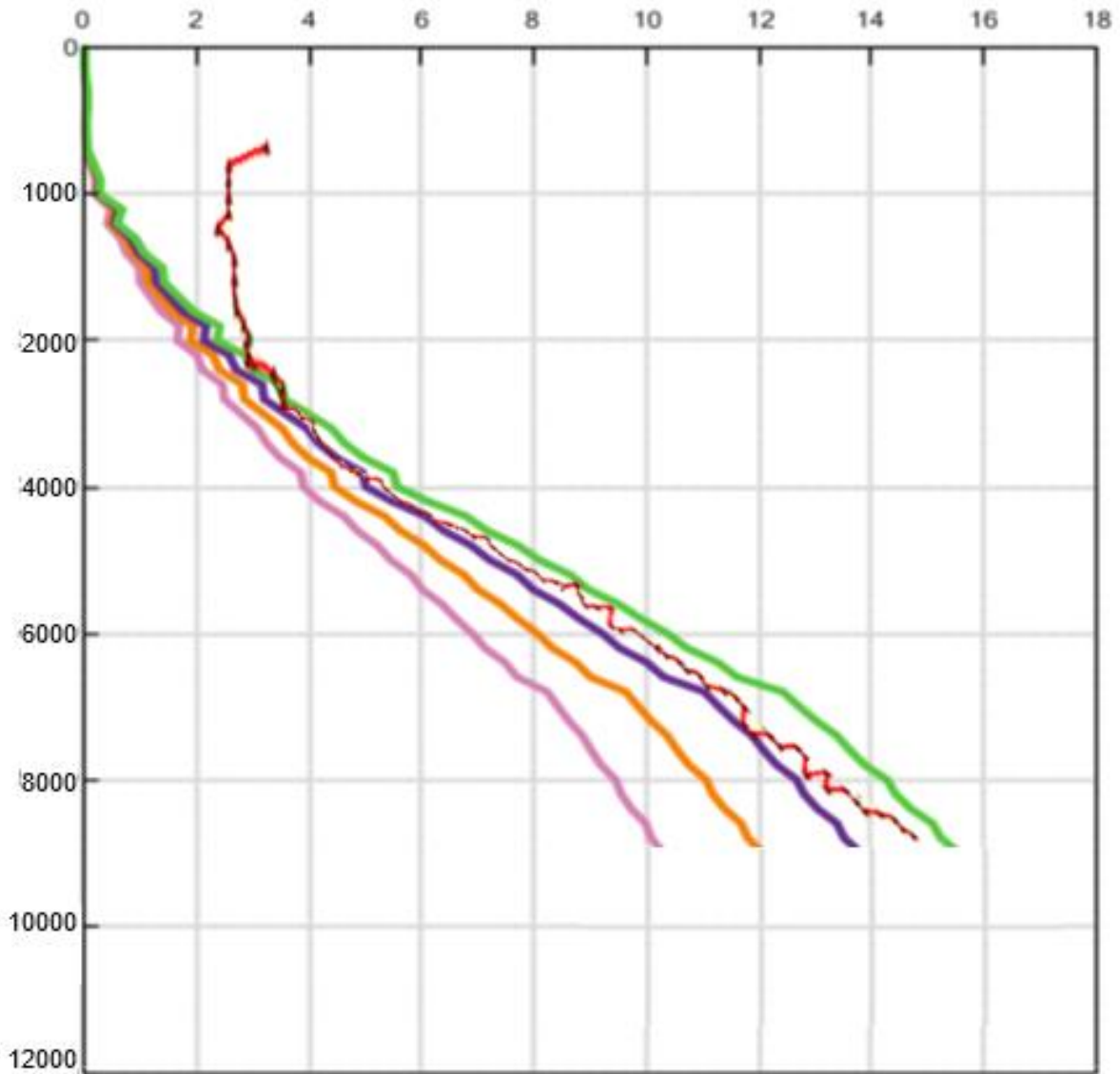
Anexo 12. Presión de Poro y gradiente de Fractura para el pozo Isc-9D



Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 13. Torque desde superficie durante la perforación sección 12 1/4" con motor de fondo

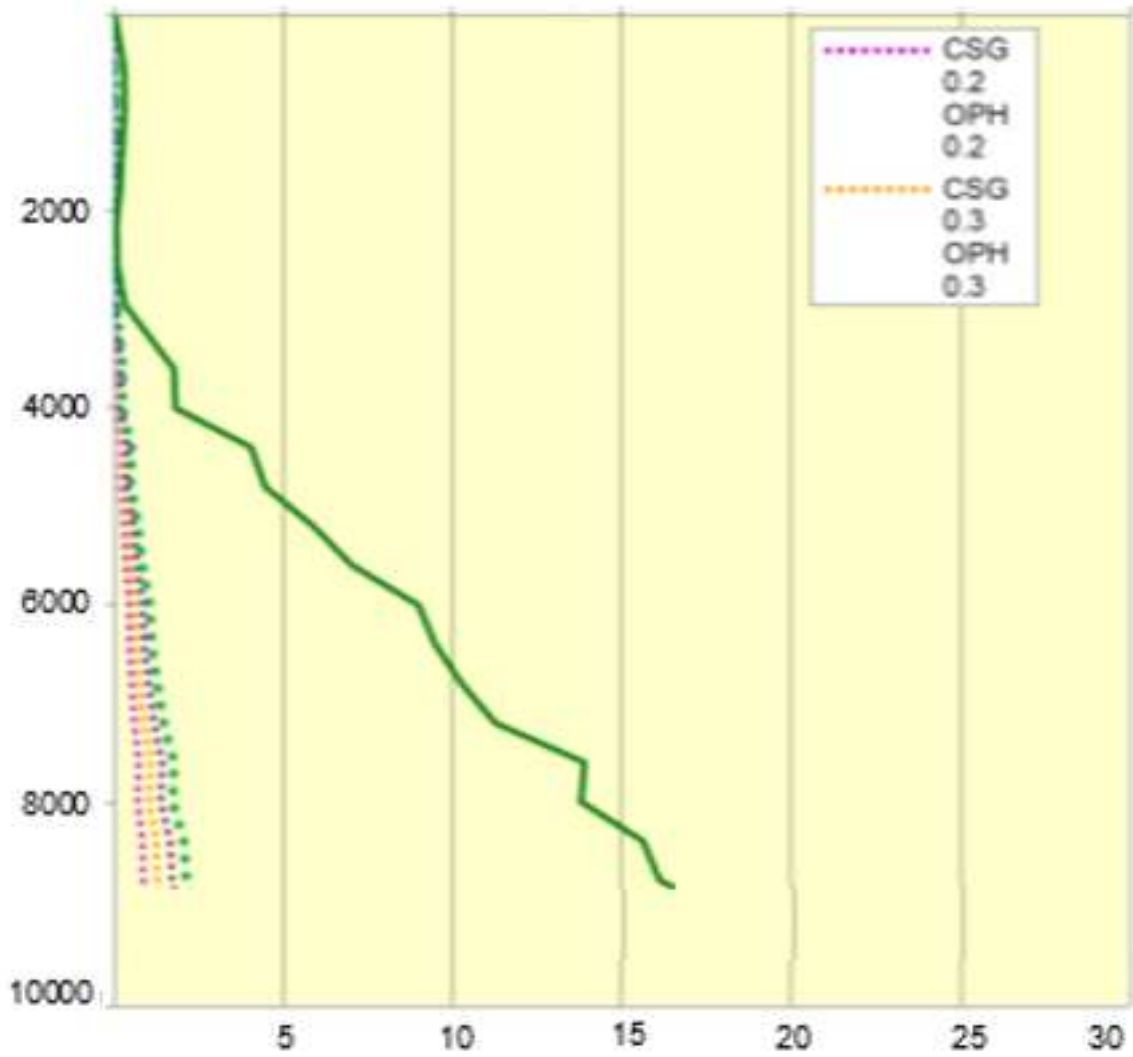
Torque [lbf-ft] VS MD [ft]



Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 14. Torque en el backreaming para el pozo Lsc-X5D sección 12 1/4"

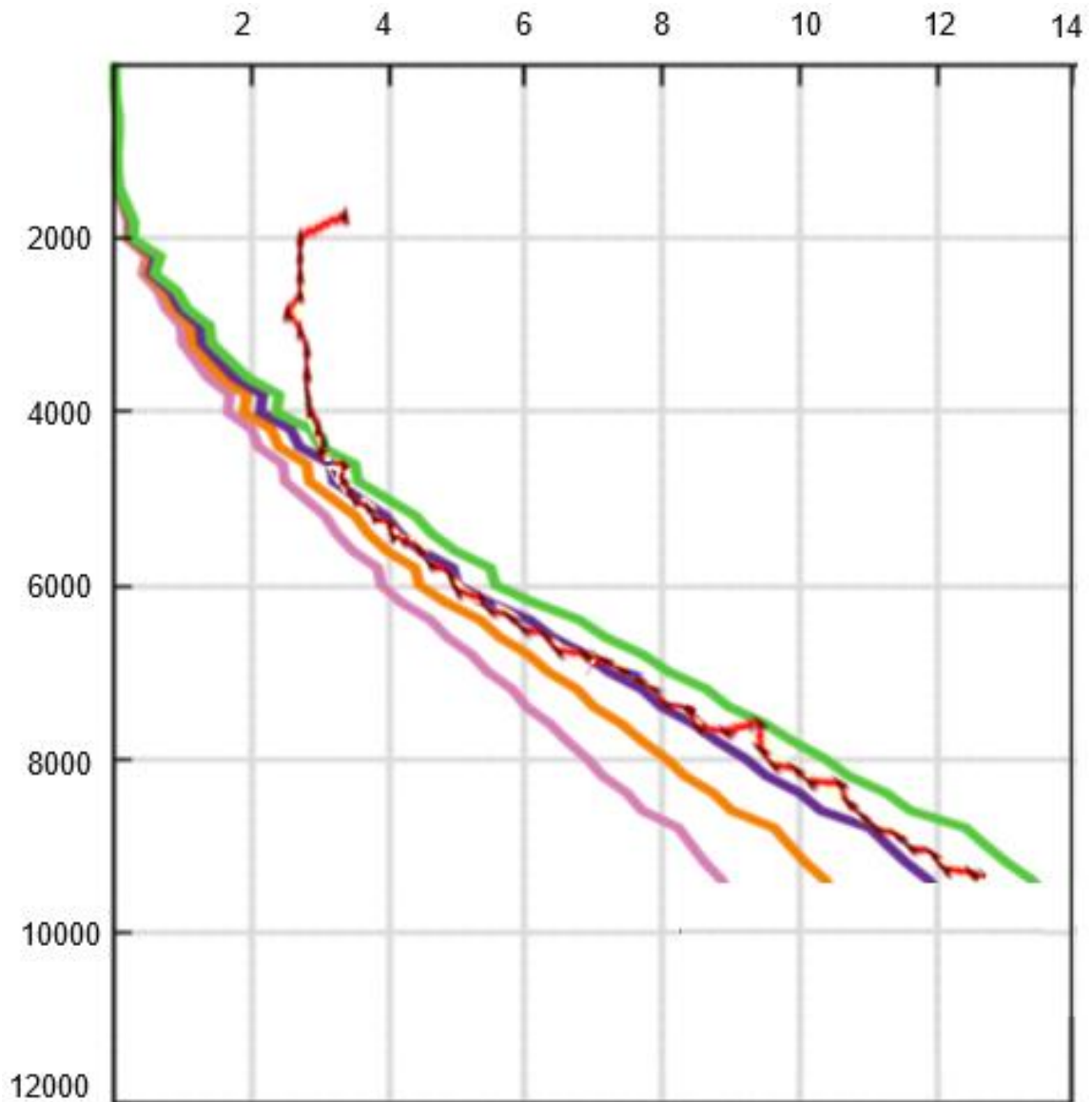
Torque [lbf-ft] VS MD [ft]



Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 15. Torque desde superficie durante la perforación pozo RSS Sección 12 1/4"

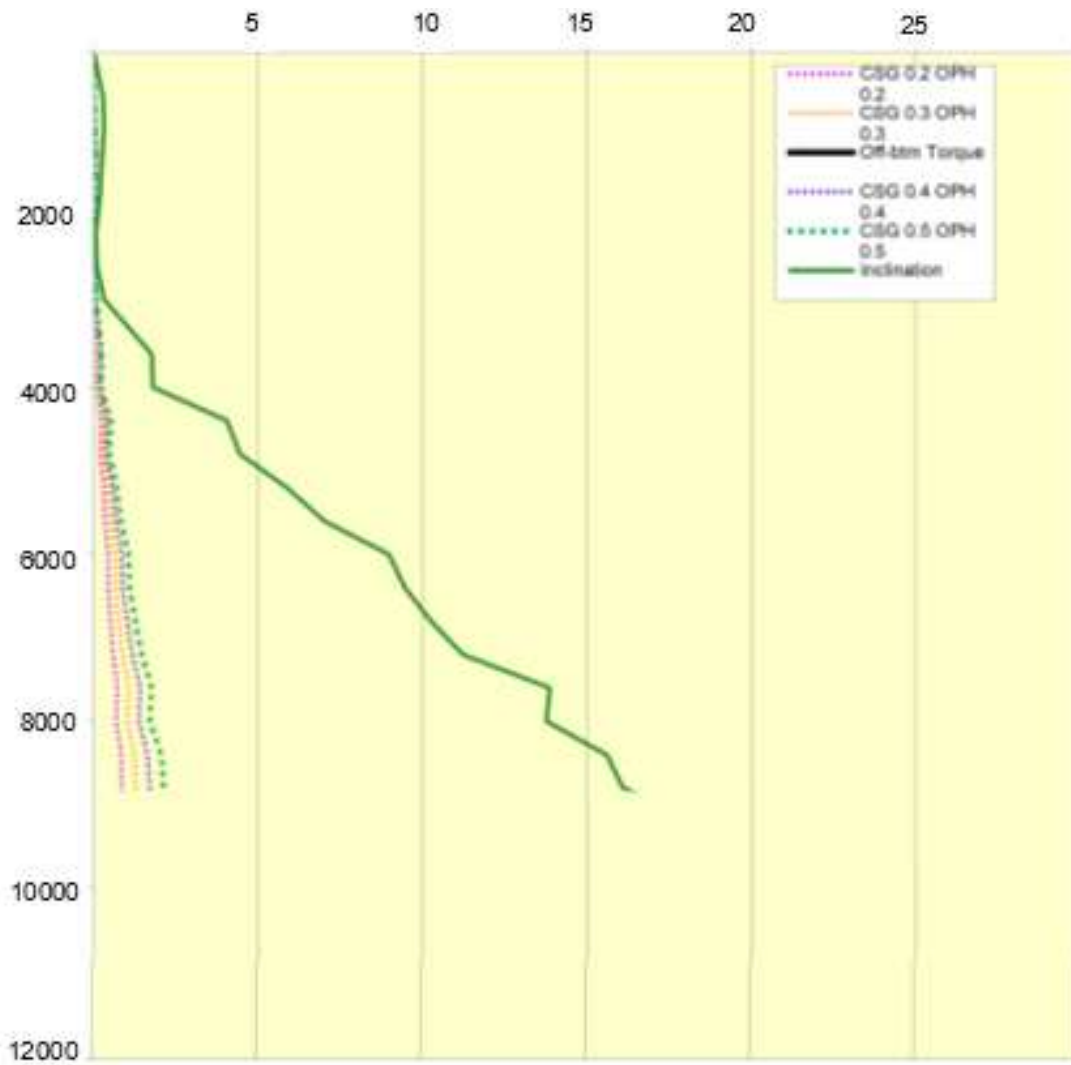
Torque [lbf-ft] vs MD [ft]



Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 16. Torque en el backreaming para el pozo LSC-9D

Torque [lbf-ft] vs Profundidad [ft]



Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 17.A. Costos de la perforación del pozo LSC-9D

EQUIPO DE PERFORACIÓN	2,059,240
SUPERVISION	90,145
CONTROL GEOLÓGICO	78,677
CORONEO Y ANALISIS	0
FLUIDOS DE PERFORACION	679,152
CEMENTACIÓN Y ACCESORIOS	410,000
REGISTROS AGUJERO ABIERTO / ENTUBADO	70,000
TRÉPANOS	72,408
ALQUILER DE HERRAMIENTAS DE PERFORACIÓN	47,686
SERVICIO PERFORACIÓN CON CAÑERÍA	120,000
PERFORACIÓN DIRECCIONAL	771,435
LOCACIÓN SECA Y CONTROL DE SÓLIDOS	172,086
SERVICIO GYRO	50,000
INSPECCIÓN TUBULAR	16,219
SERVICIO DE ENTUBACIÓN	251,850
TRANSPORTES Y FLETES	100,000
SERVICIO AEREO	0
SENSORES ELECTRONICOS	24,751
MISCELANEOS	81,956
CANERIAS	1,195,844
CABEZA DE POZO	148,740
COLGADOR DE LINER Y ACCESORIOS	130,000
	6,570,189
TOTAL	6,570,189

Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

Anexo 18.B. Costos de la etapa de producción del pozo LSC-9D

Description	AFE Amount	Daily Cost	Difference
TUBERIA PRODUCCION 2.3/8"	177.600,00	219.426,78	-41.826,78
ARBOL DE SURGENCIA	48.180,00	41.531,30	6.648,70
ACCESORIOS INSTALACION FINAL	143.434,00	95.267,20	48.166,80
HS. OPERATIVA NORMAL C/SONDEO	390.360,00	230.837,17	159.522,83
HS. OPERATIVA NORMAL S/SONDEO	0,00	551.835,41	-551.835,41
EQUIPO EN REPARACION	0,00	3.032,15	-3.032,15
EQUIPO EN MANTENIMIENTO	0,00	3.475,78	-3.475,78
SUPERVISION	11.050,00	5.200,00	5.850,00
CATERING	15.990,00	51.086,00	-35.096,00
COMUNICACIONES	1.950,00	3.900,00	-1.950,00
FILTRADO AGUA (BASICO)	14.820,00	23.529,00	-8.709,00
ALQUILER HERRAMIENTAS	16.200,00	52.222,93	-36.022,93
PERFILAJE SERVICIO	45.000,00	46.897,56	-1.897,56
PUNZADO SERVICIO	105.000,00	61.712,70	43.287,30
MED.FISICAS C/HTA. FONDO	0,00	42.242,24	-42.242,24
MED.FISICAS C/HTA. SUPERFICIE	0,00	6.630,00	-6.630,00
WIRE LINE (FIJADO HTAS.)	0,00	41.426,00	-41.426,00
WIRE LINE (ESPECIALES)	15.000,00	0,00	15.000,00
SERVICIO SLICK LINE	50.000,00	33.149,20	16.850,80
INSPECCION DE TUBERIA	55.000,00	2.222,00	52.778,00
ALQUILER SCRAPER/RECTIFICADOR	0,00	12.816,14	-12.816,14
ALQUILER EQUIPAMIENTO	26.026,00	14.255,02	11.770,98
ALQUILER TPN Y PKR	14.000,00	6.932,00	7.068,00
ALQUILER FRESAS	3.000,00	840,64	2.159,36
SERV CTRL Y ENROSCADO TBG	0,00	5.448,00	-5.448,00
SERV. PRUEBAS DE PRODUCCION	15.920,00	81.518,56	-65.598,56
SERVICIO CABEZA DE POZO	12.000,00	17.780,00	-5.780,00
OPERADOR ARREGLO FINAL	16.000,00	25.472,00	-9.472,00
SERVICIO LODO -TERM / REP.	27.040,00	33.740,00	-6.700,00
MATERIAL LODO -TERM / REP.	101.945,00	146.988,85	-45.043,85
ALQUILER DE VEHICULO	1.170,00	2.210,00	-1.040,00
TRANSPORTES Y FLETES	30.139,00	24.645,00	5.494,00
SERVICIO DE ORIENTACION	45.000,00	0,00	45.000,00
ALQUILER DE CISTERNA	5.850,00	23.650,00	-17.800,00
TRATAMIENTO DE AGUAS	24.274,00	49.691,74	-25.417,74
TALLER DE TORNERIA-SOLDADURA	15.000,00	0,00	15.000,00
SERVICIO DE VIGILANCIA	3.510,00	6.864,00	-3.354,00
	1.430.458,00	1.968.475,37	-538.017,37

Fuente: YPFB – ANDINA, 2016

E-Mail: kevindot218@gmail.com

Teléfono: 2-484510

Celular: 60681234