

**EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES DE PERFORACION
DIRECCIONAL DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO Y ROTARY STEERABLE
SYSTEMS CORRIDOS EN UN CAMPO COLOMBIANO**

LEONARDO ANTONIO ROA SUAREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES DE PERFORACION
DIRECCIONAL DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO Y ROTARY STEERABLE
SYSTEMS CORRIDOS EN UN CAMPO COLOMBIANO**

LEONARDO ANTONIO ROA SUAREZ

Trabajo de grado para optar al título
de Ingeniero de Petróleos

Tutor UIS:

Wilson Raúl Carreño Velasco

Ingeniero de Petróleos – Docente UIS

Tutor Schlumberger:

Danny Leandro Ochoa Daza

Ingeniero de Petróleos – Lead Drilling Engineer Colombia

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO – QUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS

BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A mi madre Maria Mercedes Suarez Contreras por ser el motor de mi vida, sin su apoyo, amor y sabios consejos no hubiera llegado a donde me encuentro ahora, siempre te amare hasta el fin de los días sin importar la distancia que nos separe.

A mi padre Nelson Roa Gonzales por su incondicional acompañamiento y tenacidad implantada en mi persona, un ejemplo de hombre a seguir, fiel amigo, extraordinario padre y el mejor entrenador, siempre ocupara la otra mitad de mi corazón.

A mi hermana Maria Juliana Roa Suarez, mis primos y a toda mi familia y personas que estuvieron presentes en mi realización como profesional, también a mis abuelos, aunque algunos no se encuentran presentes en cuerpo... siempre vivirán en mi con sus enseñanzas y recuerdos.

A mis fieles amigos Jhonatan Felipe Gutierrez y Jose Daniel Orejarena Alarcón, sin el apoyo de ellos nada de esto hubiera sido posible, siempre podrán encontrar en mi un apoyo incondicional y un amigo verdadero sin importar las situaciones presentes y futuras.

Leonardo Antonio Roa Suarez

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por si mi mayor soporte durante el desarrollo del presente proyecto.

Al Drilling Engineering Center de Schlumberger por todo el apoyo durante la realización de la práctica empresarial, siempre serán recordados con gran agrado y agradecimiento.

A los ingenieros Wilson Raúl Carreño Velasco y Danny Leandro Ochoa Daza por sus valiosas observaciones, apoyo y acompañamiento durante la realización de este proyecto.

A la escuela de Ingeniería de Petróleos y a la Universidad Industrial de Santander, las enseñanzas, valores profesionales y recursos académicos permitieron el desarrollo de un perfil integral como futuro ingeniero.

A los ingenieros Jhonatan Felipe Gutierrez y Jose Daniel Orejarena Alarcón, tener una segunda opinión a la orden para la resolución de dudas en la realización de esta investigación fue de gran importancia y valor.

A todo el personal de Schlumberger, haber tenido la posibilidad de realizar mi práctica empresarial en esta empresa generó importantes enseñanzas para como futuro profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	17
1. PRINCIPIOS OPERACIONALES DE LOS MOTORES DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL	18
1.1. CONCEPTOS BASICOS	18
1.1.1. Perforación Direccional.....	18
1.1.2. Parámetros tenidos en cuenta en operaciones direccionales	25
2. MOTORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.....	26
2.1.1. Top Sub	27
2.1.2. Válvula de descarga	27
2.1.3. Sección de potencia	28
2.1.4. Sección acodada	31
2.1.5. Sección de transmisión.....	32
2.1.6. Estabilizadores	34
2.1.7. Caja de la broca.....	34
2.1.8. Funcionamiento de un PDM.....	36
2.2. ROTARY STEERABLE SYSTEMS.....	41
2.2.1. Unidad de control	41
2.2.2. Unidad de desvío (bias unit).....	43
2.2.3. Funcionamiento de un RSS	45
2.2.4. Beneficios del uso de RSS	47

3.	PARAMETROS DE EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES DE PERFORACION DIRECCIONAL	50
3.1.	PARAMETROS DE EVALUACION.....	50
3.1.1.	Desempeño perforando.....	50
3.1.2.	Tiempos de viaje desde la profundidad final de la sección (TD).....	51
3.1.3.	Corrida de revestimiento	52
3.2.	Escenarios de evaluación para tiempos de viajes y circulación desde la profundidad final de la sección.	52
3.2.1.	Tiempo Global de actividades	52
3.2.2.	Discriminación de ciertas actividades	53
3.3.	Metodología de análisis.....	53
3.3.1.	Tecnologías del análisis	54
3.3.2.	Operaciones de perforación y viaje	56
3.3.3.	Operaciones de corrida de revestimiento	56
3.3.4.	Análisis de costos.....	57
4.	ANALISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES DE PERFORACION DIRECCIONAL CORRIDOS	59
4.1.	Tecnología 1 con PDM	59
4.1.1.	Análisis del desempeño para la perforación	59
4.1.2.	Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación	60
4.1.3.	Análisis de desempeño para corrida de revestimiento.....	61
4.2.	Tecnología 2 con RSS.....	62
4.2.1.	Análisis del desempeño para perforación.....	62

4.2.2.	Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación	63
4.2.3.	Análisis de desempeño para corrida de revestimiento	64
4.3.	Tecnología 3 con RSS	65
4.3.1.	Análisis del desempeño para perforación.....	65
4.3.2.	Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación	66
4.3.3.	Análisis de desempeño para corrida de revestimiento	67
4.4.	Tecnología 4 con PDM	68
4.4.1.	Análisis del desempeño para perforación.....	68
4.4.2.	Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación.	69
4.4.3.	Análisis de desempeño para corrida de revestimiento	70
4.5.	Tecnología 5 con PDM	71
4.5.1.	Análisis del desempeño para perforación.....	71
4.5.2.	Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación	72
4.5.3.	A Análisis de desempeño para corrida de revestimiento	73
4.6.	ANALISIS GLOBAL DE LAS TECNOLOGIAS	74
4.7.	Analisis de costos para las tecnologías.....	78
4.7.1.	Tecnología 1 con PDM análisis de costos.....	79
4.7.2.	Tecnología 2 con RSS análisis de costos	80
4.7.3.	Tecnología 3 con RSS análisis de costos	81
4.7.4.	Tecnología 4 con PDM análisis de costos.....	81
4.7.5.	Tecnología 5 con PDM análisis de costos.....	83

5. CONCLUSIONES.....	86
6. RECOMENDACIONES	87
7. BIBLIOGRAFIA	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aplicaciones de la perforación direccional.	19
Figura 2. Vista 3D de una operación direccional.....	20
Figura 3. Vista superior de una operación direccional.	21
Figura 4. Arreglos en el BHA para operaciones direccionales.....	22
Figura 5. Arreglos para el incremento y reducción angular.....	23
Figura 6. Utilización de Cucharas para operaciones direccionales.....	24
Figura 7. Motores de turbina y desplazamiento positivo.	26
Figura 8. Válvula de descarga de un PDM	27
Figura 9. partes de la sección de potencia.	28
Figura 10. Etapa del rotor de un PDM	30
Figura 11. Sección acodada de un PDM	31
Figura 12. Eje de transmisión.	32
Figura 13. rodamientos radiales y de empuje	33
Figura 14. Vista seccionada de un motor PDM.....	35
Figura 15. BHA con motor PDM y broca.....	36
Figura 16. Representación de sarta de perforación con PDM en hueco abierto....	37
Figura 17. Trayectorias por rotación y deslizamiento.....	39
Figura 18. Vista lateral de la trayectoria direccional generada por un PDM.	40
Figura 19. Ensamblaje de fondo para operaciones con RSS.	41
Figura 20. Unidad de control de un RSS.	42
Figura 21. Unidad de desvió (unidad sesgada) de un RSS.	44
Figura 22. Mecanismo de activación de los PADs de un RSS.....	44
Figura 23. PADs de la unidad de desvió, sin activar y activados.	45
Figura 24. Optimo control de la trayectoria, inclinación, azimut generado por un RSS	46
Figura 25. Funcionamiento de un RSS.....	47

Figura 26. Espiralamiento al usar PDM (superior), RSS (inferior).....	48
Figura 27. Ejemplo teórico de la Trayectoria con PDM (naranja) vs Trayectoria con RSS (negra).....	49
Figura 28. Tecnologías por analizar.....	54
Figura 29. Parámetros analizados.	54
Figura 30. Metodología para el desarrollo del análisis operacional.	55
Figura 31. Tasa de perforación [ft/h] por tecnología aplicada.	75
Figura 32. Tiempo perforando cada 1000 ft [h] por tecnología aplicada.	75
Figura 33. Tiempo viajando cada 1000 ft [h] (total de actividades) por tecnología aplicada.	76
Figura 34. Tiempo viajando cada 1000 ft [h] (discriminación de ciertas actividades) por tecnología aplicada.....	76
Figura 35. Tiempo viajando y perforando cada 1000 ft [h] (total de actividades) por tecnología aplicada.	77
Figura 36. Tiempo viajando y perforando cada 1000 ft [h] (discriminación de ciertas actividades) por tecnología aplicada.....	77
Figura 37. Tiempo corriendo revestimiento por tecnología usada.	78
Figura 38. Costos estandarizados al correr 1000 pies de tecnología en dólares...	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Numero de pozos para el análisis por tecnología en operaciones de perforación y viajes desde la profundidad final de la sección hasta hueco revestido.	56
Tabla 2. Numero de pozos para el análisis por tecnología en operaciones de corrida de revestimiento.....	57
Tabla 3. Desempeño perforando Tecnología 1 con PDM.	59
Tabla 4. Desempeño viajando tecnología 1 con PDM	60
Tabla 5. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 1 con PDM.	61
Tabla 6. Desempeño perforando tecnología 2 con RSS.....	62
Tabla 7. Desempeño viajando tecnología 2 con RSS.....	63
Tabla 8. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 2 con RSS.	64
Tabla 9. Desempeño perforando tecnología 3 con RSS.....	65
Tabla 10. Desempeño perforando tecnología 3 con RSS.....	66
Tabla 11. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 3 con RSS.	67
Tabla 12. Desempeño perforando tecnología 4 con PDM.	68
Tabla 13. Desempeño viajando tecnología 4 con PDM.	69
Tabla 14. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 4 con PDM.	70
Tabla 15. Desempeño Perforando tecnología 5 con PDM.....	71
Tabla 16. Desempeño viajando tecnología 5 con PDM.	72
Tabla 17. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 5 con PDM.	73
Tabla 18. Análisis total de las tecnologías.	74
Tabla 19. Costos de los PDM y RSS	78
Tabla 20. Análisis de costos tecnología 1.....	79
Tabla 21. Análisis de costos tecnología 2.....	80
Tabla 22. Análisis de costos tecnología 3.....	81
Tabla 23. Análisis de costos tecnología 4.....	82

Tabla 24. Análisis de costos tecnología 5.....83
Tabla 25. Análisis general de costos para PDM.84

RESUMEN

TITULO: EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES DE PERFORACION DIRECCIONAL DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO Y ROTARY STEERABLE SYSTEMS CORRIDOS EN UN CAMPO COLOMBIANO¹

AUTOR: LEONARDO ANTONIO ROA SUAREZ²

PALABRAS CLAVE: Perforación direccional, motor de desplazamiento positivo, Rotary Steerable Systems.

DESCRIPCION:

Para desarrollar operaciones direccionales es recomendable la utilización de motores, en la presente investigación se estudian dos clases de estos: los Rotary Steerable Systems (RSS) y los motores de desplazamiento positivo (PDM), se explican los componentes, secciones y funcionamiento de estos con tal de tener claro sus principios físicos, además de familiarizarse con los mismos.

Se tendrán cinco tecnologías distribuidas de la siguiente manera: dos RSS y tres PDM. Los desempeños de estos son evaluados a partir de tres parámetros: perforación con los tiempos gastados en ella, tiempos de viajes desde la profundidad total alcanzada (TD) hasta hueco revestido ubicado aproximadamente a mil pies con dos escenarios de análisis respectivamente para este punto y tiempos de corrida de revestimiento para la sección perforada, la cual corresponde a 12.25 pulgadas. Los resultados serán estandarizados para mil pies en cada parámetro de análisis con el objetivo de tener una medida estándar con una profundidad determinada.

También se tiene un estudio de costos de las tecnologías en el cual se analiza los precios totales de operación con base a los costos del motor analizado puntualmente y el taladro, este último tiene una tarifa única para los cinco casos y al igual que el análisis operacional se estandarizará la medida a partir de mil pies de operación con el fin de tener un análisis con igualdad de condiciones para todos.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Tutor UIS: Wilson Raúl Carreño Velasco, Ingeniero de Petróleos, Tutor Schlumberger: Danny Leandro Ochoa Daza, Ingeniero de Petróleos.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF PERFORMANCE OF THE DIRECTIONAL DRILLING MOTORS OF POSITIVE DISPLACEMENT AND ROTARY STEERABLE SYSTEMS USED IN A COLOMBIAN FIELD³

AUTHOR: LEONARDO ANTONIO ROA SUAREZ⁴

KEYWORDS: Directional drilling, Positive displacement motor, Rotary Steerable Systems.

DESCRIPTION:

To develop directional operations, it is advisable to use motors, in the present investigation two classes of these are studied: The Rotary Steerable Systems (RSS) and Positive displacement Motors (PDM), the components, sections and operation of these are explained with to be clear about their physical principles, as well as to become familiar with them.

Five technologies will be distributed as follows: two RSS and three PDM. The performances of these are evaluated from three parameters: Drilling and times used for this operation, tripping time from the total depth reached (TD) to casing hole located at approximately one thousand feet deep with two analysis scenarios respectively for this point and times for casing run for the drilled section, which corresponds to 12.25 inches. The results will be standardized for a thousand feet in each analysis parameter to have a standard measurement with a certain depth.

There is also a cost study of the technologies in which the total operating prices are analyzed based on the motor costs analyzed and the drill, the latter has a single rate for the five cases and like the operational analysis, the measure will be standardized from a thousand feet of operation to have an analysis with equal conditions for all.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Tutor UIS: Wilson Raúl Carreño Velasco, Ingeniero de Petróleos, Tutor Schlumberger: Danny Leandro Ochoa Daza, Ingeniero de Petróleos.

INTRODUCCION

Durante la perforación direccional es necesario alcanzar el objetivo según el ángulo y dirección especificados por la compañía operadora, para esto es indispensable la utilización de herramientas direccionales tales como los motores de desplazamiento positivo (PDM, por sus siglas en inglés) y Rotary Steerable Systems (RSS). Schlumberger, compañía pionera en la prestación de servicios petroleros ofrece gran variedad de herramientas a la orden de satisfacer las necesidades del cliente, en este caso puntual con operaciones de perforación direccional.

En este proyecto de grado se estudiarán los motores direccionales corridos por Schlumberger para la sección de 12.25 pulgadas en un campo colombiano donde se utiliza PDM y RSS, se tiene una totalidad de cinco tecnologías para el análisis, comparación y evaluación de su desempeño.

Inicialmente se explicarán los principios de perforación direccional y los parámetros de dichas operaciones, además del funcionamiento de PDM y RSS. Ya claro se procederá a establecer los factores de evaluación de los motores y una vez concluida esta fase de entendimiento e identificación de los ítems de evaluación se continuará con el respectivo análisis el cual una vez terminado dará una perspectiva clara del desempeño de cada uno de los motores usados para perforar la sección de 12.25 pulgadas en el campo de investigación, resaltar las tecnologías más sobresalientes y recomendar los escenarios de aplicación según los resultados obtenidos.

1. PRINCIPIOS OPERACIONALES DE LOS MOTORES DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL

1.1. CONCEPTOS BASICOS

El presente capítulo explicara los principios de perforación direccional y los parámetros tenidos en cuenta en estas operaciones, además del funcionamiento de los motores de desplazamiento positivo y Rotary Steerable Systems resaltando la función de cada uno de sus componentes.

1.1.1. Perforación Direccional

La perforación direccional busca la desviación intencional de un pozo con respecto al trayecto inicial que sería tomado por este. Este proceso se lleva a cabo mediante ciertos arreglos del BHA o uso de herramientas especiales MWD (Measurements while Drilling) y motores de perforación direccional.

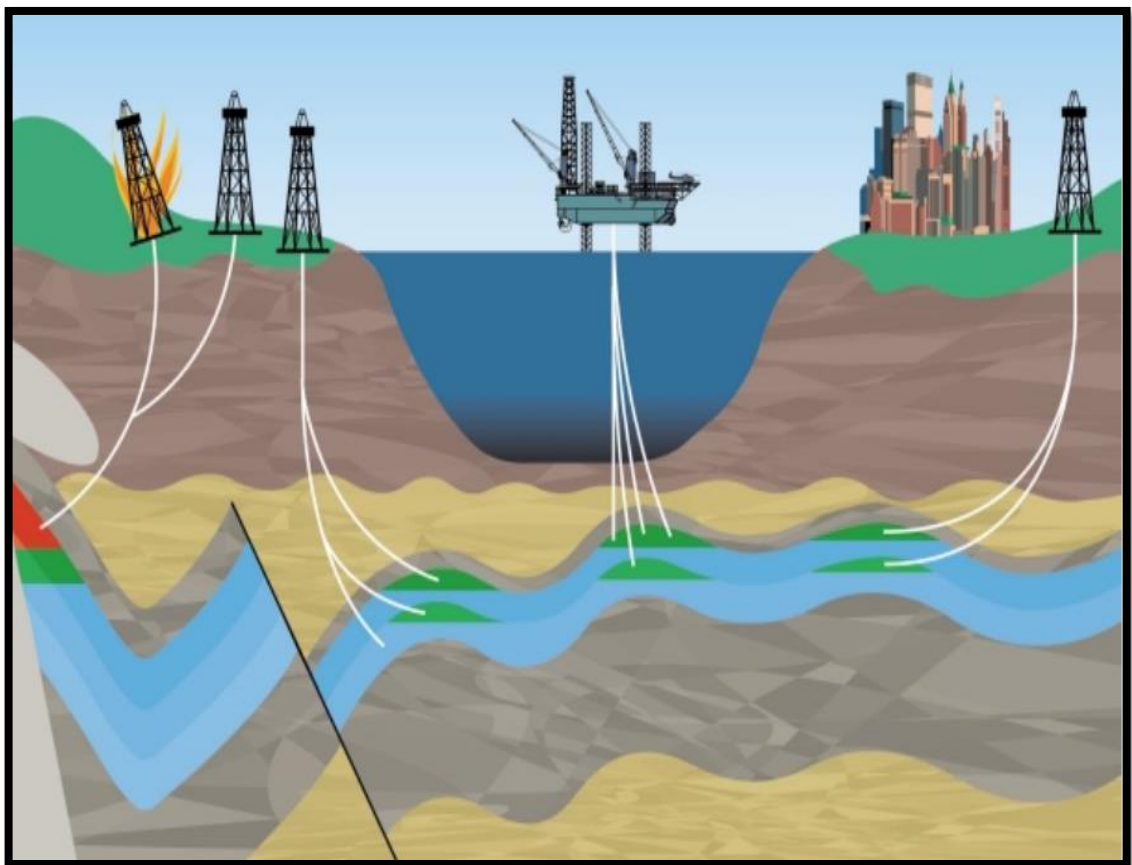
La aplicación de esta operación permite realizar perforaciones en zonas geológicas complejas evitando ciertas formaciones no deseadas tales como los domos salinos y rocas extremadamente duras, además permite maximizar el drenaje del yacimiento debido a la mayor penetración en la formación productora optimizando la superficie de contacto entre el pozo y el yacimiento. En cuanto a las operaciones costa fuera se puede implementar la perforación multilateral, lo cual permitiría drenar varios compartimientos del yacimiento al mismo tiempo desde un solo pozo.

En campos maduros esta técnica puede ser económicamente viable si se tiene una correcta ubicación del objetivo para el aprovechamiento óptimo del recurso. Esta operación además de tener las ventajas mencionadas permite un mayor alcance para llegar a yacimientos que por ejemplo no se pueden explotar debido a riesgos

ambientales en zonas protegidas, urbanas, perforación de locaciones marinas desde superficie, entre otros.

En situaciones de emergencia tales como incendios en pozo o pérdida del control, la perforación direccional resulta indispensable ya que gracias a esta técnica se pueden formar pozos de alivio para controlar la catástrofe. En escenarios menos peligrosos se utilizan en desviaciones alrededor de una formación no deseada o sidetracks planeados permitiendo controlar la trayectoria del pozo en beneficio de los objetivos planteados.

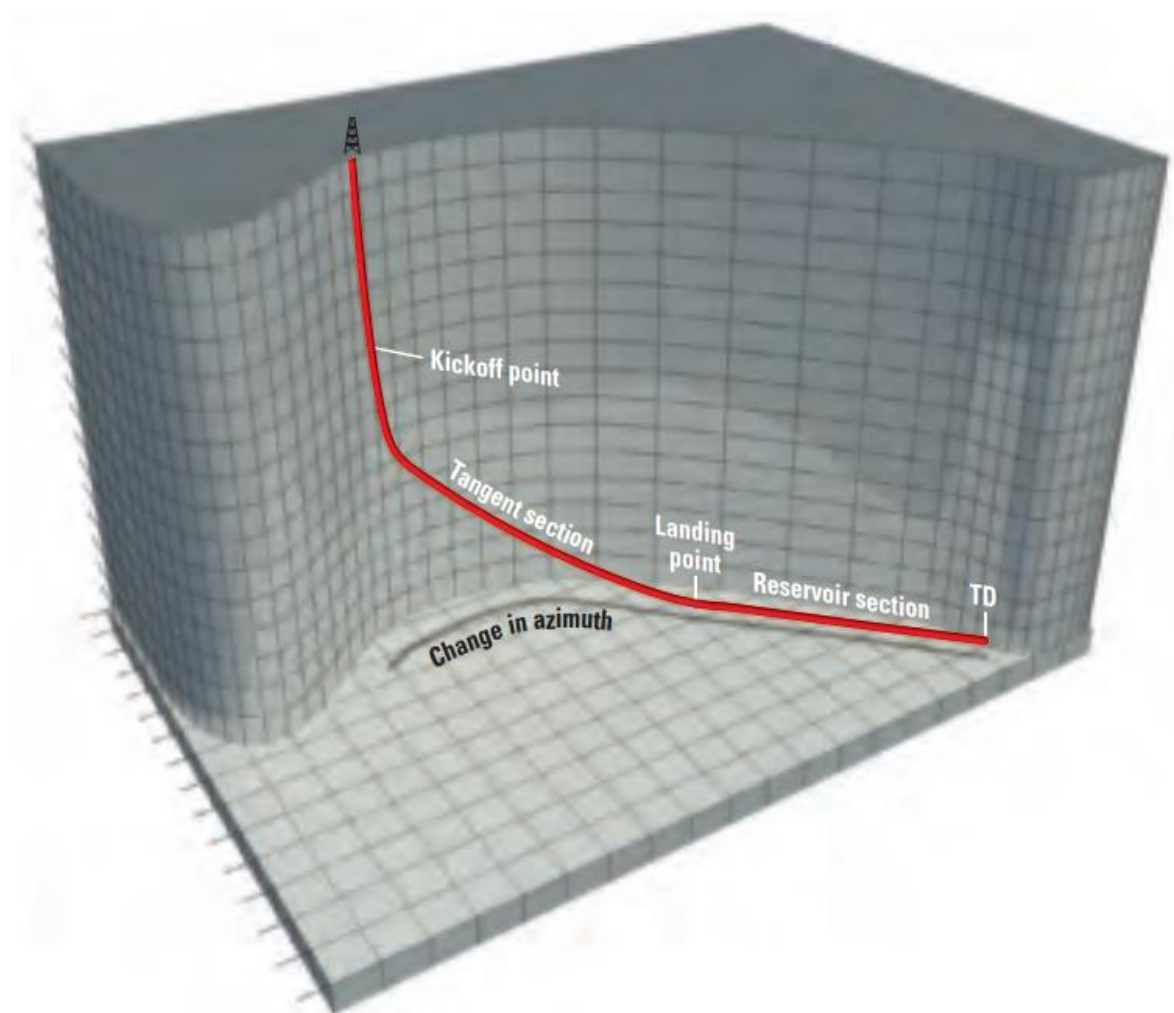
Figura 1. Aplicaciones de la perforación direccional.



Fuente: DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000.

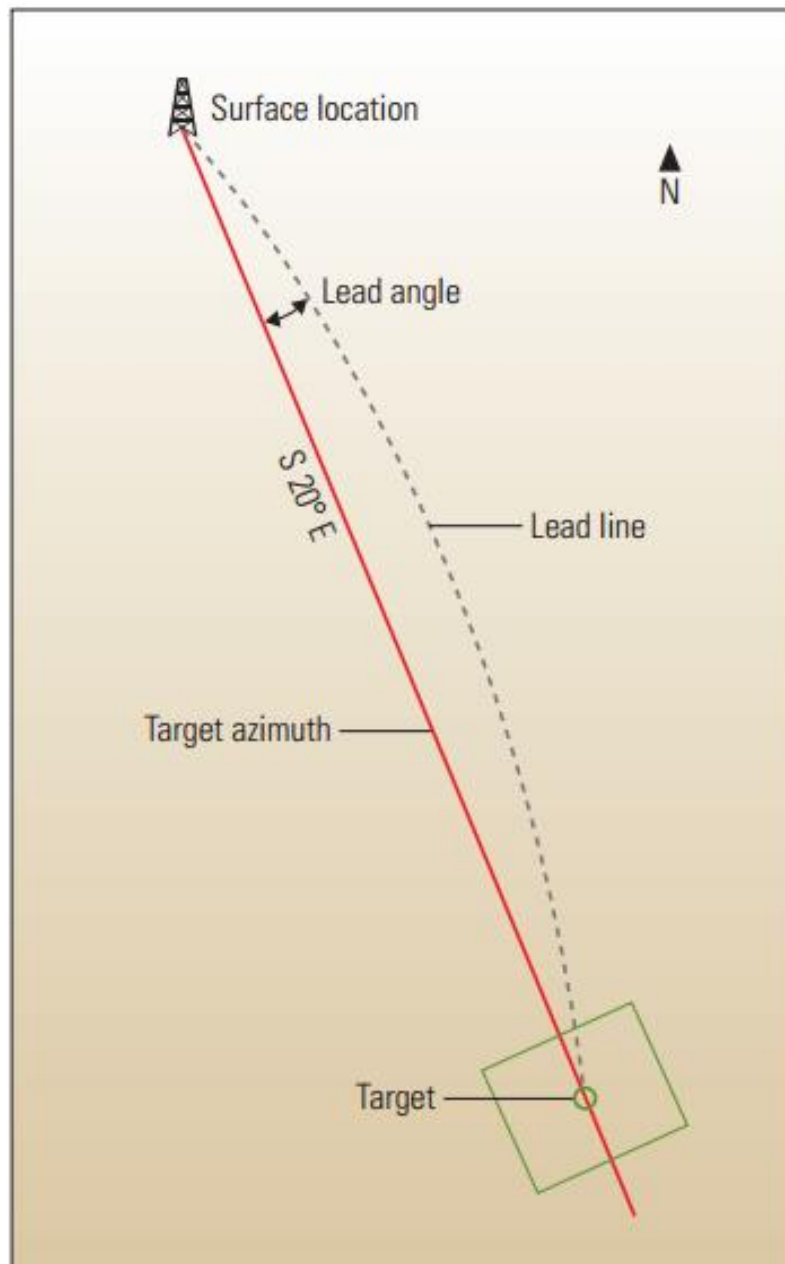
Las operaciones direccionales inicialmente se realizaban con arreglos del BHA a partir del posicionamiento de estabilizadores, lo cual permitía controlar el incremento o reducción angular, esta técnica daba cierto control sobre la trayectoria del pozo, pero tenía un deficiente control del azimut (dirección de un punto del pozo en grados ubicado en un plano horizontal con respecto al norte magnético de la tierra).

Figura 2. Vista 3D de una operación direccional.



Fuente: FELCZAK, Edwin, et al. The Best of Both Worlds – A Hybrid Rotary Steerable System, Schlumberger, 2012.

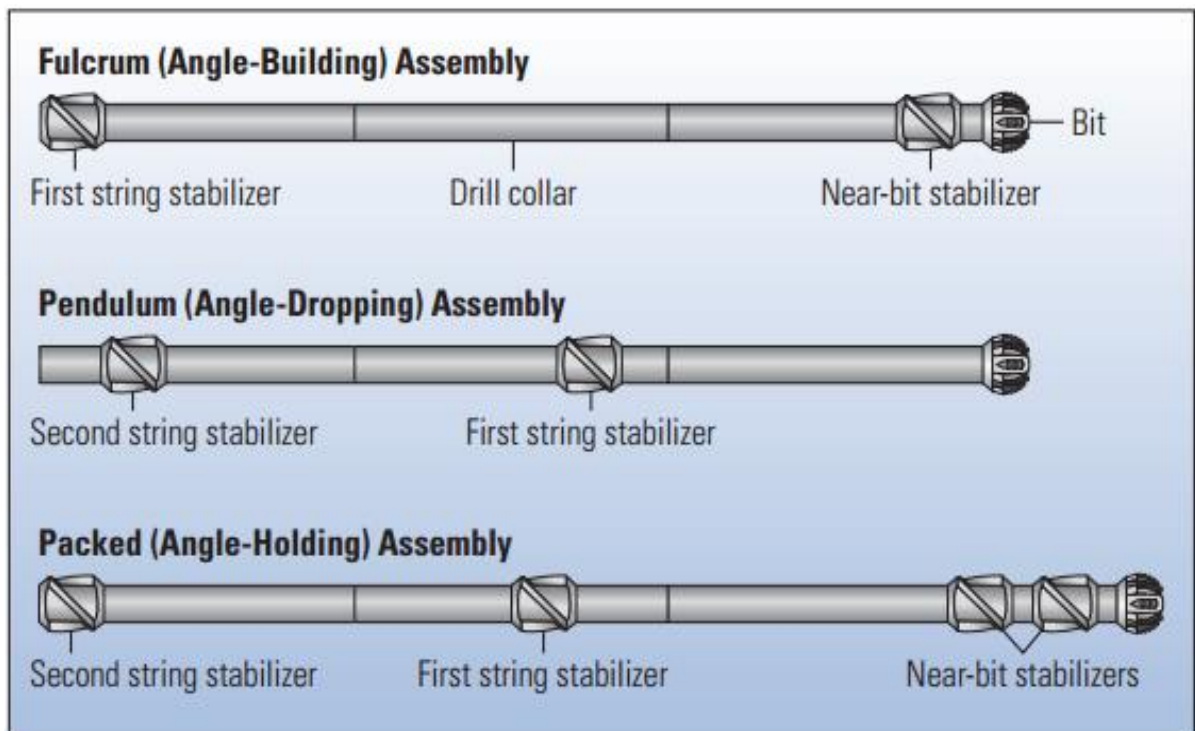
Figura 3. Vista superior de una operación direccional.



Fuente: FELCZAK, Edwin, et al. The Best of Both Worlds – A Hybrid Rotary Steerable System, Schlumberger, 2012.

Para la construcción del ángulo direccional, mantenerlo estable o tumbarlo en su defecto inicialmente se utilizaron arreglos en el BHA a partir de la colocación estratégica de estabilizadores cerca a la broca, en la siguiente imagen se encuentran este tipo de arreglos:

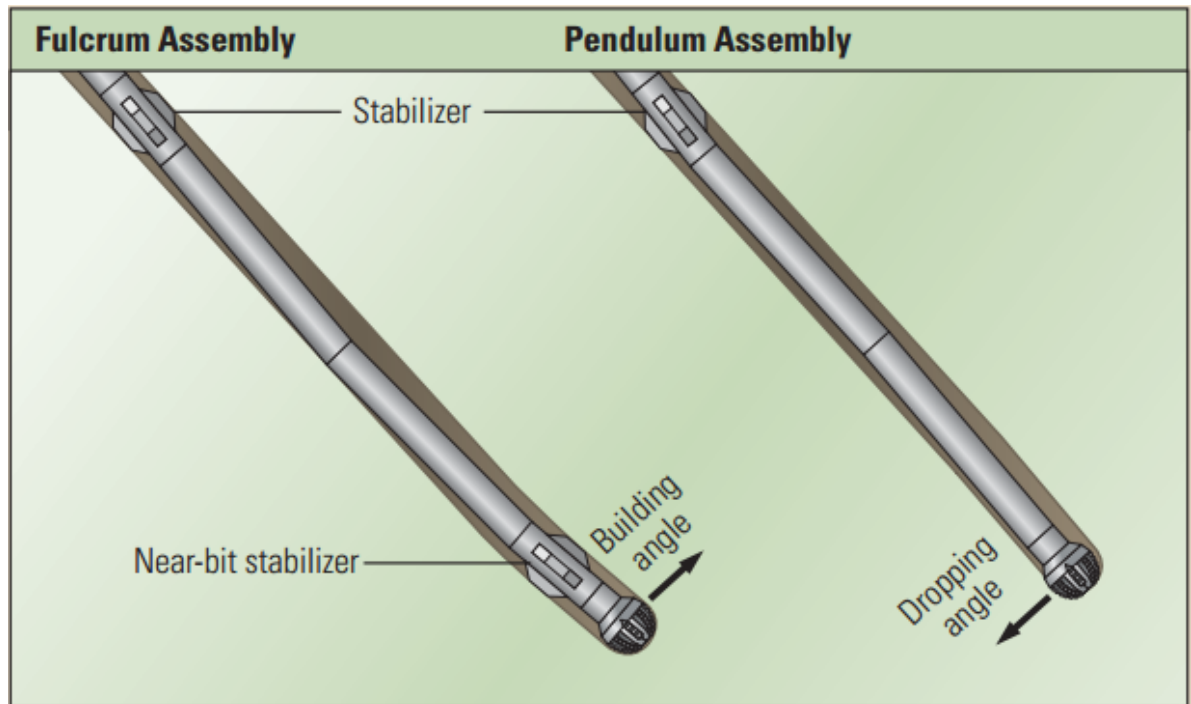
Figura 4. Arreglos en el BHA para operaciones direccionales.



Fuente: FELCZAK, Edwin, et al. The Best of Both Worlds – A Hybrid Rotary Steerable System, Schlumberger, 2012.

A continuación, se puede observar la trayectoria tomada en el hueco para construir y tumbar Angulo debido a arreglos con estabilizadores cercanos a la broca:

Figura 5. Arreglos para el incremento y reducción angular.



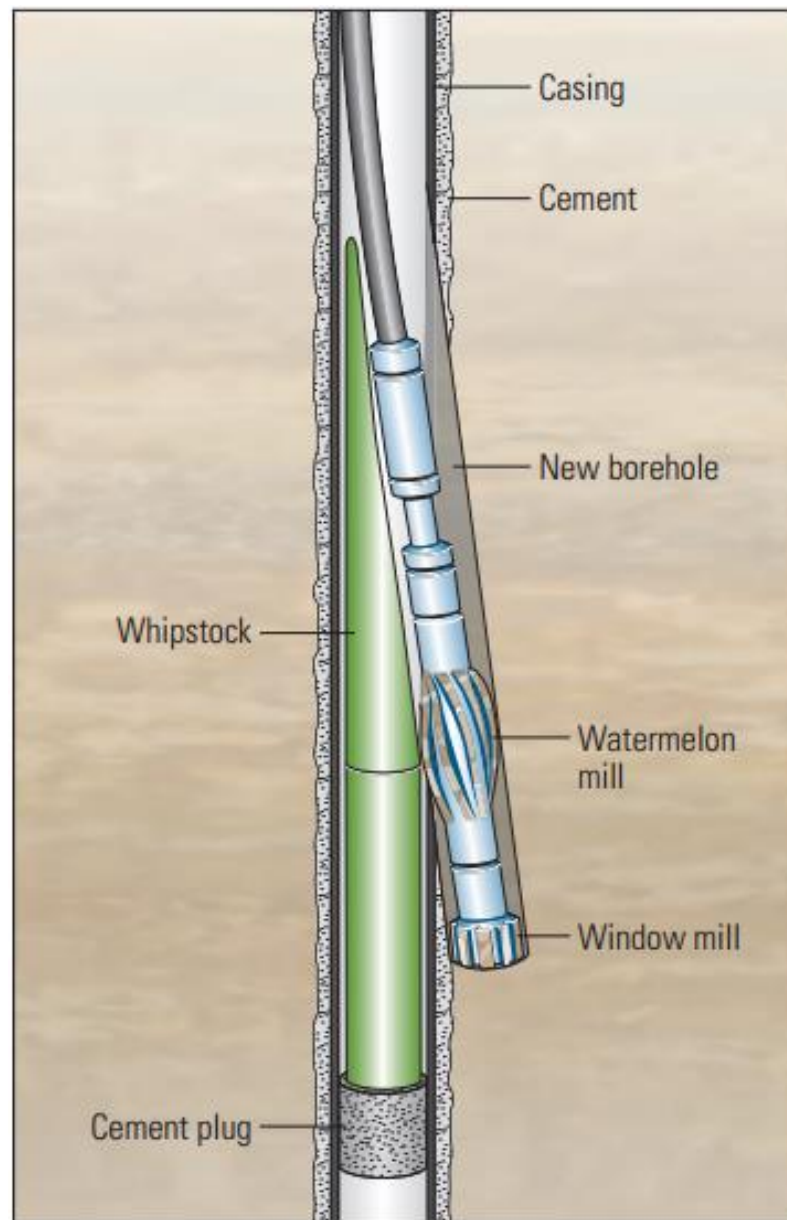
Fuente: MANTLE, Kate. The Art of Controlling Wellbore Trajectory, Schlumberger, 2014.

El otro método más Antiguo en perforación direccional data del uso de cucharas de perforación para direccionamiento de pozos en el caso de sidetracks u otras operaciones en las cuales se requerían un cambio de la trayectoria. Esta consiste en una cuña invertida cóncava en un extremo para sostener y guiar el ensamblaje previsto hacia una dirección dada⁵

⁵ LA COMUNIDAD PETROLERA, PerfoBlogger. Técnicas de Perforación Direccional: Cucharas, Motores y Operaciones. Disponible en:

www.lacomunidadpetrolera.com/2015/09/tecnicas-de-perforacion-direccional-cucharas-motores-y-operaciones.html.

Figura 6. Utilización de Cucharas para operaciones direccionales.



Fuente: FELCZAK, Edwin, et al. The Best of Both Worlds – A Hybrid Rotary Steerable System, Schlumberger, 2012.

1.1.2. Parámetros tenidos en cuenta en operaciones direccionales

Para llevar a cabo una operación direccional es necesario planear y definir el objetivo teniendo en cuenta las condiciones geológicas y operaciones del área donde se encuentra el yacimiento, se debe contar con la siguiente información antes de iniciar una operación direccional:

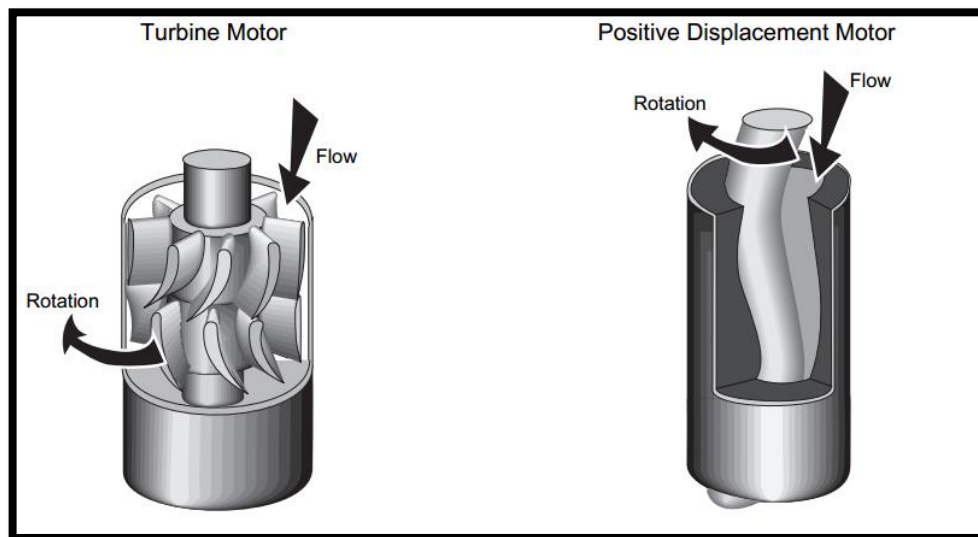
- Coordenadas de superficie (mesa rotaria)
- Coordenadas del objetivo (yacimiento)
- Perfil del pozo a crear (J, S, Horizontal)
- Tasa de construcción de ángulo
- Elevación de la mesa rotaria
- Características geológicas de la zona
- Espaciamiento entre pozos
- Datos de correlación de pozos vecinos
- Programa de Survey (inclinación y azimut del pozo con respecto a superficie)
- Herramientas MWD que serán corridas
- Frecuencia de toma de datos direccionales
- Plan de perforación general
- Reporte anticolidión (evitar colisionar con pozos vecinos)
- Torque y arrastre (evitar que la tubería sufra daños por esfuerzos)
- Especificaciones técnicas de la tubería y herramientas a correr
- Ensamblajes requeridos en fondo de pozo
- Tipo de lodo y peso de lodo a usar en las diferentes secciones
- Profundidades de asentamiento de revestimiento
- Arreglos utilizados en la sarta de perforación.

2. MOTORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Al comienzo de la utilización de los motores como alternativa de perforación direccional se utilizaron los que poseían turbinas y posteriormente técnicas de desplazamiento positivas similares a la bomba de cavidades progresivas en los sistemas de levantamiento artificial, los primeros generaban una curvatura fija de aproximadamente 0.5° por cada 100 ft, fueron desarrollados en la época del 60 con el objetivo de permitir el control del azimut e inclinación de hoyo complementando la falencia que poseían los arreglos del BHA con estabilizadores.

La tecnología utilizada actualmente son los motores de desplazamiento positivo los cuales constan de un rotor y estator a través de los cuales se bombea el fluido de perforación que hace girar la broca y evitando realizar varios viajes con la sarta para los diferentes ensamblajes de fondo a la hora de perforar direccionalmente, reduciendo los tiempos considerablemente.

Figura 7. Motores de turbina y desplazamiento positivo.



Fuente: SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. Directional Drilling Training Manual. Schlumberger, 1996.

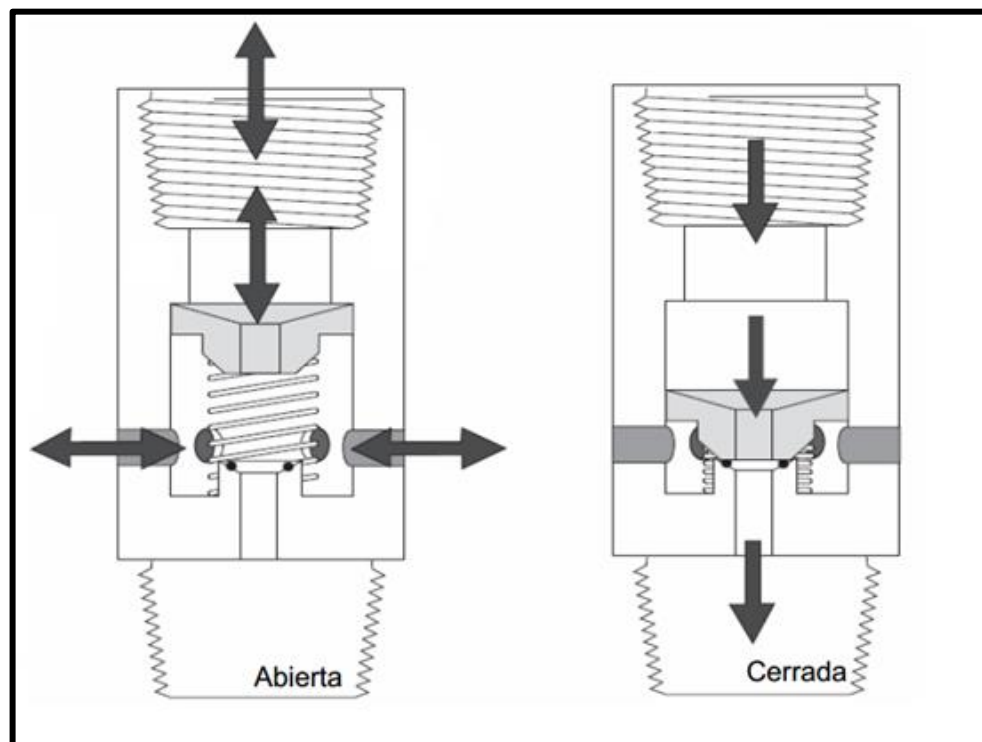
2.1.1. Top Sub

Es la parte superior del motor de desplazamiento positivo la cual permite la conexión con el resto de sarta de perforación.

2.1.2. Válvula de descarga

Se encuentra localizada en la parte superior del motor, esta válvula permite aislar o comunicar el ID de la sarta de perforación con el anular, permitiendo así llenar la sarta cuando se está corriendo dentro del pozo y drenarla cuando se está sacando, cuando las bombas en superficie son activadas la válvula se cierra y direcciona el fluido de perforación a través del motor.

Figura 8. Válvula de descarga de un PDM

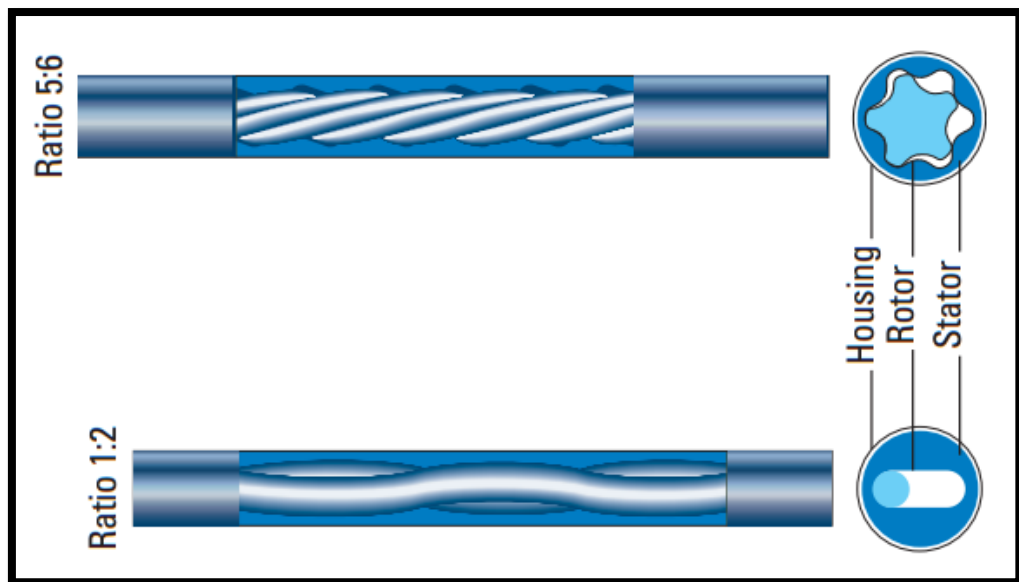


Fuente: SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. Directional Drilling Training Manual. Schlumberger, 1996.

2.1.3. Sección de potencia

Esta sección de los motores de desplazamiento positivo se encarga de convertir la energía hidráulica suministrada por el flujo de lodo en energía mecánica la cual permite la rotación de la broca. Está conformado por dos secciones: rotor y estator, cuando estos dos componentes trabajan en conjunto conforman un sello continuo a lo largo de sus puntos de contacto⁶.

Figura 9. partes de la sección de potencia.



Fuente: SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerPak Steerable Motor. Schlumberger, 2004.

⁶ TORO DOWNHOLE TOOLS. Manual de Motores de Perforación. EE.UU. Texas, 2010.

El rotor es una barra de metal de patrón helicoidal de lóbulos múltiples, esta barra metálica cuenta con un recubrimiento cromado para reducir el desgaste y corrosión, el estator posee un lóbulo más que el rotor⁷.

Cuando el rotor es instalado dentro del estator la combinación de sus formas helicoidales y lóbulos forman un sello al flujo entre las cavidades de los dos componentes, ocasionando que con el paso del fluido de perforación en la sección de potencia a través de las cavidades genere una caída de presión haciendo que el rotor gire dentro del estator provocando así la energía requerida para hacer girar la broca. La sección de potencia de los motores puede ser configurada de acuerdo a los parámetros requeridos durante la perforación dependiendo así de la dureza de la formación a perforar, tipo de broca utilizada, potencia de las bombas en superficie, entre otros.

Los rangos de los motores dependen de la velocidad y el torque (esfuerzo rotacional aplicado sobre un eje), la potencia mecánica se calcula de la siguiente manera⁸:

$$HP_{mecanica} = \frac{\tau * Sr}{5552}$$

Donde,

HP: potencia requerida por el motor [hp]

τ : Torque [ft-lbf]

Sr: Velocidad de rotación del eje

Otra característica importante de los PDM es la longitud de la sección de potencia la cual está relacionada con el número de etapas. Una etapa está definida como una rotación helicoidal completa del lóbulo del estator, de esta forma esta parte puede ser clasificada de acuerdo al número de etapas, un mayor número crearía

⁷ TORO DOWNHOLE TOOLS. Manual de Motores de Perforación. EE.UU. Texas, 2010.

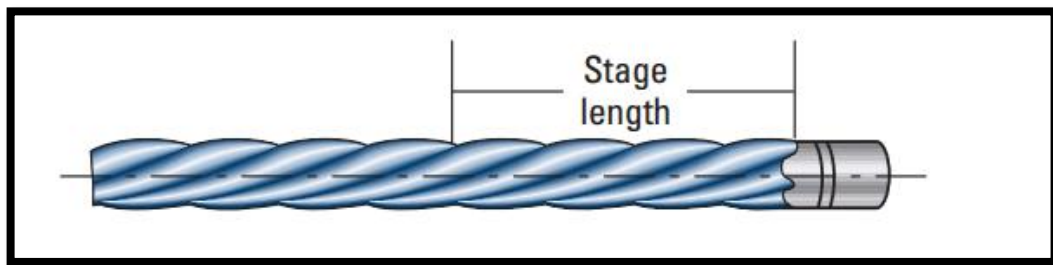
⁸ SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerPak Steerable Motor. Schlumberger, 2004.

una mayor presión diferencial, lo cual provee un mayor torque, la ecuación que describe la relación entre el número de etapas del rotor y estator es la siguiente⁹:

$$\text{Etapas del rotor} = \frac{n + 1}{n} * \text{Etapas del estator}$$

Donde, n: número de lóbulos del rotor

Figura 10. Etapa del rotor de un PDM



Fuente: SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerPak Steerable Motor. Schlumberger, 2004.

Los rangos de los motores dependen de la velocidad y torque (esfuerzo rotacional aplicados sobre un eje). Por ejemplo, una configuración entre el rotor y estator 1:2 significa que el motor es de alta velocidad y bajo torque, se deduce que será utilizado para formaciones blandas, en cambio un motor con configuración de 7:8 denotaría un alto torque y baja velocidad utilizado para formaciones más duras con respecto a la anterior configuración, de esto se puede concluir que en la medida en que esta relación de lóbulos incrementa, la velocidad decrece y el torque aumenta.

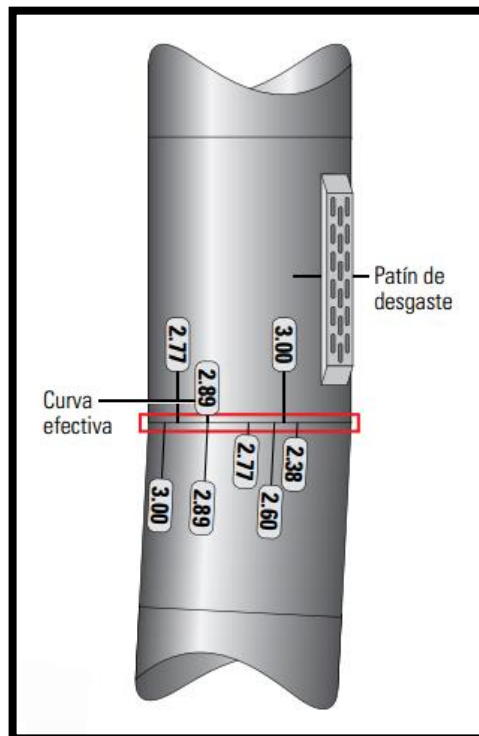
⁹ SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerPak Steerable Motor. Schlumberger, 2004.

2.1.4. Sección acodada

Es la encargada de generar el Angulo de perforación en la operación de deslizamiento, es un ensamblaje compuesto por una cubierta acodada que se ajusta mediante un disco selector fijo o cuadrante el cual gradúa el Angulo entre 0° a 3° con respecto al resto de la sarta, el sistema cuenta con su respectivo dispositivo de medición el cual monitorea la trayectoria cuando se perfora.

Este dispositivo tiene que ser ajustado en superficie de acuerdo a las necesidades de la operación y el Angulo requerido por cada 100 ft que varía de 0° a 3° como se aclaró anteriormente.

Figura 11. Sección acodada de un PDM



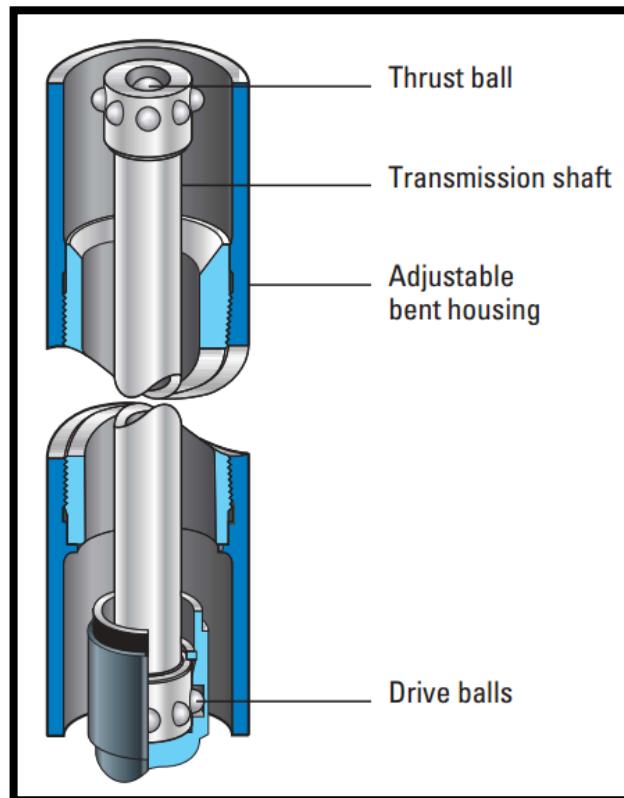
Fuente: DUPLANTIS, Steven. Perforación en el modo de deslizamiento con torsión, Schlumberger, 2016.

2.1.5. Sección de transmisión

El conjunto de transmisión se encuentra unido al extremo inferior de la sección acodada, este se encarga de transmitir la velocidad de rotación y el torque generado por la sección de potencia a la sección de rodamientos o bearing section, la cual se encarga de compensar el movimiento excéntrico del rotor y absorción del empuje descendente.

La potencia se transmite a través del eje que está equipado con una junta en cada extremo la cual permite absorber cualquier movimiento que pueda afectar la integridad de la herramienta, estas se encuentran debidamente selladas y llenas de material lubricante para extender su tiempo de vida útil.

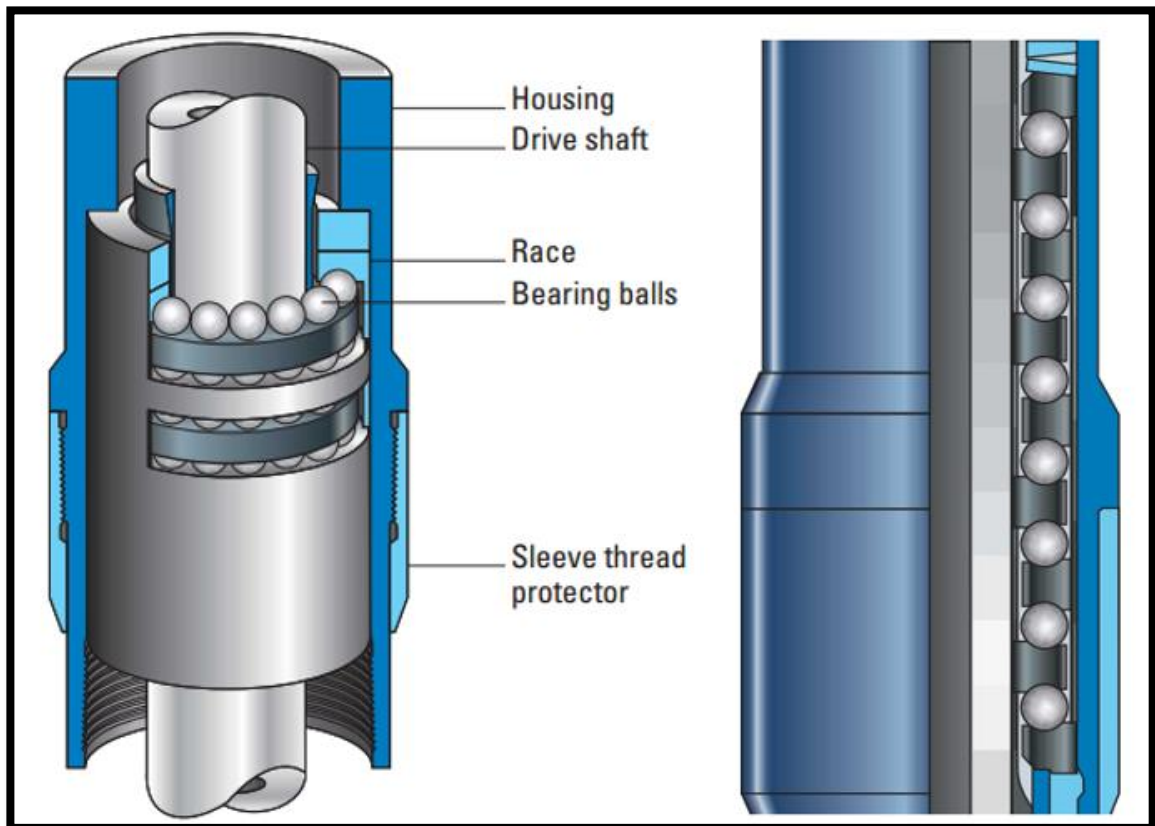
Figura 12. Eje de transmisión.



Fuente: SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerPak Steerable Motor. Schlumberger, 2004.

La sección de rodamientos constituye la mitad inferior del motor. Está compuesta de un eje que esta sostenido por una serie de rodamientos radiales y de empuje. La sección de rodamientos se encarga de controlar la energía mecánica suministrada por la sección de potencia al eje de transmisión, el eje transfiere la energía a la broca a través de la caja de la broca.

Figura 13. rodamientos radiales y de empuje



Fuente: SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerPak Steerable Motor. Schlumberger, 2004.

Los rodamientos son lubricados por el fluido de perforación y su desempeño depende de los parámetros de perforación, así como del peso sobre la broca (WOB), además de la tasa de circulación y presión diferencial.

Los rodamientos de empuje soportan la carga descendente resultante del peso sobre la broca, empuje hidrostático y peso propio de los componentes internos del motor, por otra parte, los radiales soportan las cargas laterales del eje de transmisión y ayudan a regular el caudal de fluido de perforación a través de las bolas de los rodamientos, solo una pequeña parte del fluido se desvía para lubricar estas.

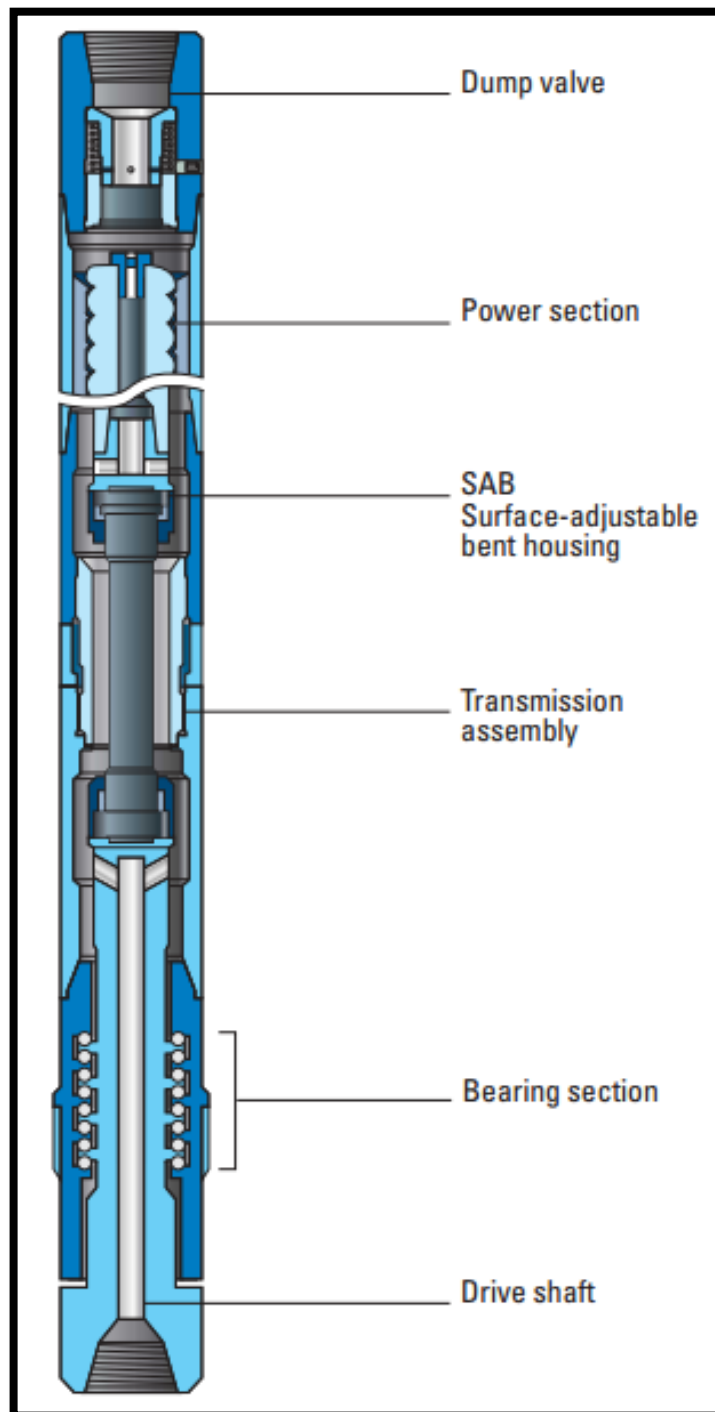
2.1.6. Estabilizadores

Los estabilizadores instalados en los PDM se encuentran ubicados cerca a la broca y por lo general tienen laminas o espirales, este diseño permite reducir la fricción durante la rotación del equipo disminuyendo el desgaste y resistencia mientras se desliza. Esto permite un aumento de la ROP.

2.1.7. Caja de la broca

La broca se conecta al motor mediante este acoplamiento, el cual tiene una mayor resistencia y durabilidad, la caja de la broca está integrada con el eje de transmisión permitiendo así el paso de la potencia requerida por la broca a este y generar la ROP determinada para perforar.

Figura 14. Vista seccionada de un motor PDM

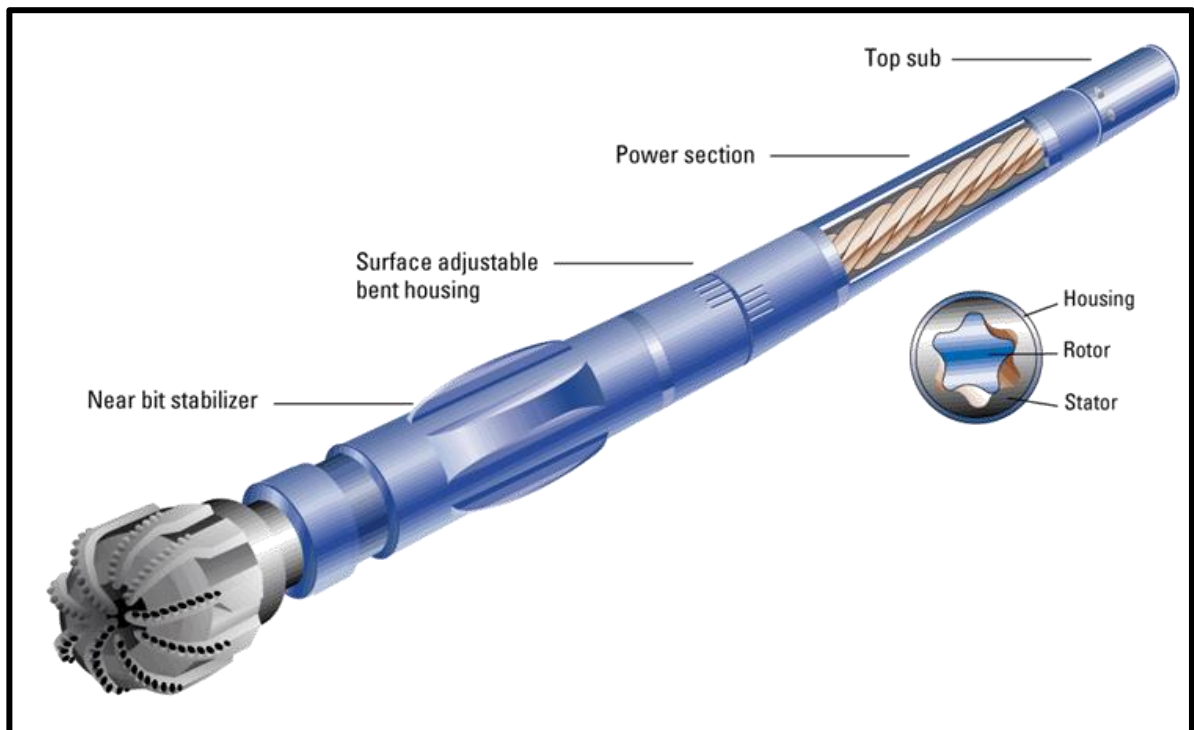


Fuente: SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerPak Steerable Motor. Schlumberger, 2004.

2.1.8. Funcionamiento de un PDM

El principio de funcionamiento de un motor de desplazamiento positivo parte de que a medida que se inyecta lodo en la columna de perforación (ID), el fluido se desplaza a través de las cavidades de la sección de potencia. La presión del fluido reacciona en contra de los lóbulos del rotor y las paredes del estator haciendo girar el rotor. El par de torsión se transmite entonces a través de la sección de acoplamiento, pasando por la sección de rodamientos y de allí a la broca mediante el eje de transmisión y caja de la broca.

Figura 15. BHA con motor PDM y broca.



Fuente: SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerDrive Level 2 Training Material. Intouch Support: Drilling & Measurements Learning Centers. Schlumberger 2017. All rights reserved.

Figura 16. Representación de sarta de perforación con PDM en hueco abierto.



Fuente: DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000.

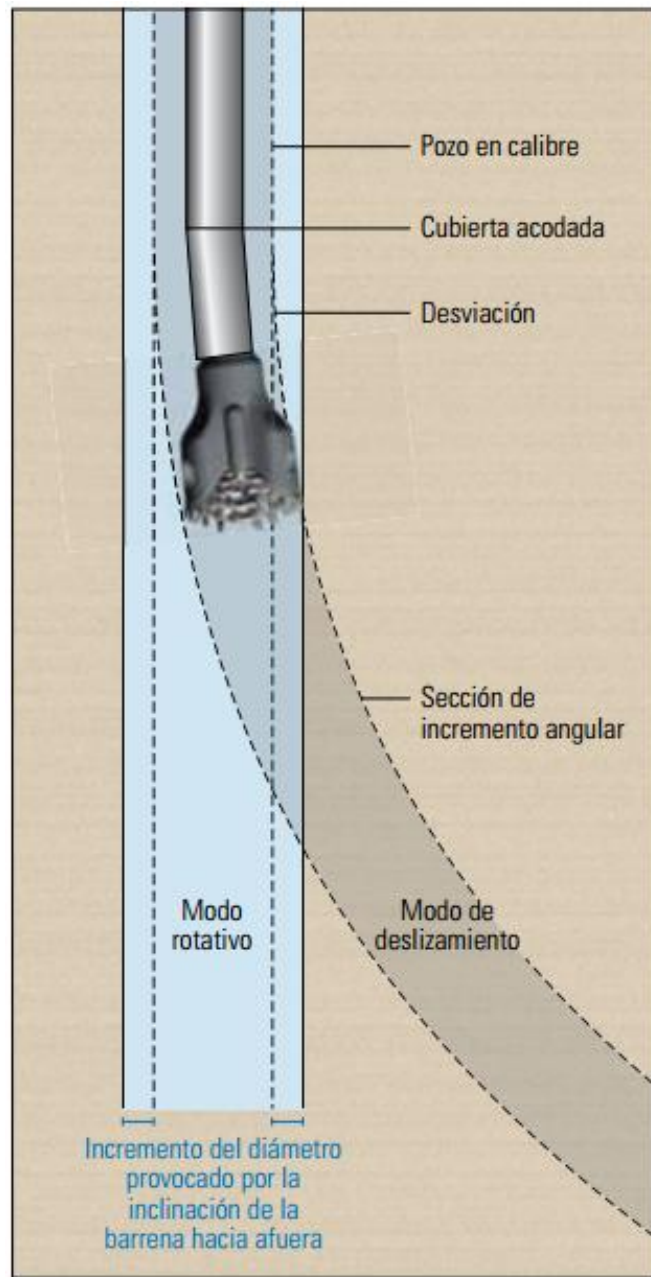
La perforación direccional con este tipo de motores se logra de dos modos: Rotación y deslizamiento.

Rotación: la totalidad de la sarta gira, tal cual como ocurre en una perforación convencional tendiendo a perforar hacia la dirección que tomaría el hueco originalmente sin dispositivos direccionales.

Deslizamiento: En este proceso se rota únicamente la broca y el motor de desplazamiento positivo, permaneciendo el resto de sarta inmóvil. De esta operación depende la desviación y control de la trayectoria del pozo, la configuración de la cubierta acodada permite la generación del ángulo junto al deslizamiento.

Mientras esta en la operación de rotación la broca avanza a través del hueco en un trayecto recto paralelo a la sarta de perforación la cual también rota. Dado que la cubierta acodada hace que la broca se incline unos grados con respecto al eje genera un pozo con un diámetro levemente mayor. Cuando se pasa al modo de deslizamiento rota solo la broca por ende la sección resultante en la operación de deslizamiento está en calibre paralelo al eje del BHA que se encuentra por debajo de la sección acodada, generando así un hueco de menor tamaño con respecto al creado cuando solamente se rota.

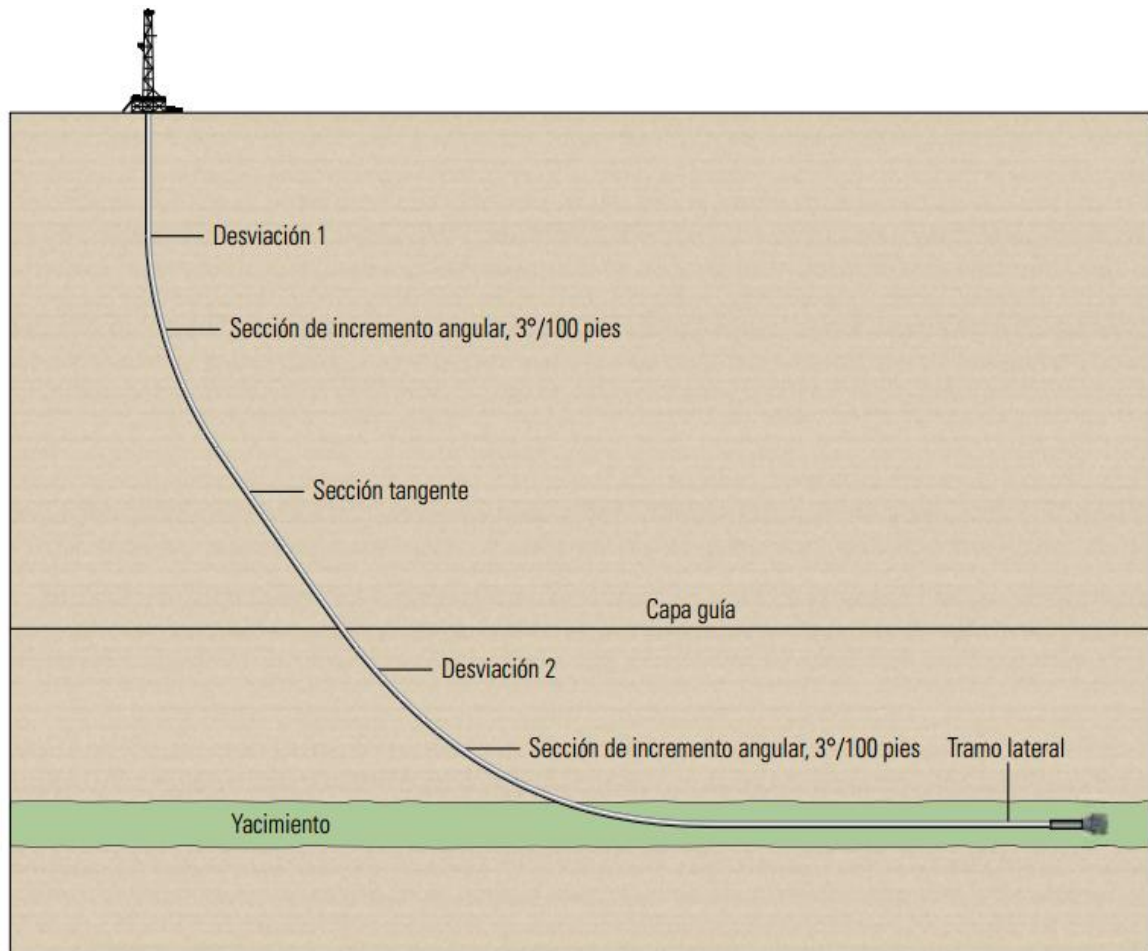
Figura 17. Trayectorias por rotación y deslizamiento.



Fuente: DUPLANTIS, Steven. Perforación en el modo de deslizamiento con torsión, Schlumberger, 2016.

Después de perforar verticalmente un pozo con rotación se llega a un punto especificado donde comienza la desviación y con esta la operación de deslizamiento. Una vez se alcanza el ángulo deseado, se puede perforar una sección tangente a la línea recta mediante rotación, mientras el BHA mantiene la inclinación y el azimut. El perforador recurre al modo de deslizamiento solo cuando la dirección de perforación se desvía de la trayectoria planificada, a continuación, se muestra un ejemplo de la trayectoria de perforación de un PDM.

Figura 18. Vista lateral de la trayectoria direccional generada por un PDM.

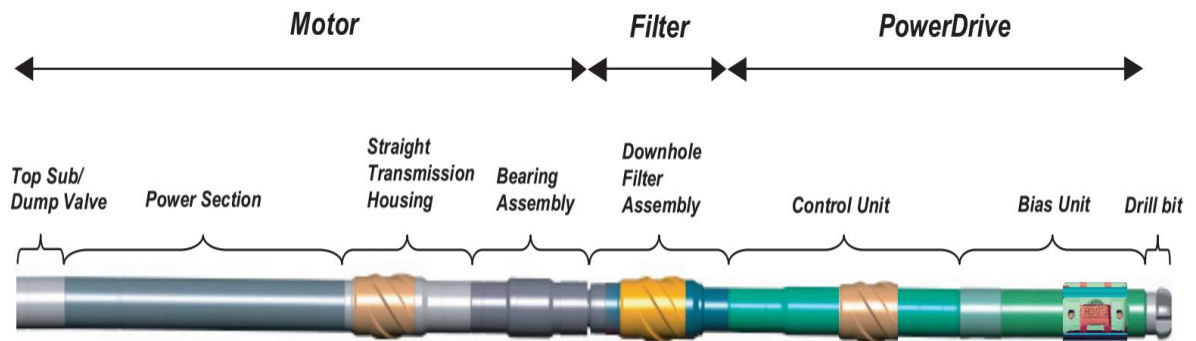


Fuente: DUPLANTIS, Steven. Perforación en el modo de deslizamiento con torsión, Schlumberger, 2016.

2.2. ROTARY STEERABLE SYSTEMS

La nueva tecnología en perforación direccional el Rotary Steerable System (RSS), por sus siglas en inglés es una herramienta que se encuentra a la vanguardia de las operaciones direccionales ya que permiten una operación con rotación continua de la columna de perforación apoyada con la ROP suministrada por el motor y controlando óptimamente la dirección de la broca gracias al sistema rotativo direccional, posee además un filtro ubicado en el ensamblaje del RSS el cual permite aumentar el tiempo de vida útil de la herramienta y evitar problemas durante la operación por elementos extraños o suciedad.

Figura 19. Ensamblaje de fondo para operaciones con RSS.



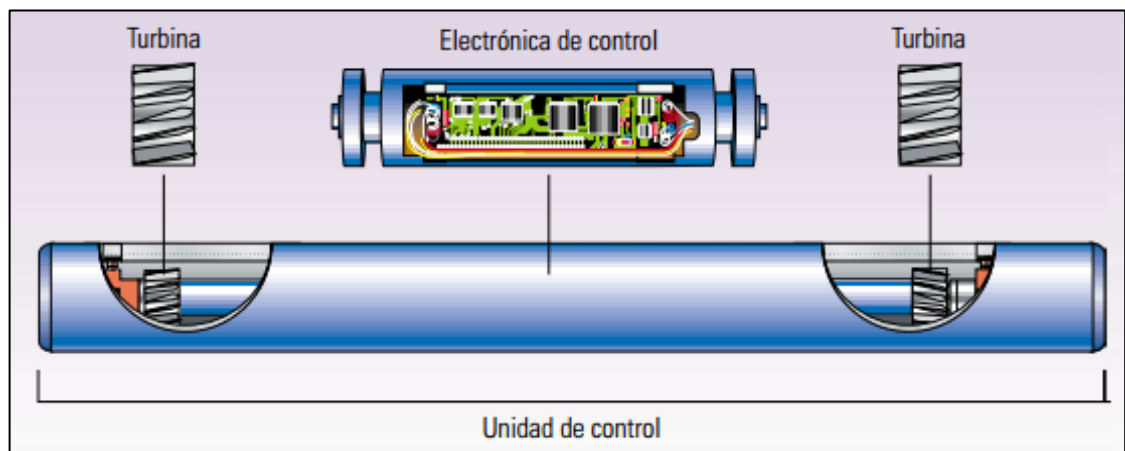
Fuente: SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerDrive Level 2 Training Material. Intouch Support: Drilling & Measurements Learning Centers. Schlumberger 2017. All rights reserved.

2.2.1. Unidad de control

La unidad de control mantiene la posición angular propia del eje de impulso relativa a la formación, esta se encuentra después del ensamblaje de filtro de fondo y está montada sobre rodamientos los cuales permiten que esta rote libremente alrededor

del eje de la sarta de perforación por medio de su sistema de activación¹⁰, la unidad de control permite además dirigir el RSS para que mantenga un ángulo de giro determinado, o ángulo de orientación de la herramienta con respecto a la formación perforada y a perforar. Los sensores internos proporcionan datos relativos a la inclinación y azimut de la broca, además de la posición angular del eje de impulso.

Figura 20. Unidad de control de un RSS.



Fuente: DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000.

Dentro de esta unidad se encuentran unas turbinas con rotación contraria una con respecto a otra, están montadas sobre los extremos de la unidad, estas desarrollan el toque estabilizador necesario por medio de unos imanes permanentes de gran potencia, cuya acción se suma a bobinas de torsión las cuales controlan la resistencia del torque generado por las turbinas según la cantidad de electricidad suministrada. La turbina superior se utiliza para aplicar torque en la misma dirección

¹⁰ DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000

de rotación de la columna de perforación, mientras que la inferior gira en dirección inversa.

La unidad de control se puede reconfigurar en superficie de acuerdo con las necesidades de la operación direccional.

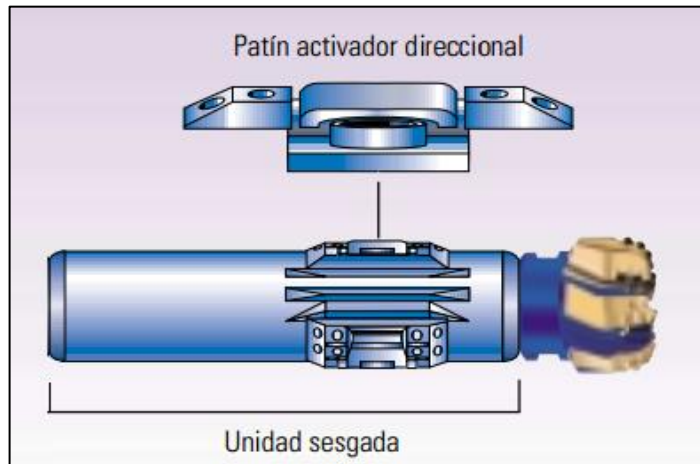
Esta unidad puede ser evaluada conjuntamente con herramientas MWD y sensores adicionales instalados en la misma, la información es transmitida a superficie mediante telemetría utilizando pulsos de presión en el sistema de lodo a partir patrones de amplitud o frecuencias moduladas, esto también se aplica para transmitir nuevas instrucciones en la operación al RSS. La unidad de control además ayuda a diagnosticar problemas durante la perforación, y junto a los registros MWD, registros de lodo y de la formación, resultan de gran utilidad para operaciones futuras.

2.2.2. Unidad de desvío (bias unit)

Este componente del RSS es el más cercano a la broca, se encarga de aplicar una fuerza sobre una dirección específica para controlar la trayectoria mientras toda la columna gira, esta sección es configurada de acuerdo con las instrucciones de la unidad de control.

La unidad de desvío posee tres PADs o aletas externas que son activados por el flujo de lodo a través de una válvula. La válvula utiliza la diferencia de presión del lodo existente entre el interior y exterior de la unidad de desvío para accionar los PADs los actuales rotan continuamente y son activados de acuerdo con la trayectoria especificada.

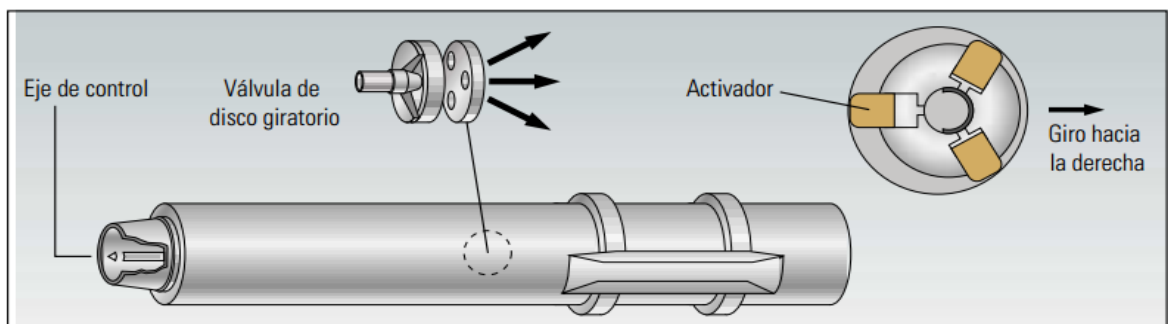
Figura 21. Unidad de desvío (unidad sesgada) de un RSS.



Fuente: DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000.

La válvula de tres vías de disco rotativo acciona a los PADs en forma sucesiva a la cámara del pistón de cada PAD¹¹, a medida que la unidad de desvío rota los PADs son empujados con el punto del pozo deseado para formar trayectoria, el cual es el punto opuesto a la trayectoria deseada.

Figura 22. Mecanismo de activación de los PADs de un RSS.

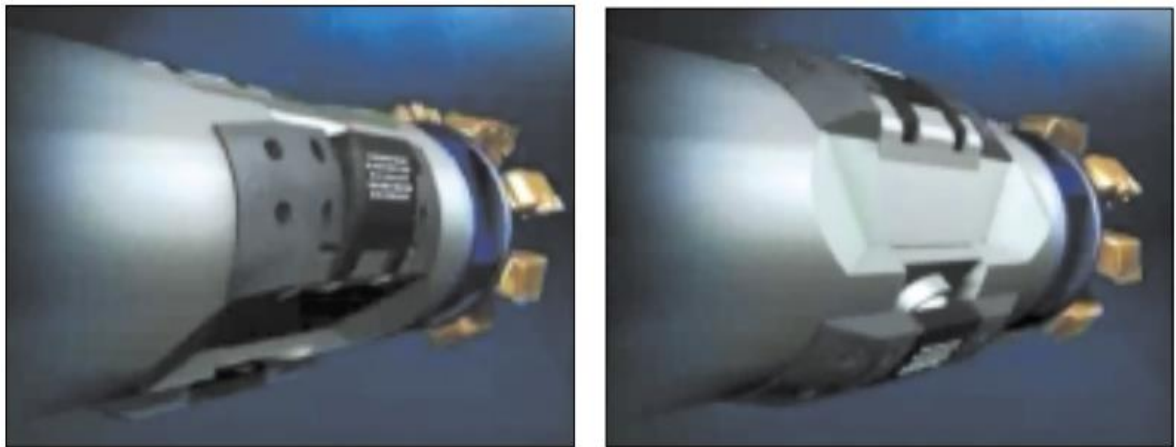


¹¹ DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000

Fuente: DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000.

Cuando el PAD pasa por el punto de empuje deseado, la válvula rotativa corta el suministro del lodo y el mismo se escapa a través de una compuerta para su respectiva filtración. Si el ángulo de trayectoria específico no varía no se necesitaría modificar la dirección el sistema procediendo a operar en modo neutral, donde cada PAD se extiende uno a la vez de manera que estos sistemas aplican fuerzas en todas las direcciones cancelando los movimientos entre sí.

Figura 23. PADs de la unidad de desvío, sin activar y activados.



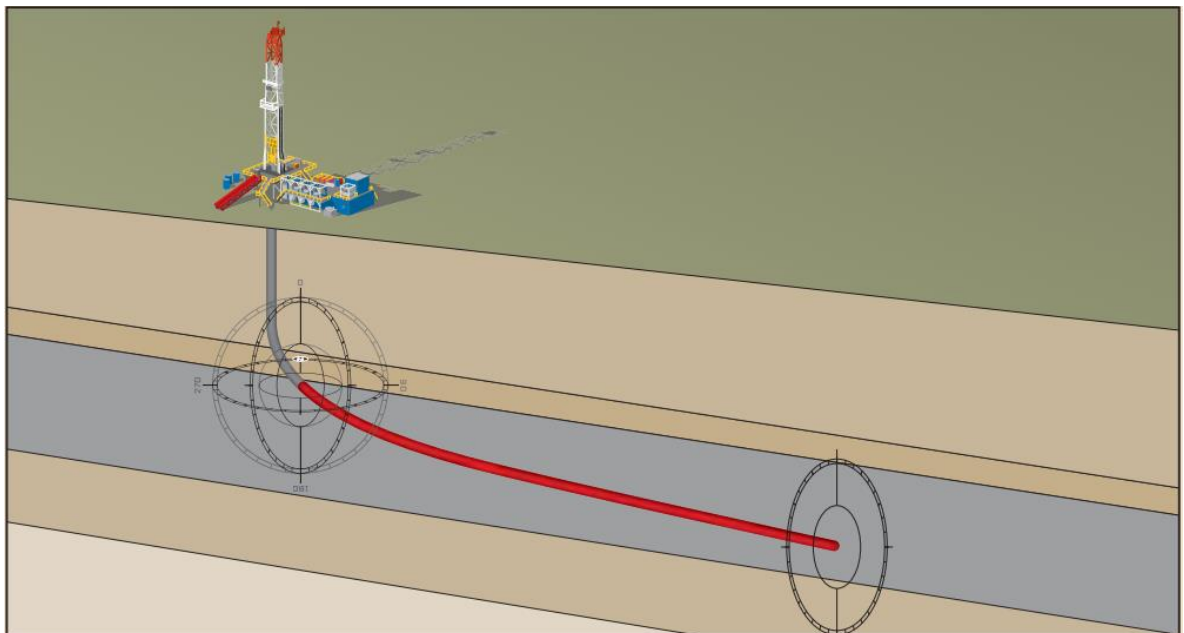
Fuente: DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000.

2.2.3. Funcionamiento de un RSS

Los Rotary Steerable System son herramientas que permiten perforar direccionalmente en forma continua, lo que elimina la necesidad de deslizar un

motor direccional para desviar la trayectoria. Se apoyan de la potencia suministrada de un motor convencional de desplazamiento positivo que junto a sus unidades internas propias del RSS permiten ciertas prestaciones de gran utilidad.

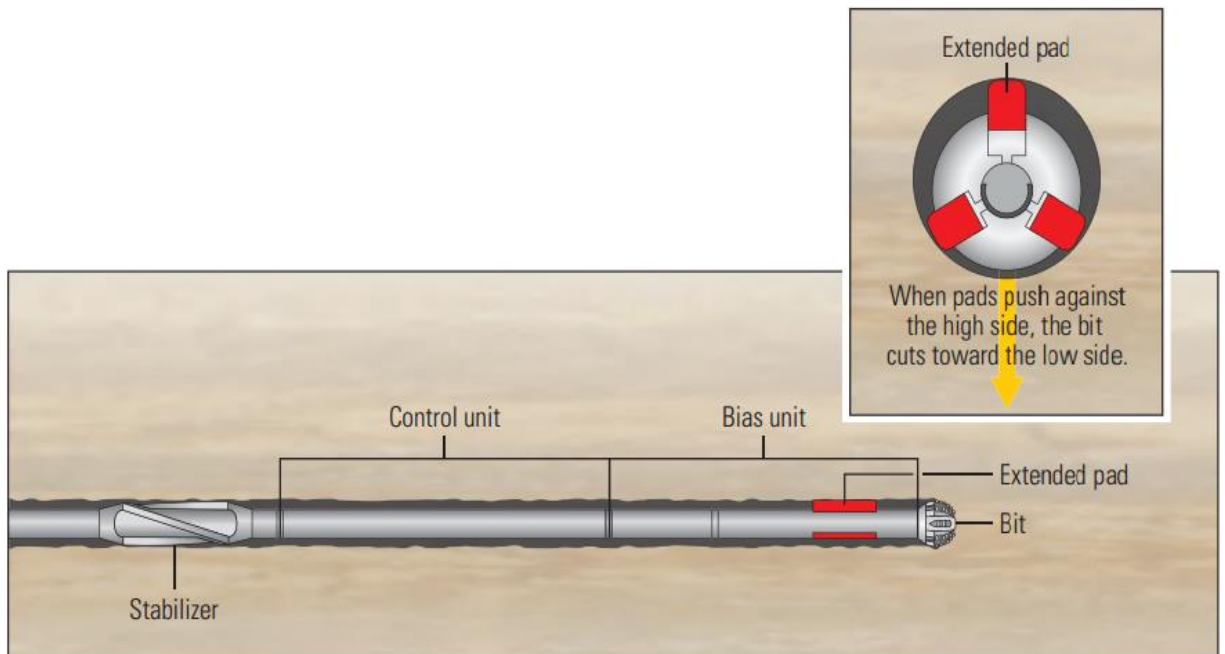
Figura 24. Optimo control de la trayectoria, inclinación, azimut generado por un RSS



Fuente: FELCZAK, Edwin, et al. The Best of Both Worlds – A Hybrid Rotary Steerable System, Schlumberger, 2012.

El suministro de energía se da a partir del motor y las turbinas los cuales giran junto con el resto de la sarta para brindar la ROP adecuada a la broca, el sistema de control permite una óptima posición en la trayectoria planeada como también de la inclinación y el azimut sin necesidad de ajustar una cubierta acodada en superficie. Las instrucciones son transmitidas a la unidad de desvío la cual posiciona sus PADs empujando contra la formación en dirección contraria a la trayectoria deseada.

Figura 25. Funcionamiento de un RSS.



Fuente: FELCZAK, Edwin, et al. The Best of Both Worlds – A Hybrid Rotary Steerable System, Schlumberger, 2012.

2.2.4. Beneficios del uso de RSS

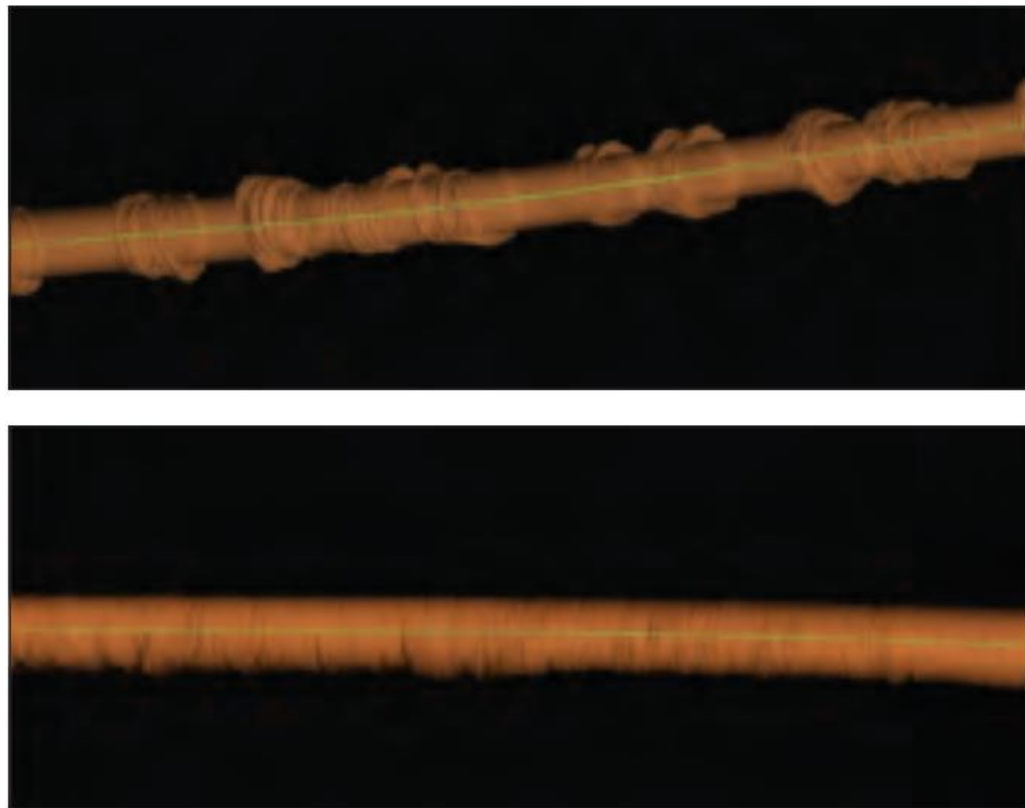
Si bien los PDM han funcionado de buena manera, se requiere una extrema precisión para orientar correctamente la sección curva del motor (sección acodada) en las operaciones por deslizamiento, además de otros problemas tales como aprisionamientos de la sección de la sarta que no está rotando, ya que esta se apoya en un extremo del hoyo lo cual produce una deficiente remoción de recortes lo cual podría formar un colchón de estos sobre el lado al cual esta acostada la tubería, generando pérdida de torque al rotar, específicamente en pozos de alta inclinación.

Además, la operación por deslizamiento disminuye la potencia disponible ya que solo se utiliza la potencia generada por el motor, lo cual sumado a la fricción de

deslizamiento disminuye la potencia disponible para hacer rotar la broca lo cual en operaciones de gran alcance las fuerzas de fricción durante el deslizamiento llegan a tal punto que el peso axial resulta insuficiente para hacer frente al arrastre de la tubería de perforación contra el hoyo, haciendo imposible continuar la operación.

Operaciones posteriores a la perforación pueden verse afectadas también debido a las patas de perros y ondulaciones generadas por la variación entre rotación y deslizamiento aumentando la tortuosidad del hueco, lo cual provoca que aumente la fricción aparente durante la perforación.

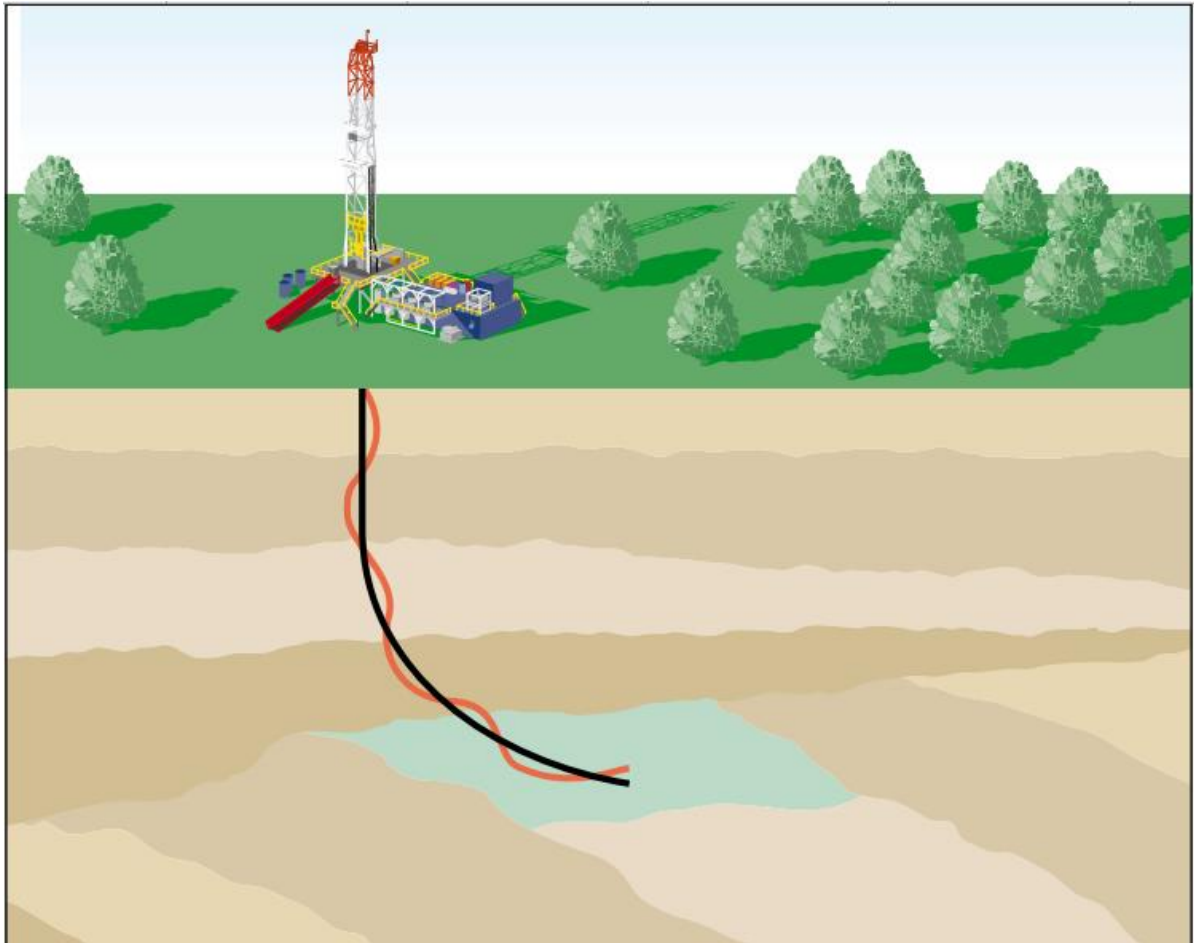
Figura 26. Espiralamiento al usar PDM (superior), RSS (inferior).



Fuente: FELCZAK, Edwin, et al. The Best of Both Worlds – A Hybrid Rotary Steerable System, Schlumberger, 2012.

La utilización de RSS genera una optimización de la trayectoria, mayor calidad del hueco, aumento considerable de ROP. En cambio, la perforación direccional en los métodos de deslizamiento y rotación generada por los PDM da como resultado una trayectoria irregular y mar larga con respecto a la planeada generando durante la perforación patas de perro que pueden afectar la posibilidad de colocar el revestimiento en la profundidad indicada.

Figura 27. Ejemplo teórico de la Trayectoria con PDM (naranja) vs Trayectoria con RSS (negra).



Fuente: DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000.

3. PARAMETROS DE EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES DE PERFORACION DIRECCIONAL

3.1. PARAMETROS DE EVALUACION

Ya teniendo claros los principios de perforación direccional, motores PDM y RSS con cada una de sus componentes principales se establecerá a continuación los factores por los cuales se va a evaluar el desempeño de los motores para la sección de 12.25 pulgadas del campo de análisis.

3.1.1. Desempeño perforando

Para las tecnologías PDM y RSS se tendrán en cuenta los siguientes parámetros.

Parámetros analizados:

- Pies perforados rotando [ft]
- Pies perforados deslizando [ft]
- Pies perforados en la sección de 12.25 pulgadas [ft]
- Máximo ángulo durante la operación [°]
- Tiempo Rotando [h]
- Tiempo deslizando [h]
- Tiempo perforando la sección [h]
- Tasa de perforación rotando [ft/h]
- Tasa de perforación deslizamiento [ft/h]
- Tasa de perforación promedio [ft/h]

Observación: para el tiempo perforando gastado en los PDM y RSS se hará el estudio adicional estandarizando esta medida por cada 1000 pies perforados.

$$\text{tiempo perforando } 1000 \text{ ft [h]} = \frac{\text{tiempo perforando [h]}}{\text{pies perforados [ft]}} * 1000 \text{ [ft]}$$

Esto se realiza con el fin de tener un patrón de evaluación único para los pozos con respecto al tiempo de perforación gastado en la sección de 12.25 pulgadas.

3.1.2. Tiempos de viaje desde la profundidad final de la sección (TD).

Para este ítem se analizarán los siguientes parámetros:

- Tiempo exclusivo de viajes y circulación desde la profundidad final de la sección de 12.25 pulgadas hasta el zapato del revestimiento ubicado aproximadamente a 1000 pies.

Observación: para los tiempos de viaje de los PDM y RSS se hará el estudio adicional estandarizando esta medida por cada 1000 ft.

$$\text{Tiempos de viajes por } 1000 \text{ ft [h]} = \frac{\text{Tiempos de viaje [h]}}{\text{pies perforados [ft]}} * 1000 \text{ [ft]}$$

3.1.3. Corrida de revestimiento

Se analizará el siguiente punto para corrida de revestimiento:

- Tiempo gastado bajando revestimiento hasta la profundidad de asentamiento del zapato.

Observación: para los tiempos de corrida de revestimiento después de usar PDM y RSS se hará el estudio adicional estandarizando esta medida por cada 1000 ft.

$$\text{tiempo corriendo csg por } 1000 \text{ ft [h]} = \frac{\text{tiempo corriendo csg [h]}}{\text{pies perforados [ft]}} * 1000 \text{ [ft]}$$

3.2. Escenarios de evaluación para tiempos de viajes y circulación desde la profundidad final de la sección.

El parámetro de evaluación correspondiente a los tiempos de viaje y circulación desde la profundidad final de la sección hasta hueco revestido, será analizado teniendo en cuenta los siguientes escenarios:

3.2.1. Tiempo Global de actividades

En este escenario serán tenidas en cuenta todo tipo de actividades adicionales a la perforación, viajes y corrida de revestimiento para la sección de 12.25 pulgadas tales como:

- Empaquetamientos
- Pegas diferenciales
- Pegas mecánicas
- Ojos de llave
- Pegas geométricas
- Colapso de tubería
- Torbellino en la tubería debido a recortes
- Todas las circulaciones debido a actividades ajenas a la perforación
- Tormentas eléctricas en la locación
- Simulacros de evacuación
- Mantenimiento de equipos en superficie, entre otros.

3.2.2. Discriminación de ciertas actividades

Serán discriminados todos los tiempos debido a los acontecimientos mencionados en el anterior punto, por ende, solo serán tenidas en cuenta las siguientes actividades:

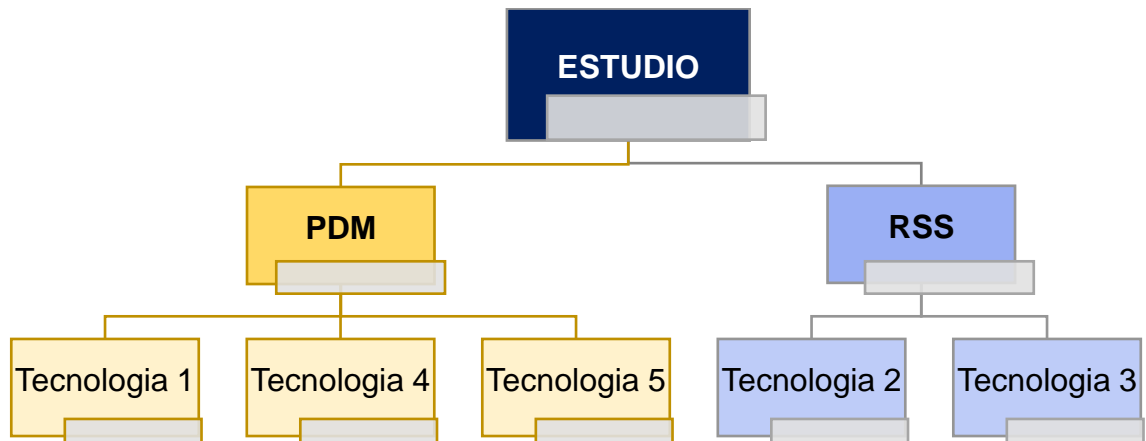
- Tiempos exclusivos a viajes y circulación desde la profundidad final para la sección perforada a hueco revestido ubicado aproximadamente a 1000 pies.

3.3. Metodología de análisis

A partir de los datos suministrados por la compañía se realizará el análisis de acuerdo con los puntos anteriores, se tendrán cinco tipos de tecnologías para el estudio entre las cuales hay PDM y RSS

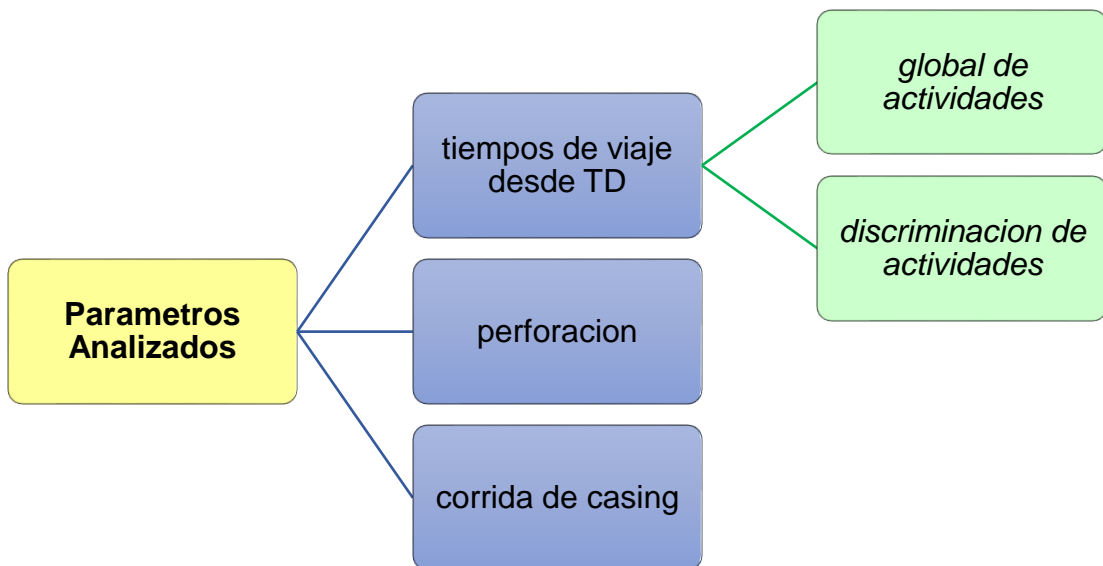
3.3.1. Tecnologías del análisis

Figura 28. Tecnologías por analizar.



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 29. Parámetros analizados.

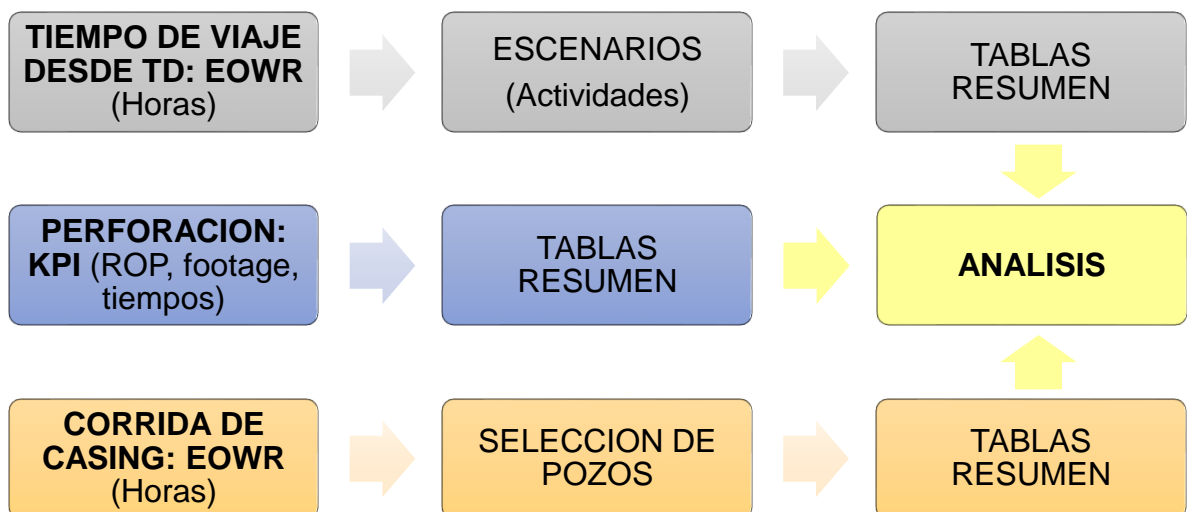


Fuente: Elaboración propia del autor.

Para el desarrollo del estudio se partirá de dos fuentes de datos suministradas por la empresa:

- **Reportes diarios de pozo** (por sus siglas en inglés: end of well report, **EOWR**), para las actividades de viajes y circulación desde profundidad final de la sección (TD) a hueco revestido y corrida de casing, los cuales permiten tener una idea de los tiempos gastados en estos tipos de actividades durante la operación de cada pozo.
- **Indicador clave de rendimiento** (por sus siglas en inglés: Key performance indicator, **KPI**), para las actividades de perforación, este indicador permite la compilación de datos importantes tales como la tasa de perforación, pies perforados, ángulo máximo alcanzado durante la actividad, tiempos tanto en rotación como en deslizamiento y de perforación promedio, entre otros.

Figura 30. Metodología para el desarrollo del análisis operacional.



Fuente: Elaboración propia del autor.

3.3.2. Operaciones de perforación y viaje

Se analizarán un total de 63 pozos para los parámetros de perforación y tiempos de viaje desde la profundidad final de la sección perforada hasta el revestimiento de 6.625 pulgadas, distribuidos de la siguiente forma:

Tabla 1. Numero de pozos para el análisis por tecnología en operaciones de perforación y viajes desde la profundidad final de la sección hasta hueco revestido.

MOTOR	# de pozos
Tecnología 1	12
Tecnología 2	15
Tecnología 3	16
Tecnología 4	17
Tecnología 5	3
TOTAL	63

Fuente: Elaboración propia del autor.

3.3.3. Operaciones de corrida de revestimiento

Por otra parte, para la operación de corrida de revestimiento se analizará un total de 51 pozos distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 2. Numero de pozos para el análisis por tecnología en operaciones de corrida de revestimiento

MOTOR	# de pozos
Tecnología 1	10
Tecnología 2	10
Tecnología 3	13
Tecnología 4	16
Tecnología 5	2
TOTAL	51

Fuente: Elaboración propia del autor.

Cada tecnología tendrá su análisis individual a partir de los parámetros y escenarios planteados al comienzo del capítulo y finalizando con un estudio general de acuerdo a los datos promedios entre los pozos de cada uno de los cinco motores teniendo en cuenta los dos escenarios planteados, en resumen, dos análisis generales uno para cada escenario. Finalizando con la recomendación de los escenarios de aplicación idóneos de cada tecnología acorde a los resultados a obtener.

3.3.4. Análisis de costos

Para este punto se solicitará el precio de cada tecnología por unidad de referencia utilizada para el cobro en el campo de estudio, además del costo por la utilización del taladro, se estandarizará la medida de acuerdo al costo por 1000 pies de operación de acuerdo a lo siguiente:

Costo por la corrida de tecnología:

$$\text{Costo Motor [USD]} = \text{Costo Motor} \frac{[\text{USD}]}{[\text{h}]} * \text{tiempo en operacion del motor [h]}$$

$$\text{Costo Taladro [USD]} = \text{Costo Taladro} \frac{[\text{USD}]}{[\text{h}]} * \text{tiempo bajo mesa rotaria [h]}$$

$$\text{Costo total [USD]} = \text{Costo del Motor [USD]} + \text{Costo del Taladro [USD]}$$

$$\text{Costo por 1000 ft de operacion} \left[\frac{\text{USD}}{1000 \text{ ft}} \right] = \frac{\text{Costo total [USD]}}{\text{pies perforados [ft]}} * 1000 [\text{ft}]$$

El objetivo de este análisis de costos es identificar cuáles son las tecnologías más viables económicamente hablando en torno a los tiempos de operación gastados.

4. ANALISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES DE PERFORACION DIRECCIONAL CORRIDOS

4.1. Tecnología 1 con PDM

4.1.1. Análisis del desempeño para la perforación

Tabla 3. Desempeño perforando Tecnología 1 con PDM.

TECNOLOGIA 1 - DESEMPEÑO PERFORANDO											
Nombre del pozo & promedio aritmético	GENERAL					DESLIZANDO			ROTANDO		
	Pies perforados [ft]	Angulo máximo [grados]	Tiempo perforando [h]	Tasa perforación [ft/h]	Tiempo perforando cada 1000 ft [h]	Pies perforados [ft]	Tiempo deslizando [h]	Tasa de perforación [ft/h]	Pies perforados [ft]	Tiempo rotando [h]	Tasa de perforación [ft/h]
Pozo 1	5722.0	62.0	45.7	125.1	8.0	0.0	0.0	0.0	5722.0	45.7	125.1
Pozo 2	6282.3	64.0	83.0	62.4	13.2	318.0	31.0	10.3	5963.3	52.1	114.6
Pozo 3	6530.3	42.0	82.1	51.6	12.6	132.5	7.7	17.3	6397.8	74.5	85.9
Pozo 4	6781.3	49.3	102.4	66.3	15.1	0.0	0.0	0.0	6781.3	102.2	66.3
Pozo 5	4393.2	53.6	57.0	59.3	13.0	207.0	17.9	11.6	4186.2	39.1	107.1
Pozo 6	5909.0	57.5	81.5	64.2	13.8	908.0	18.6	48.8	5001.0	62.9	79.5
Pozo 7	6168.0	33.2	62.9	98.0	10.2	0.0	0.0	0.0	6168.0	62.9	98.0
Pozo 8	5258.3	46.0	62.9	61.9	12.0	229.0	12.8	17.9	5312.3	50.2	105.9
Pozo 9	6346.3	49.0	64.4	64.4	10.1	118.0	12.1	9.8	6228.3	52.3	119.0
Pozo 10	6716.3	51.0	51.2	131.1	7.6	0.0	0.0	0.0	6716.3	51.2	131.1
Pozo 11	5734.3	50.5	54.9	70.6	9.6	128.0	11.9	10.8	5606.3	43.0	130.5
Pozo 12	5799.3	65.0	79.6	45.4	13.7	86.0	7.3	11.8	5713.3	72.3	79.0
Prom.	5970.1	51.9	69.0	75.0	11.6	177.2	9.9	11.5	5816.3	59.0	103.5

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.1.2. Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación

Tabla 4. Desempeño viajando tecnología 1 con PDM

TECNOLOGIA 1 - DESEMPEÑO VIAJANDO				
Nombre del pozo & promedio aritmético	GLOBAL DE ACTIVIDADES		DISCRIMINADO	
	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]
Pozo 1	22.0	3.8	22.0	3.8
Pozo 2	44.5	7.1	44.5	7.1
Pozo 3	23.5	3.6	23.5	3.6
Pozo 4	16.5	2.4	16.5	2.4
Pozo 5	35.0	8.0	35.0	8.0
Pozo 6	57.5	9.7	57.5	9.7
Pozo 7	12.0	1.9	12.0	1.9
Pozo 8	17.0	3.2	17.0	3.2
Pozo 9	15.5	2.4	15.5	2.4
Pozo 10	74.5	11.1	74.5	11.1
Pozo 11	22.5	3.9	22.5	3.9
Pozo 12	16.0	2.8	16.0	2.8
Prom.	29.7	5.0	29.7	5.0

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.1.3. Análisis de desempeño para corrida de revestimiento.

Tabla 5. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 1 con PDM.

TECNOLOGIA 1 - DESEMPEÑO CORRIENDO REVESTIMIENTO		
Nombre del pozo & promedio aritmético	Tiempo corriendo revestimiento hasta profundidad indicada [h]	Tiempo corriendo revestimiento por cada 1000 ft [h]
Pozo 1	24.0	4.2
Pozo 2	33.0	5.3
Pozo 3	29.5	4.5
Pozo 4	32.0	4.7
Pozo 5	42.0	7.1
Pozo 6	23.5	4.5
Pozo 7	30.5	4.8
Pozo 8	49.5	7.4
Pozo 9	25.5	4.4
Pozo 10	31.0	5.3
Prom.	32.1	5.2

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.2. Tecnología 2 con RSS

4.2.1. Análisis del desempeño para perforación

Tabla 6. Desempeño perforando tecnología 2 con RSS.

TECNOLOGIA 2 - DESEMPEÑO PERFORANDO											
Nombre del pozo & promedio aritmético	GENERAL					DESLIZANDO			ROTANDO		
	Pies perforados [ft]	Angulo máximo [arados]	Tiempo perforando [h]	Tasa perforación [ft/h]	Tiempo perforando cada 1000 ft [h]	Pies perforados [ft]	Tiempo deslizando [h]	Tasa de perforación [ft/h]	Pies perforados [ft]	Tiempo rotando [h]	Tasa de perforación [ft/h]
Pozo 13	6139.0	68.2	27.9	109.9	4.5	0	0	0	6139	27.92	219.9
Pozo 14	5573.0	28.0	51.3	108.7	9.2	0	0	0	5573	51.29	108.7
Pozo 15	5681.3	44.9	39.1	145.4	6.9	0	0	0	5681.3	39.08	145.4
Pozo 16	5579.3	50.1	41.2	135.3	7.4	0	0	0	5579.3	41.23	135.3
Pozo 17	5812.0	41.2	40.7	142.9	7.0	0	0	0	5812	40.68	142.9
Pozo 18	6403.3	40.2	41.8	153.1	6.5	0	0	0	6403.3	41.82	153.1
Pozo 19	5713.3	61.8	43.2	132.3	7.6	0	0	0	5713.3	43.18	132.3
Pozo 20	6122.3	53.5	36.7	166.9	6.0	0	0	0	6122.3	36.69	166.9
Pozo 21	7011.3	2.0	68.5	102.3	9.8	0	0	0	7011.3	68.54	102.3
Pozo 22	5520.3	0.5	42.9	128.8	7.8	0	0	0	5520.3	42.87	128.8
Pozo 23	5852.3	56.9	41.62	140.6	7.11	0	0	0	5852.3	41.62	140.6
Pozo 24	5659.3	41.4	32.4	174.6	5.7	0	0	0	5659.3	32.41	174.6
Pozo 25	5547.3	37.2	28.83	192.4	5.2	0	0	0	5547.3	28.83	192.4
Pozo 26	7299.4	3.0	67.1	108.7	9.2	0	0	0	7299.4	67.14	108.7
Pozo 27	6174.3	0	60.75	101.6	9.84	0	0	0	6174.3	60.75	101.6
Prom.	6005.8	35.3	44.3	136.2	7.3	0.0	0.0	0.0	6005.8	44.3	143.6

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.2.2. Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación

Tabla 7. Desempeño viajando tecnología 2 con RSS.

TECNOLOGIA 2 - DESEMPEÑO VIAJANDO				
Nombre del pozo	GLOBAL DE ACTIVIDADES		DISCRIMINADO	
	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]
Pozo 13	52.0	8.5	52.0	8.5
Pozo 14	7.0	1.3	7.0	1.3
Pozo 15	17.0	3.0	17.0	3.0
Pozo 16	20.0	3.6	20.0	3.6
Pozo 17	41.5	7.1	41.5	7.1
Pozo 18	21.0	3.3	21.0	3.3
Pozo 19	27.5	4.8	27.5	4.8
Pozo 20	10.5	1.7	10.5	1.7
Pozo 21	14.0	2.0	14.0	2.0
Pozo 22	12.5	2.3	12.5	2.3
Pozo 23	50.5	8.6	50.5	8.6
Pozo 24	20.5	3.6	20.5	3.6
Pozo 25	11.0	2.0	11.0	2.0
Pozo 26	64.0	8.8	46.0	6.3
Pozo 27	17.0	2.8	17.0	2.8
Prom.	25.7	4.2	24.5	4.1

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.2.3. Análisis de desempeño para corrida de revestimiento

Tabla 8. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 2 con RSS.

TECNOLOGIA 2 - DESEMPEÑO CORRIENDO REVESTIMIENTO		
Nombre del pozo	Tiempo corriendo revestimiento hasta profundidad indicada [h]	Tiempo corriendo revestimiento por cada 1000 ft [h]
Pozo 15	25.5	4.6
Pozo 16	30.0	5.3
Pozo 17	28.0	5.0
Pozo 18	28.0	4.9
Pozo 19	43.0	7.0
Pozo 20	47.0	6.7
Pozo 21	29.5	5.3
Pozo 22	37.5	6.6
Pozo 23	23.0	4.1
Pozo 24	28.5	4.6
Prom.	32.0	5.4

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.3. Tecnología 3 con RSS

4.3.1. Análisis del desempeño para perforación

Tabla 9. Desempeño perforando tecnología 3 con RSS.

TECNOLOGIA 3 - DESEMPEÑO PERFORANDO											
Nombre del pozo & promedio aritmético	GENERAL					DESLIZANDO			ROTANDO		
	Pies perforados [ft]	Angulo máximo [grados]	Tiempo perforando [h]	Tasa perforación [ft/h]	Tiempo perforando cada 1000 ft [h]	Pies perforados [ft]	Tiempo deslizando [h]	Tasa de perforación [ft/h]	Pies perforados [ft]	Tiempo rotando [h]	Tasa de perforación [ft/h]
Pozo 28	7387.4	54.5	66.7	110.8	9.0	0	0	0	7387.4	66.7	110.8
Pozo 29	7524.4	54.0	58.0	129.8	7.7	0	0	0	7524.4	57.95	129.8
Pozo 30	5815.3	53.2	34.5	168.4	5.9	0	0	0	5815.3	34.54	168.4
Pozo 31	6286.3	54.8	44.6	141.0	7.1	0	0	0	6286.3	44.58	141
Pozo 32	5701.3	42.3	40.0	142.7	7.0	0	0	0	5701.3	39.96	142.7
Pozo 33	7329.4	47.9	47.5	154.2	6.5	0	0	0	7329.4	47.52	154.2
Pozo 34	5877.3	60.0	28.1	209.2	4.8	0	0	0	5877.3	28.09	209.2
Pozo 35	5294.3	15.2	16.7	316.5	3.2	0	0	0	5294.3	16.73	316.5
Pozo 36	4253.2	23.3	20.2	210.1	4.8	0	0	0	4253.2	20.24	210.1
Pozo 37	5905.3	30.0	33.1	178.2	5.6	0	0	0	5905.3	33.13	178.2
Pozo 38	5794.3	51.8	32.1	180.3	5.5	0	0	0	5794.3	32.14	180.3
Pozo 39	5856.3	40.7	26.4	222.2	4.5	0	0	0	5856.3	26.36	222.2
Pozo 40	5861.3	40.9	27.66	211.9	4.72	0	0	0	5861.3	27.66	211.9
Pozo 41	6420.3	55.0	37.7	170.5	5.9	0	0	0	6420.3	37.65	170.5
Pozo 42	6215.3	70.6	75.18	82.67	12.1	0	0	0	6215.3	75.18	82.67
Pozo 43	6056.3	51.1	33.9	178.7	5.6	0	0	0	6056.3	33.9	178.7
Prom.	6098.6	46.6	38.9	175.4	6.2	0.0	0.0	0.0	6098.6	38.9	175.4

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.3.2. Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación

Tabla 10. Desempeño perforando tecnología 3 con RSS.

TECNOLOGIA 3 - DESEMPEÑO VIAJANDO				
Nombre del pozo & promedio aritmético	GLOBAL DE ACTIVIDADES		DISCRIMINADO	
	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]
Pozo 28	12.0	1.6	12.0	1.6
Pozo 29	20.0	2.7	20.0	2.7
Pozo 30	16.5	2.8	15.5	2.7
Pozo 31	12.5	2.0	12.5	2.0
Pozo 32	26.0	4.6	26.0	4.6
Pozo 33	28.5	3.9	28.5	3.9
Pozo 34	17.0	2.9	17.0	2.9
Pozo 35	96.0	18.1	22.8	4.3
Pozo 36	80.5	18.9	13.5	3.2
Pozo 37	14.0	2.4	14.0	2.4
Pozo 38	17.5	3.0	17.5	3.0
Pozo 39	16.5	2.8	16.5	2.8
Pozo 40	14.0	2.4	14.0	2.4
Pozo 41	32.0	5.0	32.0	5.0
Pozo 42	45.5	7.3	45.5	7.3
Pozo 43	20.0	3.3	20.0	3.3
Prom.	29.3	5.2	20.5	3.4

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.3.3. Análisis de desempeño para corrida de revestimiento

Tabla 11. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 3 con RSS.

TECNOLOGIA 3 - DESEMPEÑO CORRIENDO REVESTIMIENTO		
Nombre del pozo & promedio aritmético	Tiempo corriendo revestimiento hasta profundidad indicada [h]	Tiempo corriendo revestimiento por cada 1000 ft [h]
Pozo 28	37.5	5.1
Pozo 29	31.0	4.1
Pozo 30	31.5	5.4
Pozo 31	48.0	7.6
Pozo 32	58.0	10.2
Pozo 33	30.0	4.1
Pozo 34	31.0	5.3
Pozo 35	30.5	5.2
Pozo 36	39.5	6.8
Pozo 37	26.5	4.5
Pozo 38	30.5	5.2
Pozo 39	62.5	10.1
Pozo 40	30.0	5.0
Prom.	37.4	6.0

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.4. Tecnología 4 con PDM

4.4.1. Análisis del desempeño para perforación

Tabla 12. Desempeño perforando tecnología 4 con PDM.

TECNOLOGIA 4 - DESEMPEÑO PERFORANDO											
Nombre del pozo & promedio aritmético	GENERAL					DESLIZANDO			ROTANDO		
	Pies perforados [ft]	Angulo máximo [grados]	Tiempo perforando [h]	Tasa perforación [ft/h]	Tiempo perforando cada 1000 ft [h]	Pies perforados [ft]	Tiempo deslizando [h]	Tasa de perforación [ft/h]	Pies perforados [ft]	Tiempo rotando [h]	Tasa de perforación [ft/h]
Pozo 44	6218.0	45.7	36.0	172.9	5.8	1053.0	13.2	79.5	5165.0	22.7	227.3
Pozo 45	6420.0	51.5	43.1	148.9	6.7	851.0	18.5	46.0	5569.0	24.6	226.2
Pozo 46	6084.0	42.0	44.1	138.0	7.2	1137.0	23.6	48.2	4947.0	20.5	241.2
Pozo 47	6802.3	57.0	66.7	102.0	9.8	1027.1	29.6	34.8	5775.3	37.2	155.4
Pozo 48	6158.0	53.5	45.8	134.5	7.4	1013.0	20.3	50.0	5145.0	25.5	201.8
Pozo 49	5541.0	44.0	45.0	123.3	8.1	742.0	19.7	37.7	4799.0	25.3	189.9
Pozo 50	6267.0	37.7	66.4	94.4	10.6	1087.0	35.3	30.8	5000.0	31.0	161.4
Pozo 51	6677.0	19.5	51.1	130.8	7.6	1104.0	22.0	50.2	5573.0	29.1	191.8
Pozo 52	6346.0	55.5	52.4	121.0	8.3	629.0	22.2	28.4	5717.0	30.3	188.8
Pozo 53	6419.0	41.3	43.1	148.8	6.7	1261.0	18.5	68.2	5158.0	24.6	209.3
Pozo 54	5961.0	39.3	48.7	122.3	8.2	1293.0	24.7	52.5	4668.0	24.1	193.9
Pozo 55	7172.0	4.1	63.1	113.6	8.8	774.0	19.0	40.7	6398.0	44.1	145.2
Pozo 56	5793.0	39.0	58.5	99.1	10.1	1436.0	32.0	44.9	4357.0	26.5	164.5
Pozo 57	6777.0	42.9	51.8	130.8	7.6	1267.0	19.7	64.5	5510.0	32.2	171.4
Pozo 58	5942.0	46.2	54.1	109.9	9.1	812.0	19.2	42.3	5130.0	34.9	147.1
Pozo 59	5940.0	41.0	92.2	64.4	15.5	1670.0	55.0	30.3	4270.0	37.2	114.8
Pozo 60	6696.2	42.4	55.5	120.6	8.3	810.0	22.8	35.5	5886.0	32.7	180.1
Prom.	6306.7	41.3	54.0	122.1	8.6	1056.8	24.4	46.1	5239.3	29.5	182.9

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.4.2. Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación.

Tabla 13. Desempeño viajando tecnología 4 con PDM.

TECNOLOGIA 4 - DESEMPEÑO VIAJANDO				
Nombre del pozo & promedio aritmético	GLOBAL DE ACTIVIDADES		DISCRIMINADO	
	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]
Pozo 44	12.0	1.9	12.0	1.9
Pozo 45	10.0	1.6	10.0	1.6
Pozo 46	18.5	3.0	15.5	2.5
Pozo 47	24.5	3.6	24.5	3.6
Pozo 48	15.0	2.4	15.0	2.4
Pozo 49	11.0	2.0	11.0	2.0
Pozo 50	11.0	1.8	11.0	1.8
Pozo 51	10.0	1.5	10.0	1.5
Pozo 52	26.5	4.2	26.5	4.2
Pozo 53	23.5	3.7	23.5	3.7
Pozo 54	11.0	1.8	11.0	1.8
Pozo 55	13.5	1.9	13.5	1.9
Pozo 56	10.0	1.7	10.0	1.7
Pozo 57	12.5	1.8	12.5	1.8
Pozo 58	10.0	1.7	10.0	1.7
Pozo 59	10.5	1.8	10.5	1.8
Pozo 60	42.5	6.3	31.5	4.7
Prom.	16.0	2.5	15.2	2.4

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.4.3. Análisis de desempeño para corrida de revestimiento

Tabla 14. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 4 con PDM.

TECNOLOGIA 4 - DESEMPEÑO CORRIENDO REVESTIMIENTO		
Nombre del pozo & promedio aritmético	Tiempo corriendo revestimiento hasta profundidad indicada [h]	Tiempo corriendo revestimiento por cada 1000 ft [h]
Pozo 44	25.0	4.0
Pozo 45	46.5	7.2
Pozo 46	48.0	7.9
Pozo 47	30.0	4.4
Pozo 48	15.0	2.4
Pozo 49	27.5	5.0
Pozo 50	23.5	3.7
Pozo 51	19.5	2.9
Pozo 52	33.5	5.3
Pozo 53	28.0	4.4
Pozo 54	32.0	5.4
Pozo 55	40.5	5.6
Pozo 56	38.5	6.6
Pozo 57	59.0	8.7
Pozo 58	10.5	1.8
Pozo 59	45.0	6.7
Prom.	32.6	5.1

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.5. Tecnología 5 con PDM

4.5.1. Análisis del desempeño para perforación

Tabla 15. Desempeño Perforando tecnología 5 con PDM.

TECNOLOGIA 5 - DESEMPEÑO PERFORANDO											
Nombre del pozo & promedio aritmético	GENERAL					DESLIZANDO			ROTANDO		
	Pies perforados [ft]	Angulo máximo [grados]	Tiempo perforando [h]	Tasa perforación [ft/h]	Tiempo perforando cada 1000 ft [h]	Pies perforados [ft]	Tiempo deslizando [h]	Tasa de perforación [ft/h]	Pies perforados [ft]	Tiempo rotando [h]	Tasa de perforación [ft/h]
Pozo 61	5606.0	47.5	67.8	82.7	67.8	506.0	13.6	37.2	5100.0	54.2	94.1
Pozo 62	6082.0	37.5	42.0	144.8	42.0	763.0	17.8	43.0	5319.0	24.3	219.2
Pozo 63	6727.0	42.3	63.9	105.2	63.9	1275.0	31.6	40.3	5452.0	32.3	168.6
Prom.	6138.3	42.4	57.9	110.9	57.9	848.0	21.0	40.2	5290.3	36.9	160.6

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.5.2. Análisis de desempeño para viajes desde la profundidad final de la sección (TD) con escenarios de evaluación

Tabla 16. Desempeño viajando tecnología 5 con PDM.

TECNOLOGIA 5 - DESEMPEÑO VIAJANDO				
Nombre del pozo & promedio aritmético	GLOBAL DE ACTIVIDADES		DISCRIMINADO	
	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]	Tiempo viajando desde TD a zapato (1000 ft profundidad aproximadamente) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h]
Pozo 61	19.0	3.4	19.0	3.4
Pozo 62	9.5	1.6	9.5	1.6
Pozo 63	14.0	2.1	14.0	2.1
Prom.	14.2	2.3	14.2	2.3

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.5.3. A Análisis de desempeño para corrida de revestimiento

Tabla 17. Desempeño corriendo revestimiento tecnología 5 con PDM.

TECNOLOGIA 5 - DESEMPEÑO CORRIENDO REVESTIMIENTO		
Nombre del pozo & promedio aritmético	Tiempo corriendo revestimiento hasta profundidad indicada [h]	Tiempo corriendo revestimiento por cada 1000 ft [h]
Pozo 61	21.0	3.7
Pozo 62	28.5	4.7
Prom.	24.8	4.2

Fuente: Elaboración propia del autor.

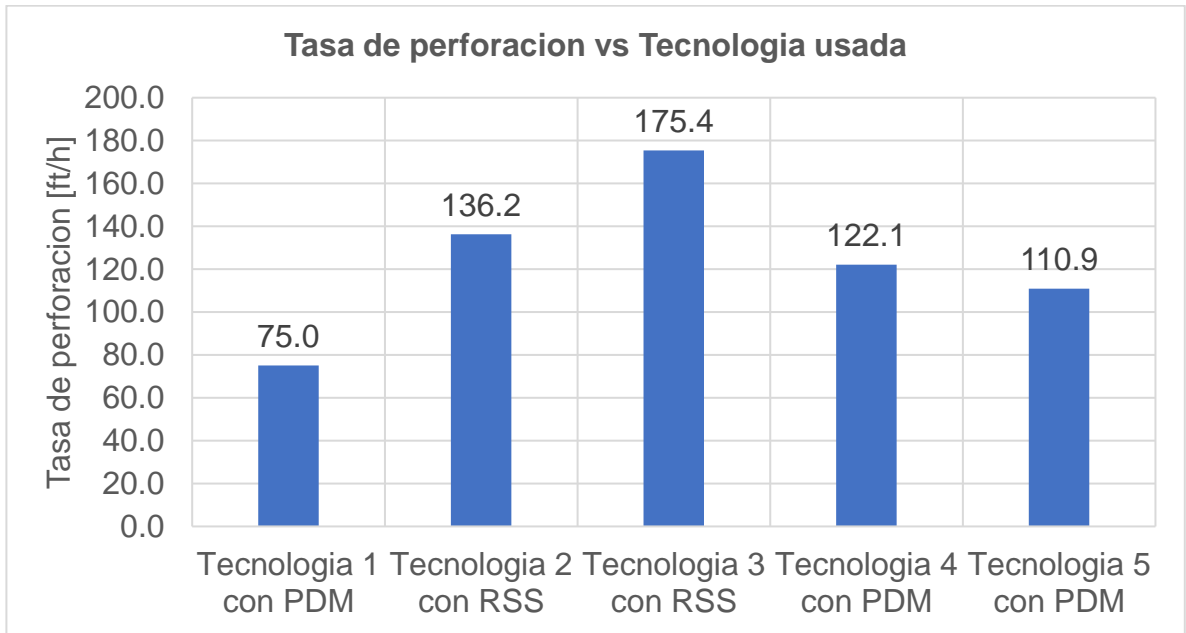
4.6. ANALISIS GLOBAL DE LAS TECNOLOGIAS

Tabla 18. Análisis total de las tecnologías.

ANALISIS GENERAL DE LAS TECNOLOGIAS							
Tecnología Analizada	Tasa perforación [ft/h]	Tiempo perforando cada 1000 ft [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft [h] (Total de actividades) [h]	Tiempo de viaje por 1000 ft (Discriminación de actividades) [h]	Tiempos de viajes + perforación por cada 1000 ft (Total de actividades) [h]	Tiempos de viajes + perforación por cada 1000 ft (discriminación de actividades) [h]	Tiempo corriendo revestimiento por cada 1000 ft [h]
Tecnología 1 con PDM	75.0	11.6	5.0	5.0	16.6	16.6	5.2
Tecnología 2 con RSS	136.2	7.3	4.2	4.1	11.5	11.4	5.4
Tecnología 3 con RSS	175.4	6.2	4.8	3.4	11.5	9.6	6.0
Tecnología 4 con PDM	122.1	8.6	2.5	2.4	11.1	11.0	5.1
Tecnología 5 con PDM	110.9	9.5	2.3	2.3	11.8	11.8	2.8

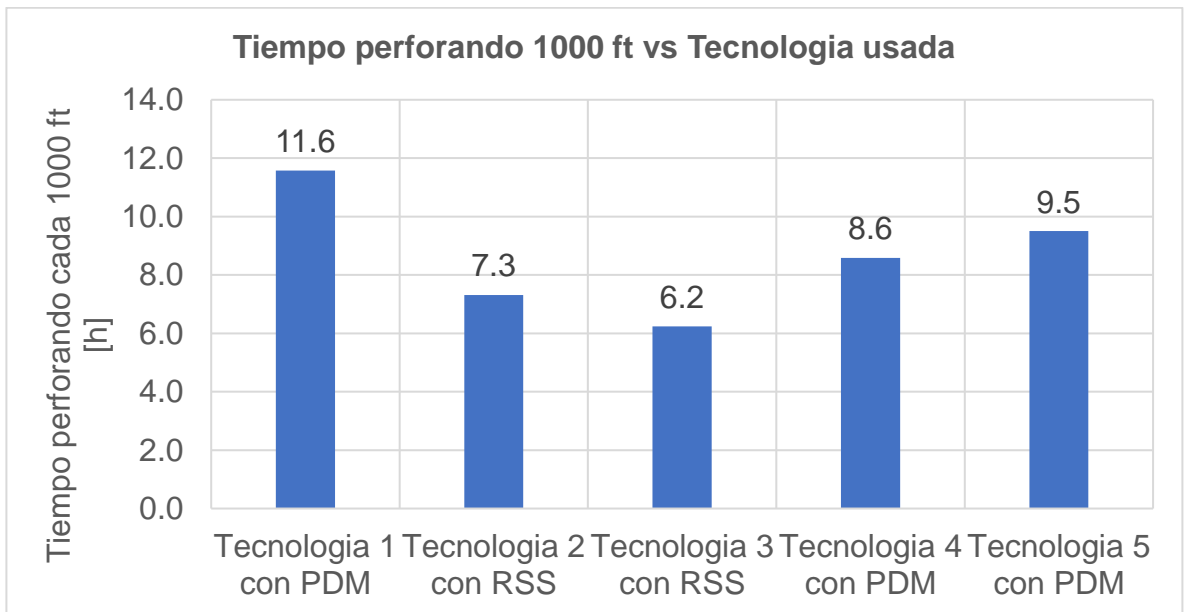
Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 31. Tasa de perforación [ft/h] por tecnología aplicada.



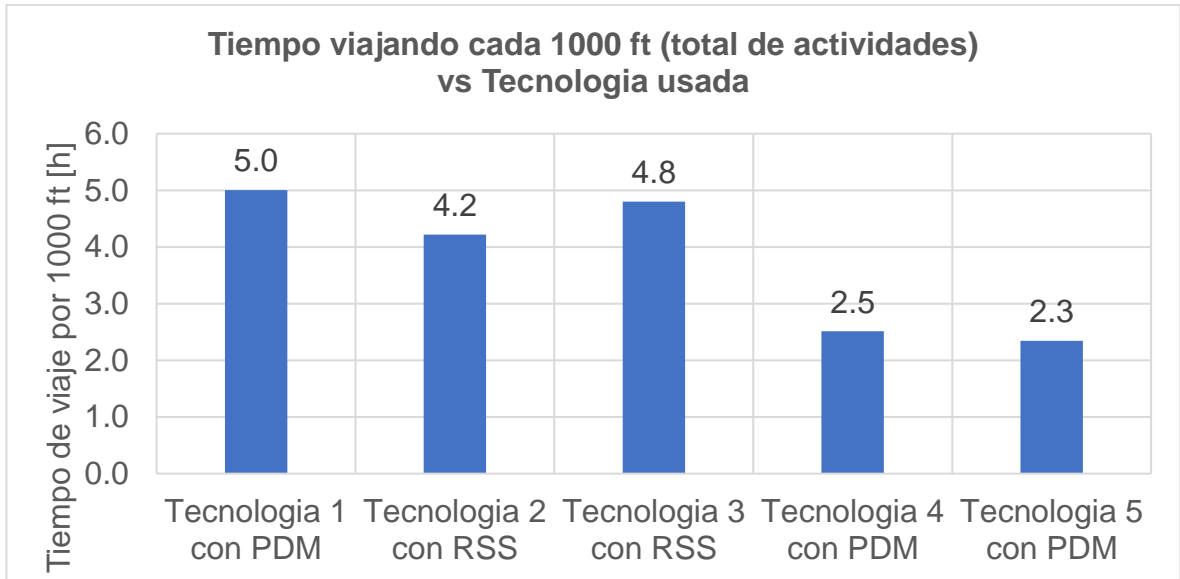
Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 32. Tiempo perforando cada 1000 ft [h] por tecnología aplicada.



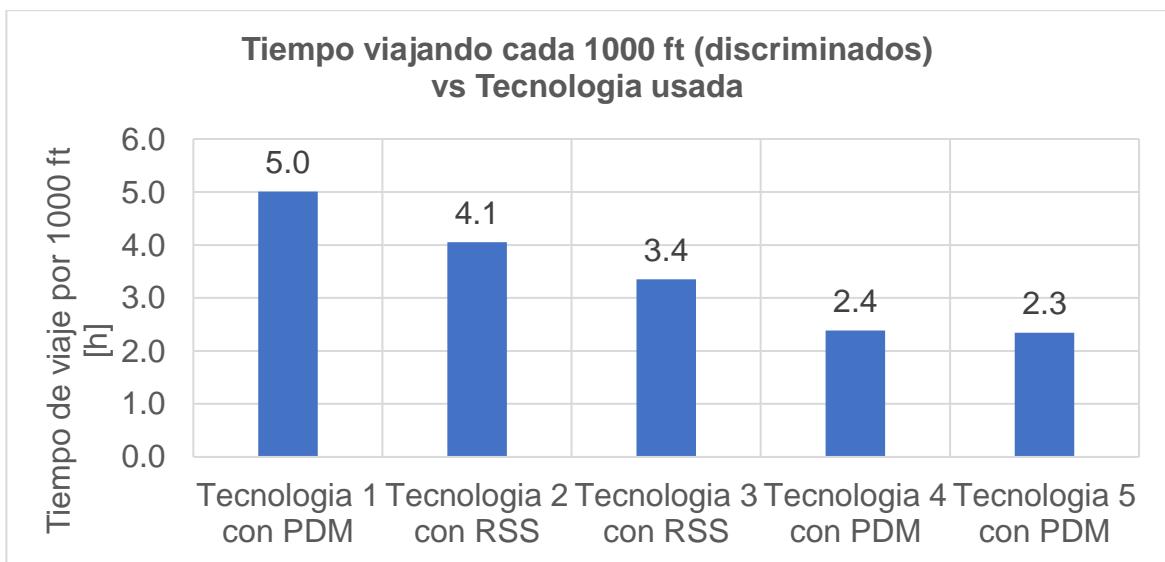
Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 33. Tiempo viajando cada 1000 ft [h] (total de actividades) por tecnología aplicada.



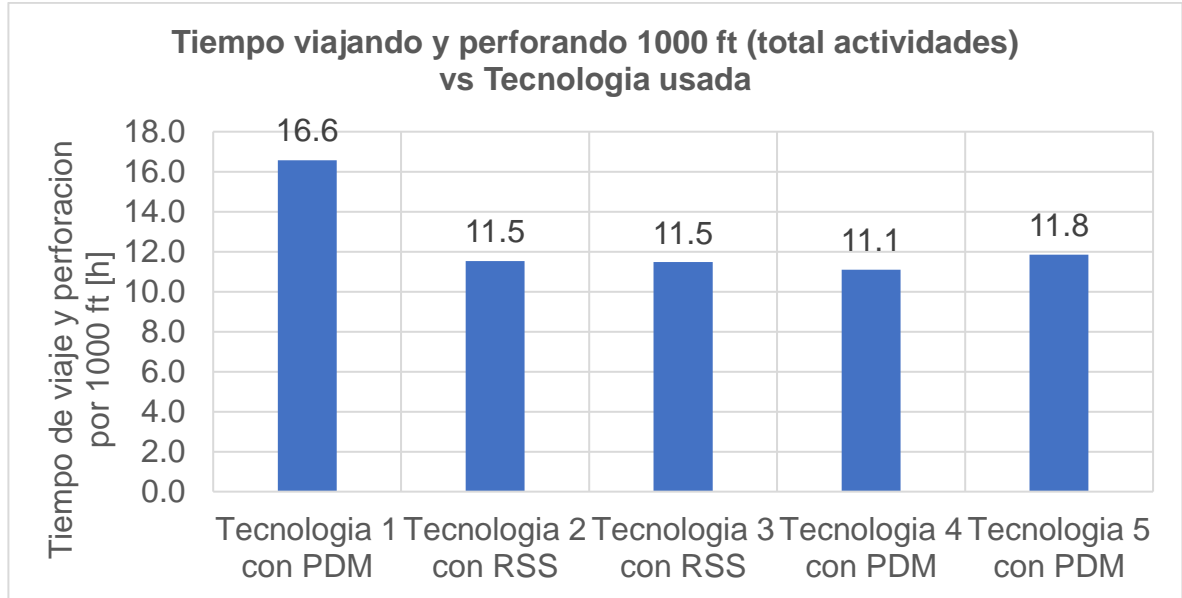
Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 34. Tiempo viajando cada 1000 ft [h] (discriminación de ciertas actividades) por tecnología aplicada.



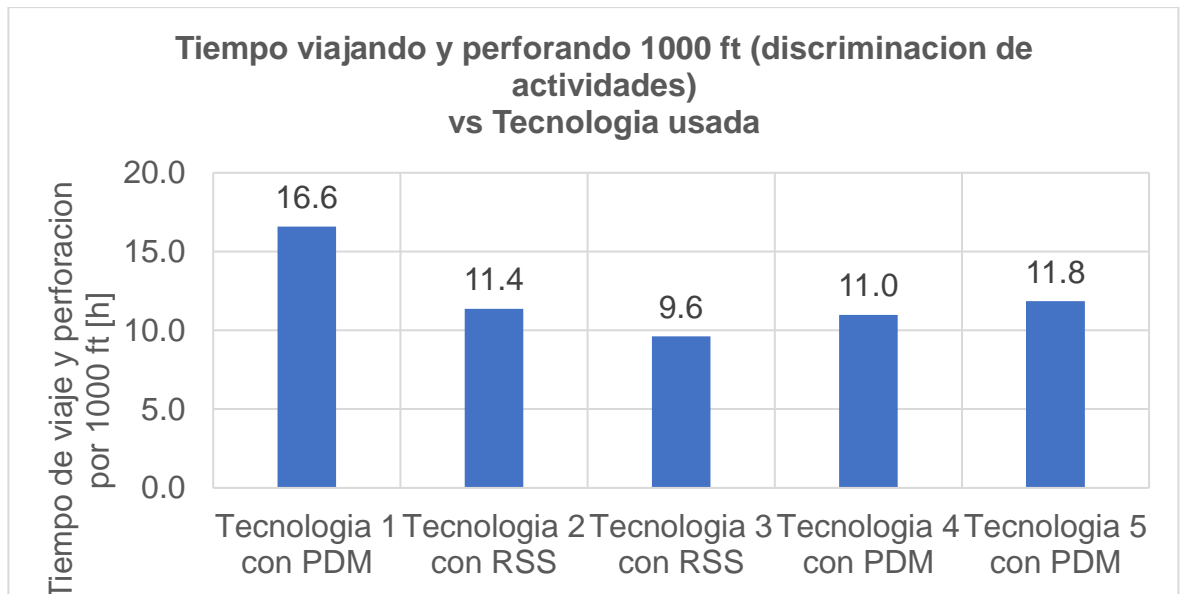
Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 35. Tiempo viajando y perforando cada 1000 ft [h] (total de actividades) por tecnología aplicada.



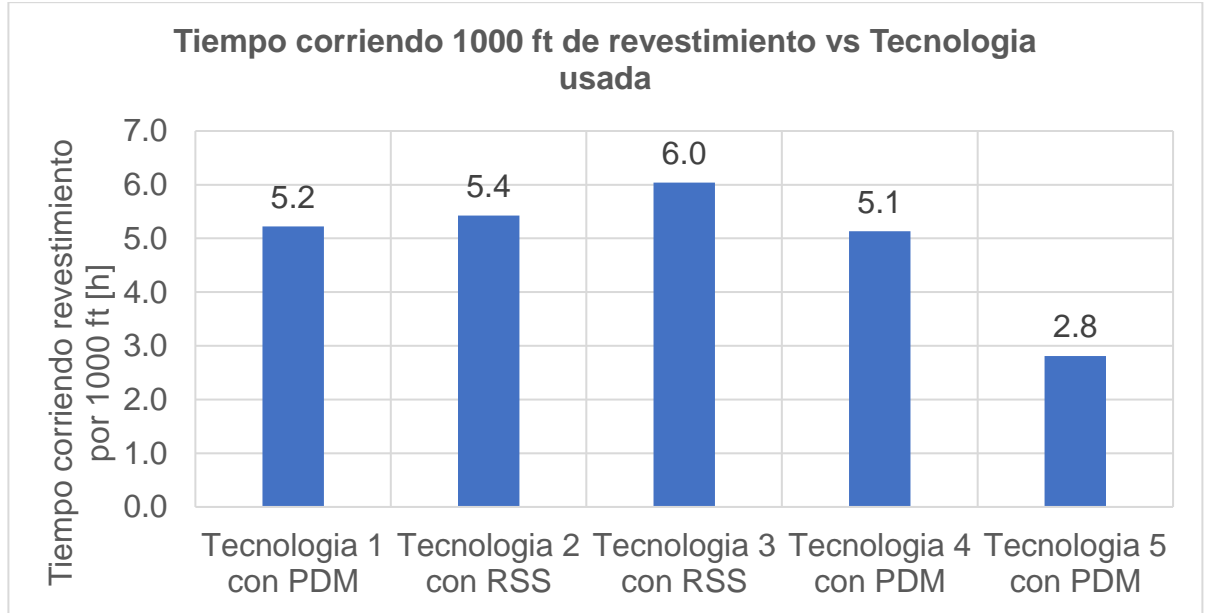
Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 36. Tiempo viajando y perforando cada 1000 ft [h] (discriminación de ciertas actividades) por tecnología aplicada.



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 37. Tiempo corriendo revestimiento por tecnología usada.



Fuente: Elaboración propia del autor.

4.7. Analisis de costos para las tecnologías

Para este analisis se tomara un costo de taladro de 50000 dolares de renta diaria lo cual corresponde a aproximadamente 2083.3 dolares por hora.

Tabla 19. Costos de los PDM y RSS

TECNOLOGIA	Costo (USD)	Unidad de referencia
Motor de desplazamiento positivo (PDM)	475.36	Hora
Rotary Steerable System (RSS)	1489.7	Hora

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.7.1. Tecnología 1 con PDM análisis de costos

Tabla 20. Análisis de costos tecnología 1.

Análisis de costos tecnología 1 con PDM									
Nombre del pozo & promedio aritmético	Pies perforados [ft]	BRT [h]	Tiempo en operación del motor [h]	Costo del taladro [USD/h]	Costo de taladro [USD]	Costo de la tecnología [USD/h]	Costo promedio de la tecnología (USD)	Costo total corriendo la tecnología [USD]	Costo total corriendo la tecnología por cada 1000 ft[USD]
Pozo 1	5722	137.0	81.2	2083.3	285,417	475.36	38,599	324,016	56,626
Pozo 2	6282	260.5	208	2083.3	542,708	475.36	98,875	641,583	102,125
Pozo 3	6530	235.0	166.4	2083.3	489,583	475.36	79,100	568,683	87,084
Pozo 4	6781	220.5	162.9	2083.3	459,375	475.36	77,436	536,811	79,160
Pozo 5	4393	248.0	182	2083.3	516,667	475.36	86,516	603,182	137,299
Pozo 6	5909	348.5	245.1	2083.3	726,042	475.36	116,511	842,552	142,588
Pozo 7	6168	216.5	122.5	2083.3	451,042	475.36	58,232	509,273	82,567
Pozo 8	5258	186.3	122.1	2083.3	388,125	475.36	58,041	446,166	84,851
Pozo 9	6346	242	143.9	2083.3	504,167	475.36	68,404	572,571	90,221
Pozo 10	6716	245.8	188.5	2083.3	512,083	475.36	89,605	601,689	89,586
Pozo 11	5734	186.5	124.2	2083.3	388,542	475.36	59,040	447,581	78,054
Pozo 12	5799	205.8	147.8	2083.3	428,750	475.36	70,258	499,008	86,047
prom.	5970	227.7	157.9	2083.3	474,375	475.36	75,051	549,426	93,017

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.7.2. Tecnología 2 con RSS análisis de costos

Tabla 21. Análisis de costos tecnología 2.

Análisis de costos tecnología 2 con RSS									
Nombre del pozo & promedio aritmético	Pies perforados [ft]	BRT [h]	Tiempo perforando y circulando [h]	Costo del taladro [USD/h]	Costo de taladro [USD]	Costo de la tecnología [USD/h]	Costo promedio de la tecnología (USD)	Costo total corriendo la tecnología [USD]	Costo total corriendo la tecnología por cada 1000 ft[USD]
Pozo 13	6139	188.0	137.4	2083.3	391,667	1489.7	204,685	596,351	97,141
Pozo 14	5573	156.0	109.5	2083.3	325,000	1489.7	163,122	488,122	87,587
Pozo 15	5681	131.0	99.8	2083.3	272,917	1489.7	148,672	421,589	74,207
Pozo 16	5579	129.5	97	2083.3	269,792	1489.7	144,501	414,293	74,256
Pozo 17	5812	179.5	133.1	2083.3	373,958	1489.7	198,279	572,237	98,458
Pozo 18	6403	167.5	125.3	2083.3	348,958	1489.7	186,659	535,618	83,647
Pozo 19	5713	138	109.6	2083.3	287,500	1489.7	163,271	450,771	78,899
Pozo 20	6122	159	88.4	2083.3	331,250	1489.7	131,689	462,939	75,615
Pozo 21	7011	166	125.9	2083.3	345,833	1489.7	187,553	533,387	76,075
Pozo 22	5520	125.5	94.2	2083.3	261,458	1489.7	140,330	401,788	72,784
Pozo 23	5852	217.5	132.4	2083.3	453,125	1489.7	197,236	650,361	111,129
Pozo 24	5659	134	95.7	2083.3	279,167	1489.7	142,564	421,731	74,520
Pozo 25	5547	101	68.8	2083.3	210,417	1489.7	102,491	312,908	56,408
Pozo 26	7299	199	152.1	2083.3	414,583	1489.7	226,583	641,167	87,839
Pozo 27	6174	149.5	116.2	2083.3	311,458	1489.7	173,103	484,561	78,480
prom.	6006	156.1	112.4	2083.3	325,139	1489.7	167,383	492,522	81,803

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.7.3. Tecnología 3 con RSS análisis de costos

Tabla 22. Análisis de costos tecnología 3.

Análisis de costos tecnología 3 con RSS									
Nombre del pozo & promedio aritmético	Pies perforados [ft]	BRT [h]	Tiempo perforando y circulando [h]	Costo del taladro [USD/h]	Costo de taladro [USD]	Costo de la tecnología [USD/h]	Costo promedio de la tecnología (USD)	Costo total corriendo la tecnología [USD]	Costo total corriendo la tecnología por cada 1000 ft[USD]
Pozo 28	7387	217.5	157.3	2083.3	453,125	1489.7	234,330	687,455	93,058
Pozo 29	7524	204.0	144.1	2083.3	425,000	1489.7	214,666	639,666	85,013
Pozo 30	5815	140.0	92.2	2083.3	291,667	1489.7	137,350	429,017	73,774
Pozo 31	6286	135.8	98	2083.3	282,917	1489.7	145,991	428,907	68,229
Pozo 32	5701	178.5	119	2083.3	371,875	1489.7	177,274	549,149	96,320
Pozo 33	7329	164.5	120.6	2083.3	342,708	1489.7	179,658	522,366	71,270
Pozo 34	5877	107.5	74.7	2083.3	223,958	1489.7	111,281	335,239	57,040
Pozo 35	5905	145	104.1	2083.3	302,083	1489.7	155,078	457,161	77,416
Pozo 36	5794	135	88.3	2083.3	281,250	1489.7	131,541	412,791	71,241
Pozo 37	5856	113.5	81.1	2083.3	236,458	1489.7	120,815	357,273	61,007
Pozo 38	5861	123	87.6	2083.3	256,250	1489.7	130,498	386,748	65,983
Pozo 39	6420	162	124.6	2083.3	337,500	1489.7	185,617	523,117	81,478
Pozo 40	6215	226	170.8	2083.3	470,833	1489.7	254,441	725,274	116,692
Pozo 41	6056	134	93.2	2083.3	279,167	1489.7	138,840	418,007	69,020
prom.	6288	156.2	111.1	2083.3	325,342	1489.7	165,527	490,869	77,682

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.7.4. Tecnología 4 con PDM análisis de costos

Tabla 23. Análisis de costos tecnología 4.

Análisis de costos tecnología 4 con PDM									
Nombre del pozo & promedio aritmético	Pies perforados [ft]	BRT [h]	Tiempo perforando y circulando [h]	Costo del taladro [USD/h]	Costo de taladro [USD]	Costo de la tecnología [USD/h]	Costo promedio de la tecnología (USD)	Costo total corriendo la tecnología [USD]	Costo total corriendo la tecnología por cada 1000 ft[USD]
Pozo 44	6218	104.0	68.3	2083.3	216,667	475.4	32,467	249,134	40,067
Pozo 45	6420	107.5	80.3	2083.3	223,958	475.4	38,171	262,130	40,830
Pozo 46	6084	142.5	99.7	2083.3	296,875	475.4	47,393	344,268	56,586
Pozo 47	6802	203.5	132.3	2083.3	423,958	475.4	62,890	486,848	71,571
Pozo 48	6158	123.8	88.7	2083.3	257,917	475.4	42,164	300,081	48,730
Pozo 49	5541	112.5	87	2083.3	234,375	475.4	41,356	275,731	49,762
Pozo 50	6267	148.5	115.2	2083.3	309,375	475.4	54,761	364,136	58,104
Pozo 51	6677	138.3	98.3	2083.3	288,125	475.4	46,728	334,853	50,150
Pozo 52	6346	183.5	122.9	2083.3	382,292	475.4	58,422	440,713	69,447
Pozo 53	6419	141	106.1	2083.3	293,750	475.4	50,436	344,186	53,620
Pozo 54	5961	123	89.5	2083.3	256,250	475.4	42,545	298,795	50,125
Pozo 55	7172	156.5	112.8	2083.3	326,042	475.4	53,621	379,662	52,937
Pozo 56	5793	146.8	114.3	2083.3	305,833	475.4	54,334	360,167	62,173
Pozo 57	6777	135.5	94.8	2083.3	282,292	475.4	45,064	327,356	48,304
Pozo 58	5942	137.5	93.9	2083.3	286,458	475.4	44,636	331,095	55,721
Pozo 59	5940	165	128.6	2083.3	343,750	475.4	61,131	404,881	68,162
Pozo 60	6696	174.25	119.55	2083.3	363,021	475.4	56,829	419,850	62,700
Prom.	6307	143.7	103.07	2083.3	299,467	475.4	48,997	348,464	55,235

Fuente: Elaboración propia del autor.

4.7.5. Tecnología 5 con PDM análisis de costos

Tabla 24. Análisis de costos tecnología 5.

Análisis de costos tecnología 5 con PDM									
Nombre del pozo & promedio aritmético	Pies perforados [ft]	BRT [h]	Tiempo perforando y circulando [h]	Costo del taladro [USD/h]	Costo de taladro [USD]	Costo de la tecnología [USD/h]	Costo promedio de la tecnología (USD)	Costo total corriendo la tecnología [USD]	Costo total corriendo la tecnología por cada 1000 ft[USD]
Pozo 61	5606	114.2	82	2083.33	237,917	475.36	38,980	276,896	49,393
Pozo 62	6082	182.8	75.2	2083.33	380,833	475.36	35,747	416,580	68,494
Pozo 63	6727	150.0	106.8	2083.33	312,500	475.36	50,768	363,268	54,002
prom.	6138	149.0	88	2083.3	310,417	475.4	41,832	352,248	57,296

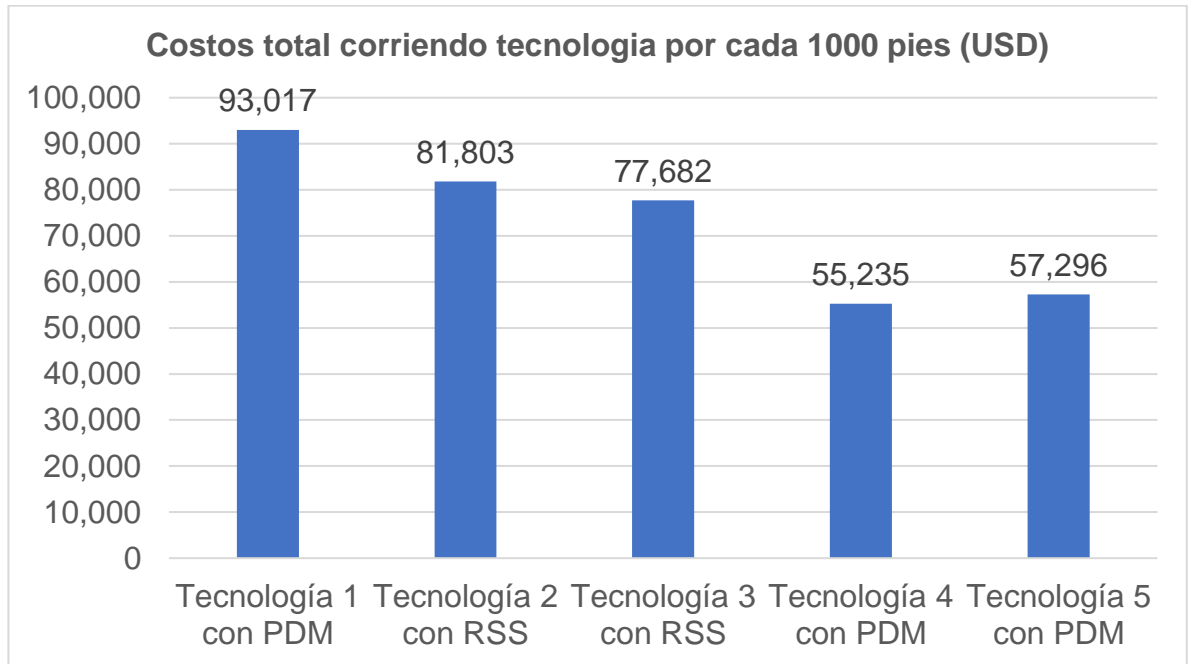
Fuente: Elaboración propia del autor.

Tabla 25. Análisis general de costos para PDM.

ANALISIS DE COSTOS DE LOS MOTORES									
Nombre del pozo & promedio aritmético	Pies perforados [ft]	BRT [h]	Tiempo perforando y circulando [h]	Costo del taladro [USD/h]	Costo de taladro [USD]	Costo de la tecnología [USD/h]	Costo promedio de la tecnología (USD)	Costo total corriendo la tecnología [USD]	Costo total corriendo la tecnología por cada 1000 ft[USD]
Tecnología 1 con PDM	5970	227.7	157.9	2083.33	474,375	475.36	75,051	549,426	93,017
Tecnología 2 con RSS	6006	156.1	112.4	2083.33	325,139	1489.7	167,383	492,522	81,803
Tecnología 3 con RSS	6288	156.2	111.1	2083.33	325,342	1489.7	165,527	490,869	77,682
Tecnología 4 con PDM	6307	143.7	103.1	2083.33	299,467	475.36	48,997	348,464	55,235
Tecnología 5 con PDM	6138	149.0	88	2083.33	310,417	475.36	41,832	352,248	57,296

Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 38. Costos estandarizados al correr 1000 pies de tecnología en dólares.



Fuente: Elaboración propia del autor.

5. CONCLUSIONES

- Específicamente para el campo en cuestión donde fue desarrollado el presente estudio, los resultados muestran que el motor más eficiente viene siendo el RSS correspondiente a la tecnología 3.
- La operación de viajes y circulación desde la profundidad final de la sección de 12.25 pulgadas a hueco revestido afecta directamente los resultados del RSS si no se discriminan las actividades ajenas a la operación neta de perforación.
- Para el escenario de corrida de revestimiento excluyendo la tecnología 5 debido a la poca cantidad de pozos en el análisis, el motor más sobresaliente viene siendo la tecnología 4 con PDM.
- Analizando las operaciones de perforación y viajes con circulación desde la profundidad final de la sección a hueco revestido la tecnología más eficiente teniendo en cuenta el global de actividades viene siendo la 4 con PDM, aunque si se tiene en cuenta la discriminación de operaciones establecidas la tecnología más eficiente es la número 3 con RSS.
- Para el análisis económico en el campo donde se desarrolló el proyecto, teniendo en cuenta el costo por correr 1000 pies con el respectivo motor la tecnología más viable en relación con su costo – beneficio viene siendo la numero 5 con PDM.

6. RECOMENDACIONES

- Dentro del alcance del presente proyecto no se evaluaron las condiciones del fluido de perforación y geomecánica, sin embargo, se podrían estudiar en análisis posteriores, los cuales permitirían esclarecer la influencia de estas variables durante el desarrollo de la operación.
- Hacer una prueba piloto en la cual se corra el RSS con las condiciones operacionales actuales, ya que podría tener un cambio significativo con respecto a sus corridas del pasado, tal como en tiempos de viajes, número de repasadas en el hoyo, condiciones de la operadora, entre otras.
- Del presente trabajo se puede reevaluar el arreglo comercial entre las compañías de servicios y operadoras en el área con el fin de hacer más llamativa la utilización de ciertas tecnologías.
- Continuar la investigación con un estudio económico más profundo que permita esclarecer las tecnologías más llamativas en torno a sus precios, posibles descuentos y costos ajenos a la tarifa estándar.

7. BIBLIOGRAFIA

DOWNTON, Geoff, et al. Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional, Schlumberger, 2000.

DRILLING AND MEASUREMENT TECHNOLOGIES. 2015 Quick reference Guide. Schlumberger, 2015.

DUPLANTIS, Steven. Perforación en el modo de deslizamiento con torsión, Schlumberger, 2016.

FELCZAK, Edwin, et al. The Best of Both Worlds – A Hybrid Rotary Steerable System, Schlumberger, 2012.

LA COMUNIDAD PETROLERA, PerfoBlogger. Técnicas de Perforación Direccional: Cucharas, Motores y Operaciones. Disponible en:

www.lacomunidadpetrolera.com/2015/09/tecnicas-de-perforacion-direccional-cucharas-motores-y-operaciones.html.

MANTLE, Kate. The Art of Controlling Wellbore Trajectory, Schlumberger, 2014.

MANUAL DE PERFORACION PROCEDIMIENTOS Y OPERACIONES EN EL POZO, Datalog, 2002.

MUÑOS CASTILLO, Adrián. Perforación direccional con aplicación en un pozo. Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

OILFIELD GLOSSARY, Schlumberger. Positive displacement motor. Disponible en:
www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/p/positive_displacement_motor.aspx.

OILFIELD GLOSSARY, Schlumberger. Rotary Steerable System. Disponible en:
www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/p/rotary_steerable_system.aspx.

OILFIELD GLOSSARY, Schlumberger. directional drilling. Disponible en:
http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/d/directional_drilling.aspx.

OILFIELD GLOSSARY, Schlumberger. bottomhole assembly. Disponible en:
http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/b/bottomhole_assembly.aspx.

RABIA, Hussain. Well Engineering & Construction, 2002.

SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerPak Steerable Motor. Schlumberger, 2004.

SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. PowerDrive Level 2 Training Material. Intouch Support: Drilling & Measurements Learning Centers. Schlumberger 2017. All rights reserved.

SCHLUMBERGER DRILLING & MEASUREMENTS. Directional Drilling Training Manual. Schlumberger, 1996.

TAVERA REALES, Anny Sofia; LIZARAZO VARGAS, Jaime. Evaluación y comparación de los motores convencionales vs motores E.R.T y sistema de estabilizador ajustable en los pozos direccionales del campo la Yuca. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2008.

TORO DOWNHOLE TOOLS. Manual de Motores de Perforación. EE.UU. Texas, 2010.

WILLIAMS, Mike. Better Turns for Rotary Steerable Drilling, Schlumberger, 2004.