



UNIVERSIDAD DE MATANZAS

FACULTAD DE CIENCIAS TECNICAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

**Determinación de las condiciones del caño desnudo
en el pozo Seboruco-26 para su encamisado.**

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Perforación de
pozos de petróleo y producción de petróleo.**

Mención: Perforación de pozos de petróleo

Autor: Ing. Yaremis Vega Pujol

Matanzas

2019



**UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TECNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**CENTRO POLITÉCNICO DEL
PETRÓLEO
SEDE: VARADERO**

**Determinación de las condiciones del caño desnudo
en el pozo Seboruco-26 para su encamisado.**

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Perforación de
pozos de petróleo y producción de petróleo.**

Autor: Ing. Yaremis Vega Pujol

Tutor: Esp. Jorge Sergio Trujillo Rodríguez
MSc. Milagros de la Caridad Beatón Berenguer

Matanzas
2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Yaremis Vega Pujol declaro que soy el único autor del presente trabajo y autorizo a la Universidad de Matanzas y al Centro Politécnico del Petróleo a hacer el uso que estime pertinente con la información que aparece en el mismo siempre y cuando se respete nuestra autoría.

Nombre y Apellidos. Firma

SÍNTESIS

Este trabajo se realizó en el pozo Seboruco-26, perteneciente al yacimiento Seboruco ubicado en Matanzas. Desde el inicio de su perforación, durante el empleo de barrenas de 8 ½” de diámetro, hasta la profundidad de 5783 m presentó problemas, como pérdidas de circulación, problemas con la limpieza del caño, alto torque, estrechamiento en el hoyo abierto, así como zonas inestables que impidieron la continuidad de su perforación y se propone la perforación del desvío número 4. Se determinan las condiciones del caño desnudo en el pozo Seboruco-26 que permitan su encamisado, a través de modelos de torque y arrastre, con el empleo de diferentes composiciones de herramienta de fondo (BHA). Para ello se emplea información de registros a través del software Wellwizard que registra todos los parámetros y operaciones que se realizan en el pozo y son analizados a través del software INNOVA. Se realiza el análisis de riesgos operativos durante la perforación aplicando la técnica HAZOP. Se obtuvo en el caño desnudo un factor de fricción mayor que 0,4, que no garantiza mantener la estabilidad del caño, luego de calibrar el mismo el torque se mantuvo por debajo de los 30000Klb-ft, que confirma que el caño se encuentra limpio y estable, el factor de fricción para la bajada del colgador arrojó valores entre 0,2 y 0,35, aceptables para el encamisado y la continuidad de la perforación. Del análisis de riesgo se obtuvo que el torque y el arrastre son las variables que más influyen en el proceso de perforación de pozos de largo alcance, causas de posibles averías y parada de la perforación.

Abstract

This work was carried out in the Seboruco-26 well, belonging to the Seboruco deposit located in Matanzas. From the beginning of its drilling, during the use of drill bits of 8 ½ "in diameter, to the depth of 5783 m presented problems, such as circulation losses, problems with the cleaning of the pipe, high torque, narrowing in the open hole, as well as as unstable zones that prevented the continuity of their drilling and the drilling of the detour number 4 is proposed. The conditions of the naked pipe in the Seboruco-26 well that allow their cladding, through torque and drag models, are determined with the use of different background tool compositions (BHA). To do this, record information is used through the Wellwizard software that records all the parameters and operations performed in the well and analyzed through the INNOVA software. The analysis of operative risks during the drilling is carried out applying the HAZOP technique. A friction factor greater than 0.4 was obtained in the naked pipe, which does not guarantee to maintain the stability of the pipe, after calibrating it the torque remained below 30000Klb-ft, which confirms that the pipe is clean and stable, the friction factor for the descent of the hanger showed values between 0,2 and 0,35, acceptable for the jacketing and the continuity of the perforation. From the risk analysis it was obtained that torque and drag are the variables that most influence the process of drilling long-range wells, causes of possible breakdowns and stoppage of drilling.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo I. Análisis Bibliográfico.....	3
1.1 Definición de Pozos de Alcance Extendido (ERD).....	4
1.2 Tipos de perfiles direccionales.....	6
1.2.1 Pozo vertical.....	6
1.2.2 Pozo tipo S.....	6
1.2.3 Pozo tipo J.....	7
1.2.4 Pozo Horizontal.....	8
1.3 Fuerza de fricción dinámica.....	8
1.4 Torque y arrastre.....	9
1.4.1 Torque.....	10
1.4.2 Arrastre.....	11
1.5 Mediciones del torque y el arrastre.....	11
1.6 Parámetros que afectan el torque y arrastre.....	12
1.6.1 Limpieza del agujero.....	13
1.6.2 Trayectoria del pozo.....	13
1.6.3 Tortuosidad.....	14
1.7 Factor de flotación.....	15
1.8 Empuje, tracción y torsión.....	16
1.9 Modelo de sarta suave y Modelo la sarta rígida.....	17
1.9.1 Modelo de sarta suave.....	17
1.9.2 Modelo de sarta rígida.....	18
1.10 Modelos para el cálculo del Torque y el Arrastre:.....	19
1.10.1 Software INNOVA.....	20
1.10.2 Análisis de sensibilidades por factores de fricción.....	22
1.10.3 Factor de fricción.....	22
1.11 Técnicas de evaluación y estimación de riesgos en la industria química.....	24
1.11.1 Descripción de la técnica empleada para evaluar riesgos.....	25
Conclusiones Parciales del Capítulo.....	25
CAPÍTULO II. MÉTODOS PARA LA INVESTIGACIÓN.....	27
2.1 Caracterización del pozo Seboruco-26.....	27
2.2 Factor de fricción.....	29
2.3 Modelo de torque y arrastre en pozos de alcance extendido utilizado en el caso del pozo Seboruco26.....	30

2.3.1 Determinación del modelo de Torque y Arrastre.....	30
2.3.2 Metodología a seguir para usar el software de simulación.....	32
2.3.3 Propiedades del Lodo a tener en cuenta en la determinación del torque y arrastre.....	32
2.4 Metodología del análisis de riesgo a través del HAZOP.....	43
CAPÍTULO 3: Resultados y discusión.....	45
3.1 Caracterización de la sección 8 ½” del pozo Seboruco-26.....	45
3.1.1 Propiedades del lodo utilizado en la sección.....	47
3.2 Interpretación de torque y arrastre en la sección perforada con barrena 8½”, que permiten determinar las condiciones del caño para el baje del colgador.....	48
3.3 Análisis de riesgo operacionales mediante el HAZOP.....	56
Conclusiones Parciales.....	59
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	62

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el país ha ratificado la importancia de aumentar la producción de petróleo crudo y así disminuir las importaciones de este combustible. Esto estimula el incremento de la perforación y mejoramiento de pozos. La industria del petróleo en Cuba aporta cuantiosas cantidades de dinero a la economía nacional, por lo que es necesario incrementar su producción con el menor gasto posible.

En el país se han perforado más de 1800 pozos y se han descubierto 22 yacimientos de petróleo de los cuales muchos están actualmente en producción. El problema principal para localizar reservas producibles ha sido, hasta ahora, la complejidad de la Geología Cubana, que se divide en dos provincias: La mayormente sedimentaria del norte y la del sur, que forma parte de la placa continental del caribe.

En el 2012 el pozo Seboruco 17^a arrojó resultados productivos positivos, dando lugar a un proyecto de perforación acelerada en el yacimiento Seboruco para explorar y verificar la continuidad de la estructura Seboruco en su sector oriental. La perforación y evaluación de los pozos Seboruco 18 y Seboruco 20 en el 2013, así como los pozos perforados durante 2014: Seboruco 21; 22 y 23 han demostrado potencialidad productiva en este sector y las perspectivas de desarrollo de esta estructura con extensión hacia el Este y además se supone la continuidad hacia Maya y Varadero Oeste. (Padrón, 2018)

Durante 2015 se perforó el pozo de exploración Seboruco 24, actualmente en producción y con resultados productivos que permiten la proyección de nuevos pozos en el área. Por esta razón se propuso la perforación de un nuevo pozo multicaño de dos brazos para evaluar y explotar el área comprendida entre Seboruco 23 y Seboruco 24. Este nuevo pozo fue denominado Seboruco 25 y el brazo secundario Seboruco 25A; actualmente se encuentra en perforación. (Padrón, 2018)

Con todos estos elementos, es concebida la perforación de un nuevo pozo, el Seboruco 26 de dos brazos, ubicado al Este de Seboruco 24, el cual tiene como objetivo definir el desarrollo de la estructura en ese sector, y mediante su evaluación productiva, establecer el carácter de la saturación de las capas de Veloz Green, Veloz Gray y Veloz Seboruco en el área. (Padrón, 2018)

El pozo Seboruco26 inicia la perforación el día 9 de junio de 2017, perforando el tranque de agua hasta 409m, sin mucha dificultad, a pesar de tener 2 días de afectación esta etapa cerró con 1 día de adelanto.

Desde el inicio de la perforación con barrena de la etapa de 8 ½” del pozo Seboruco-26 hasta que se alcanza la profundidad de 5783m. La perforación de este intervalo ha presentado problemas, como pérdidas de circulación, problemas con la limpieza, alto torque, estrechamiento, así como zonas inestables a la profundidad de 4500m aproximadamente.

Debido a todos estos problemas, se decide correr un registro geofísico con vistas a tener la información necesaria sobre el estado del cemento por detrás de esta camisa para determinar la posición de una ventana que posibilite la continuidad de la perforación de este pozo.

A partir de este desvío se continuó perforando hasta la profundidad actual de 5783m. En este intervalo se produjeron numerosos problemas durante la perforación, por lo cual se decidió parar la perforación a dicha profundidad y correr un registro geofísico que brindara mayor información para poder definir en qué zona se encontraba el caño; esta información unida a las descripciones de las muestras de canal mostró que a la profundidad de 4513m, justamente en la zona de mayores problemas, existía una transición litológica de una roca deleznable y poco consolidada.

Por lo que se plantea como problema:

Se desconocen las condiciones del caño desnudo del pozo Seboruco-26 que permitan realizar de forma efectiva y estable su encamisado.

Hipótesis:

Si se determinan los valores de torque y arrastre haciendo uso del software INNOVA se podrá determinar condiciones aceptables para el encamisado del caño desnudo del pozo Seboruco-26.

Objetivo general

Determinar las condiciones del caño desnudo en el pozo Seboruco-26 para su encamisado.

Objetivos Específicos:

1. Caracterizar la estructura del pozo Seboruco-26.

2. Analizar los valores de torque, arrastre y factores de fricción en el caño desnudo perforado en el pozo Seboruco-26 para su encamisado.
3. Análisis de riesgos operacionales a través del HASOP del caño desnudo del pozo Seboruco-26.

Capítulo I. Análisis Bibliográfico

En este capítulo se abordan temas relacionados con la temática en estudio registrado en artículos de internet, revistas, libros que permiten definir técnicas y métodos necesarios a emplear durante la investigación. También se analizan temáticas como: Definición de pozos de alcance extendido, tipos de perfiles direccionales, definición de torque y arrastre, así como de factor de fricción, parámetros que los afectan y como se determinan, modelos que permiten la interpretación grafica de torque y arrastre en la perforación de petróleo y técnicas para el análisis de riesgos en la industria.

1.1 Definición de Pozos de Alcance Extendido (ERD).

Un Pozo de Alcance Extendido o largo alcance se define como aquél que posee una relación de desviación horizontal-profundidad vertical verdadera (HD/TVD) mayor que 2. Esta relación constituye una indicación cruda de la complejidad del pozo: cuanto más alta es la relación, más complejo es el pozo. Pero se trata solamente de un indicador básico de la dificultad que implicará la perforación y la terminación del pozo. Las operaciones de perforación que apuntan a objetivos localizados a una distancia horizontal significativa respecto de la localización superficial, requieren algo más que perforar en sentido vertical, girar y perforar en sentido horizontal. Dependiendo de características de la formación tales como temperatura, presión y propiedades de las rocas, el personal de perforación determina el peso a aplicar sobre la barrena (WOB), las rpm de la sarta de perforación, la densidad del lodo y otros parámetros. Todos estos parámetros son ajustados por la trayectoria planificada del pozo, y por el incremento y la reducción angular, y los giros acimutales necesarios para lograrla. Esto último se ha convertido en un factor significativo en la planeación de pozos de alcance extendido en los últimos años ya que la sofisticada tecnología de perforación direccional permitió a los operadores utilizar trayectos de pozos 3D menores en número, pero más complejos, para optimizar el desarrollo de los yacimientos. (Verteuil et al., 2001).

Los pozos direccionales poseen una clasificación la cual dependerá de la forma que tome el ángulo de inclinación en lo que corresponde a su trayectoria. El torque y el arrastre dentro de la sarta de perforación dependerán de la trayectoria del pozo y de los ángulos de diseño. (Verteuil et al., 2001).

1. Tangencial o “J” Invertido (Slant)

2. “S” Especial o Modificado

3. Inclinado (uso de taladro especial)

4. Horizontal o Multilateral

Según Aadnoy et al 2008, a la hora de planificar un pozo de alcance extendido, los ingenieros deben considerar también la física de la longitud del pozo. En los pozos verticales, el torque, el arrastre y la flexión se ignoran en esencia y se asume que la tubería se encuentra ubicada en el centro del pozo. Las cargas generadas por estos eventos pueden volverse tan grandes que la cabeza rotativa superior del equipo de perforación no puede rotar la tubería, y el malacate no puede subirla o bajarla. También puede suceder que las cargas sean suficientemente grandes de manera que, en caso de que la tubería se atasque, los esfuerzos realizados para liberarla produzcan su rotura, obligando al operador a abandonar el pozo, declarar la profundidad total (TD) prematuramente o perforar un pozo de re-entrada. En los pozos de alcance extendido, la fricción juega un rol más significativo que en los pozos verticales. Esto se debe a que la columna de perforación y la tubería de revestimiento son forzadas contra los lados del pozo de alcance extendido (derecha). La existencia y la magnitud del torque mecánico (tal como el torque en la barrena y el torque fuera del fondo producido por fricción) y del arrastre son una función de diversos factores clave:

- Tensión y compresión en la sarta de perforación
- Severidad de la pata de perro; tasa de incremento o reducción angular o cambio de acimut
- Tamaño del pozo y de la tubería
- Peso de la sarta de perforación
- Inclinación
- Lubricidad; el efecto de los reductores de fricción en el fluido de perforación.

El torque mecánico se genera cuando la sarta de perforación experimenta un fenómeno de atascamiento diferencial o interactúa con capas de recortes o formaciones inestables.

1.2 Tipos de perfiles direccionales.

Existen varios tipos de perfiles de pozos direccionales, diferenciados tanto por su forma, su función, limitaciones geológicas, geomecánicas, económicas y de operación. Con base en las perforaciones que se han venido realizando en los últimos años, los más frecuentemente usados son: pozos tipo tangencial, pozos tipo “S”, pozos tipo “J”, pozos inclinados, pozos horizontales y pozos multilaterales (Verteuil et al., 2001). En la literatura existen cuatro perfiles direccionales más comunes, su selección depende de los objetivos geológicos y el mecanismo de producción que se tendrá en el pozo: vertical, tipo S, tipo J, horizontal.

1.2.1 Pozo vertical.

Generalmente utilizados para pozos exploratorios para localizar el contacto agua-aceite, y la localización exacta de planos de fallas. Ver figura 1.1.

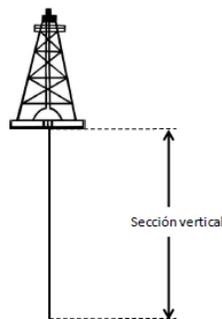


Figura 1.1. Pozo vertical. Fuente: Aadnoy et al 2008

1.2.2 Pozo tipo S.

Es el pozo de configuración en S, como se muestra en la figura 1.2, cuya desviación se inicia cerca de la superficie manteniendo su inclinación al igual que el pozo tangencial hasta que se logra casi todo el desplazamiento lateral; seguidamente se reduce el ángulo de desviación hasta volver el pozo a la vertical para llegar al objetivo. Esta configuración se usa principalmente para perforar pozos con intervalos productores múltiples o en los que hay limitaciones impuestas por el tamaño y la localización del objetivo. (Aadnoy et al., 2008).

En los pozos, el perfil S garantiza el espaciamiento en el fondo cuando varios pozos son perforados desde la misma plataforma.

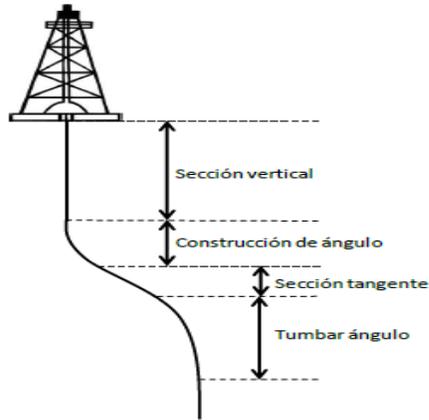


Figura 1.2. Pozo tipo S. Fuente: Aadnoy et al., 2008

1.2.3 Pozo tipo J.

La configuración de estos pozos tipo J como se muestra en la figura 1.3, tiene como característica que la desviación inicial se presenta a poca profundidad, el ángulo de inclinación que alcanza el pozo se mantiene constante hasta llegar al objetivo. Esta configuración se aplica usual-mente en pozos de profundidad moderada, en regiones en las que la producción se encuentra en un solo intervalo y en las que no se requieren sartas intermedias de revestimiento, también se utiliza en pozos de mayor profundidad en los que se requiere mucho desplazamiento lateral. Conocidos como pozos inclinados, estos se componen de una sección recta, sección de construcción y una sección tangente. Generalmente se utilizan en zonas donde no es posible o no se desea perforar sobre el objetivo. (Aadnoy et al., 2008).

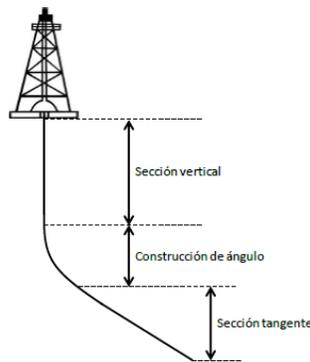


Figura 1.3: Pozo tipo J. Fuente: Aadnoy et al., 2008

1.2.4 Pozo Horizontal.

Son pozos perforados horizontalmente o paralelos a los planos de estratificación de un yacimiento con la finalidad de tener mayor área de producción. También se denominan pozos horizontales aquellos con un ángulo de inclinación no menor de 86° respecto a la vertical. La longitud de la sección horizontal depende de la ex-tensión del yacimiento y del área a drenar en el mismo. Los pozos horizontales constan de una sección vertical, sección de construcción, sección tangente, una segunda sección de construcción y una sección horizontal.

Estos pozos son usados cuando se tiene una zona con un espesor delgado, ya que la parte horizontal atravesara la zona, teniendo como resultado mayor área de contacto con el yacimiento. Ver figura 1.4. (Fazaelizadeh et al., 2010).

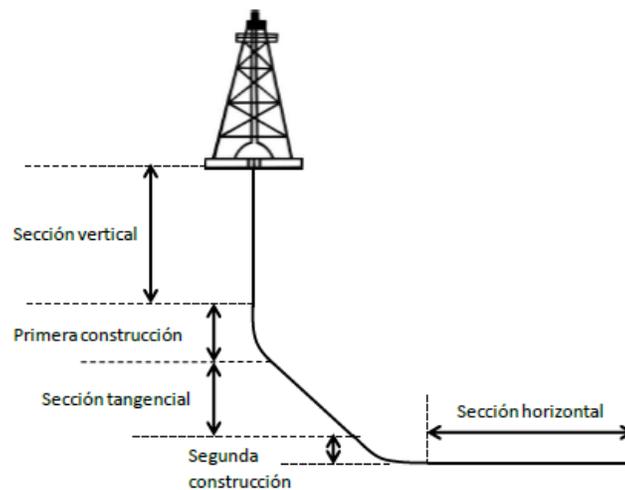


Figura 1.4. Pozo horizontal. Fuente: Fazaelizadeh et al., 2010

1.3 Fuerza de fricción dinámica.

Fricción:

Se define a la fricción como una fuerza que actúa sobre un cuerpo e impide el deslizamiento de este con respecto a otro o en la superficie que esté en contacto. Esta fuerza es siempre tangencial a la superficie en los puntos de contacto con el cuerpo, y su dirección se opone al movimiento del cuerpo con respecto a esos puntos. (Gaynor et al., 2002). Ver figura 1.5.

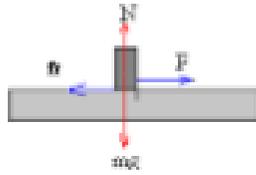


Figura 1.5. Fricción entre un cuerpo y una superficie Fuente: Gaynor et al., 2002.

Como indica la figura 1.5, la magnitud de la fuerza de rozamiento entre dos cuerpos en contacto es proporcional a la fuerza normal entre los dos cuerpos. (Gaynor et al., 2002).

Existen dos tipos de fricción:

1. Fuerza de Fricción Estática (f_s)
2. Fuerza de Fricción Dinámica (f_k): Coeficiente de fricción es un coeficiente adimensional que expresa la relación de las fuerzas aplicadas. Usualmente se representa con la letra griega μ . Existen diferentes tipos de coeficiente de fricción según la fuerza de fricción que exista: (Gaynor et al., 2002).

1. Coeficiente de fricción estática (μ_s):
2. Coeficiente de fricción dinámica (μ_k):

La relación entre los dos coeficientes es: $\mu_s > \mu_k$

1.4 Torque y arrastre.

El torque es una medida de la resistencia a la rotación, causada por la fricción entre la tubería de revestimiento o la sarta de perforación y la pared del pozo. El arrastre es una medida de la resistencia al movimiento ascendente o descendente. La magnitud del torque y del arrastre, observada en el tubular, es una función de la tensión o la compresión y del área en contacto con el pozo. Cuando los tubulares están centrados correctamente en un pozo vertical, el contacto con la pared del pozo es insignificante, y el torque y el arrastre son esencialmente nulos (izquierda). Durante una sección de incremento angular, la columna de perforación o la tubería de revestimiento experimentan grados variables de torque y arrastre porque es presionada contra el lado superior de la pared del pozo y se encuentra en estado de compresión o tensión (centro). En la sección tangencial del pozo, los tubulares se encuentran

en pleno contacto con la parte inferior del pozo y en cierto estado de compresión o tensión (derecha). La magnitud del torque y el arrastre, creados a lo largo de esta sección del pozo, es básicamente una función del peso de la tubería de revestimiento. La flexión se produce cuando las fuerzas de compresión resultantes del arrastre pliegan la tubería contra la pared del pozo, generando una configuración sinusoidal (inserto, extremo superior). Con el tiempo, si las cargas continúan creciendo, la tubería se curvará helicoidalmente (inserto, extremo inferior), y en ese momento el movimiento descendente se detendrá. Ver anexo 1. (Maehs et al., 2010).

1.4.1 Torque

El torque es aplicar una fuerza de rotación, para poder hacer girar a la sarta de perforación y a las herramientas que la componen; es afectado por diferentes fuerzas dentro del pozo (Cardona et al., 2012):

- Torque friccional: Es generado debido a las fuerzas de contacto entre la sarta de perforación y la tubería de revestimiento o el agujero del pozo descubierto.
- Torque mecánico: generado por la interacción entre el agujero descubierto, la sarta de perforación y composición de la herramienta de fondo (BHA), debido a la posible reducción de agujero, derrumbe del agujero, ojos llave, pegadura por diferencial o acumulación de recortes causada por una mala limpieza del agujero.
- Torque en la barrena: generado por la interacción entre la barrena y las formaciones que están siendo perforadas.

El torque T de una fuerza F que actúa sobre algún punto de un cuerpo rígido, en una posición r respecto de cualquier origen O , por el que puede pasar un eje perpendicular, y sobre el cual se produce la rotación del cuerpo, se puede determinar como el producto vectorial entre la posición r y la fuerza aplicada F . El torque es una magnitud vectorial, si θ es el ángulo entre r y F . (Cardona et al., 2012).

El valor escalar de este producto vectorial se define como:

$$T=r \times F \times \text{sen}(\theta) \tag{1.1}$$

1.4.2 Arrastre

Todo cuerpo que esté inmerso en la corriente de un fluido estará sometido a fuerzas y momentos de fuerzas que dependen de la forma y orientación con respecto al flujo. El arrastre es una fuerza mecánica, generada por la interacción entre un cuerpo rígido y un fluido. No es generado por un campo de fuerzas como en el caso de fuerzas gravitacionales o electromagnéticas donde no es necesario el contacto físico. Para que exista arrastre el cuerpo debe estar en contacto con el fluido. Debe haber un movimiento relativo entre el fluido y el sólido. El arrastre presente en la perforación es la fuerza que se produce entre las superficies de contacto de las conexiones de tubería y las paredes del hueco causado por el deslizamiento y/o la rotación de la sarta de perforación.

Es una fuerza axial generada de forma similar al toque, y básicamente toma el lugar del torque cuando la rotación de la sarta se detiene y la tubería se mueve únicamente en dirección axial. Al igual que con el torque, existe la componente friccional y mecánica. El arrastre siempre será una fuerza opuesta a la dirección en la cual la tubería está siendo movida (Cardona et al., 2012).

Para las operaciones de campo, los puntos de interés más importantes a medir son los siguientes:

- Peso durante rotación en el fondo: es el peso de la sarta que se mide mientras la barrena está girando en el fondo pero no recargada en él y además no existe arrastre.
- Peso durante el izaje: es el peso de la sarta cuando la tubería se está levantando.
- Peso durante la bajada: es el peso de la sarta cuando esta se está introduciendo al pozo.
- Torque en el fondo: es el torque que se mide cuando la sarta gira y al mismo tiempo se encuentra en el fondo del pozo.

1.5 Mediciones del torque y el arrastre

Medición de arrastre

Si se quiere conocer el arrastre en el campo se utiliza un sensor para medir car-gas, la cual es una herramienta que va montada en la línea muerta del gancho de perforación (sistema de levantamiento de cargas).

Un cable delgado va desde el malacate y se ramifica entre las poleas del bloque corona y del bloque Viajero. El gancho que se conecta al bloque viajero, es usado para suspender la carga de perforación. Uno de los extremos de las líneas se enrolla en el malacate, siendo conocida como la “línea rápida”, el otro extremo de la línea se denomina “línea muerta”, la cual va sujeta a un carrete que enrolla al cable de acero cuando el gancho de perforación es bajado, pero primero pasa por una polea llamada tambor que sirve para cambiar la dirección de la línea muerta. (Tviedal, T., 2011). Ver figura 1.7.



Figura 1.7. Sensor de cargas. Fuente: Tviedal, T., 2011

Medición de torque

Es difícil medir el torque con la mesa rotaria por ello el torque es comúnmente medido con el top drive, este equipo mide la presión necesaria para rotar la sarta. De acuerdo al fabricante, existen tablas que están calibradas para convertir PSI en torque ($N \times m$ o $Lb \times ft$).

1.6 Parámetros que afectan el torque y arrastre.

Las mediciones de torque y arrastre que se hacen en el campo siempre se ven afectadas por varios factores, algunos de estos pueden ser modelados y otros están agrupados en un solo factor de fricción. Gracias al efecto combinado de todos estos parámetros se obtienen

resultados más precisos. En general se pueden separar los parámetros que afectan el torque y el arrastre en dos grupos, el primero se debe a la limpieza del agujero o uso de un lodo inapropiado y el segundo a la trayectoria del pozo, dichos parámetros son explicados a continuación (Tveitdal., 2011).

1.6.1 Limpieza del agujero.

El tipo de fluido de perforación: un lodo base agua tiene un menor efecto lubricante que un lodo base aceite; se le pueden añadir lubricantes para reducir el torque y el arrastre, pero ello podría causarle daños a la formación.

Cada litología tiene diferentes propiedades que afectan al torque y el arrastre como:

1. El tamaño de grano.
2. Fuerzas de viscosidad hidrodinámica.
3. Tener dos tipos de fluidos de perforación con distintas densidades en el pozo o la tubería.
4. Una mala limpieza del pozo: la acumulación de recortes representan obstrucción mecánica en el pozo, esto se reduce con un buen diseño de la hidráulica y un fluido de perforación apropiado.
5. Inestabilidad en el agujero: hinchazón de las lutitas, agujero estrecho, desprendimientos del agujero.
6. Adherencia diferencial: cuando la presión en el pozo es más grande que la presión de formación, provocando que la tubería sea empujada hacia una pared del agujero, aumentando las fuerzas de contacto entre la sarta de perforación y el pozo. (Kristensen E., 2013).

1.6.2 Trayectoria del pozo.

La rigidez del ensamble de fondo y de la tubería siempre interactúan con la formación, lo cual resulta en tener un aumento en el torque y arrastre, especialmente cuando el ensamble de fondo se encuentra en una sección con alta severidad de pata de perro. (Sheppard et al. 1987).

Asientos de llave: Son agujeros que se producen en las paredes del pozo, se deben a las fuerzas laterales que hay entre el pozo y la sarta de perforación; cuando la tensión es alta el contacto de la tubería con el agujero hace que las paredes del pozo se derrumben,

produciendo asientos de llave, el problema ocurre cuando las conexiones de la herramienta entran en esos espacios, provocando un aumento en el arrastre y en ocasiones la sarta se atora, un ejemplo de asiento de llave se muestra en la figura 1.8 (Sheppard et al., 1987).

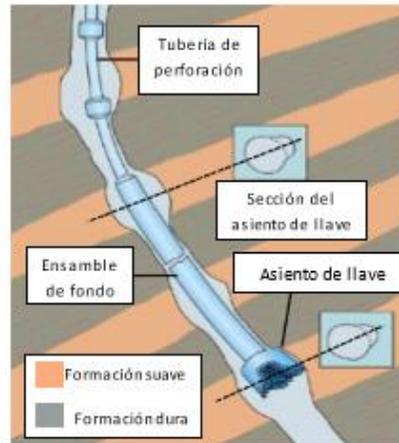


Figura 1.8. Ojo de llave. Fuente: Tveitdal 2011.

1.6.3 Tortuosidad

La tortuosidad son las irregularidades que se presentan a lo largo de la trayectoria del pozo, estas se deben al deslizamiento del motor de fondo a través de los diferentes tipos de litología. Al detener la perforación rotacional y antes de iniciar la perforación por deslizamiento, se orienta la sección curva del motor hacia la dirección que se desea perforar, muchas veces queda en la orientación incorrecta, provocando que la sarta de perforación se deslice hacia una dirección indeseada. Se dice que se tiene una trayectoria tortuosa cuando el fenómeno anteriormente mencionado ocurre con frecuencia durante la perforación, generando aumento en el torque y el arrastre (Gaynor, 2001). La siguiente figura muestra a una trayectoria tortuosa (rojo) y a otra sin irregularidades (negro).

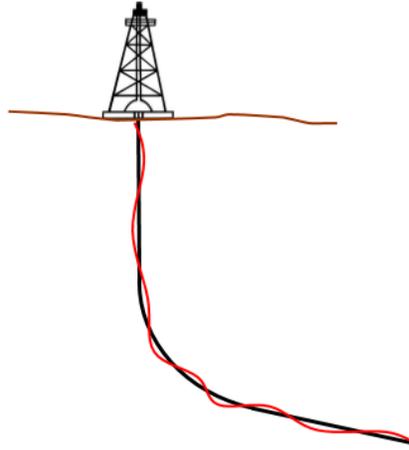


Figura 1.9. Tortuosidad. Fuente: Gaynor, 2001

1.7 Factor de flotación.

Para el modelado de torque y arrastre, es importante considerar el efecto de la fuerza de flotación, ya que cuando la tubería de perforación está sumergida en un fluido, su peso es igual al peso de la tubería en el aire menos el peso del fluido de perforación desplazado por la tubería sumergida, este efecto es mejor conocido como el principio de Arquímedes, el cual se utiliza para deducir la ecuación del factor de flotación.

Factor de flotación:

$$\beta = 1 - \rho_{fl} \times \rho_{tuberia} \quad (1.2)$$

Donde,

β = Factor de flotación

ρ_{fl} = Densidad del fluido de perforación (g/cm^3)

$\rho_{tuberia}$ = Densidad de la tubería (g/cm^3)

Cuando se multiplica el factor de flotación, por el peso de la tubería, obtenemos el peso de la tubería inmersa en fluido de perforación. Si existe una diferencia de densidades entre el fluido que está dentro y fuera de la tubería, como por ejemplo en una cementación durante el desplazamiento del cemento y el lodo de perforación que lo empuja, es necesario usar la siguiente formula (Aadnoy et al., 2006):

$$\beta = 1 - \frac{\rho_e A_e - \rho_i A_i}{\rho_{sarta} (A_e - A_i)} \quad (1.3)$$

Dónde:

ρ_e = densidad del fluido externo (g/cm^3)

A_e = Área externa.

ρ_i = densidad del fluido interno (g/cm^3)

A_i = Área interna.

La ecuación 1.3, es la más comúnmente usada durante la perforación, la ecuación 4.2 suele usarse más en casos donde existe una diferencia de densidades entre el fluido contenido dentro de la tubería y el del espacio anular, como por ejemplo, en las operaciones de cementación, corrida de la tubería en el pozo, así como operaciones de perforación bajo balance.

1.8 Empuje, tracción y torsión

En los pozos de alcance extendido, la fricción juega un rol más significativo que en los pozos verticales. Esto se debe a que la columna de perforación y la tubería de revestimiento son forzadas contra los lados del pozo de alcance extendido (derecha). (Aadnoy et al., 2006).

La existencia y la magnitud del torque mecánico (tal como el torque en la barrena y el torque fuera del fondo producido por fricción) y del arrastre son una función de diversos factores clave:

1. Tensión y compresión en la sarta de perforación
2. Severidad de la pata de perro; tasa de incremento o reducción angular o cambio de acimut
3. Tamaño del pozo y de la tubería
4. Peso de la sarta de perforación
5. Inclinación
6. Lubricidad, el efecto de los reductores de fricción en el fluido de perforación.

El torque mecánico se genera cuando la sarta de perforación experimenta un fenómeno de atascamiento diferencial o interactúa con capas de recortes o formaciones inestables. La

ejecución de la selección de la barrena al comienzo del proceso de planeación del pozo ayuda a evitar el torque en la barrena, el cual es generado por su interacción con la formación. El torque fuera del fondo, como indica el término, ocurre cuando se rota la sarta de perforación mientras se levanta por encima del fondo del pozo. Esto elimina el elemento de torque en la barrena de la medición. El arrastre es una fuerza axial, afectada por los mismos factores que el torque, y se produce cuando la tubería es desplazada hacia arriba o hacia abajo en el pozo. (Verteuil 2001).

1.9 Modelo de sarta suave y Modelo la sarta rígida.

Existen varios modelos matemáticos para predecir las fuerzas de torque y arrastre, cada modelo tiene sus teorías y suposiciones. El modelo de sarta suave y el modelo sarta rígida, son básicamente los dos tipos de modelos más comunes para el análisis de torque y arrastre.

1.9.1 Modelo de sarta suave:

La certeza al aplicar cada modelo depende en gran parte de la tortuosidad del pozo, la cual se divide en macro o micro y tiene un efecto en la superficie de contacto entre la sarta y el agujero. La macro tortuosidad se caracteriza por tener irregularidades en una longitud mayor a 10 metros, mientras que la micro tortuosidad tiene una longitud menor a 10 metros (Menand y Sellami 2006). Los dos tipos de irregularidades tienen un efecto en el parámetro friccional del pozo, el cual es un valor difícil de predecir durante la fase de planeación.

La mayoría de los modelos usados por la industria, están basados en el modelo de sarta suave, en ocasiones llamado modelo de “cable” o “cadena”. Este modelo asume que la sarta toma la forma que tiene la trayectoria del pozo y siempre existe el contacto entre el pozo y la tubería.

Debido a la fricción generada por la rotación, la tubería tiende a recargarse en un lado del pozo (lado derecho, izquierdo, arriba), en estos casos las fuerzas de contacto entre el pozo y la sarta serán menores si se compara cuando se tiene a la sarta recargada en la parte baja del pozo; de acuerdo a esto, otra importante suposición que hace el modelo de sarta suave es no considerar la posición de la tubería, lo que introduce errores a la hora de calcular el torque y el arrastre, algunos autores compensan este error ajustando el valor del factor de fricción (Mitchell et al. 2007).

En general, la posición de la sarta de perforación es relativa, ya que tal vez la superficie de contacto podría estar en la parte alta, del lado derecho o izquierdo del pozo, dependiendo de la sección del pozo y la operación de perforación que se esté realizando (fig.1.10)

El modelo de sarta suave, no puede predecir la posición de donde estará recargada la sarta, por lo tanto y en algunos casos tal falta de predicción provocara errores en los resultados del cálculo de torque y arrastre.

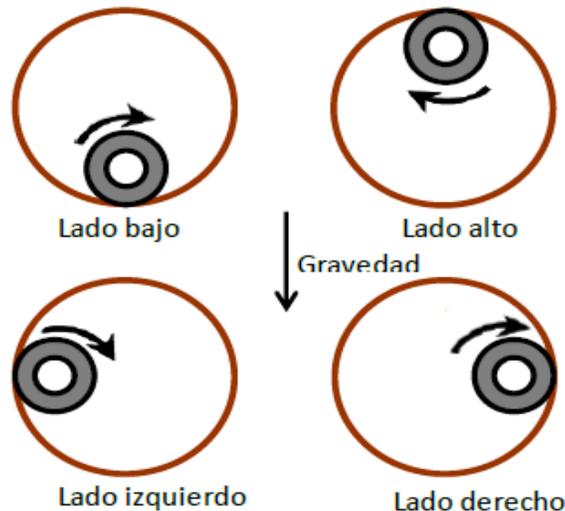


Figura 1.10. Posición de la sarta en relación con el pozo. Fuente: Menand et al. 2006.

1.9.2 Modelo de sarta rígida.

El modelo de sarta rígida, como lo dice su nombre toma en cuenta la rigidez de la sarta de perforación en el agujero y también el tamaño del espacio anular. Aunque exista una variedad de modelos desarrollados de sarta rígida, ninguno de ellos tiene una formulación estándar de torque y arrastre como el modelo de sarta suave.

Menand y sus colegas introdujeron un modelo de sarta rígida basado en experimentos de visualización en 3D de la deformación de la sarta de perforación dentro del pozo, el cual muestra resultados más exactos si se compara con el modelo de sarta suave. Tal modelo contiene un algoritmo de contacto, el cual calcula todos los puntos que están en contacto entre el pozo y la sarta. Aplicando el nuevo modelo de tubería rígida de S. Menand, la sarta se comporta de manera más natural en cuanto a las fuerzas de contacto laterales y momentos de flexión dentro del pozo, por lo tanto es más precisa la predicción de torque y arrastre de acuerdo a las posiciones mostradas (figura 1.11).

Basado en experimentos, los modelos de sarta suave y rígida muestran resultados similares sobre una trayectoria con poca tortuosidad, pero al tener altas tortuosidades, el modelo de sarta rígida muestra mejores resultados (Menand et al. 2006). El criterio más importante que requiere la industria petrolera es dar un valor razonable para la predicción de torque y arrastre.

1.10 Modelos para el cálculo del Torque y el Arrastre:

Aadnoy desarrolló una solución analítica para calcular el torque y arrastre en las diferentes geometrías que pudiera tener un pozo. El modelo se aplica en cada sección del pozo, como lo es en secciones verticales, construcción de las curvas, cuando se tumba ángulo y secciones rectas con cualquier ángulo de inclinación.

El modelo de Aadnoy es capaz de calcular el torque y el arrastre para los diferentes trabajos que se estén elaborando con la sarta de perforación, ya sea cuando se encuentra rotando, cuando se extrae o se introduce e incluso la combinación del movimiento axial y rotacional.

Aadnoy considera a la sarta como una sarta suave, en otras palabras la tubería es capaz de adaptarse a la forma que tenga la trayectoria, además es llamado modelo de sarta suave debido a que no considera la rigidez de la sarta, asumiendo que la tubería se comporta como un cable pesado o cadena que corre a lo largo de la trayectoria del pozo, lo que implica que la tensión axial y el torque estén directamente relacionados con la tubería y las fuerzas de contacto con las paredes del pozo (Ismayilov 2012).

Una de las ventajas de este modelo es que incluye el efecto Capstan, el cual nos dice que al pasar un cable por una superficie curva (ejemplo: Cable enrollado en una polea), es necesario considerar la tensión del cable. La fuerza de tensión está relacionada con la reacción (fuerza normal) que existe entre el cable y la pared de la superficie curva, si se ignora la rigidez del cable, tal reacción es proporcional a la tensión y por lo tanto a la fuerza de fricción. Entonces, retomando el ejemplo de la polea, cuando un objeto es levantado la fuerza tensión en el cable aumenta al igual que la fuerza ejercida para levantar el peso y cuando el objeto es bajado la fuerza de tensión disminuye al igual que la fuerza necesaria para bajar el objeto, como se muestra en las siguientes imágenes:

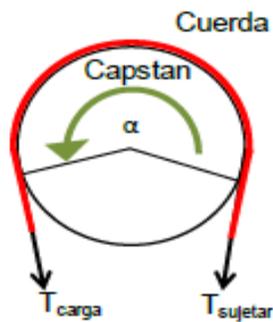


Figura 1.11. Efecto capstan al bajarla

la carga. El cable rojo representa un aumento en la tensión al levantar la carga.

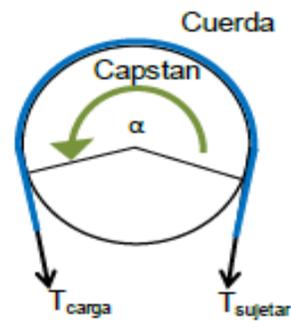


Figura 1.12. Efecto capstan al levantar

la carga. El cable azul representa una disminución en la tensión al bajar la carga.

El efecto Capstan confirma una disminución en las fuerzas de arrastre al bajar la tubería de perforación y un aumento en el arrastre al levantarla.

El torque y el arrastre del pozo pueden ser modelados por dos ecuaciones, una para secciones rectas y otra para secciones curvas. En este capítulo se explicaran los conceptos que utilizo Aadnoy para crear las ecuaciones del cálculo de torque y arrastre.

1.10.1 Software INNOVA

La capacidad de integración de la aplicación, junto con su facilidad de uso, nos permite brindar a nuestros clientes los servicios integrales que ellos necesitan para la planificación de pozos e ingeniería de perforación.

Es una aplicación completa y de fácil uso para la planeación de pozos, manejo de trayectorias y análisis de ingeniería de perforación; que permite a las compañías de servicios de perforación planificar pozos con mayor exactitud, reducir riesgos e incertidumbres al perforar, conocer la ubicación y perforar con más seguridad. El software INNOVA es independiente de los servicios tradicionales petroleros y brinda soluciones que ayudan a los clientes alcanzar sus objetivos libres de conflicto de interés.

INNOVA es una sola aplicación integrada con una sola base de datos, que trabaja bajo el sistema operativo Microsoft Windows. Esto permite niveles de integración sin precedente,

interface consistente y amigable, y resultados más rápidos a través de flujos de trabajo de ingeniería altamente eficientes y flexibles. Los datos se ingresan una vez y están disponibles instantáneamente en todas las áreas de la aplicación, asegurando, su integridad y evitando ser transferidos o reingresados.

1. El sistema de análisis de Torque y Arrastre de INNOVA se usa para validar diseños de pozo, previendo posibles fallas en las sartas de perforación, y disminuir tiempos no productivos. Los ingenieros de perforación lo pueden usar para modelar y evaluar todo tipo de BHA, por ejemplo:
2. Sartas de perforación
3. Corridas de tuberías de revestimiento.
4. Sartas de terminación

El tipo y grado de material son totalmente personalizables, lo cual permite definir y agregar nuevas herramientas a un catálogo existente o a un nuevo catálogo. Uniones rotatorias API y conexiones de las tuberías de revestimiento, son modeladas permitiendo cálculo de propiedades y límites operacionales de las mismas.

Las Composiciones de Herramientas de Fondo (BHA) creadas, se pueden guardar en catálogos para uso futuro y se pueden añadir nuevos catálogos. Podemos visualizar gráficamente las combinaciones, propiedades mecánicas y dimensiones físicas de las herramientas.

El software ingenieril Innova es un software de perforación utilizado para ayudar a operadores en diseños de pozos y el trato con Compañías de Servicio que en la actualidad presentan desafíos de perforación en la industria. El Innova proporciona una solución completa con un paquete simple y fácil de usar.

Innova combina paquetes múltiples de planificación de procesos a gran velocidad y quita duplicación de entrada de los datos. Con hidráulica, Torque, Innova Engineering realmente es uno de los mejores de todos los softwares que cuenta con un paquete para planear y perforar con éxito.

1.10.2 Análisis de sensibilidades por factores de fricción

El módulo de sensibilidades por factor de fricción realiza un análisis a diferentes profundidades usando diferentes factores de fricción, de tal modo que arroja un resumen con los resultados en superficie. La carga al gancho y torque en la superficie, obtenidos en el equipo pueden ser cargadas y mostradas en gráficas. Esto permite la comparación directa de modelos de carga diseñados con las cargas reales que se observan al perforar. Las herramientas para corrección de datos y el recalcu automático de los factores de fricción permiten que el modelo esté calibrado con precisión.

1.10.3 Factor de fricción.

Durante la perforación las principales fuerzas que actúan en la tubería de perforación son el peso flotado, la tensión axial, fuerza de fricción y la fuerza normal que es perpendicular a la superficie de contacto con el pozo.

Para conocer la fuerza de fricción primero es necesario calcular la fuerza normal y multiplicarla por un factor de fricción, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_f = \mu * F_N$$

(1.4)

Dónde:

F_f =Fuerza de fricción.

μ =Factor de fricción.

F_N =Fuerza normal.

El factor de fricción no es simplemente un coeficiente, de hecho es la suma de varios coeficientes de fricción y además es un parámetro ambiguo debido a que contiene un número de consideraciones con cierta incertidumbre:

1. Lubricidad de lodo.
2. Rigidez de la tubería.
3. Acumulación de recortes.
4. Asientos llave.

5. Pegadura por diferencial.
6. Severidad de la pata de perro.
7. Efecto de la hidráulica.

Usualmente la tortuosidad provoca problemas para el cálculo de torque y arrastre, para tomar en cuenta estas irregularidades el factor de fricción debe ser calibrado. Debido a que no existe un estándar para definir la relación entre la tortuosidad del pozo y el factor de fricción, las estimaciones de arrastre deben ser sobreestimadas o subestimadas, comparándolo con las mediciones de pozos anteriormente perforados. Otros factores como la acumulación de recortes, la temperatura del pozo, las partículas suspendidas en el fluido de perforación, tienen como resultado afectar el peso del fluido de perforación a lo largo del pozo. La variación del peso del lodo debe ser considerada para corregir el factor de fricción en cada intervalo en particular y obtener resultados más certeros, generalmente los cambios de peso del lodo no son considerados, debido a que se asume un buen diseño de la hidráulica. (Samuel 2010).

Tabla 1.1. Rango de factores friccionales, dependiendo del fluido con el que se requiera perforar.

Tipo de fluido	Factor de fricción	
	Agujero descubierto	Agujero entubado
Base aceite	0.16-0.20	0.17-0.25
Base agua	0.25-0.35	0.25-0.4
Salmuera	0.3-0.4	0.3-0.4
Base polímero	0.15-0.22	0.2-0.3
Base sintético	0.12-0.18	0.15-0.25
Espumoso	0.3-0.4	0.35-0.55
Aire	0.35-0.55	0.4-0.6

Fuente: Samuel 2010.

En la mayoría de los softwares para el cálculo de torque y arrastre, el usuario solo puede utilizar un solo factor de fricción para agujero descubierto y otro para agujero entubado. El mínimo cambio en el factor de fricción de un pozo de alcance extendido (ERW), puede tener un gran efecto en los cálculos de torque y arrastre, por ello es necesario que en la etapa de planeación se utilice la experiencia de pozos anteriormente perforados para ajustar la fricción. Para eliminar la incertidumbre del valor a seleccionar del rango de factor de fricción

de la tabla 1.1, en la industria petrolera los valores más usados son de 0.20 para agujero entubado y 0.25 para agujero descubierto (Aadnoy et al. 2010).

1.11 Técnicas de evaluación y estimación de riesgos en la industria química.

La evaluación de los diversos riesgos potenciales existentes en una determinada instalación se lleva a cabo modernamente mediante la aplicación de un conjunto de metodologías específicas, cada vez más extendidas; dicha evaluación, también denominada análisis de riesgos, consiste básicamente en la determinación, con una precisión razonable, de los siguientes aspectos:

Accidentes que pueden ocurrir,

Frecuencia de los mismos,

Magnitud de sus consecuencias.

Algunas de las técnicas utilizadas son claramente determinísticas (ejemplo: el cálculo de consecuencias con modelos matemáticos), otras son netamente probabilísticas (ejemplo: los árboles de fallos y los árboles de sucesos), y un tercer grupo resulta algo más difícil de clasificar; en él se incluye el análisis histórico, determinados modelos de vulnerabilidad, los índices de riesgo e incluso el HAZOP.

Para evaluar el riesgo se estudian esencialmente los acontecimientos internos, es decir, aquellos que tienen su origen en la propia industria. Simultáneamente se estudian también los acontecimientos denominados externos, tanto los de origen natural (terremotos, inundaciones) como artificial (explosiones, incendios o nubes procedentes de plantas vecinas, accidentes de carretera) capaces de originar posteriores emergencias internas.

Para estudiar los posibles accidentes internos, en primer lugar, se efectúa un análisis histórico. Es decir, se estudian los accidentes ocurridos en fábricas, procesos, instalaciones u operaciones parecidas a la que se está analizando. (Colectivo de autores 2001).

Este estudio facilita el establecimiento de los puntos débiles del sistema. Si por ejemplo, se lleva a cabo el análisis de riesgo de un parque de depósitos de combustible, el análisis histórico demostrará que un elevado número de accidentes ha sido provocado por rebosamiento (sobrellenado) y vertido del combustible; por tanto, instalando en los depósitos

un control automático de nivel provisto de alarma, se eliminará de entrada una de las fuentes de accidentes más probables. (Colectivo de autores 2001).

La técnica del análisis HAZOP, también conocido como análisis de riesgo y operabilidad, se utiliza para la identificación, evaluación cualitativa y prevención del riesgo potencial y de los problemas de operación derivados del funcionamiento incorrecto de un sistema técnico, lo cual se fundamenta en el hecho de que las desviaciones en el funcionamiento de las condiciones normales de operación y diseño suelen conducir a un fallo del sistema, quien puede provocar desde una parada del proceso hasta un accidente mayor de graves consecuencias.(Colectivo de autores 2001).

1.11.1 Descripción de la técnica empleada para evaluar riesgos.

Para la evaluación de los riesgos se emplea la técnica del análisis HAZOP, conocido como análisis de riesgo y operabilidad o análisis funcional de operabilidad (AFO) o análisis operativo (AO), es un método que fue diseñado en Inglaterra en la década de los sesenta por Imperial Chemical Industries (ICI) para aplicarlo al diseño de plantas de fabricación de pesticidas.

El análisis HAZOP es una técnica deductiva para la identificación, evaluación cualitativa y prevención del riesgo potencial y de los problemas de operación derivados del funcionamiento incorrecto de un sistema técnico. El análisis pretende, mediante un protocolo relativamente sencillo, estimular la creatividad de un equipo de expertos con diferente formación para encontrar los posibles problemas operativos.

La técnica se fundamenta en el hecho de que las desviaciones en el funcionamiento de las condiciones normales de operación y diseño suelen conducir a un fallo del sistema. La identificación de estas desviaciones se realiza mediante una metodología rigurosa y sistemática. El fallo del sistema puede provocar desde una parada sin importancia del proceso hasta un accidente mayor de graves consecuencias. (Casal 1991).

Conclusiones parciales del Capítulo

1. Un pozo de alcance extendido es aquel que posee una relación desviación horizontal-profundidad vertical verdadera.
2. Existen diferentes tipos de pozo como son tipo S, tipo J, pozos verticales y horizontales.

3. El torque es una medida (fuerza) de la resistencia a la rotación y el arrastre es la medida (fuerza) de la resistencia al movimiento ascendente y descendente
4. Los parámetros que afectan el torque y el arrastre en dos grupos, el primero se debe a la limpieza del agujero o uso de un lodo inapropiado y el segundo a la trayectoria del pozo.
5. Los modelos de sarta suave y rígida muestran resultados similares sobre una trayectoria con poca tortuosidad, pero al tener altas tortuosidades, el modelo de sarta rígida muestra mejores resultados.
6. Se presentaron modelos para el cálculo del Torque y el Arrastre y en este caso el software INNOVA que es el que se va a utilizar por su eficacia y cantidad de datos que proporciona.
7. Se evidencia la importancia de análisis de sensibilidades por factores de fricción
8. Se realiza un estudio de técnicas de evaluación y estimación de riesgos en la industria química, en este caso se empleara la técnica del análisis HAZOP.

CAPÍTULO II. MÉTODOS PARA LA INVESTIGACIÓN

La investigación está enfocada a determinar las condiciones del caño desnudo en el pozo Seboruco-26 para su encamisado, a través de la interpretación del torque y arrastre, evaluados en el software INNOVA.

La investigación se desarrolla en las etapas siguientes: caracterización del pozo Seboruco 26, elaborar una metodología que contemple la interpretación de torque y arrastre en pozos de alcance extendido, con la utilización de un software que mediante modelos gráficos permiten observar parámetros que influyen en el condicionamiento del pozo y evaluar posibles riesgos para maniobras futuras.

2.1 Caracterización del pozo Seboruco-26.

El pozo Seboruco 26, ubicado en el yacimiento Seboruco en Matanzas inicia la perforación el día 9 de junio de 2017, perforando el tranque de agua hasta 409 m, sin mucha dificultad, a pesar de tener 2 días de afectación esta etapa cerró con 1 día de adelanto.

La sección de 17 ½” inició el 25 de junio de 2017 y concluye el 22 de agosto de 2017, acumulando según se aprecia en la curva PLAN-REAL en total 17 días de atraso hasta el momento de iniciarse la tercera etapa, con una afectación de 21.28 días. Las principales afectaciones que influyen en el atraso de la sección de 17 ½” están relacionadas con una sección de baja ROP ocasionando días de atraso al cronograma planificado y a complejidades geológicas por presencia de arcillas reactivas (entre 75-100 % por cortes) de una formación Vega Alta no prevista en la información entregada por el cliente en la sección desde 1920 m hasta 1955 m.

El intervalo de 12 ¼” desde 1955 m hasta 3705 m es perforada desde el 23 de agosto al 22 de noviembre de 2017, acumulando en la etapa según curva PLAN-REAL 50 días de atraso al cronograma. Las principales afectaciones en este período están asociadas a 293 horas por paso del huracán Irma; 23h por segunda depresión tropical María y 812h por diferentes complejidades geológicas.

La etapa de 8 ½” (en perforación aún a 5562 m) con la pérdida de 255m de caño perforado en la sección anterior de 12 ¼”, esta complejidad ocurre por la imposibilidad de bajar la

camisa de 9 5/8" hasta el fondo (3705 m), quedando el zapato situado a 3450m, la complejidad ocurre debido a un cambio litológico brusco que generó un escalón en el paso de una formación muy blanda a otra extremadamente dura, se realizaron intentos de sacar la camisa para reacondicionar esa zona sin éxito. Siendo necesario cementar la camisa a 3450 m.

Se perforó caño de desvío #4 con 8 1/2" desde 3343 m hasta 5567 m con presencia de pérdidas de circulación, resistencia en el caño a partir de 4000 m siendo necesario rimar en intervalos. A esa profundidad PETRAF decide bajar el colgador, se ensancha el caño con ensanchador de 10 1/8". Bajan colgador de 7" a 5496 m, dejando un bolsillo de 71m. La sección de 8 1/2" concluye cuando se baja sarta de calibración para fresar elemento de sellaje interior del colgador y bajar a contactar la bola receptora.

El servicio de software de hidráulica, limpieza de agujero en conjunto con ingenieros altamente capacitados ha consolidado una fuerte reputación dentro de la industria como herramienta líder de análisis hidráulicos; de la misma forma, el software de reforzamiento de formación de la pared del agujero ha dado la pauta para ayudar a para minimizar las filtraciones y pérdidas de circulación en el intervalo perforado en formaciones porosas.

El Equipo de control de sólidos a utilizar deberá estar trabajando al menos en un 85% de su eficiencia operativa, ya que es muy importante mantener los sólidos de baja gravedad específica menor al 6% en el fluido de perforación, manteniendo las propiedades reológicas y reduciendo las diluciones.

A continuación se observa el mapa estructural de la zona donde está proyectado el pozo Seboruco 26 o GW-139, en el mapa se pueden observar las formaciones geológicas como son Veloz Blue, Veloz Gray y Veloz Seboruco que es a donde se quiere llegar.

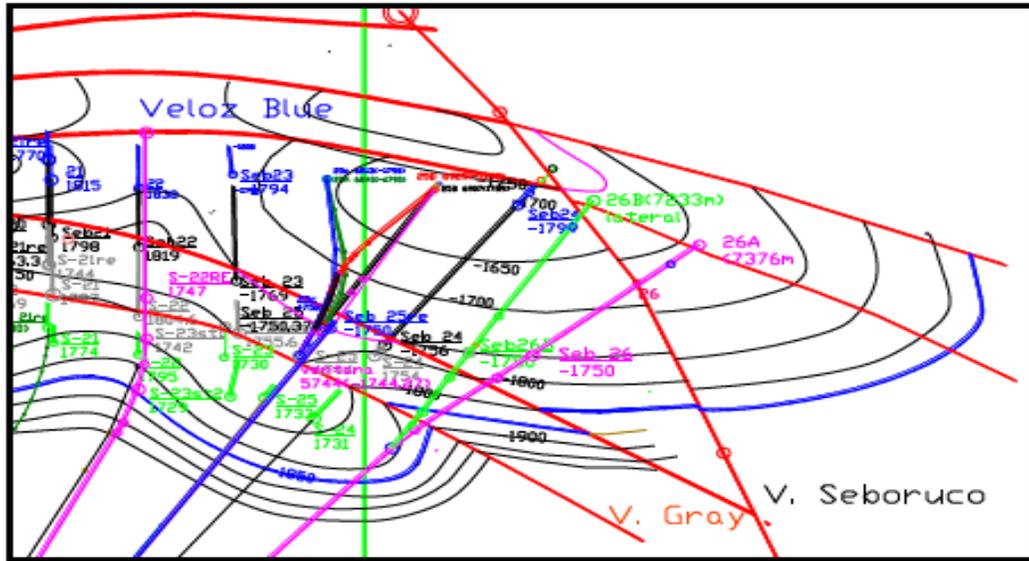


Figura 2.2. Mapa estructural en el área donde se proyecta el pozo Seboruco 26. Fuente: Padrón, 2018

2.2 Factor de fricción.

Para conocer la fuerza de fricción primero es necesario calcular la fuerza normal y multiplicarla por un factor de fricción, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_f = \mu * F_N \quad (2.1)$$

Dónde:

F_f = Fuerza de fricción. (kPa)

μ = Factor de fricción.

F_N = Fuerza normal. (kPa)

Factores como la acumulación de recortes, la temperatura del pozo, las partículas suspendidas en el fluido de perforación, tienen como resultado afectar el peso del fluido de perforación a lo largo del pozo. La variación del peso del lodo debe ser considerada para corregir el factor de fricción en cada intervalo en particular y obtener resultados más certeros en la tabla 2.1 contiene los tipos de fluidos con sus respectivos rangos de factores de fricción.

Tabla 2.1. Rango de factores friccionales, dependiendo del fluido con el que se requiera perforar

Tipo de fluido	Factor de fricción	
	Agujero descubierto	Agujero entubado
Base aceite	0.16-0.20	0.17-0.25
Base agua	0.25-0.35	0.25-0.4
Salmuera	0.3-0.4	0.3-0.4
Base polímero	0.15-0.22	0.2-0.3
Base sintético	0.12-0.18	0.15-0.25
Espumoso	0.3-0.4	0.35-0.55
Aire	0.35-0.55	0.4-0.6

Fuente: Tveitdal 2011

En la mayoría de los softwares para el cálculo de torque y arrastre, el usuario solo puede utilizar un solo factor de fricción para agujero descubierto y otro para agujero entubado. El mínimo cambio en el factor de fricción de un pozo de alcance extendido (ERW), puede tener un gran efecto en los cálculos de torque y arrastre, por ello es necesario que en la etapa de planeación se utilice la experiencia de pozos anteriormente perforados para ajustar la fricción. Para eliminar la incertidumbre del valor a seleccionar del rango de factor de fricción de la tabla 2.1, en la industria petrolera los valores más usados son de 0.20 para agujero entubado y 0.25 para agujero descubierto (Aadnoy et al. 2010)

2.3 Modelo de torque y arrastre en pozos de alcance extendido utilizado en el caso del pozo Seboruco26.

2.3.1 Determinación del modelo de Torque y Arrastre.

La simulación de procesos se ha convertido en los últimos años en una pieza fundamental para el diseño, evaluación y optimización de los diferentes procesos encontrados en la industria del gas y crudo, desde su explotación hasta su comercialización. La existencia en el mercado de una gran variedad de paquetes de computación permite al ingeniero de procesos incorporar estas herramientas de cálculos en su trabajo cotidiano, dándole así uso imprescindible y frecuente en su área que redundara en mejoramiento de su productividad y tiempo de respuesta.

El software INNOVA especializado en Modelos de Torque y Arrastre y usado para realizar diseños de pozos, previendo posibles fallas en las sartas de perforación, y disminuir tiempos no productivos, se utilizará como herramienta para identificar las condiciones del caño desnudo del pozo Seboruco-26 en la sección 81/2", para determinar las posibilidades de bajar camisas en forma de colgador de 7" y la continuidad de la perforación. El software INNOVA, utilizado para correr modelos de torque y arrastre en el pozo es el más eficiente para ver el comportamiento en cuanto a estos parámetros en pozos de largo alcance, consta de modelos tanto de torque y arrastre como hidráulico. El desarrollo de un nuevo modelo matemático para la estimación del torque y el arrastre generado durante la fase de perforación trae como beneficio:

- Permitir la optimización en función al arrastre generado, datos especialmente útiles cuando se planifican pozos de alcance extendido.
- Debido a la flexibilidad y versatilidad del modelo, puede ser usado como base para desarrollar análisis en diferentes áreas tales como pandeo, vibraciones, análisis de esfuerzos, entre otras.
- Permite la reducción de fallas en la cementación de pozos asociadas a mala centralización.
- Permite la reducción de costos no planificados por concepto de atascamiento de tuberías.
- Permite optimizar los tiempos de la perforación y la completación e pozos.

El software INNOVA ofrece una planeación personalizada, secciones, cilindro viajero y trayectorias 3D. Permite a las compañías de servicios de perforación planificar pozos con mayor exactitud, reducir riesgos e incertidumbres al perforar, conocer la ubicación y perforar con más seguridad.

Es muy útil para planificar caño de desvío, pozos multilaterales y retomar trayectorias ligándolos con otros ya existentes en la base de datos INNOVA. Se pueden definir tuberías de revestimiento, secciones de pozo, comentarios y modelos de error. También se pueden cargar y visualizar líneas de permisos y límites locales.

2.3.2 Metodología a seguir para usar el software de simulación.

Para la aplicación del modelo de Torque y Arrastre en la sección 8 ½", es muy importante conocer la profundidad a la que se va a perforar y la BHA que se va a utilizar según la construcción del pozo y de las condiciones geológicas presentes, ya que cualquier cambio litológico que es el estudio de las rocas, generalmente las macroscópicas y las características individuales de una roca en términos de su composición mineral, estructura etc. o una mala operación puede influir en su construcción efectiva.

Para obtener un perfil del Modelo de Torque y Arrastre es necesario introducir:

1. Geometría del pozo.
2. Propiedades del fluido como son: densidad del lodo, punto de cedencia (YP), viscosidad plástica (PV).
3. BHA que se va a utilizar según el TALLY.
4. Dato que son los que datan de valores de inclinación, azimut, entre otros parámetros medidos por la herramienta de trabajo direccional.

2.3.3 Propiedades del Lodo a tener en cuenta en la determinación del torque y arrastre.

Para la interpretación del torque y arrastre en el software INNOVA es necesario determinar las propiedades del lodo que se va a utilizar.

El fluido de perforación propuesto por Schlumberger para la perforación del pozo Seboruco 26.

El lodo será de gel en base a agua salada (de mar) con las siguientes propiedades:

Densidad: 1030 – 1060 kg/m³

Viscosidad: 60 - 100 cP

pH: 9.0 - 9.5

En la etapa de 26", se perforara un agujero piloto de 17 Y2" y posteriormente ampliado a 26" usando agua de mar con bombeando continuo de baches bentónicos de altas reologías (ISBAMB) para mantener limpio el agujero. Hasta la profundidad de 400 m.

En la etapa 17", se perforara con un rango de densidad de 1.28 g/cm³ a 1.38 g/cm³ de 400 m a 2.000 m. bajando un revestidor de 13 3/8"; la etapa de 12 1/4" comprende de 2.000 m a

3.650 m con un rango de densidades de fluido de 1.30 g/cm³ a 1.50 g/cm³ para sentar un revestidor de 9 5/8".

La etapa de 8 5/8' contempla bajar un colgador de 7" al perforar de 3,650 a 6,185 m con un rango de densidad de 1.30 g/cm³ a 1.35 g/cm³. Para estas etapas se propone utilizar un sistema base agua de mar polimérico inhibido (ISPAM) de diferentes densidades debido a las columnas geológicas. Diseñado especialmente para perforar formaciones reactivas. Conformados por un supresor de hidratación. Un inhibidor de dispersión y un anti embolante, que trabajan en sinergia para obtener rendimientos similares a los fluidos base aceite.

En la etapa de producción de 6" se propone utilizar el sistema base agua de mar polimérico libre de barita, gilsonita y densificado con carbonatos de calcio de diferentes granulometría (DRILL DIM) con un rango de densidad de 1.10 g/cm³ a 1.12g/cm.

Se tiene contemplado perforar un primer agujero, abriendo una ventana a la profundidad de 5492 m y posteriormente perforar hasta 7.233 m, bajando un colgador ranurado de 4 1/2". Por último, se perforara un segundo agujero de 6" de 6,185 m hasta 7,375 m con el mismo sistema de fluido limpio.

El sistema base agua de mar polimérico DRILL DIM está diseñado especialmente para perforar formaciones medianamente reactivas con capacidad de intercambio catiónico menor a 10 meq/100 gramos de arcilla. Los beneficios del DRILL DIM es la fácil preparación al estar compuesto por productos líquidos. Pudiendo generar hasta 60 m³/hr siendo de gran ayuda en etapas donde aparecen altas tasas de pérdidas de circulación.

Las mallas de zaranda deben ser las más finas posibles. Los equipos de control de sólidos deben utilizarse según las necesidades para mantener los sólidos en el mínimo posible. Se utilizará como material pesante exclusivamente Carbonato de Calcio y debe maximizarse la utilización del sistema de control de sólidos para garantizarla densidad mínima necesaria.

Se prevé la necesidad de perforar el intervalo casi en balance entre las pérdidas y las entradas de fluidos. En ese caso, algo que a veces ayuda es adicionar una densidad equivalente a la ECD del lodo antes de efectuar maniobras (para evitar entrada de fluidos) y eliminar ese exceso a reiniciar la perforación (para evitar pérdidas de circulación dinámicas).

Características principales del software INNOVA:

- Interfaz simple de usar, en un paquete estándar. Los cálculos son sumamente rápidos; buen resultado para el ensamble de fondo (BHA), complejo a las proporciones de flujo múltiples / los factores de fricción son calculados en segundos.
- Fácil para interpretar los rendimientos gráficos y numéricos disponibles para todos los módulos del cálculo.
- El usuario personaliza los informes en PDF y aventaja los formatos para todos los rendimientos.
- Proporciona informes detallados para cada módulo.
- Cuenta con gráficos completos que permiten al lector la interpretación rápida de datos generados.
- Ofrece una amplia gama de colección de datos.
- El modelado de composiciones de perforaciones con agujeros múltiples abiertos, bajo las combinaciones de rimado, encamisado y correr colgador.
- El apoyo completo para el complejo 3D de pozos direccionales
- Importar y exportar composiciones de BHA.

A continuación en la figura 2.1 se puede observar la pantalla principal del software INNOVA, a la derecha se observan las ventanas donde se introduce la geometría del pozo, propiedades del lodo y reología del lodo, a la izquierda se encuentran varias pestañas utilizadas las propiedades de las herramientas de fondo que se utilizan en la perforación, los datos reales del pozo recogidos en forma de Excel a través de la extracción de los mismos del software Wellwizard que registra todos los parámetros y operaciones que se realizan en el pozo.

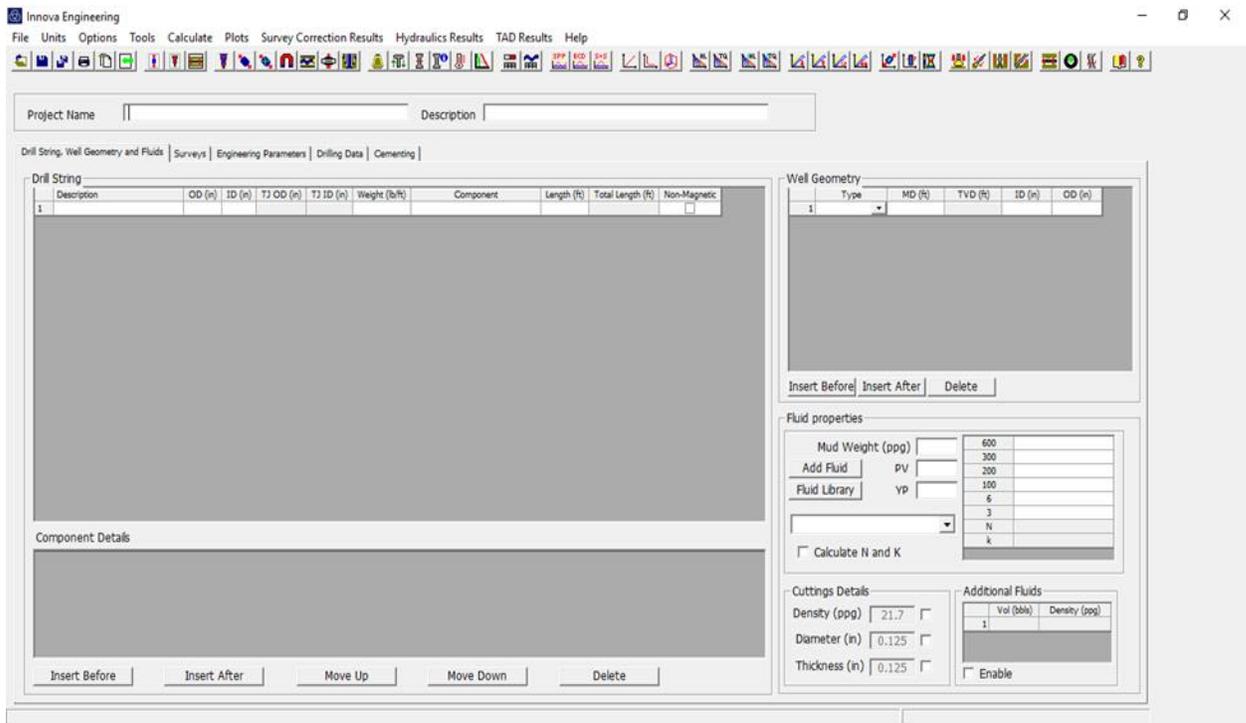


Figura 2.1. Pantalla del software INNOVA. Fuente: Software INNOVA

Operaciones que se realizan en el software:

- Modela la última sarta suave con el factor de corrección de sarta rígida.
- Modelo de Viscosidad de Arrastre, la fuerza adicional debido al pandeo (*buckling*) y la Corrección de Superficie de Contacto.
- Modelo helicoidal de pandeo estándar y conservador.
- Cálculo de Torque y Arrastre para múltiples operaciones simultáneamente Viajando arriba y abajo, Rotando fondo arriba y abajo, deslizar y rimar.
- La habilidad de modelo tanto para bombas encendidas como apagadas, y tener en cuenta la presión diferencial de la sarta.
- Cálculo sinusoidal y límites de pandeo helicoidal.
- Apoyo completo para camisas, colgador, tuberías y ensamble de perforación.
- Apoyo completo para pozos complejos direccionales en 3D.
- Análisis de sensibilidad del factor de fricción para un ilimitado número de factor de fricción o el solo cálculo.
- Modela camisa de flotación / sarta llena perforada.

- Dispositivos de reducción de fricción (no rotar los protectores de la tubería de perforación) puede ser modelada.
- Puede modelar datos a tiempo real y factor de fricción con datos calculados en orden a tiempo real.
- Cálculo del WOB (Peso sobre la barrena) aparente y real y presión de la herramienta, se puede observar visualmente la presión en la herramienta, WOB es el valor del peso sobre la barrena por valores tomados en superficie.
- La habilidad de modelar colgador expandibles.
- Habilidad de modelar diferentes materiales como el Aluminio, Titanio así como Acero.
- Modela el efecto de centralización y estabilización de camisas.

A continuación en la figura 2.2 se observan las opciones que se pueden escoger según el tipo de operación que se desee realizar. En este caso se escoge Modelo de Torque y Arrastre y se continúan los pasos según indique el software.

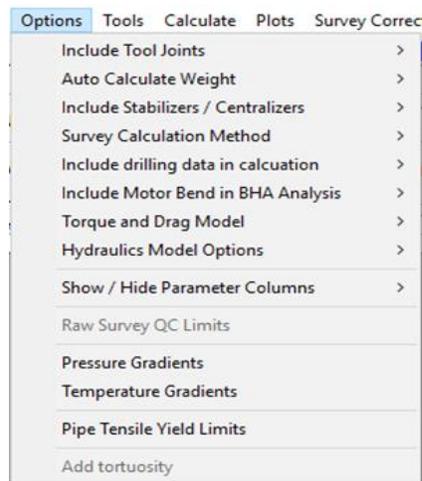


Figura 2.2. Opción Menú. Fuente: Software INNOVA

Include Tool joints: Esta opción selecciona si el diámetro externo (OD) y diámetro interno (ID) de la conexión de la herramienta son incluidos en los cálculos. Esta opción sólo afecta el torque y arrastre y cálculos del hidráulica, por defecto se pone a Sí.

Auto Calculate Weight: Esta opción determina si el peso de un componente de la herramienta de perforación es automáticamente calculado por el software basado en su OD / ID, o si el peso es entrado por el usuario. Por defecto, esta opción se pone a Sí.

Include Stabilisers / Centralizers: Esta opción habilita o desactiva estabilizadores de la tubería de perforación o centralizadores de camisas en hidráulica y torque y arrastre calculados. Por defecto, esta opción se pone a Sí.

Dato Calculation Method: Determina el método de cálculo de estudio usado para los datos entrados en la tabla de los Datos en la interfaz del usuario principal. Las opciones son Curvatura Mínima, el Radio de Curvatura, Balance Tangencial y Tangencial. Por defecto, la Curvatura

Torque & Drag Model: Opción que relaciona los cálculos de Torque y Arrastre, obteniendo el modelo deseado.

En la figura 2.3 se observa el menú de cálculo, esta ventana es la encargada de calcular de forma segura y eficiente los datos que se proporcionen según la operación deseada a realizar.

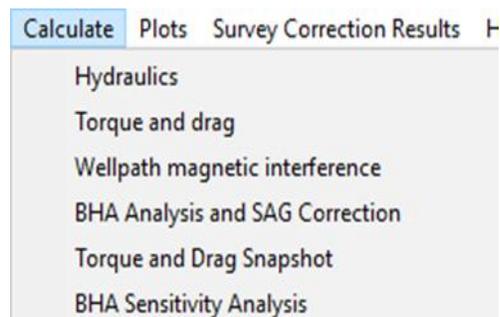


Figura 2.3. Menú de cálculo

Este menú permite realizar varios cálculos del módulo. Determina "Torque y Arrastre de forma Instantánea" ejecutará sólo el cálculo para fotos o imágenes instantáneas. Esto puede usarse para reducir tiempo del cálculo al jugar con configuraciones de caños diferentes en pozos de alcance extendidos donde el pandeo está presente.

En la figura que se observa a continuación se introduce la composición de herramienta de fondo que se va a simular, según las características de la operación realizada en el pozo. Ver figura 2.4.

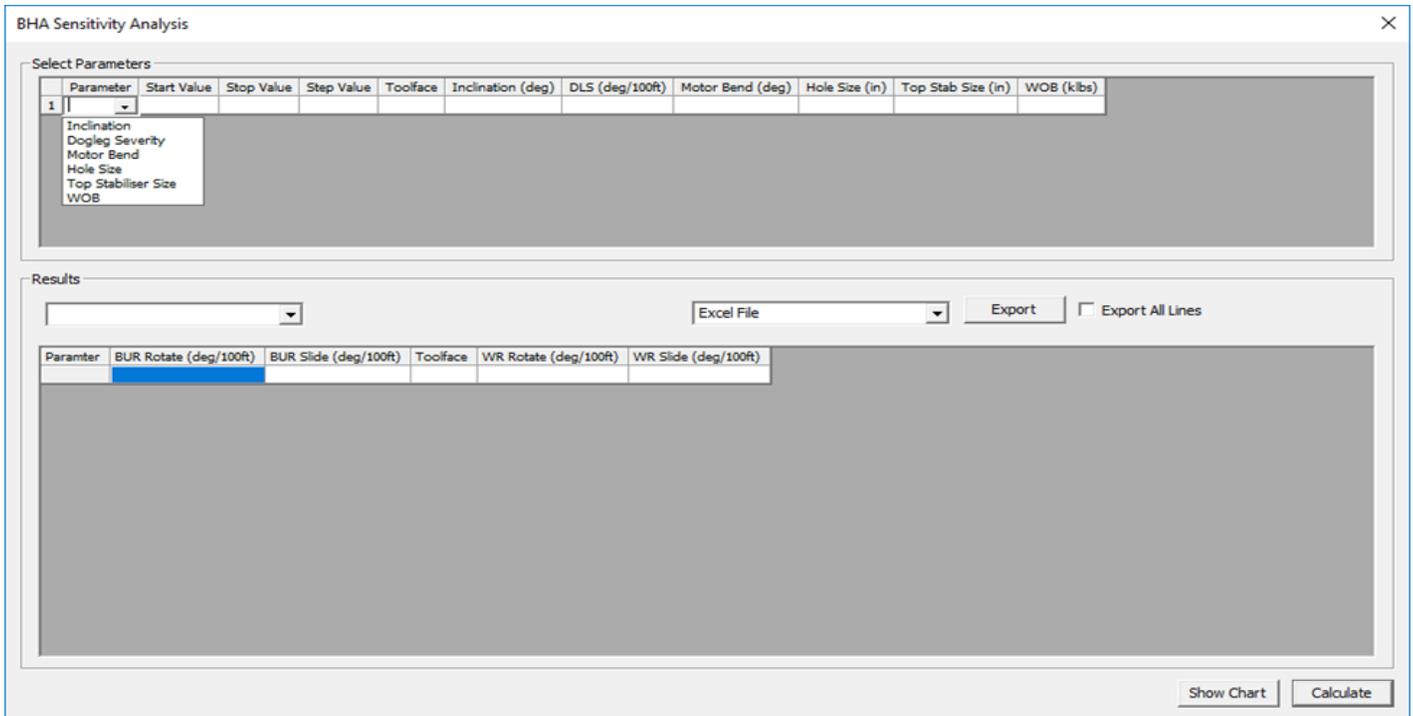


Figura 2.4. Análisis de Sensibilidad del ensamble de fondo (BHA). Fuente: Software INNOVA

- **El Tamaño del agujero:** Seleccione un rango de tamaños del agujero. Esto le permite al usuario modelar el efecto de grados variantes de tranque de agua del agujero en la tendencia a la inclinación. El tamaño del agujero debe ser el mismo tamaño de la barrena o más grande. Cualquier valor que se entre más pequeño que la barrena no correrá el programa.
- **Top Stabiliser Size:** Seleccione un rango de tamaños tope del estabilizador
- **WOB:** Selecciona valores de rango de WOB
- **Start Value:** Primer valor en el rango
- **Stop Value:** Último valor en el rango
- **Step Value:** El tamaño del paso ser usado en el cálculo entre los valores iniciales y finales
- **Toolface:** El Toolface usado en el análisis. Esto afecta el BUR & WR deslizando

- **Inclinación:** La Inclinación es usada para el análisis.
- **Resultados:** Esto es donde todos los resultados se despliegan. Los resultados pueden exportarse en forma de tabla o en forma de texto. El usuario puede escoger exportar un solo juego de resultados creando un informe que incluye todos los resultados.
- **Parámetros de la Columna:** Esta columna cambiará dependiendo del parámetro seleccionado para el cálculo, y contendrá el valor entre la entrada y la salida.
- **Calculate:** Correr el cálculo

En la siguiente figura se introducen los valores geométricos del pozo.

	Type	MD (ft)	TVD (ft)	ID (in)
1	[Dropdown]			

Buttons: Insert Before, Insert After, Delete

Figura 2.7. Geometría del pozo. Fuente: Software INNOVA

Esta sección le permite al usuario definir la construcción del pozo. El tipo de la sección se selecciona de la caja del combo en la columna del tipo y en la profundidad se entra en la columna de MD (Profundidad por la horizontal). La TVD (Profundidad por la vertical) se interpola. La TVD no se usa en cualquiera de los cálculos y simplemente se despliega para la referencia.

El ID de la sección se entra en pulgadas en la columna de ID, y en el OD se entra en la columna de OD. ID y OD debe ponerse progresivamente más pequeño y MDs debe ponerse progresivamente más profundo. Cuando el Agujero Abierto se selecciona, la celda de OD se cargará automáticamente con el mismo valor entrado en la celda de ID.

Open Hole (Caño desnudo): Éste siempre debe ser el último valor en la lista de la geometría.

La figura 2.8 que se muestra a continuación, es la ventana donde se introducen las propiedades del lodo como es densidad, viscosidad plástica y valores reológicos del pozo.

The screenshot shows the 'Fluid properties' window with the following details:

- Mud Weight (ppg):** Input field with value 600.
- Buttons:** 'Add Fluid' and 'Fluid Library'.
- Viscosity Parameters:** 'PV' and 'YP' input fields.
- Dropdown:** A dropdown menu with a downward arrow.
- Calculate N and K:** A checkbox that is currently unchecked.
- Table:** A table with 2 columns and 7 rows. The first column contains values: 600, 300, 200, 100, 6, 3, N, k. The second column is empty.
- Cuttings Details:**
 - Density (ppg):** Input field with value 21.7 and an unchecked checkbox.
 - Diameter (in):** Input field with value 0.125 and an unchecked checkbox.
 - Thickness (in):** Input field with value 0.125 and an unchecked checkbox.
- Additional Fluids:**
 - Table with 2 columns: 'Vol (bbbls)' and 'Density (ppg)'. Row 1: 1, (empty).
 - Enable:** An unchecked checkbox.

Figura 2.8. Propiedades del fluido. Fuente: Software INNOVA

Esta sección permite especificar todas las propiedades del lodo. Las propiedades del lodo se usan para todos los módulos del cálculo

1. Mudweight – Densidad del lodo
2. PV – Viscosidad Plástica. Solo se utiliza el modelo hidráulico de Bingham
3. YP – Punto de cedencia. Solo se utiliza el modelo hidráulico de Bingham
4. La densidad de las cortes - El valor predeterminado es 21.7ppg
5. Diámetro de Corte- Es el diámetro de corte usado en pulgadas para el cálculo de la limpieza del caño en el modelo hidráulico. El valor predeterminado es 0.125''.
6. El Espesor de las cortes - el Espesor de las cortes en pulgadas usadas para el cálculo de limpieza del caño en el modelo hidráulico. El valor predeterminado es 0.125 pulgadas
7. Reología del lodo – Marca las lecturas del fluido de perforación, usado para todos los modelos hidráulicos excepto el Plástico de Bingham. Incluido en la sección de reologías es en los valores N y k que representa el Índice de Flujo (N) y la Consistencia (k). Estas celdas se llenan automáticamente basado en la entrada de los valores de PV & YP. Si ningún

valores de PV & YP se entran, generalmente se entran los valores desde 3 a 600 en dichas celdas.

En la siguiente figura se observa la ventana donde se seleccionan los datos del pozo que se van a utilizar en el estudio en cuestión.



Figura 2.9. Selección de datos. Fuente: Software INNOVA

Esta sección define cual datos será utilizado, hay tres opciones.

Datos actuales-Usualmente se toman datos en la perforación

Datos del plan - Plan o datos usados cuando el pozo está en la etapa de planificación

Correr los datos – Dato MWD crudo, esta página se usa para las correcciones del estudio como MSA, SCC y SAG

Los métodos de cálculo de Datos son los siguientes:

- Curvatura Mínima
- Radios para Curvatura
- Tangencial
- Balance Tangencial

Interpolación de datos para MD y TVD juntos, el resultado puede ser exportado en forma de Texto o Excel.

En la siguiente figura se puede observar los valores numéricos proporcionados por los datos que se introducen como son profundidad real del pozo, inclinación, acimut, deslizamiento del pozo.

TAC	Grid Convergence	Declination	North Ref	Offset (ft)	Inc Start	Inc Stop	Inc Step	DLS	Inc
0.00	0.00	0.00	Grid	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

ic	Delta Azi	TVD (ft)	NS (ft)	EW (ft)	VS (ft)	TF	DLS deg/100	BR deg/100	TR deg/100
		84.99	1.00	-0.85	1.00	-136.67	1.9688	-0.1529	102.2118
		195.47	1.15	-3.18	1.15	57.63	0.1973	0.1176	7.4842
		292.96	1.12	-4.74	1.12	-169.15	0.7595	-0.7282	-14.5128
		304.96	1.12	-4.86	1.12	-99.30	1.5352	0.0000	-155.0000
		316.96	1.04	-4.97	1.04	-89.42	4.7481	2.0000	-372.5000
		328.96	0.85	-5.08	0.85	-97.60	13.5689	7.5833	-581.5000
		341.45	0.42	-5.22	0.42	-64.49	10.3597	6.7200	-217.3600
		353.43	-0.21	-5.29	-0.21	-16.74	7.9124	7.6667	-37.5833
		365.41	-0.97	-5.28	-0.97	-77.77	8.7167	3.0000	-128.7500
		377.87	-1.92	-5.25	-1.92	-44.65	11.0575	8.6400	-91.2000

Figura 2.10. Valores numéricos. Fuente: Software INNOVA

Exportar BHA: Exportar el ensamble de fondo (BHA), es la opción que el usuario ha utilizado con mayor frecuencia en la Perforación de la sección de perforación, Geometría del pozo y Fluidos se selecciona en la interfaz del usuario principal.

Importar BHA: La importación cualquiera del ensamble de fondo (BHA), en el caso de la perforación, la geometría del pozo y Fluidos se selecciona o introducen en la interfaz del usuario principal. Se debe tener cuidado, pues cualquier error en esta sección se borrará.

En la figura 2.11 se observa la ventana que te brinda los resultados de la simulación realizada, que son extraídos en forma de gráfico.

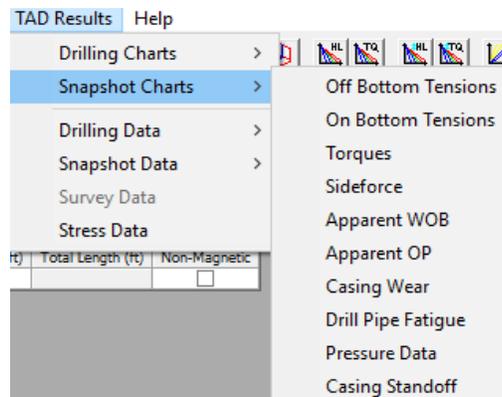


Figura 2.11. Resultados de Torque y Arrastre. Fuente: Software INNOVA

Le permite al usuario seleccionar y ver los resultados del torque y arrastre en forma de tabla o gráfico. Se desplegarán los resultados del torque y el arrastre, como se observa en la figura 2.12 luego de correr el modelo

Bit Depth (m)	Rotating Weight (klbs)	PU (klbs) @ 0.10	PU (klbs) @ 0.15
0	69	69	69
30.00	92.52	92.54	92.55
60.00	104.01	104.06	104.08
90.00	110.36	110.45	110.49
120.00	116.72	116.84	116.91
150.00	123.97	124.14	124.23
180.00	131.25	131.48	131.60
210.00	137.01	137.29	137.44

Bit Depth (m)	Off Btm Tq (kftlbs) @ 0.10	Off Btm Tq (kftlbs) @ 0.15	Off Btm Tq (kftlbs) @ 0.20
0	0	0	0
30.00	0.01	0.01	0.01
60.00	0.02	0.02	0.02
90.00	0.03	0.04	0.04
120.00	0.04	0.06	0.06
150.00	0.05	0.08	0.08
180.00	0.07	0.11	0.11
210.00	0.09	0.13	0.13

Figura 2.12. Resultados de Torque y Arrastre. Fuente: Software INNOVA

En la siguiente ventana se pueden modificar los valores de la barrena, incluyendo tipo, material y resistividad. Ver figura 2.13.

	Description	OD (in)	ID (in)	TJ OD (in)	TJ ID (in)	Weight (lb/ft)	Type	Length (m)	Total Length (m)	Non-Magnetic
1	PDC Bit	12.250	2.840			240.000	Bit	0.350	0.35	<input type="checkbox"/>
2	RSS	9.500	2.480			265.000	RSS	6.180	6.53	<input type="checkbox"/>
3	Drilling Dynamics	9.500	2.840			329.000	MWD/LWD	2.240	8.77	<input checked="" type="checkbox"/>
4	MWD	9.500	2.810			329.000	MWD/LWD	8.550	17.32	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Pulser	9.500	2.810			329.000	MWD/LWD	6.320	23.64	<input checked="" type="checkbox"/>
6	LWD	8.250	2.813			240.000	MWD/LWD	10.930	34.57	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Flexi NMDC	8.250	2.875			150.000	MWD/LWD	17.220	51.79	<input checked="" type="checkbox"/>
8	HWDP	6.625	4.000	8.000	4.000	80.000	Drill Pipe	74.650	126.44	<input type="checkbox"/>
9	Jar	8.000	3.000			110.000	Jar	11.340	137.78	<input type="checkbox"/>
10	HWDP	6.625	4.000	8.000	4.000	80.000	Drill Pipe	28.000	165.78	<input type="checkbox"/>
11	Accelerator	8.000	3.000			110.000	Accelerator	11.780	177.56	<input type="checkbox"/>
12	HWDP	6.625	4.000	8.000	4.000	80.000	Drill Pipe	28.250	205.81	<input type="checkbox"/>
13	Drill Pipe	5.731	5.153	6.563	4.250	27.060	Drill Pipe	3000.000	3205.81	<input type="checkbox"/>
14	Drill Pipe w/Friction Reduction	5.731	5.153	6.563	4.250	27.060	Drill Pipe	3000.000	6205.81	<input type="checkbox"/>
15	Drill Pipe	5.731	5.153	6.563	4.250	27.060	Drill Pipe	1000.000	7205.81	<input type="checkbox"/>
16										<input type="checkbox"/>

Figura 2.13. Valores de la barrena. Fuente: Software INNOVA

2.4 Metodología del análisis de riesgo a través del HAZOP.

En un pozo de alcance extendidos muy común que factores como el torque y el arrastre afecten la operatividad del pozo, es por esto la importancia de analizar los riesgos operativos que traerían consigo no realizar un análisis exhaustivo de estos parámetros para evitarlos o prevenirlos, por lo que es necesario realizar el análisis HAZOP (Análisis de riesgo y operabilidad), que es una técnica deductiva para la identificación, evaluación cualitativa y prevención del riesgo potencial y de los problemas de operación. El análisis pretende,

mediante un protocolo relativamente sencillo, encontrar los posibles problemas operativos y se fundamenta en el hecho de que las desviaciones en el funcionamiento de las condiciones normales de operación y diseño suelen conducir a un fallo del sistema.

El primer paso es la selección de los elementos críticos que deben estudiarse (depósitos, reactores, separadores, etc.). Luego se identifican las variables que intervienen en este caso flujo y presión, ya que la temperatura se fija a la entrada de la ERO y la ERE (35oC), se aplican las palabras guía (no, más, menos, otro, parte de, etc.) a cada una de las condiciones de operación del proceso. Operando de esta manera se generan las desviaciones significativas de las condiciones normales de operación y se realiza un repaso exhaustivo de los posibles funcionamientos anómalos.

El estudio de las desviaciones conduce a la identificación de sus posibles causas y consecuencias y, por lo tanto, del riesgo potencial y de los problemas derivados de un funcionamiento incorrecto; paralelamente, se buscan los medios protectores del sistema. Toda la información del análisis es documentada ordenadamente, hecho que permite la evaluación cualitativa de las medidas de control y seguridad. A partir de esta información es relativamente sencillo implementar nuevas medidas operativas para la mejora del torque y arrastre de la perforación de pozos de petróleo de alcance extendido en el país.

Como alternativa a contrarrestar los posibles riesgos operativos en la construcción del pozo Seboruco-26 producto de valores erróneos de torque y arrastre, así como análisis hidráulicos, geológicos y reológicos.

CAPÍTULO 3: Resultados y discusión.

En el siguiente capítulo se realizara el análisis de la caracterización del caño desnudo en la sección 8 1/2" del pozo seboruco 26, las causas que lo llevaron a la pérdida del mismo y a la perforación del caño de desvío 4. También se analizarán los resultados obtenidos en la corrida del modelo de torque y arrastre a través del software INNOVA y un análisis de riesgo operativos en pozos de alcance extendido como es el caso.

3.1 Caracterización de la sección 8 1/2" del pozo Seboruco-26.

La etapa de 8 1/2" (en perforación aún a 5562 m) con la pérdida de 255m de caño perforado en la sección anterior de 12 1/4", esta complejidad ocurre por la imposibilidad de bajar la camisa de 9 5/8" hasta el fondo (3705 m), quedando el zapato situado a 3450m, la complejidad ocurre debido a un cambio litológico brusco que generó un escalón en el paso de una formación muy blanda a otra extremadamente dura, se realizaron intentos de sacar la camisa para reacondicionar esa zona sin éxito. Siendo necesario cementar la camisa a 3450 m.

Desde el inicio de la perforación de la etapa de 8 1/2" hasta que se alcanza la profundidad de 5783m, La perforación de este intervalo ha presentado problema, como pérdidas de circulación, problemas con la limpieza, alto torque, estrechamiento, así como zonas inestables a la profundidad de 4500m aproximadamente.

Debido a todos estos problemas, se decide correr un registro geofísico con vistas a tener la información necesaria sobre el estado del cemento por detrás de esta camisa para determinar la posición de una ventana que posibilite la continuidad de la perforación de este pozo. Luego de la interpretación de estos registros se perforará el primer caño de desvío o ventana de la etapa:

Caño de desvío número 2 de la sección con barrena

Al no poder continuar bajando camisa de 9 5/8" a partir de 3450m debido a las restricciones geomecánicas producto del cambio litológico de arcillas a caliza. Se decidió dejar la camisa en ese punto, cementarla y realizar Caño de desvío.

Se bombea tapón de cemento en 2 ocasiones debido al sobredimensionado en ese intervalo de 250 m abiertos con barrena 12 ¼ ". Se perforó deslizando construyendo Caño de desvío #2 desde 3459mmd a 3462mMD a 1 pulg/3min con pobre transferencia de peso.

Caño de desvío número 3 de la sección con barrena 8 ½".

Luego de continuar perforando caño de desvío#2 e iniciar maniobra para cambio de barrena y carga del motor se observa resistencia a 3490m. Se intenta rotar sin éxito, quedándose la sarta empacada sin rotación, circulación, ni recorrido efectivo (posible colapso del caño por debajo del zapato de 9 ⅝"). Cortaron tubería, escariaron revestimiento y bajaron a 3420m con alto torque y poco avance.

A partir de este desvío se continuó perforando hasta la profundidad actual de 5783mbmr. En este intervalo se produjeron numerosos problemas durante la perforación, por lo cual se decidió parar la perforación a dicha profundidad y correr un registro LWT para poder definir en qué zona se encontraba el caño; esta información unida a las descripciones de las muestras de canal mostró que a la profundidad de 4513mbmr aproximadamente, justamente en la zona de mayores problemas, existía una transición litológica de una roca deleznable y poco consolidada, correspondiente a la arcilla, a una litología compuesta básicamente por Carbonato de Calcio (CaCO₃) que la hace dura y consistente, lo que provoca la posible existencia de un escalón que dificulta la entrada de la tubería de perforación a esta zona, haciendo que no pase de este punto, lo cual por tanto, haría prácticamente imposible garantizar la bajada de la camisa.

Por la imposibilidad de bajar la herramienta durante las maniobras de calibración en varios intentos y con diferentes BHA, a partir de la profundidad de 4500m aproximadamente en reunión con PETRAF y EPEPO se decide buscar un punto donde la cementación detrás de la camisa tuviera calidad y realizar una caño de desvío.

Caño de desvío número 4 de la sección con barrena 8 ½”.

Se bajó sarta de registro LWT que no pasó de 4489m, se decidió bajar sarta de calibración. Se rima a 4491m donde la herramienta se apoya y se incrementa el torque, se realizan varios intentos sin resultados.

La causa raíz se debe a una complejidad geológica presente en esa sección con cambios de formación brusco que ha generado un escalón donde se están depositando los ripios de formación perforados obstruyendo en ocasiones el paso de las herramientas.

Se decide realizar Caño de desvío número 4 a 3343m dentro de camisa 9 5/8” y modificar trayectoria del pozo hasta 5567 m con presencia de pérdidas de circulación, resistencia en el caño a partir de 4000 m siendo necesario rimar en intervalos. A esa profundidad PETRAF decide bajar el colgador, luego de ensanchar el caño con ensanchador de 10 1/8”. Se decide bajar con varias composiciones de herramienta de fondo hasta lograr acondicionar el caño para el baje del colgador de 7” y continuar las operaciones de perforación hasta la terminación del pozo.

3.1.1 Propiedades del lodo utilizado en la sección.

En la siguiente tabla se observan las propiedades del lodo utilizado en la sección, valores que se introducen en el software INNOVA más adelante para la interpretación del torque y el arrastre en el caño desnudo de la sección con barrena 8 ½” y así lograr determinar las condiciones del mismo para su encamisado.

Tabla 3.1. Propiedades del lodo en la sección con barrena 8 ½”

Fluido SPAM	Planeado		Real	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Densidad (g/cm ³)	1.30	1.35	1.31	1.46
Viscosidad Marsh (seg/L)	45	70	44	58
Viscosidad Plástica (cP)	15	30	11	35
Punto de Cedencia (lb/100 ft ²)	20	30	17	34
Gel 10 seg (lb/100 ft ²)	8	16	3	10
Gel 10 min (lb/100 ft ²)	12	25	9	25

Filtrado (mL/30 min.)	6	6	4,8	9,6
pH	9.5	10.5	9,5	11
Cloruros (mg/L)	> 40000	> 40000	61000	70000
Sólidos (%)	16	22	17	22

El fluido utilizado para la perforación del intervalo de 8 ½” fue el fluido SPAM con densidad que osciló durante la perforación entre 1.33 gr/cc y 1.46 gr/cc. Esta etapa fue perforada hasta 5567 metros.

3.2 Interpretación de torque y arrastre en la sección perforada con barrena 8½”, que permiten determinar las condiciones del caño para el baje del colgador.

En la perforación Direccional las operaciones con los reductores de torque y arrastre desempeñan un rol vital en el proceso de la perforación direccional, ya que se reducen el tiempo y los costos de la unidad de perforación a través de:

1. Reducir el torque y el arrastre hasta el 70% (dependiendo de las características del pozo) para mantener el peso de la sarta de perforación.
2. Prevenir daño o fallas del equipo de fondo y superficie.
3. Reducir el desgaste en las secciones entubadas del pozo.
4. Orientar con precisión las herramientas de perforación y completación

A continuación se muestra el resultado muestran Modelo de arrastres y valores reales de pesos para el ensamble de fondo (BHA), para la obtención del mismo se utilizaron los valores de lodo visto en el epígrafe anterior, así como los datos que se observan en el anexo 2 y 3, se puede observar los valores de arrastre según valores de profundidad determinada. Ver grafica 3.1.

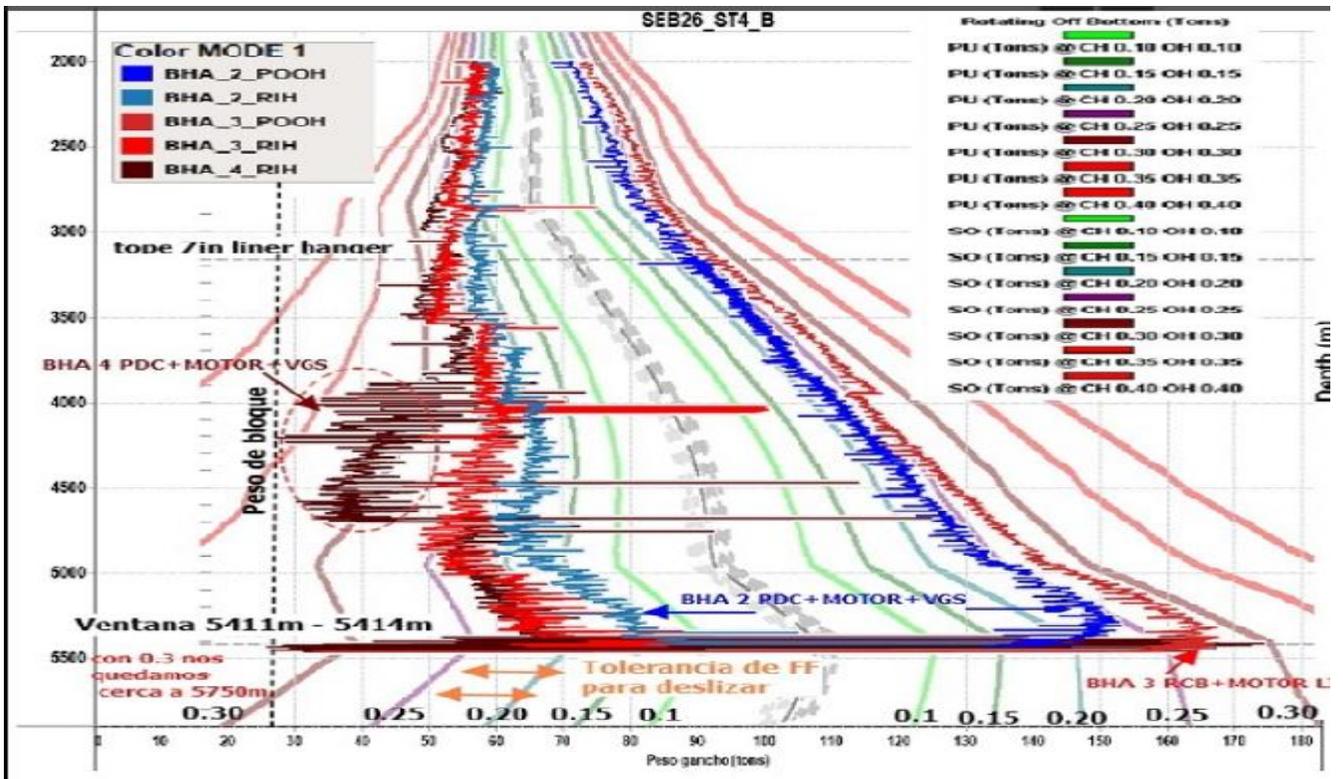
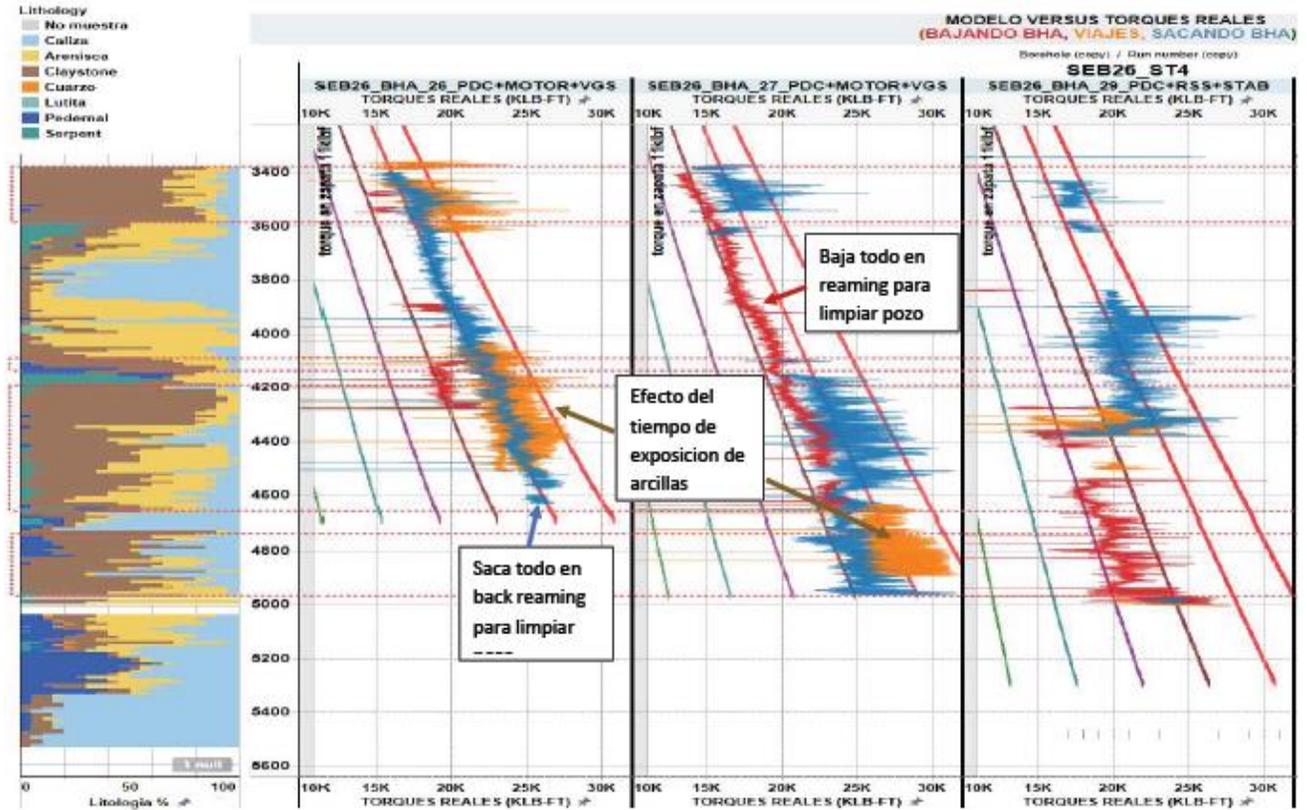


Gráfico 3.1. Modelo de arrastre con composición de herramienta de fondo (BHA).

A este gráfico se le conoce como gráfico escoba, a la derecha se observan los valores de factor de fricción que varían desde 0,10 a 0,25 en función de los pesos, extraídos de una data de valores proporcionada por el software Wellwizard que registra todos los parámetros y operaciones que se realizan en el pozo, tanto sacando la herramienta como bajándola que se observa a la izquierda. La curva verde es cuando el factor de fricción es cero (0).

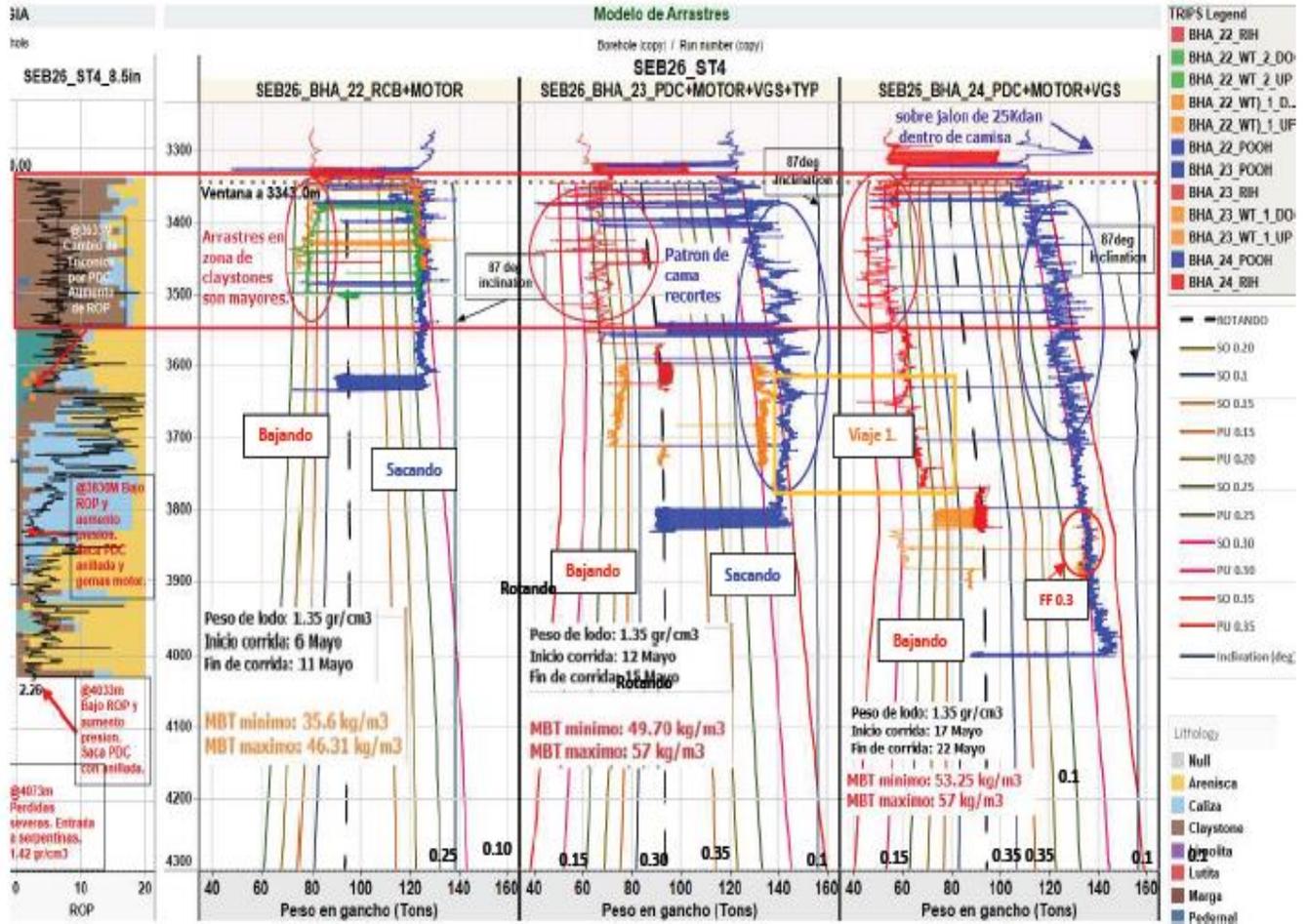
A continuación se muestran los modelos de torques de las composiciones de herramienta de fondo (BHA) 26, 27 con motor y BHA 27 con Power Drive. Se muestra en rojo los torques cuando se bajaba la composición de la herramienta de fondo (BHA), en naranja la de los diferentes viajes y en azul los torques cuando se sacaba el BHA. Como se puede apreciar, la mayor acumulación de torques realizado en modo rimando sacando fueron dentro los paquetes arcillosos. Ver gráfica 3.2.



Grafica 3.2. Modelos de Torque de BHAs 26 y 27 con motor y con power drive.

Se observa el aumento del torque en las diferentes BHAs hasta más de 30000Klb-ft al pasar por el paquete de arcillas, hay imposibilidad de continuar bajando libre la herramienta con peligro de pega por el alto torque, por lo que fue necesario conectar el Top Drive para realizar la sacada de la herramienta rimando. Ya en la BHA 27 con Power Drive se nota una mejoría del torque manteniéndose por debajo de 30000Klb-ft, esto se puede deber a que el caso ha sido repasado en varias ocasiones y a que el Power Drive proporciona mayor potencia, pudiendo levantar los cortes con mayor facilidad y mayor eficiencia.

A continuación en el Gráfico 3.3 se muestran los modelos de arrastres bajando, sacando y pesos rotando del BHA 22 con motor liso (izquierda), el BHA 23 con motor de fondo, VGS que es un estabilizador variable que abre y cierra con presión y Typhoon que es una herramienta para calibrar caños que funciona como un estabilizador con cortadores, y el BHA 24 con motor de fondo y VGS que es un estabilizador variable que abre y cierra con presión. Asimismo, se indica los valores de factores de fricción para cada curva de arrastre presentada.

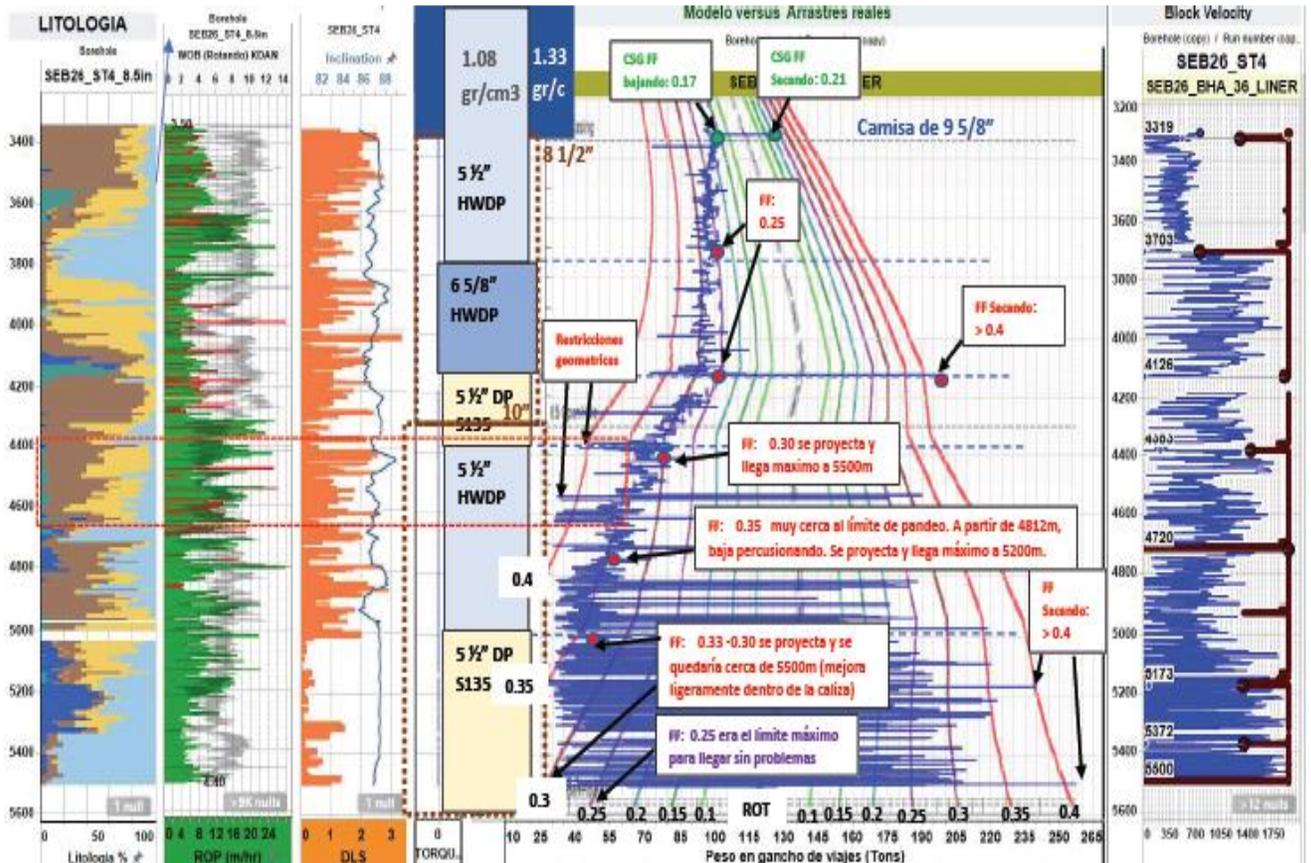


Gráfica 3.3. Modelos de arrastres bajando, sacando y pesos rotando del BHA 22, 23 y 24.

Para ambos modelos se consideran factores de fricción promedio desde 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,30 y 0,35 para camisa y hoyo abierto. Obsérvese también como existe un aumento progresivo en los arrastres bajando en el primer paquete de arcillas debajo del zapato. Además se evidencia el efecto de la acumulación de cortes.

A continuación en la gráfica 3.4 se muestran la simulación del baje del colgador de 7'', a través de la interpretación de arrastres y valores reales de pesos para la composición de la herramienta de fondo (BHA) que se muestra en el anexo 4, bajando en hoyo abierto hasta 5497m (semi flotado: con densidad de lodo de 1,33 gr/cm3 anular y 1,08 gr/cm3 dentro de camisas y tubería) y la distribución de los pesos en gancho reales con respecto al modelo teórico con diferentes factores de fricción promedios (mismo factor de fricción desde superficie hasta el fondo), modelados en el software INNOVA. Asimismo, se indica el orden

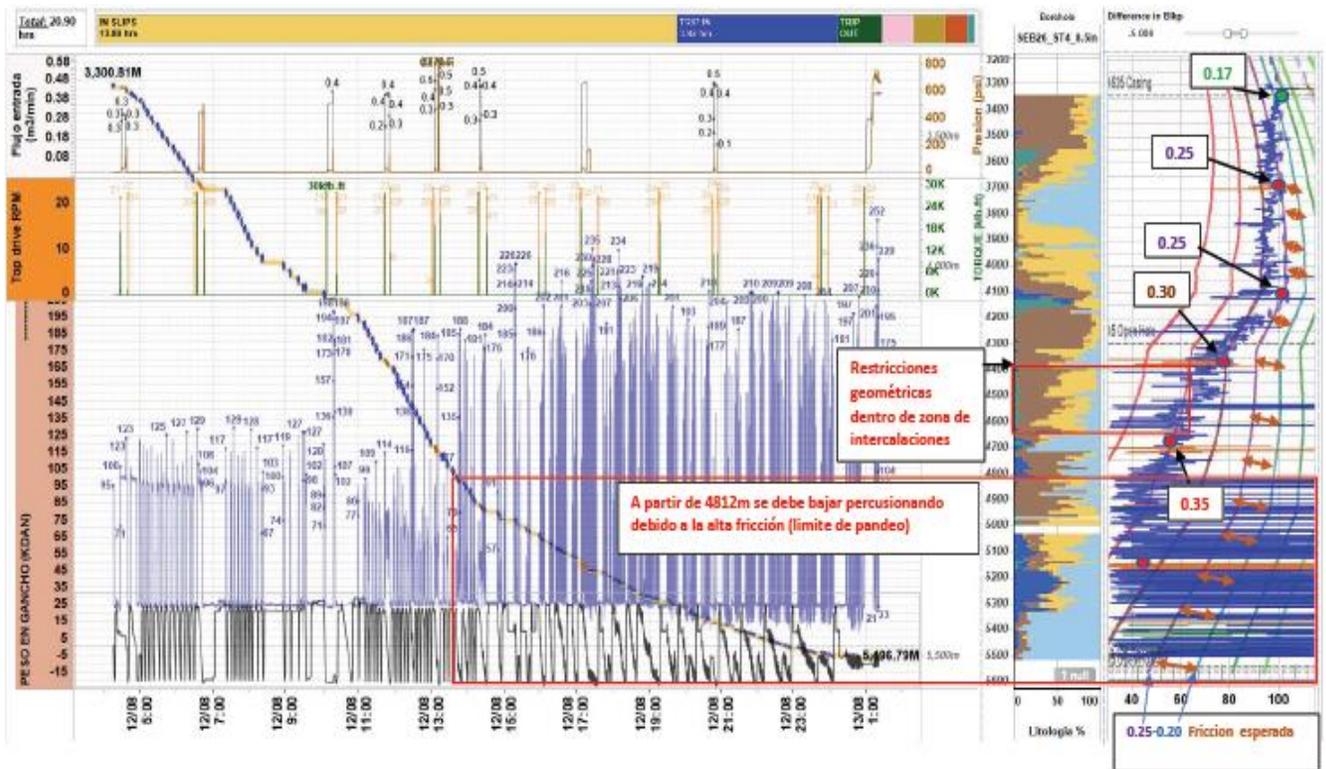
de entrada de cada tubular de empuje, las velocidades del bloque, puntos de llenado de tubería enmarcados en rojo, la litología, velocidad de perforación de la barrena (ROP), densidad del lodo e inclinación reales obtenidos durante la perforación.



Gráfica 3.4. Simulación del bajo del colgador de 7”.

Se observa que los factores de fricción tomados en la camisa a 3319m, se encuentran dentro de la zona verde tanto bajando (0,17) como sacando (0,21) y son ligeramente mayores a los obtenidos con los BHAs (composición de la herramienta de fondo) de perforación (0,15 bajando y 0,2 sacando). Luego se tomaron algunos puntos en hoyo abierto después de llenar tubería y se observa que después de pocas lingadas, se pasa a la zona roja de factores de fricción (0,25 – 0,35) bajando muy cerca del límite de pandeo, luego baja percusionando, llegando a 5200m como máximo y a 4126m se toma peso sacando y se observa factor de fricción mayor a 0,4. A 0,25 de factor de fricción es el límite máximo para que la camisa llegue sin problemas.

En el gráfico que se muestra a continuación, se observa un resumen en función del tiempo y profundidad con modelo de factores de fricción bajando del ensamble de fondo (BHA) número 2 que se muestra en el anexo 3, bajada del colgador de 7" en modo semiflotado y su correlación con la litología. En la parte superior se muestran los tiempos de cada actividad de la barrena. Así mismo, se indican los puntos de llenado de tubería donde se pueden obtener los factores de fricción reales con respecto al modelo. Ver gráfico 3.5.

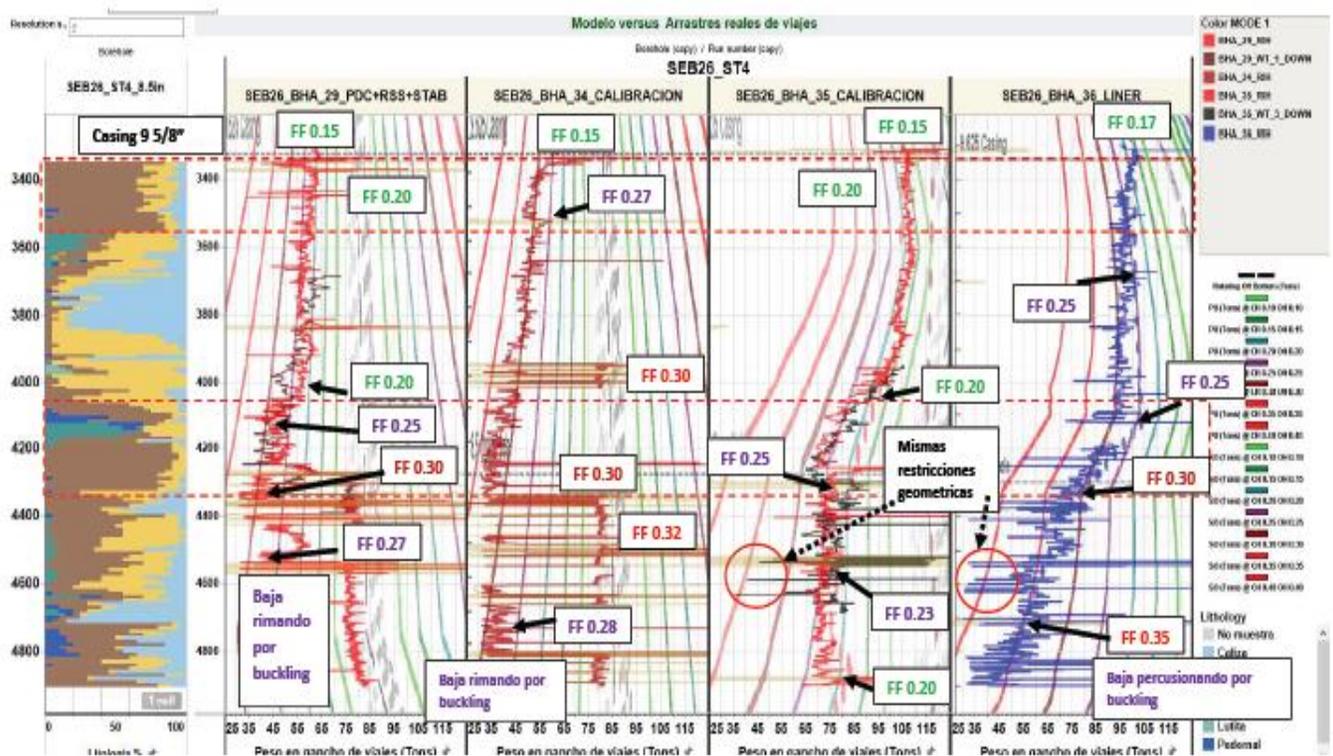


Gráfica 3.5. Factor de fricción en función del tiempo y profundidad.

A modo general, se observa que después de las primeras lingadas, dentro de la primera zona de arcillas, existe un factor de fricción bajando de 0,25, siendo lo esperado 0,2 - 0,23. Estos valores de fricción se mantienen así hasta 4100m aproximadamente donde se observa otro gran cambio al pasar por el segundo paquete de arcillas y, el factor de fricción bajando, aumenta drásticamente a 0,3 cuando se llena a 4383m, luego hay otro aumento a 0,35 cuando se llena a 4720m dentro de la zona de las intercalaciones con arcillas-arenisca-calizas, siendo esto demasiada fricción posiblemente ocasionada por el arrastres acumulado de matriz arcillosa. Al estar en modo semiflotado, no se podía circular para limpiar ya que se perdía la semi flotación y el lodo dentro de la tubería de 1,08 gr/cm3 podría desestabilizar el pozo al llegar a la vertical. También se observan fuertes apoyos dentro de la zona de intercalaciones

(repetidas de ultima calibración: 4525m, 4535m) que se trabajan y logra pasar sin dificultad gracias a la acción del zapato especial (Twister bit) incluso estando con una fricción muy alta, cerca del pandeo helicoidal.

A continuación en la Gráfica 3.6 se muestran los arrastres históricos en sus modelos de la composición de la herramienta de fondo (BHA) número 3 (Power Drive), la composición de la herramienta de fondo (BHA) número 4 (primer BHA de calibración), la composición de la herramienta de fondo (BHA) número 5 (segundo BHA de calibración) y el BHA 2 (Bajada de colgador). Se observa claramente como en todos estos BHAs ocurre un aumento drástico en los factores de fricción bajando cuando se pasa por las zonas de arcillas. Ver las composiciones de herramienta de fondo (BHA) en Anexos 4, 5, 6 y 7.



Gráfica 3.6. Arrastre de BHA(Composición de la herramienta de fondo) 3, 4, 5 y 2.

En la BHA 3 se puede observar que el Power Drive entra después de haberse limpiado el pozo rimando hacia arriba (sacando) y rimando hacia abajo completo con motor de fondo en las últimas composiciones de herramienta de fondo (BHA) número y luego se tuvieron pérdidas severas que renovaron todo el lodo del sistema. Aún así, se observa el efecto del aumento drástico en la fricción hacia abajo cuando pasa por 4300m (segundo paquete de arcillas).

La BHA 4 de calibración, entra después de las dos corridas con ensanchadores. Se observa desde el inicio el efecto de alto arrastre en el primer y segundo paquete de arcillas. A 4800m, se debe bajar rimando debido al límite de buckling (pandeo) alcanzado por la alta fricción.

La BHA 5 de calibración entra después de haber limpiado con la BHA 4 desde 4800m hacia abajo. Esta BHA cuenta con cerca de 2000m de tubería pesada de 5 ½". Su resistencia al buckling es mucho más alta, sin embargo, se observa igual el cambio de fricción en el segundo paquete de arcillas a 4300m, mismo punto donde hubo problemas en anteriores corridas.

La BHA 2 que es el colgador de 7" entra después de haber calibrado y limpiado con BHA 5 y haber bombeado píldora lubricante en todo el pozo. Se presenta también el cambio drástico en los arrastres desde 4300m. Presenta las mismas restricciones geométricas del BHA 35 y los pasa con la acción del zapato especial, aún estando muy cerca del límite del pandeo.

Las composiciones de herramientas de fondo (BHA) número direccionales o de calibración, presentan el aumento en la fricción cuando pasa el BHA que es la parte más rígida y más adelante, en ciertas ocasiones puede mejorar cuando entra a zona de calizas que tienen mucha menor fricción. Esto no sucede con las bajadas de camisas, ya que, al pasar por una zona de alto arrastre, este se mantendrá a lo largo de la corrida ya que todas las camisas son iguales (rígidas) y seguirá acumulando arrastre hasta que no se circule o limpie lo que está arrastrando.

El análisis de torque y arrastre nos permite definir y conocer puntos de apoyo o de resistencia para operaciones futuras en la construcción de un pozo como es la bajada de camisas de revestimiento, después de todos los análisis anteriores del caño desnudo donde se observan valores de torque y arrastre en ocasiones elevados, mostrando así la suciedad del caño, donde luego de varios viajes de calibración con diferentes BHAs, se puede concluir que para el baje de camisa en esta sección:

1. En los viajes de calibración, se confirma que el pozo se encuentra limpio y estable según los factores de fricción sacando y bajando. Sin embargo, bajando se observa mayor arrastre en la zona de las arcillas debido al tiempo de exposición.
2. Durante la bajada del colgador de 7", se tomaron algunos pesos dentro de la camisa de 9 5/8" y se confirma factores de fricción bajando de 0,17 y sacando de 0,21, muy similares a los del BHA de perforación.

3. Se observa en hoyo abierto factores de fricción mucho más altos de lo esperado. Sin embargo, el comportamiento en el aumento de la fricción en la zona de arcillas, también se observó en los BHAs de perforación y calibración, pero no eran consistentes o fijos.
4. La semi flotación de la camisa, restringe el uso de la circulación como medida para mitigar los arrastres acumulados, ya que se pasaría a modo convencional con mayor peso y arrastres al desplazar el lodo ligero dentro de los tubulares y este mismo podría ocasionar inestabilidad al pasar por la vertical.
5. Se observaron los mismos puntos de apoyo por restricciones geométricas dentro de la zona de intercalaciones. Se observa la acción del zapato inteligente que logro pasarlos incluso teniendo muy poco margen de pandeo.
6. Las simulaciones de bajada de camisa se basan en factores de fricción y no pueden simular condiciones dinámicas como la acumulación de arrastres o la alteración de matriz arcillosa debido al tiempo de exposición.
7. La fricción acumulada a 4800m corresponde a 0,35 o 0,2 en camisa y mayor que 0,4 en hoyo abierto, lo cual es extremadamente alto. Es por ello, que se tiene que bajar percusionando el colgador.
8. Es necesario realizar un análisis de riesgo para corroborar la importancia de la interpretación del torque y arrastre en caño desnudo de pozos de largo alcance, como es el caso del pozo Seboruco 26, para la continuidad de las operaciones de forma eficiente.

3.3 Análisis de riesgo operacionales mediante el HAZOP.

Luego de obtener resultados tan importantes para el baje del colgador de 7", como es la bajada del mismo percusionando, facilidad que da el zapato inteligente utilizado en el caño desnudo del pozo en cuestión, es necesario corroborar los posibles riesgos operativos que pueden traer consigo parámetros tan esenciales en la condición de caños desnudos en pozos de largo alcance como son torque, arrastre y factor de fricción.

Tabla 3.1 Análisis de riesgo

Torque, Arrastre y factor de fricción en pozos de largo alcance.				Medidas a tomar	
Palabra guía.	Desviación	Causas posibles	Consecuencias	Medidas inmediatas	Medidas a largo plazo
Más	Torque mecánico.	Torque en la barrena. Torque producido por la fricción.	Tensión y compresión en la sarta de perforación. Pérdida de caño perforado. Severidad de la pata de perro (Causa de incremento o reducción angular o cambio de acimut). Atascamiento diferencial o interacción con capas de recortes o formaciones inestables. Peso de la sarta de perforación.	Parada del proceso de perforación. Controlar las RPM del Top Drive.	Controlar la limpieza de caño desnudo y calcular cama de recortes.
Más	Arrastre	Mal acarreamiento de recortes. Capas de recortes.	Atascamiento de la tubería de perforación. Pérdida de caño perforado. Incremento de la suciedad del caño. Mal funcionamiento	Parar el proceso de perforación. Determinar mediante un software especializado valores de Peso de Gancho para	Cambiar equipos de limpieza de lodo.

			de los equipos de limpieza del lodo. Imposibilidad para el encamisado del caño.	cada BHA. Realizar mantenimientos periódicos a los equipos de limpieza.	
Más	Factor de fricción.	Atascamiento diferencial. Densidad del lodo. Trayectoria del pozo. Selección de la profundidad de entubación. Diseño de la sarta de perforación o tubería de revestimiento.	Rigidez en la tubería de perforación. Golpes de presión. Ejercen fuerzas de contacto causadas por las presiones de bajas del yacimiento, las presiones altas del yacimiento, o ambas, es decir la tubería no se puede desplazar hacia ningún sentido. Efectos de pistón hidráulico. Valores erróneos de Torque y Arrastre. Movimiento de la tubería.	Continuar operaciones haciendo caño de desvío. Imposibilidad de bajar camisa.	Cambiar la BHA de perforación. Mantenimiento periódico a los equipos de limpieza del pozo. Controlar valores reológicos del lodo. Cambiar BHA e intentar nuevamente.

El aumento del torque y el arrastre son las variables que más influyen en el proceso de perforación de pozos de largo alcance provocando averías de proporción mayor y a su vez afectando el proceso hasta el punto de lograr la parada del mismo, por lo que se debe aumentar el control del buen funcionamiento de equipos de limpieza, así como variar

parámetros reológicos del lodo a la hora de perforar, al igual que cambios de BHA para la repasa de puntos de resistencia que pueden traer consigo consecuencias mayores como es la pérdida del caño, otro factor que afecta parámetros de torque y arrastre, es el factor de fricción, que es el punto de partida para los cálculos de torque y arrastre, influyendo significativamente sobre ellos, los cambios introducidos en parámetros tales como la densidad del lodo, el trayecto del pozo, la selección de la profundidad de entubación el diseño de la sarta de perforación o de la tubería de revestimiento, pueden causar estas variaciones durante la perforación. Por consiguiente, es crucial que durante la planeación de un pozo de alcance extendido, se considere una gama adecuada de factores de fricción.

Conclusiones parciales

1. El análisis de torque y arrastre permite definir y conocer puntos de apoyo o de resistencia para operaciones futuras y de suma importancia en el baje de la camisa.
2. Se obtuvo en el caño desnudo un factor de fricción mayor que 0,4, que no garantiza mantener la estabilidad del caño.
3. Luego de calibrar el caño el torque se mantuvo por debajo de los 30000Klb-ft, que confirma que el mismo se encuentra limpio y estable.
4. El factor de fricción para la bajada del colgador arrojó un valor entre 0,2 y 0,35, poco altos para el encamisado, por lo que se debe bajar camisa percucionando.
5. El torque y el arrastre son las variables que más influye en el proceso de perforación de pozos de largo alcance, permiten determinar la ocurrencia de posibles averías y a su vez afectando el proceso hasta el punto de lograr la parada del mismo.

CONCLUSIONES

1. La hipótesis queda validada como positiva ya que se determinan condiciones de torque y arrastre aceptables para el encamisado del caño desnudo del pozo Seboruco-26, al interpretar estos parámetros haciendo uso del software INNOVA
2. El análisis de torque y arrastre permite definir y conocer puntos de apoyo o de resistencia para operaciones futuras y de suma importancia en el baje de camisa.
3. Se obtuvo en el caño desnudo un factor de fricción mayor que 0,4, que no garantiza mantener la estabilidad del caño.
4. Luego de calibrar el caño el torque se mantuvo por debajo de los 30000Klb-ft, que confirma que el mismo se encuentra limpio y estable.
5. El factor de fricción para la bajada del colgador arrojó valores entre 0,2 y 0,35, poco altos para el encamisado, por lo que se debe bajar camisa percucionando.
6. El torque y el arrastre son las variables que más influye en el proceso de perforación de pozos de largo alcance, permiten determinar la ocurrencia de posibles averías y a su vez afectando el proceso hasta el punto de lograr la parada del mismo.

RECOMENDACIONES

1. Realizar simulaciones en maniobras importantes y extraordinarias en pozos de alcance extendido con anticipación para así lograr una mayor efectividad y eficiencia de la perforación, sin que ocurran paradas innecesarias que retrasen la terminación de un pozo y su puesta en producción.
2. Mejorar la eficiencia operacional de los equipos de control de sólidos en pozos de petróleo y evitar su incorporación a los tanques de tratamiento del lodo.

BIBLIOGRAFÍA

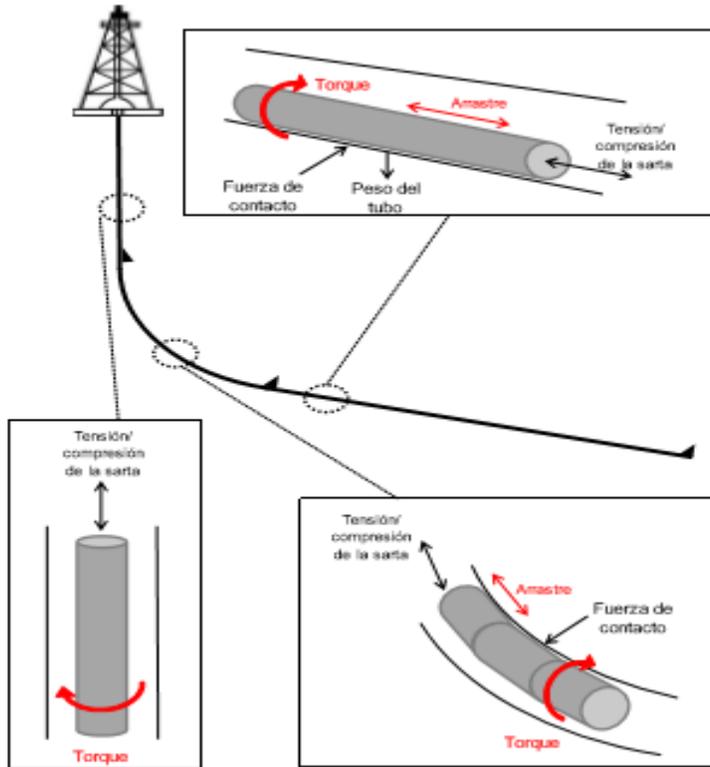
1. Aadnoy, S.A., 1998, Friction Analysis for Long-Reach Wells”, SPE/IADC 39391 presented at SPE/IADC Drilling Conference, Dallas, Texas
2. Aadnoy, B.S., Andersen, K., 2001, Design of Oil Wells Using Analytical Friction Models, Journal of Petroleum Science and Engineering.
3. Aadnoy, B.S., Kaarstad, E., 2006, Theory and Application of Buoyancy in Wells, SPE/IADC 101795 presented at the SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Bangkok, Thailand.
4. Aadnoy, B.S., Djurhuus J., 2008, Theory and application of a new generalized model for Torque and Drag, SPE/IADC 114684, presented at the SPE/IADC Asia Pacific Drilling Tech. Conf. and Exhibition, Jakarta, Indonesia.
5. Aadnoy, B.S., Fazelizadeh, M., Hareland, G. 2010, A 3-Dimensional Analytical Model for Wellbore Friction, Journal of Canadian Petroleum Technology
6. Cardona, A., Kohan P., Quinteros, R., Storti, M., 2012, Modelado numérico del fenómeno de torque y arrastre en tuberías de completación de pozos de petróleo y gas”, Salta, Argentina.
7. Casal J., 1991 La evaluación del riesgo en la industria química', Química e Industria, Diciembre, 918-924.
8. Edel Padron 2018, Informe Técnico sobre la perforación del pozo Seboruco 26
9. Fazelizadeh, M., Hareland, G., Aadnoy, B.S., 2010, Application of New 3D Analytical Model for Directional Wellbore Friction, Journal of Modern Applied Science, Vol. 4, No. 2.
10. Fazelizadeh, M., 2014, Real Time Torque and Drag Analysis during Directional Drilling, Department of Chemical and Petroleum Engineering Calgary, Alberta.
11. Gaynor, T. M., Chen, D. C-K, Stuart D., and Comeaux, B., 2001, Tortuosity versus Micro-Tortuosity: Why Little Things Mean aLot, SPE/IADC #67818. 2001 SPE/IADC Drilling Conference in Amsterdam.
12. Gaynor, T., Hamer, D., Chen, D., 2002, Quantifying tortuosities by Friction Factors in Torque and Drag Model, SPE 77617, Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas.

13. Ismayilov O., 2012, Applications of 3D Analytical Model for wellbore friction calculation in Actual wells, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology.
14. Johancsik, C.A., Friesen, D.B., Dawson, R., 1984, Torque and Drag in Directional Wells, Prediction and Measurement.
15. Kristensen E., 2013, Model of Hook Load During Tripping Operation, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology.
16. Maehs, J., Renne, S., Logan, B., Diaz, N., 2010, Proven Methods and Techniques to Reduce Torque and Drag in the Pre Planning and Drilling Execution of Oil and Gas Wells, IADC/SPE 128329, Drilling Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA.
17. Menand, S., SPE, Sellami, H., SPE, Tijani, M., and Stab, O., École des Mines de Paris; D. Dupuis, SPE, Pride-Intl.; and C. Simon, DrillScan, 2006, "Advancements in 3D Drillstring Mechanics: From the Bit to the Topdrive", IADC/SPE 98965, IADC/SPE Drilling Conference.
18. Mirhaj, S.A., Fazaelizadeh, M., Kaarstad, E., Aadnoy, B.S., 2010, New Aspects of Torque and Drag Modelling in Extended Reach Wells, SPE 135719, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy.
19. Mirhaj, S.A., Kaarstad, E., Aadnoy, B.S. 2010, Minimizing Friction in Shallow Horizontal Wells", SPE 135812, IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Ho Chi Minh, Vietnam. Nazari, T., Hareland, G., 2010, Review of Cutting Transport in Directional Well Drilling Systematic Approach, SPE 132372, Presented at Western Regional Meeting, Anaheim, California, USA.
20. Sheppard, M.C. Wick, C., Burgess, T., 1987, Designing well Paths to Reduce Drag and Torque, SPE Drilling Engineering.
21. Samuel, R., Halliburton, 2010, Friction Factors: What are they for Torque, Drag, Vibration, Bottom Hole Assembly and Transient Surge/Swab Analyses?, IADC/SPE 128059, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition.
22. Tviedal, T., 2011, Torque and Drag analyses of North sea Wells using new 3D model, Faculty of Science and Technology, University of Stavanger.

23. Verteuil, R., McCourt, L., 2001, Introduction to Directional Drilling, Sugar Land Learning Center, Schlumberger.

III. ANEXOS DE LA TESIS

Anexo 1: Diagrama de Torque y Arrastre.



Anexo 2. Datos que se introducen en el software INNOVA para obtener el grafico escoba.

Inclinación (degrees)	Acimut (degrees)	Profundidad vertical(m)	Subsea (m)	Seccion vertical (m)	Latitude +N/- S (m)	Datos reales del pozo			
						Salida +E/-W (m)	DLS (deg/30 m)	Grid X Este (m)	Grid Y Norte (m)
0	0.21	0	17.2	0	0	0	0	443745	366725
0	0.21	405	-387.8	0	0	0	0	443745	366725
1.1	89.61	422.53	-405.33	0.11	0	0.17	1.88	443745.17	366725
1.1	97.71	468.86	-451.66	0.64	-0.06	1.05	0.1	443746.05	366724.94
0.9	144.11	524.75	-507.55	0.82	-0.48	1.84	0.43	443746.84	366724.52
1.6	139.11	543.27	-526.07	0.75	-0.8	2.1	1.15	443747.1	366724.2
1.73	127.67	549.98	-532.78	0.74	-0.93	2.24	1.6	443747.24	366724.07
1.8	123.71	552.6	-535.4	0.75	-0.98	2.3	1.6	443747.3	366724.02
1.9	121.21	561.94	-544.74	0.79	-1.14	2.56	0.41	443747.56	366723.86
1.9	114.91	571.26	-554.06	0.85	-1.28	2.83	0.67	443747.83	366723.72
2.5	103.61	580.56	-563.36	0.98	-1.4	3.17	2.38	443748.17	366723.6
2.5	96.61	589.83	-572.63	1.19	-1.47	3.57	0.99	443748.57	366723.53
2.8	86.11	599.09	-581.89	1.46	-1.47	3.99	1.84	443748.99	366723.53
2.8	78.31	608.38	-591.18	1.79	-1.41	4.44	1.23	443749.44	366723.59
3.3	74.51	617.64	-600.44	2.19	-1.3	4.92	1.74	443749.92	366723.7
3.5	70.61	626.91	-609.71	2.66	-1.13	5.45	0.99	443750.45	366723.87
4	68.81	636.16	-618.96	3.19	-0.92	6.01	1.66	443751.01	366724.08
4.6	67.41	645.43	-628.23	3.8	-0.66	6.66	1.96	443751.66	366724.34
4.9	64.61	654.66	-637.46	4.5	-0.35	7.36	1.23	443752.36	366724.65
5.1	58.61	664.32	-647.12	5.28	0.05	8.1	1.73	443753.1	366725.05

Anexo 3. BHA número 1, para determinar la condición del caño desnudo hasta 5600m.

BHA 1 hasta 5600m seccion de 8 1/2"						
PDC Bit 8½" S/N 41239	216			4½" REG Pin	0.23	0.23
Motor Stab LBHS6003	206	171			0.00	0.23
Drilling motor LESML67505	197	0	4½" REG Box	4½" IF Box	8.19	8.42
VGS 8,5" LES S/N VGS 85003	172	65	4½" IF	4½" IF	3.37	11.79
NM Muleshoe sub 675012	171	64	4½" IF	4½" IF	0.77	12.56
Flex NMDC	175	83	4½" IF	4½" IF	9.40	21.96
Flex NMDC	163	83	4½" IF	4½" IF	9.18	31.14
Fin cutter sub	164	73	4½" IF	4½" IF	0.54	31.68
Jar 61/2" S/N LES J 65002	167	70	4½" IF	4½" IF	5.85	37.53
1 x HWDP 5"	127	76.2	4½" IF	4½" IF	9.36	46.89
18 X DP 5" G 105 19,5LB/FT	127	108.6	4½" IF	4½" IF	170.66	217.55
CBM 5" LES 500-10	162	77	4½" IF	4½" IF	2.90	220.45
18 x DP 5" G 105 19,5LB/FT	127	108.6	4½" IF	4½" IF	170.89	391.34
CBM 5" LES 500-12	165	76	4½" IF	4½" IF	2.91	394.25
18 x DP 5" G 105 19,5LB/FT	127	108.6	4½" IF	4½" IF	170.67	564.92
CBM 5" LES 500-13	166	77	4½" IF	4½" IF	2.92	567.84
18 x DP 5" G 105 19,5LB/FT	127	108.6	4½" IF	4½" IF	170.64	738.48
CBM 5" LES 500-14	163	75	4½" IF	4½" IF	2.94	741.42
18 x DP 5" G 105 19,5FT/LB	127	108.6	4½" IF	4½" IF	170.66	912.08
CBM 5" LES 500-15	166	75	4½" IF	4½" IF	2.93	915.01
18 x DP 5" G 105 19,5LB/FT	127	108.6	4½" IF	4½" IF	170.55	1085.56
CBM 5" LES 500-16	165	77	4½" IF	4½" IF	2.94	1088.50

