



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE MONAGAS
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO
MATURÍN / MONAGAS / VENEZUELA**

**ANÁLISIS DEL TORQUE Y ARRASTRE DURANTE LA PERFORACIÓN DE
POZOS DIRECCIONALES Y HORIZONTALES**

**Realizado por:
YOLAEVAN NAIRIBE NAVAS SÁNCHEZ
OLGA MILAGROS DEL VALLE LÓPEZ RUÍZ**

**Trabajo Especial de Grado Presentado como Requisito Parcial para
Optar al Título de:
INGENIERO DE PETRÓLEO**

MATURÍN, FEBRERO DE 2020



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE MONAGAS
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO
MATURÍN / MONAGAS / VENEZUELA**

**ANÁLISIS DEL TORQUE Y ARRASTRE DURANTE LA PERFORACIÓN DE
POZOS DIRECCIONALES Y HORIZONTALES**

Realizado por:

YOLAEVAN NAIRIBE NAVAS SÁNCHEZ

C.I: 23.898.441

OLGA MILAGROS DEL VALLE LÓPEZ RUÍZ

C.I: 23.239.496


Revisado por:

MSc. RUBÉN DARÍO VEGA MEJÍA

Asesor Académico

MATURÍN, FEBRERO DE 2020



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE MONAGAS
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO
MATURÍN / MONAGAS / VENEZUELA

**ANÁLISIS DEL TORQUE Y ARRASTRE DURANTE LA PERFORACIÓN DE
POZOS DIRECCIONALES Y HORIZONTALES**

Realizado por:

YOLAEVAN NAIRIBE NAVAS SÁNCHEZ

C.I: 23.898.441

OLGA MILAGROS DEL VALLE LÓPEZ RUÍZ

C.I: 23.239.496

Aprobado por:

MSc. RUBÉN DARÍO VEGA MEJÍA

Asesor Académico

Deasy Osuna
MSc. Deasy Osuna

Jurado principal

Francisco Hernández
Ing. Francisco Hernández

Jurado principal

MATURÍN, FEBRERO DE 2020

RESOLUCIÓN

De acuerdo al Artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado: “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad, y solo podrán ser utilizados a otros fines, con el consentimiento del Consejo de Núcleo Respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización”

DEDICATORIA

A Dios y la vida por darme tanto que aprender, por todas las experiencias que me ha dado, porque todo ha sido perfecto. Me han hecho la mujer que soy y es justo lo que necesito.

A mi padre **HAROLD NAVAS**; mi persona favorita, gracias por pensar aún que soy una niña, y por creer en mí. Y por supuesto a mi madre **CARMEN SÁNCHEZ**, la incansable luchadora. Los amo mucho.

A mi hermano **HAROLD NAVAS**, que me tenga paciencia y muchas gracias por su ayuda incondicional. Y a mi novio **YEFERSON MARTOS**, por siempre estar incondicionalmente conmigo apoyándome en todos los pasos que doy.

Y por supuesto, quien no podía faltar, a mi abuela **EVA** que siempre ha estado conmigo y a mi abuela **YOLANDA** que me cuida desde el cielo

YOLAEVAN NAVAS

DEDICATORIA

En primer lugar, le dedico este logro a DIOS, pues siempre me dió todo el valor y la fuerza para poder culminar mis estudios y que de una u otra forma sé que me seguirá llenando de valor para enfrentar mi nuevo capítulo de vida.

A mis padres, pues esto no lo hago solo por mí, sino por ustedes para que se sientan orgullosos de mí y que sepan que todos mis logros son para ustedes.

A mi Madre **MILAGROS RUIZ**, esto lo hago por ti, por que siempre has sido un pilar en mi vida, siempre has estado incondicionalmente conmigo y es lo que siempre has querido, verme graduada.

A mi Padre **LUIS LÓPEZ**, este logro te lo dedico pues te quiero mucho y espero que te sientas orgulloso de mi.

A mi hermana **AUGUSTA LÓPEZ**, por su apoyo incondicional y a mi sobrino **IÑAKI ORENCE**, que esto sea un ejemplo a seguir para ti.

A mis primos, tíos, y amigos y a todas esas personas que creyeron en mí, les dedico este momento y espero que nunca dejen de hacerlo pues son muy importantes en mi vida.

OLGA LÓPEZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios primeramente por darme la fortaleza de seguir luchando por mis sueños, la cual le agradezco mucho, pues sé que gracias a él pude lograr unas de mis metas que en algún momento pensé que no lo lograría, siendo una de ellas terminar mi carrera de Ingeniería de Petróleo.

A mi MADRE, la persona más importante de mi vida, un ser que me enseñó a no decaer ante cualquier circunstancia y siempre estar con la frente bien en alto, a la persona que me dio todo lo que tengo hasta ahora, que me cuida hasta más no poder y que me dio todo su amor a pesar de todos los problemas y sé que me seguirá guiando y dándome todo su amor.

A mi PADRE, a él le agradezco también todo lo que tengo pues es y seguirá siendo un gran padre.

A nuestro asesor académico **RUBÉN VEGA**, por su valioso apoyo y ayuda incondicional.

A la Ingeniero **IRAIDA CAMACHO**, gran amiga y futura colega, por su apoyo incondicional y ser guía en este proyecto.

A mi familia y amigos pues tengo la dicha de tener a gente muy especial en mi vida y les agradezco por el apoyo incondicional que me dieron.

OLGA LÓPEZ

AGRADECIMIENTOS

Agradecida toda la vida con Dios, por jamás abandonarme y siempre ser mi guía en todo momento, sin él no hubiese sido posible este logro.

Agradecida por siempre con mis padres, por toda la enseñanza y educación a lo largo de mi vida, sin ellos no hubiese podido lograr mis objetivos y metas.

A mi hermano, mis abuelas, y tíos que me han enseñado, cuidado y querido desde muy pequeña.

Agradecida inmensamente con mi novio, por tenerme toda la paciencia del mundo, por apoyarme y ayudarme con todo, y ser incondicional siempre.

A nuestro asesor académico **RUBÉN VEGA**, por su inmensa ayuda y apoyo, para lograr cumplir nuestra meta.

A una Ingeniero muy especial e importante en mi vida, **IRAIDA CAMACHO**, por siempre estar presente cuando mas la necesite, y por su gran apoyo con este proyecto.

YOLAEVAN NAVAS

ÍNDICE

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
EL PROBLEMA Y SUS GENERALIDADES	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.2 BASES TEÓRICAS	9
2.2.1 Fricción.....	9
2.2.2 Definición de torque y arrastre.....	10
2.2.3 Perforación direccional	12
2.2.4 Tipos de trayectorias durante la perforación direccional	13
2.2.5 Pozos horizontales	14
2.2.6 Ventajas y desventajas de los pozos horizontales	15
2.2.6.1 Ventajas	15
2.2.6.2 Desventajas de los pozos horizontales	16
2.2.7 Clasificación de los pozos horizontales	16
2.2.8 Pega de tubería y sus causas	18
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	19
CAPÍTULO III	21
MARCO METODOLÓGICO	21
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	21
3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
3.3 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	22
3.3.1 Descripción de los principios teóricos de torque y arrastre en pozos direccionales y horizontales.....	22

3.3.2	Explicación de los modelos para la solución del problema de torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales.	22
3.3.3	Estudio de las nuevas tecnologías que minimizan los problemas de torque y arrastre.	23
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	23
3.4.1	Análisis documental.....	23
3.4.2	Análisis de contenido.....	24
3.5	RECURSOS	24
3.5.1	Humanos	24
3.5.2	Materiales.....	24
3.5.3	Económicos.....	24
CAPÍTULO IV	25
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	25
4.1	DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPIOS TEÓRICOS DE TORQUE Y ARRASTRE EN POZOS DIRECCIONALES Y HORIZONTALES	25
4.1.1	Principios básicos de torque y arrastre presente en la sarta de perforación.	25
4.1.2	Factores a considerar para la reducción de torque y arrastre en la perforación.....	28
4.1.3	Parámetros que afectan el torque y arrastre.	32
4.1.3.1	Limpieza del agujero	32
4.1.3.2	Trayectoria del pozo:.....	33
4.1.4	Cómo reducir el torque y arrastre	35
4.1.5	Cómo medir el torque y arrastre.....	38
4.1.6	Importancia de la reducción del torque y arrastre en la perforación direccional y horizontal.	39
4.1.7	Factor de fricción	40
4.2	EXPLICACIÓN DE LOS MODELOS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE TORQUE Y ARRASTRE DURANTE LA PERFORACIÓN DE POZOS DIRECCIONALES Y HORIZONTALES	43
4.2.1	Modelo sarta suave	43
4.2.2	Modelo de sarta rígida.....	45
4.2.3	Modelo matemático 3D para el cálculo de torque y arrastre.....	46
4.2.3.1	Modelado de secciones rectas.....	48
4.2.3.2	Modelado de secciones curvas	53
4.2.3.3	Combinación de movimiento axial y rotacional	54
4.2.3.4	¿Cómo aplicar el modelo 3D?.....	55
4.3	ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS QUE MINIMIZAN LOS PROBLEMAS DE TORQUE Y ARRASTRE	58
4.3.1	Sistema LoTORQ	58
4.3.2	Beneficios.....	59

4.3.3 Sistema LoDRAG	59
4.3.4 Beneficios	60
4.3.5 Sistema LoTAD	60
4.3.5.1 Beneficios.....	62
4.3.5.2 Componentes de las herramientas.....	62
4.3.5.3 Aplicación de LoTAD en la sarta de perforación	62
4.3.6 Simulación de torque y arrastre.....	65
CAPÍTULO V	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
5.1 CONCLUSIONES	69
5.2 RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
HOJAS METADATOS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Fricción entre un cuerpo y la superficie	10
Figura 2.2 Diagrama de torque y arrastre	11
Figura 2.3 Esquemático de los tipos de perforación direccional.	14
Figura 2.4 Tipos de pozos horizontales	18
Figura 4.1 Fuerzas presentes en un cuerpo estático.	25
Figura 4.2 Fuerzas presentes en un cuerpo en movimiento.	26
Figura 4.3 Fuerzas presentes de un cuerpo en una superficie inclinada	26
Figura 4.4 Diagrama de fuerzas en una superficie inclinada	27
Figura 4.5 Pandeo Sinusoidal de una tubería bajo presión	31
Figura 4.6 Pandeo Helicoidal de una tubería bajo presión	31
Figura 4.7 Asiento de llave	34
Figura 4.8 Tortuosidad.....	35
Figura 4.9 Sensor de carga	39
Figura 4.10 Sarta rotando en posición de equilibrio.....	44
Figura 4.11 Posición de la sarta en relación con el pozo.....	44
Figura 4.12 Efecto Capstan al levantar la carga. El cable rojo representa un aumento en la tensión al levantar la carga	47
Figura 4.13 Efecto Capstan al bajar la carga. El cable azul representa una disminución en la tensión al bajar la carga	47
Figura 4.14 Fuerzas de fricción en un tubo deslizándose atreves de un plano inclinado.....	48
Figura 4.15 Geometría de una tubería dentro de una sección inclinada.....	50
Figura 4.16 Pozo tridimensional.....	56
Figura 4.17 Fuerzas de torque y arrastre.....	56
Figura 4.18 Fuerzas de torque en distintas operaciones	57
Figura 4.19 Sistema LoTORQ.....	59
Figura 4.20 Sistema LoDRAG.....	60
Figura 4.21 Sistema LoTAD.....	61
Figura 4.22 Herramienta LoTAD	62
Figura 4.23 Ensamblaje de la herramienta LoTad	63
Figura 4.24 Tool Joint en contacto con una de las paredes del agujero en una sección inclinada.....	64
Figura 4.25 Aplicación de LoTAD a la sarta de perforación en una sección inclinada	65
Figura 4.26 Introducción de los datos.....	67
Figura 4.27 Trayectoria del Hoyo MFB-San Tomé. A) Interpolación del Programa. B) Interpolación en MathCad.....	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Rango de factores friccionales, dependiendo del fluido con el que se requiera perforar.	42
--	----



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE MONAGAS
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO
MATURÍN / MONAGAS / VENEZUELA**

**ANÁLISIS DEL TORQUE Y ARRASTRE DURANTE LA PERFORACIÓN DE
POZOS DIRECCIONALES Y HORIZONTALES**

Autores:

Yolaevan Navas
Olga López
Octubre del 2019

Asesor académico:

MSc. Rubén Vega

RESUMEN

Con el incremento de pozos horizontales y direccionales de alto ángulo, es importante realizar una predicción confiable del torque y arrastre de tal manera que permita disminuir las posibles detenciones de las operaciones de perforación debido a pegas de tuberías. En tal sentido, el presente trabajo documental pretende sentar las bases sobre el referido tema, por ello se abarcan aspectos como: a) Los principios teóricos de torque y arrastre en pozos direccionales y horizontales que permitió conocer los principios físicos y mecánicos que rigen la materia, b) Los modelos para la solución del problema de torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales, los cuales se sustentan en dos criterios (sarta suave y sarta rígida) y que han dado sustentos a modelos matemáticos denominados 3D y, c) Las nuevas tecnologías que minimizan los problemas de torque y arrastre como LoTORQ, LoDRAG y LoTAD, así como simuladores. Se concluyó que la eficiencia de los elementos mecánicos estudiados está sujetos a la tortuosidad del hoyo.

Palabras clave: Torque, arrastre, modelos matemáticos, pozos horizontales, pozos direccionales.

INTRODUCCIÓN

El estudio de las sartas existe desde los primeros pozos, inicialmente, la mayoría de los pozos eran verticales y poco profundo, por lo que los problemas de torque y arrastre no eran representativos. No obstante, Mitchell, (1995) expresa que tiempo después, como consecuencia del desarrollo de la tecnología de pozos direccionales y horizontales, el procedimiento de bajar la sarta se complicó. Estos son problemas operacionales asociados a la geometría del hoyo, la estratigrafía que afecta directamente la rotación (torque) y la tensión de la tubería (arrastre) mientras se perfora un pozo.

Torque y arrastre son parámetros críticos en perforación direccional, especialmente en pozos horizontales y de alcance extendido. Las limitaciones generadas por este fenómeno en dichos pozos son encontradas usualmente durante las fases de perforación y completación (Pineda, *et al.*, 2015). Tradicionalmente los problemas debido a torque y arrastre se han modelado matemáticamente, pero, los modelos tradicionales para la predicción (etapa de diseño) de estas medidas subestiman los resultados de las predicciones, en comparación con los resultados reales, teniendo como consecuencia abusar del ajuste excesivo de parámetros como el factor de fricción (μ) o el factor de seguridad (FS) (Garibay, 2015).

Ademas, se han buscado soluciones a través de aditivos para los fluidos de perforación así como nuevas herramientas que minimicen estos problemas, por lo que la presente investigación tuvo como propósito analizar el torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales desde el punto de vista de una investigación documental.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA Y SUS GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La perforación rotatoria se utilizó por primera vez en 1901, en el campo de Spindletop, Texas, descubierto por el capitán Anthony F. Lucas, pionero de la industria como explorador y sobresaliente ingeniero de minas y de petróleos (Barberii, 1995). Al principio hubo resistencia al cambio de método de percusión a rotatoria, pero su versatilidad ha permitido que hasta el presente sea la técnica más empleada para la perforación de pozos de hidrocarburos.

La aplicación de la técnica rotatoria no solo ha concedido perforar a mayores profundidades; la tecnología en perforación ha avanzado rápidamente en los últimos 10 años, la barrera de los 30.000 pies de alcance ha sido superada varias veces y diferentes operadoras están activamente planificando pozos entre 36.000 y 49.000 pies (Ghiselin, 2009); sino que su evolución la ha llevado al empleo de la perforación direccional y horizontal. En tal sentido, a nivel mundial son cada día mayor el número de pozos horizontales que se perforan en vez de los tradicionales pozos verticales. Una estadística en los Estados Unidos establece que, a fines del año 2012, 63% de los 1817 pozos que se estaban perforando fueron clasificados como pozos horizontales y 11%, como direccionales. Sólo un 26% de los pozos recibieron la clasificación de verticales (Baker Hughes, 2012).

Como consecuencia del desarrollo de la tecnología de pozos direccionales y horizontales, el procedimiento de bajar la sarta se complicó.

En este caso, la trayectoria del pozo impone nuevas restricciones, debido a que la tubería necesariamente debe flexionarse al pasar a través de un radio de curvatura de hoyo dado. Uno de los problemas que comúnmente se presentan son los denominados torque y arrastre, los cuales son parámetros críticos en perforación direccional, especialmente en pozos horizontales y de alcance extendido. Las limitaciones generadas por el fenómeno de torque y arrastre en dichos pozos son encontradas usualmente durante las fases de perforación y completación (Pineda *et al.*, 2015).

El análisis del torque y arrastre de la sarta de perforación considera dos modos: la navegación donde la sarta no rota, el torque es bajo, aunque la presencia de arrastre axial es tan alta que crea pandeo en la sarta. En el modo de rotación, la presencia de torque es alta, pero, como la sarta está rotando, la fuerza de arrastre se reduce (Mitchell, 1995). Igualmente, el autor citado previamente expresa que, los factores que contribuyen a la generación de torques y arrastres están asociados con la presencia de *doglegs* (patas de perro), hombros pronunciados, espesor del revoque, cama de ripio entre otros.

En tal sentido, el análisis de las fuerzas que ocasionan los problemas de torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales una tarea imprescindible. El método más común usado para este tipo de tareas es el modelo de torque y arrastre desarrollado originalmente por Dawson y Lane (Johansick, *et al.*, 1983) y planteado en ecuaciones diferenciales por Sheppard, (1987). Debido a la simplicidad y a la disponibilidad general de este modelo, ha sido usado extensivamente para la planificación y durante las operaciones en el campo (Pineda, *et al.*, 2015).

Otras formas de contrarrestar los inconvenientes de torque y arrastre es el desarrollo de fluidos de perforación con aditivos que minimicen la pega de tubería y el desarrollo de nuevas tecnologías en herramientas reductoras de torque y arrastre de nueva generación en perforación direccional. Ante lo anteriormente descrito, la presente investigación pretende analizar el torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 Objetivo general

Analizar el torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales

1.2.2 Objetivos específicos

- Describir los principios teóricos de torque y arrastre en pozos direccionales y horizontales.
- Explicar los modelos para la solución del problema de torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales.
- Estudiar las nuevas tecnologías que minimizan los problemas de torque y arrastre.

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La industria petrolera a nivel mundial presenta la necesidad de perforar un gran número de pozos direccionales con alto ángulo, ello principalmente por que al hacerlo trae consigo la reducción de costos y de daños al medio

ambiente, así como mejoras en la producción de los campos a explotar (Garibay, 2015). Realizarlo entonces con el menor número de inconvenientes es primordial, por lo que reducir el torque y arrastre es uno de los principales objetivos.

Venezuela aplica la perforación direccional y horizontal en diferentes áreas como la Faja Petrolífera del Orinoco, Distrito Norte del estado Monagas solo por mencionar dos, por lo que tener un sustento teórico sobre un problema común de este tipo de perforación como lo es el torque y arrastre es importante para los Ingenieros de Petróleo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Garibay, R. (2015) “Aplicación del modelo analítico 3D de torque y arrastre en pozos direccionales y horizontales de México”. En la tesis de Maestría de la Universidad Autónoma de México, expone que hoy en día los modelos para el cálculo de torque y arrastre están basados en ecuaciones presentadas hace aproximadamente tres décadas; esta tesis presenta la aplicación del modelo analítico tridimensional desarrollado por Bernt S. Aadnoy en el año 2012 en dos pozos sintéticos y dos pozos reales, uno del mar del norte y otro del Sur de México. Para comprender el modelo analítico tridimensional de Aadnoy, este estudio se concentra en el desarrollo de las suposiciones utilizadas para llegar a las ecuaciones de torque y arrastre. Dichas ecuaciones se programaron en Excel para probar el modelo y facilitar el análisis de torque y arrastre en cualquier tipo de trayectoria.

En el pozo real del mar del norte se analizan tres casos, en el primer caso se tiene la trayectoria real del pozo, en el segundo se propone una trayectoria teórica aceptada mundialmente para pozos horizontales y en el tercer caso se estudian las trayectorias secundarias máxima y mínima posibles que tiene la trayectoria real debido a errores generados por los métodos existentes para el cálculo de trayectoria de un pozo petrolero, por instrumentos de medición o malas prácticas de operación. El pozo mexicano fue perforado en septiembre de 2015, la característica de este pozo es que tiene un alto ángulo de inclinación, severidades de hasta 3,2°/30m y 300

metros de desplazamiento horizontal, en este ejemplo se compararon los resultados durante la perforación con los resultados del modelo de Aadnoy.

Como conclusión más importante de la investigación expresaron que al comparar las trayectorias real y teórica del pozo F-9 AYT4, la diferencia entre los resultados de torque y el arrastre era mínima porque las patas de perro que tiene la trayectoria real entre los 1218 y 6750 metros desarrollados, no son lo suficientemente severas como para afectar de manera importante al torque y al arrastre. La investigación citada permitirá obtener el basamento de los modelos para el cálculo de torque y arrastre.

Pineda, G. (2012). “Modelado numérico del fenómeno de torque y arrastre en tuberías de completación de pozos de petróleo y gas”. El autor expresa que el torque y arrastre son parámetros críticos en perforación direccional, especialmente en pozos horizontales y de alcance extendido. Las limitaciones generadas por el fenómeno de torque y arrastre en dichos pozos son encontradas usualmente durante las fases de perforación y completación. Los trabajos de completación son incluidos en el diseño base del pozo como consecuencia de que han existido numerosos casos en donde el pozo ha sido satisfactoriamente perforado, pero no ha podido ser completado debido a fallas en el diseño o limitaciones en el taladro.

Para calcular las fuerzas aplicadas sobre la tubería de completación se requiere el uso de un modelo matemático que permita predecir las cargas o esfuerzos que pueden ser aplicados de forma segura sobre la tubería de completación durante su instalación. Experiencia previa ha mostrado que el uso de estos modelos en todas las fases de perforación y completación del pozo es una ventaja. El modelo más usado para estimaciones de torque y arrastre está basado en el propuesto por Johansick *et al.*, (1983), debido a su

simplicidad y disponibilidad general. Experiencia de campo indica que en algunos casos estos modelos analíticos generan resultados inexactos.

Por esta razón, se desarrolló un estudio numérico basado en el modelo de Johansick. Dicho estudio permitió desarrollar un modelo 3D en elementos finitos (MEF) para la estimación del torque y arrastre que, debido a su versatilidad y flexibilidad, puede ser usado como base iniciar estudios numéricos en diferentes áreas como lo son pandeo, vibraciones, análisis de esfuerzos, diseño del ensamble de fondo de pozo, etc.

Concluyó que a partir del modelo propuesto en combinación con algunos modelos de cálculos de trayectorias de pozo se desarrolló un programa computacional para la estimación del torque y el arrastre generado durante la fase de completación del pozo, obteniendo un buen ajuste con datos reales. Como aporte a la presente investigación, este trabajo se muestra las bases teóricas que soportan el modelo y su validación a través de su aplicación en algunos casos de campo.

Sol, A. (2002). “Desarrollo de un simulador para estimar torque y arrastre sobre tuberías de revestimiento en pozos petroleros”. Debido a que, en la construcción de un pozo petrolero, la tubería de revestimiento puede atascarse, se desarrolló un modelo computacional para estimar las cargas encontradas durante su bajada, reciprocación o rotación. Este modelo, a diferencia de otros, toma en cuenta la rigidez de la tubería y la presencia de centralizadores; modelando así la tubería de manera más real.

El principio del modelo es que tanto el torque como el arrastre, son debidos principalmente a la fricción entre el hoyo y la tubería. Se supone que el contacto ocurre en los centralizadores. El método se basa en modelar la

sarta como un conjunto de vigas continuas usando la teoría de vigas continuas de Timoshenko. Primero se describe el modelado de la sarta, y luego se desarrollan las ecuaciones analíticas para la determinación de cargas. Las ecuaciones se deducen tanto para bajada como para subida de la tubería, así como para secciones cóncavas y convexas de un hoyo. También se discuten los efectos de la flotación en el peso efectivo de la sarta y el perfil de tensiones de la misma. Además, se realizan modificaciones al modelo en función de este estudio.

Concluyó, que el método desarrollado predice las cargas usando la teoría de vigas continuas y supone un perfil de tramos circulares. Considera la rigidez de la tubería y la presencia de centralizadores, por lo que modela de manera realista las condiciones de la sarta. La investigación muestra un modelo matemático utilizando elementos finitos el cual será explicado en la presente investigación.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Fricción

De acuerdo a Lambe y Whitman, (1997) la fricción es 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. La Figura 2.1 muestra, la magnitud de la fuerza de rozamiento entre dos cuerpos en contacto es proporcional a la fuerza normal entre ellos:



Figura 2.1 Fricción entre un cuerpo y la superficie

Fuente: Lambe y Whitman, (1997)

Existen dos tipos de fricción: la fuerza de fricción estática (f_s) y la fuerza de Fricción dinámica (f_k).

2.2.2 Definición de torque y arrastre

2.2.2.1 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 (dril string) y el ensamble de fondo (BHA-Bottom Hole Assembly), debido a la posible reducción de agujero, derrumbe del agujero, pegadura por diferencial o acumulación de recortes causada por una mala limpieza del agujero.
- **Torque en la mecha:** generado por la interacción entre la barrena y las formaciones que están siendo perforadas.

2.2.2.2 Arrastre: 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). La figura 2.2 de la página 11 muestra el diagrama de torque y arrastre. 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.

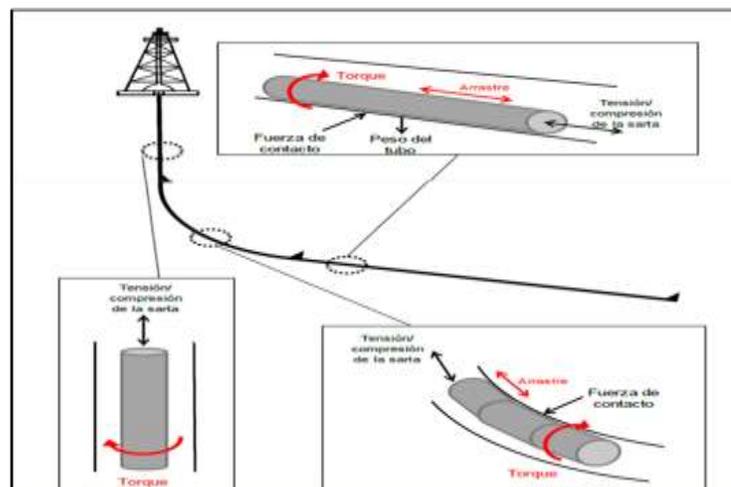


Figura 2.2 Diagrama de torque y arrastre

Fuente: Cardona, et al., (2012)

2.2.3 Perforación direccional

La perforación direccional es la desviación intencional de un pozo. Aunque generalmente los pozos se perforan para que sean verticales, algunas veces es necesario o ventajoso perforar un pozo a un ángulo fuera de la vertical. Desarrollos tecnológicos recientes han hecho esto un componente importante en la perforación moderna, permitiendo que se exploten reservorios antiguamente inaccesibles a través de ciertas distancias verticales y horizontal del taladro (Datalog, 2002)

Esta desviación se logra a través de uso de cuñas, configuraciones de arreglos de fondo de pozo (BHA), instrumentos para medir el trayecto del pozo a la superficie, motores de fondo, y componentes BHA y mechas de perforación especiales, incluidos los sistemas rotativos direccionales, y las barreras de perforación. El perforador de pozos también explota los parámetros de perforación, tales como el peso sobre la mecha y la velocidad rotativa, para desviar la mecha de lejos del eje del pozo existente.

En algunos casos, tales como en la perforación de formaciones de inclinación pronunciada o cuando existe una desviación impredecible en las operaciones de perforación convencionales, puede emplearse técnicas de perforación direccional para asegurar que el pozo se perfora verticalmente. Si bien este objetivo puede lograrse con muchas técnicas, el concepto en general es simple: direcciona la mecha de perforación en la dirección en la que se quiere perforar (PyG Consultores, 2018).

2.2.4 Tipos de trayectorias durante la perforación direccional

2.2.4.1 Tipo I: el pozo se planea de modo que la desviación inicial se obtenga a poca profundidad. El ángulo de inclinación se mantiene constante hasta llegar al objetivo. Esta configuración usa principalmente para pozos de profundidad moderada, en regiones en las que la producción está en un solo intervalo y en las que no se requieren sartas intermedias de revestimiento. Se usa también para perforar pozos más profundos en los que se requiere mucho desplazamiento lateral (PyG Consultores, 2018).

2.2.4.2 Tipo II: es el pozo de configuración en “S”. La desviación se inicia también cerca de la superficie. La inclinación se mantiene, lo mismo en el Tipo I, hasta que se logra casi todo el desplazamiento lateral. Seguidamente se reduce el ángulo de desviación hasta volver el pozo a la vertical para llevar al objetivo. Esta configuración, que puede traer consigo algunos problemas, 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.

2.2.4.3 Tipo III: la desviación se comienza bien debajo de la superficie y el ángulo promedio de inclinación se mantiene hasta llegar al objetivo. Esta configuración es especialmente apropiada para situaciones tales como las perforaciones de fallas o de domos salinos, o en cualquier situación en las que se requiere reperforar o reubicar la sección inferior del pozo.

2.2.4.4 Tipo horizontal, multilateral y de alcance extendido: la productividad de los pozos horizontales llega a ser mayor que la de uno vertical. Comunican una mayor área de la formación productora, atraviesan fracturas naturales, reducen las caídas de presión y retrasan los avances de

los contactos agua-petróleo o gas-petróleo. En la figura 2.3., se puede observar un esquemático de los cuatro tipos de perforaciones direccionales mencionados anteriormente.

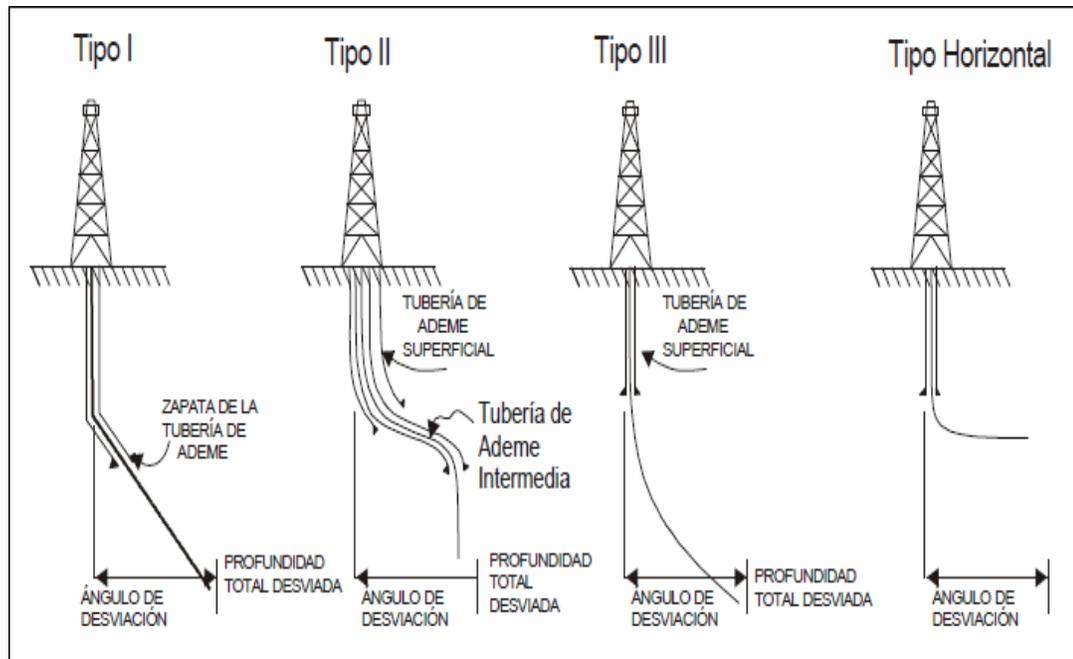


Figura 2.3 Esquemático de los tipos de perforación direccional.

Fuente: PyG Consultores, (2018).

2.2.5 Pozos horizontales

Muchos técnicos están de acuerdo en definir un pozo horizontal como un hoyo que ofrece una sección abierta al flujo cuyo eje axial posee una inclinación entre 85 y 95 grados en el yacimiento de producción (Figura 2.1), creando un cambio radical en las condiciones de flujo de los fluidos, ya que crea un área de forma elipsoidal mientras que la de un pozo vertical es de forma cilíndrica (Giannesini, *et al.*, 1997)

El propósito de un pozo horizontal es incrementar el contacto con el yacimiento y de ese modo incrementar la productividad del mismo, como pozo de inyección un pozo horizontal de larga sección horizontal provee una gran área de contacto y por lo tanto aumenta la inyectividad del pozo, que es lo que más se desea en los proyectos de recuperación secundaria.

La productividad de un pozo horizontal depende de la longitud horizontal y ésta a su vez, depende de las técnicas de perforación horizontal; otra consideración importante para la productividad es el esquema de completación, que dependerá de las necesidades de completación local y de la experiencia que se tenga en el área.

2.2.6 Ventajas y desventajas de los pozos horizontales

De acuerdo a lo expresado por Giannesini, *et al.*, (1997), se tiene:

2.2.6.1 Ventajas

- Permite incrementar la productividad del yacimiento y mejorar el recobro final del mismo, principalmente en áreas de crudo mediano, pesado y extrapesado.
- Aumento del área de drenaje del pozo o del área expuesta al flujo.
- Incremento en la eficiencia de barrido del pozo. Un espesor mínimo de 15 pies garantiza una buena eficiencia de barrido y un buen factor de recuperación.
- Retarda la conificación de agua y/o gas debido a que es posible obtener más producción con una menor caída de presión esto debido a que a diferencia de los pozos verticales la mayor caída de presión ocurre en

las cercanías del pozo; mientras que, en pozos horizontales, esta caída de presión es pequeña y aproximadamente uniforme a lo largo del yacimiento.

2.2.6.2 Desventajas de los pozos horizontales

- Barreras de la permeabilidad vertical restringen la eficiencia de barrido en esa dirección.
- Elevados costos de perforación, ya que se requiere mayor tiempo de equipo que en pozos verticales.
- Las opciones de terminación son limitadas en situaciones en la que se desee controlar problemas originados por elevados cortes de agua y/o relaciones gas – petróleo.
- Dificultad para la toma de núcleos.
- La corrida de registro para corregir el rumbo de la perforación presenta dificultad. Únicamente una parte de la longitud total permite producir o inyectar.

2.2.7 Clasificación de los pozos horizontales

Existen cuatro tipos de pozos horizontales básicos según Datalog, (2002). Cada uno de estos pozos posee una técnica que va en función directa con la tasa de incremento del ángulo y por supuesto en el desplazamiento horizontal.

2.2.7.1 Pozos de radio ultra – corto: es un nuevo método empleado en los últimos años, este utiliza fluidos a alta presión para perforar un agujero semi horizontal. Si la técnica de radio corto se lleva a cabo en agujeros

entubados, el pozo debe ser seccionado y si se lleva a cabo en agujeros descubiertos se realiza una preparación de la formación. Las características de este tipo de pozo y de los demás descritos en este punto se muestran en la Figura 2.4. de la página 18

2.2.7.2 Pozos de radio corto: estos consiguen la trayectoria horizontal en una distancia mucho menor y generalmente se usan cuando el operador tiene limitaciones en cuanto al área dentro de la cual debe limitarse. Un valor típico puede ser un radio de menos de 60 pies (18 m), producido por una tasa de levantamiento de 1°- 4° por pie. Se utilizan juntas con unión móvil para lograr este tipo de levantamiento, sin embargo, entre más severo sea el levantamiento, más corta será la sección horizontal.

2.2.7.3 Pozos de radio medio: con tasas de levantamiento de 8°- 20°/100 pies, es decir con radios entre 100 a 200 m, deben ser llevados a cabo con motores de fondo pues tienen la limitación de que la sarta no puede ser rotada con seguridad a través de la sección de levantamiento.

2.2.7.4 Pozos de radio largo: se hacen cuando se requiere una sección horizontal larga, y el operador tiene la distancia suficiente (entre el objetivo y la cabeza del pozo) para poder levantar cómodamente el ángulo. Se utilizan sargas direccionables y alternativamente con rotación desde superficie para poder hacer correcciones de curso y mejorar la tasa de penetración. Estos pozos de radio largo pueden tener tasas de levantamiento tan pequeñas como 1°/100 pies, y hoy por hoy, se pueden tener alcances de varios kilómetros.

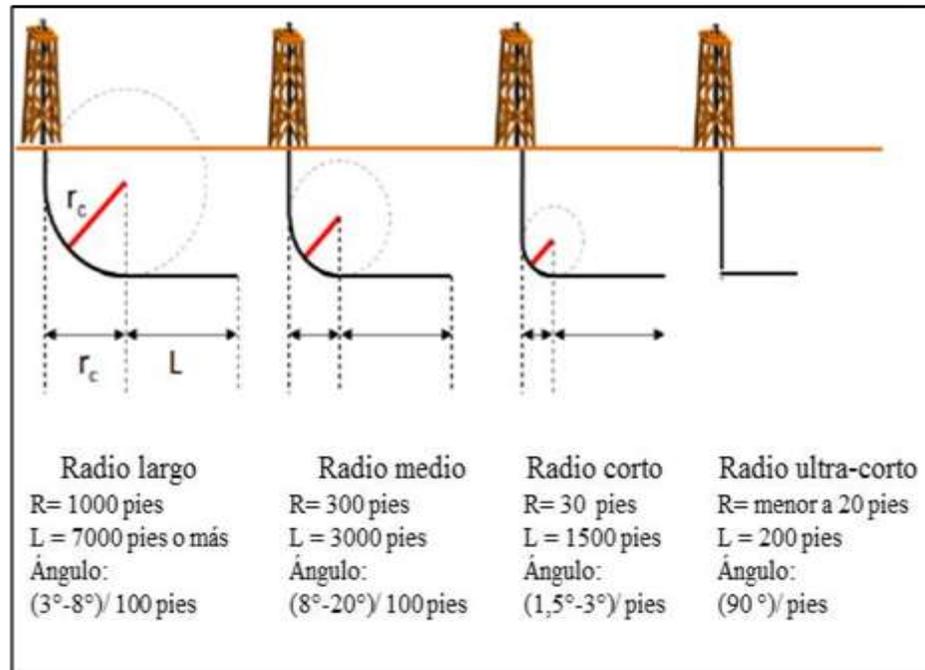


Figura 2.4 Tipos de pozos horizontales

Fuente: Pemex-IPM , (2002).

2.2.8 Pega de tubería y sus causas

Weatherford, (2012), define la pega como un evento en la operación en el cual no se puede rotar la tubería, ni moverla en ninguna dirección y existen diferentes causas por lo que la sarta de perforación puede pegarse; entre las más comunes en las operaciones de perforación están:

- **Pegaduras en arenas en tubería de revestimiento:** es causada por una falla en la tubería de revestimiento o a través de una empaadura, permitiendo que el espacio anular se llene con arena y atrapando la tubería. La tubería de perforación puede ser atrapada al perforar cuerpos de arena que se atraviesan con mucha rapidez y sin tener la limpieza y circulación adecuadas.

- **Pegaduras por atascamiento diferencial:** es un problema común en la perforación de pozos, en la cual la Sarta de Perforación se pega a las paredes del hoyo, por efectos de diferencia entre la presión hidrostática y la presión de formación, impidiendo mover la tubería.
- **Pegaduras con fluidos de perforación**
- **Pegaduras por fallas mecánicas:** ocurren durante la introducción de una empacadura, cuando esta se asienta a una profundidad no deseada, por tubería de revestimiento colapsada. De igual manera puede ocurrir al recuperar la empacadura si esta está atrapada por sedimentos aportados por la formación. Y sucede al estar bajando completaciones dobles.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Ángulo de inclinación: es el ángulo fuera de la vertical, conocido también como deflexión o desviación (Molero, 2006, p.45)

Desplazamiento horizontal: es la distancia horizontal desde la superficie hasta la profundidad final (Pemex-IPM, 2002, p.5)

Elementos finitos: método numérico general para la aproximación de solución es de ecuaciones diferenciales parciales complejas, la cual se utiliza en diversos problemas de ingeniería (Cambou, 2012).

Ensamblaje de fondo: es la sección de la sarta de perforación que agrupa las herramientas entre la mecha y la tubería de perforación. Proporciona el peso requerido sobre la mecha para maximizar la tasa de penetración y producir hoyos en calibre (PDVSA, 2002, p.33).

Modelado numérico: es una técnica basada en el cálculo numérico, empleada en muchos campos de la ingeniería desde los años 60 para validar o refutar modelos conceptuales propuestos a partir de observaciones o derivados de teorías anteriores (Cambou, 2012)

Pata de perro (Dog leg): Es una sección del agujero que cambia de dirección más rápido de lo previsto o deseado, generalmente con efectos secundarios dañinos. (Schlumberger, 2019)

Punto de desviación (KOP): es el punto de la trayectoria en el cual el pozo se desvía de la vertical (Pemex-IPM, 2002, p.5).

Radio de curvatura: es la distancia medida sobre las líneas perpendiculares a cada tangente de la curva desde el centro o punto de convergencia de todas estas líneas (Pemex-IPM. , 2002, p.5).

Tasa de construcción de ángulo: es la razón de cambio de inclinación por unidad de longitud medida generalmente en grados por cada 100 pies de longitud (Pemex-IPM, 2002, p.6).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para dar alcance a los objetivos planteados, la investigación pretendió realizar un análisis del problema de torque y arrastre basado en los criterios utilizados para dar solución a dicho inconveniente como lo son, el empleo de modelos matemáticos y la aplicación de tecnologías para tal fin.

Así, de acuerdo a lo descrito la investigación fue enmarcada dentro de la investigación descriptiva, la cual, según Fontaine, (2012) señala:

Busca establecer mediante un análisis detallado de la realidad estudiada las características, frecuencias, composición funcionamiento del objeto estudiado, sin realizar ningún tipo de modificación de la realidad inicial. El producto de esta investigación es una descripción detallada y fundamentada de las evidencias encontradas (p.126-127).

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La información necesaria para realizar la investigación fue extraída en su totalidad de trabajos previos tales como artículos científicos, tesis y libros especializados en el tema de torque y arrastre, por lo que la investigación se consideró como Documental. En tal sentido, es importante conocer que, “Se identificarán con esta clasificación los estudios que refieren la recolección de datos mediante el manejo de documentos de diversa índole” (Fontaine, 2012. P, 130)

3.3 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

3.3.1 Descripción de los principios teóricos de torque y arrastre en pozos direccionales y horizontales.

De acuerdo al diseño de la investigación planteado, la misma fue de tipo documental. En tal sentido, en esta primera fase se proyectó describir el modelo teórico que rige el tema basado en los siguientes aspectos:

- Principios básicos de torque y arrastre presente en la sarta de Perforación.
- Cómo medir el torque y arrastre.
- Parámetros que afectan el torque y arrastre.
- Factores a considerar para la reducción de torque y arrastre en la perforación.
- Métodos de reducción de torque y arrastre.
- Importancia de la reducción del torque y arrastre en la perforación direccional y horizontal.
- Factor de fricción

3.3.2 Explicación de los modelos para la solución del problema de torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales.

Existen dos modelos básicos para predecir el torque y arrastre, los cuales son, el modelo de sarta suave y el modelo de sarta rígida. Basado en ellos se han establecidos otros modelos como el analítico en 3D (Garibay, 2015), el cual fue explicado basado en su principio de diseño.

3.3.3 Estudio de las nuevas tecnologías que minimizan los problemas de torque y arrastre.

Los problemas de torque y arrastre son minimizados y/o solucionados de varias formas, pero partiendo siempre desde la planeación del pozo, por lo que no solo es importante el modelo matemático empleado sino aspectos como el fluido de perforación con su aditivo anti pega de tubería y las herramientas empleadas en la sarta de perforación tales como: centralizadores, apoyos, herramientas LoTORQ, LoDRAG y LoTAD, así como el empleo de simuladores, entre otras. En tal sentido, el uso de nuevas tecnologías para disminuir los problemas de torque y arrastre fueron estudiadas técnica, ventajas y desventajas, a partir de la revisión de artículos científicos, textos especializados y páginas web de empresas de servicio entre otras.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1 Análisis documental

Sobre el análisis documental Arias, (2016) expresa, “consiste en describir de forma exhaustiva los elementos de un documento” (p.43). De esta manera se realizó una revisión profunda de documentos referente al tema de torque y arrastre de manera de analizarlo con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados. Los instrumentos que se emplearon en la técnica fueron computadoras personales, libretas de nota.

3.4.2 Análisis de contenido

En el análisis de contenido, “se definirán las técnicas lógicas (inducción, deducción, análisis, síntesis), o estadísticas (descriptivas o inferenciales), que fueron empleados para descifrar lo que revelan los datos que fueron recogidos” (Arias, 2016). Ello permitió estructurar la información de acuerdo a la orientación que deseaban las investigadoras, partiendo de la finalidad de la misma. Los instrumentos a emplear fueron Microsoft Word, Excel, Power Point, es decir, programas informáticos.

3.5 RECURSOS

3.5.1 Humanos

La investigación contó con el apoyo del tutor académico, así como de personal experto en el tema que labora en la industria petrolera y en Departamento de Ingeniería de Petróleo de la Universidad de Oriente.

3.5.2 Materiales

Para el éxito de la investigación se emplearon equipos como computadoras, Tablet, internet, además se empleó papel y libros y se revisaron artículos científicos y tesis en el tema en estudio.

3.5.3 Económicos

Los gastos ocasionados por la investigación fueron costeados por las investigadoras.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

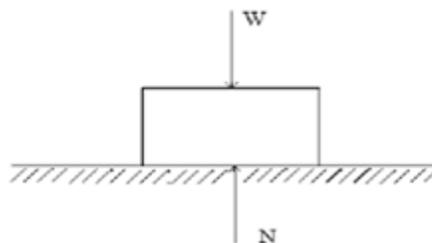
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPIOS TEÓRICOS DE TORQUE Y ARRASTRE EN POZOS DIRECCIONALES Y HORIZONTALES

Enmarcados dentro de la metodología propuesta y según al Manual de Weatherford, (2012) se tiene:

4.1.1 Principios básicos de torque y arrastre presente en la sarta de perforación.

Las fuerzas que actúan en la sarta de perforación al estar dentro del agujero dependen del tipo de superficie en la que se encuentre y la función que esté realizando la misma. Los principios básicos se pueden analizar matemáticamente. Considérese una sección de tubería en el agujero, en el tramo tangencial de un pozo sin movimiento y sin aplicar ninguna fuerza.

4.1.1.1 Superficie horizontal: considérese una sección de tubería en el agujero, en el tramo tangencial de un pozo sin movimiento y sin aplicar ninguna fuerza, como se muestra en la figura 4.1.



Donde:

W: Peso

N: Fuerza normal a la superficie

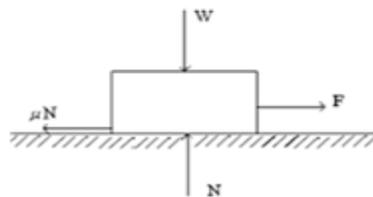
Figura 4.1 Fuerzas presentes en un cuerpo estático.

Fuente: Weatherford, (2012)

Por equilibrio estático

$$\Sigma F=0, W=N \quad (4.1)$$

Al existir desplazamiento de la tubería dentro del agujero como se ilustra en la figura 4.2, existirá una velocidad de desplazamiento, la cual será constante hasta llegar al tope de la siguiente sección que se va perforar.



μN : Fuerza normal de fricción opuesta al movimiento.

N : Fuerza normal a la superficie.

W : Peso.

F : Fuerza aplicada.

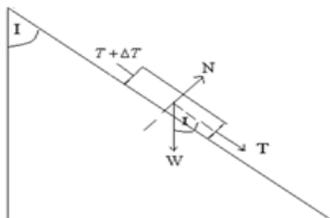
Figura 4.2 Fuerzas presentes en un cuerpo en movimiento.

Fuente: Weatherford, (2012)

$$\Sigma F_y=0, W=N \quad (4.2)$$

$$\Sigma F_x=0, F-\mu N=0 \quad (4.3)$$

4.1.1.2 Superficie inclinada: considérese una sección de tubería dentro del hoyo (Figura 4.3). En ausencia de fricción, las fuerzas actuando sobre la tubería son el peso W , la tensión axial T y la fuerza de reacción, denominada Normal N . se puede hacer un balance de fuerzas, asumiendo que la tubería está rotando dentro del agujero.



T : Tensión
 I : Ángulo
 W : Peso

N : Fuerza normal a la superficie
 ΔT : Diferencial de tensión

Figura 4.3 Fuerzas presentes de un cuerpo en una superficie inclinada

Fuente: Weatherford, (2012)

A lo largo del eje del agujero se tiene:

$$\Sigma F_h=0 \rightarrow \Delta T = W \cdot \cos(\theta) \quad (4.4)$$

Perpendicularmente al eje se tiene:

$$\Sigma F_v=0 \rightarrow N = W \cdot \sin(\theta) \quad (4.5)$$

Considerando ahora el efecto de fricción en una sección sin curvatura como se ve en la Figura 4.4.

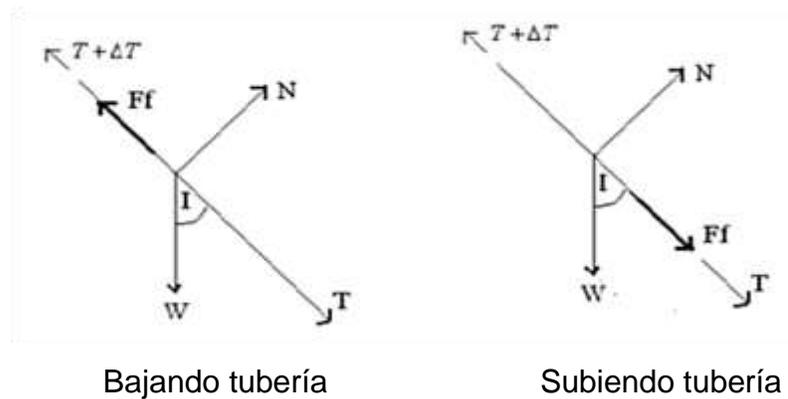


Figura 4.4 Diagrama de fuerzas en una superficie inclinada

Fuente: Weatherford, (2012)

$$F_f = \mu N \rightarrow F_f = \mu \cdot W \cdot \sin(\theta) \quad (4.6)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción. Aquí, $0 < \mu < 1$.

Usualmente este valor del coeficiente de fricción oscila según:

$$0,15 > \mu > 0,45$$

Bajando tubería

$$\Delta T = W \cdot \cos(\theta) - F_f \quad (4.7)$$

Entonces:

$$\Delta T = W \cdot \cos(\theta) - \mu \cdot W \cdot \sin(\theta) \quad (4.8)$$

Subiendo tubería

$$\Delta T = W \cdot \cos(l) + F_f \quad (4.9)$$

Entonces

$$\Delta T = W \cdot \cos(l) + \mu \cdot W \cdot \sin(l) \quad (4.10)$$

4.1.2 Factores a considerar para la reducción de torque y arrastre en la perforación

4.1.2.1 Tensión o compresión: tensión mecánica es el valor de la distribución de fuerzas por unidad de área en el entorno de un punto dentro de un cuerpo o material continuo. Un caso particular es el de tensión uniaxial, que se define en una situación en que se aplica fuerza F uniformemente distribuida sobre un área A . en este caso, la tensión mecánica uniaxial se representa por un escalar designado como σ (sigma) y dado por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.11)$$

Donde: σ = Esfuerzo normal o tensión uniaxial

F = fuerza axial

A = área

Compresión es una presión que tiende a causar en algunos casos una reducción de volumen, siempre manteniendo una masa constante. Cuando se somete un material a una fuerza de flexión, cizallamiento o torsión actúan simultáneamente tensiones de tracción y compresión.

En la perforación de un pozo, cuando existe mayor tensión en la sarta de perforación, es porque existe un problema como pata de perro (dog leg) es decir, a mayor tensión mayor pata de perro.

4.1.2.2 Carga o Peso: el peso es la medida de la fuerza que ejerce la gravedad sobre la masa de un cuerpo. Normalmente, se considera respecto de la fuerza de gravedad terrestre. El peso depende de la posición relativa de los cuerpos y de su masa. En el caso de tubería dentro del agujero, su posición vertical, horizontal o inclinada dependiendo del diseño del pozo. El peso puede afectar a la sarta porque permite que la tubería sufra el contacto con la pared inferior del hoyo logrando que esta sufra desgaste, de la misma manera sino se maneja bien el peso dentro del hoyo se pudiera sufrir de un posible pandeo de tubería.

4.1.2.3 Fatiga: es el daño estructural progresivo localizado permanente, que se produce cuando un material se somete a repetidos ciclos de tensión. Daños por fatiga se acumulan en puntos de alta tensión y en última instancia forman la grieta de fatiga. Las fuentes más comunes de la fatiga por tensión son:

- ✓ La rotación de la tubería, mientras exista una parte de la tubería doblada o pandeada.
- ✓ Presión
- ✓ Vibraciones

La falla por fatiga debido al efecto de rotación de la tubería es un problema que merece ser analizado, más aún cuando las condiciones de operación pueden aproximarse a valores críticos de: severidad en el agujero, velocidad de rotación y esfuerzo axial en la tubería. Estos esfuerzos ocurren

cuando existen espacios anulares estrechos, desgaste excesivo y la sarta se encuentra sometida a tensión.

El criterio utilizado para determinar estos valores críticos fue el sugerido por Lubinski, (1950), el cual consiste en una ecuación empírica que sugiere que la máxima carga lateral que la junta del tubo puede resistir antes de dañarse es de 2000 lb. Por lo tanto, la siguiente ecuación, permite determinar la máxima severidad permisible bajo esta condición a lo largo del pozo.

$$C = \frac{1800.F}{L.T} \quad (4.12)$$

Donde:

C = Máxima severidad permisible (°/100 pies).

F = Carga Lateral sobre la junta del tubo (lb).

L= La mitad de la longitud de un tubo de perforación (ft).

T = Carga de Tensión al tubo (lb).

4.1.2.4 Pandeo: el pandeo es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos alargados y rígidos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes, transversales a la dirección principal de compresión. Se traduce en la aparición de una flexión adicional en la tubería cuando se halla sometida a la acción de esfuerzos axiales de cierta importancia.

Eventualmente, a partir de cierto valor de la carga axial de compresión, denominada carga crítica de pandeo, puede producirse una situación de inestabilidad elástica y entonces fácilmente la deformación aumentará produciendo tensiones adicionales que superaran la tensión de rotura, provocando la ruptura del material.

- ✓ **Pandeo sinusoidal:** la Figura 4.5 muestra la forma y manera gradual como ocurre el pandeo, mientras la tubería de perforación es puesta en compresión provocando una reducción de peso hacia la broca, tendiendo esta a vibrar axialmente.

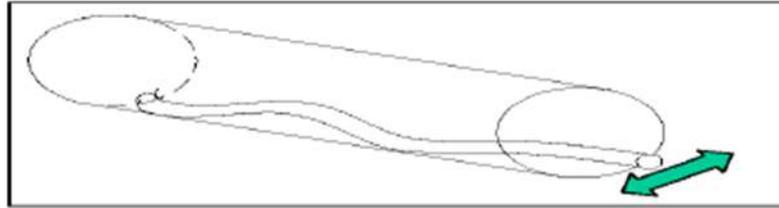


Figura 4.5 Pandeo Sinusoidal de una tubería bajo presión

- ✓ **Pandeo helicoidal:** la figura 4.6 demuestra el pandeo helicoidal, ocurre cuando la tubería se adhiere a las paredes del hoyo. Se podría evitar al rotar la tubería. Si existe este tipo de pandeo lo recomendable es evitar rotar la tubería: de este modo se reduce el riesgo que sufra daños por fatiga.

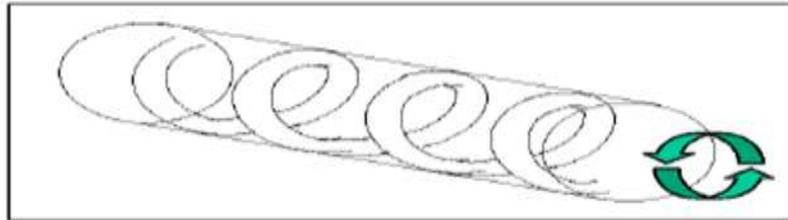


Figura 4.6 Pandeo Helicoidal de una tubería bajo presión

4.1.2.5 Vibración: las vibraciones son inevitables en una perforación. Sin embargo, su grado de severidad y su efecto sobre el proceso de perforación dependen del diseño de la parte inferior de la sarta y, en gran medida, de los parámetros de perforación.

En el pozo abajo se pueden sentir tres tipos de vibraciones:

- ✓ Axial: movimiento a lo largo del eje de la columna de perforación.
- ✓ Lateral: perpendicular a la columna de perforación.
- ✓ Torsional: es una vibración angular alrededor del eje de la columna de perforación.

4.1.3 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 (Tviedal, 2011)

4.1.3.1 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.
- ✓ Propiedades de la formación, cada litología tiene diferentes propiedades que afectan al torque y el arrastre como lo es el tamaño de grano; para visualizar mejor lo anteriormente mencionado, imaginemos a un tubo de metal que es arrastrado sobre una lija.

- ✓ Fuerzas de viscosidad hidrodinámica.
- ✓ Tener dos tipos de fluidos de perforación con distintas densidades en el pozo o la tubería.
- ✓ Una mala limpieza del pozo: la acumulación de recortes representa obstrucción mecánica en el pozo, esto se reduce con un buen diseño de la hidráulica y un fluido de perforación apropiado.
- ✓ Inestabilidad en el agujero: hinchazón de las lutitas, agujero estrecho, desprendimientos del agujero.
- ✓ 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.

4.1.3.2 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.
- ✓ El peso de la sarta: si se usa una tubería menos pesada es benéfico para la perforación de pozos de alcance extendido.
- ✓ Patas de perro.
- ✓ Inclinación.
- ✓ Relación entre el tamaño del agujero y de la sarta.
- ✓ Asientos de llave (Key Seat): 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 4.7 (Sheppard, 1987).

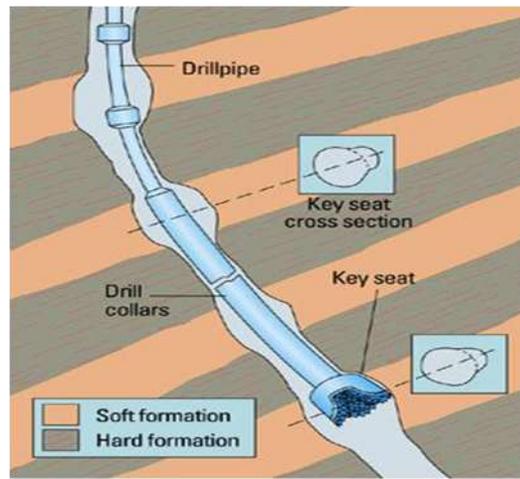


Figura 4.7 Asiento de llave

Fuente: Tveitdal, (2011).

- ✓ 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, Chen, D., & Comeaux, 2001). La siguiente figura muestra a una trayectoria tortuosa (rojo) y a otra sin irregularidades (negro).

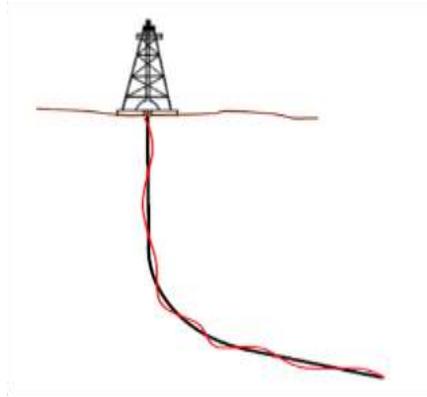


Figura 4.8 Tortuosidad
Fuente: Tveitdal, (2011)

4.1.4 Cómo reducir el torque y arrastre

Si durante la perforación de un pozo el torque y el arrastre son mucho más altos de lo predicho analíticamente y además exceden las capacidades del top drive, existen una variedad de métodos con los cuales se pueden reducir estas fuerzas. La aplicación de estos métodos es esencial para conseguir el objetivo antes de alcanzar los límites de torque y arrastre del equipo o de la sarta de perforación (Tveitdal 2011).

4.1.4.1 Selección de la barrena: la selección de la barrena esta normalmente basado en el ritmo de penetración y durabilidad de acuerdo a las características de la formación, pero también es importante considerar la longitud de la pata de la barrena, ya que afecta significativamente el torque y el arrastre, debido a que una pata corta crea un caliper muy irregular y por lo tanto se crean micro tortuosidades, en cambio una pata larga crea un agujero más suave (Gaynor *et al.*, 2001).

4.1.4.2 Trayectoria del pozo: la reducción de la tortuosidad también reduce significativamente las fuerzas de torque y arrastre durante la perforación, para ello es recomendable usar un sistema de rotación dirigible (RSS). También reducir las severidades de la pata de perro cuando se levanta o se tumba ángulo, disminuirá las fuerzas de torque y arrastre especialmente en la superficie del pozo, donde tales fuerzas son más altas (Tveitdal 2011).

4.1.4.3 Fluido de perforación: la manera, más sencilla de reducir el torque y el arrastre es usar un fluido de perforación base aceite (OBM) o agregar lubricantes al fluido base agua (WBM).

4.1.4.4 Reducción de la fricción mecánica con herramientas: se ha demostrado en el golfo de México que usar herramientas y otras técnicas para reducir la fricción mecánica, ha funcionado de manera efectiva (Maehs, Renne, Logan, & Diaz, 2010). Existen varios tipos de estas herramientas como lo son patines mecánicos o cojinetes con baleros, estos se colocan en la tubería de perforación, en secciones donde se aprecian mayores fuerzas laterales, convirtiendo a la superficie de contacto en una superficie efectiva. Estas herramientas han sido usadas en circunstancias donde al momento de ir perforando las fuerzas de torque y arrastre aumentan de manera inesperada, impidiendo completar la trayectoria deseada. El uso de estos reductores de fricción mecánica ha aminorado el torque y arrastre lo suficiente como para continuar perforando y conseguir el objetivo (Nazari & Hareland, 2010).

4.1.4.5 Sistema de rotación dirigible (RSS): un pozo perforado con motor de fondo generalmente es más tortuoso que uno perforado con sistema de rotación dirigible (RSS), esto se debe al principio que tiene cada

herramienta para direccionar. La perforación direccional con un motor direccional se logra en dos modos: rotación y deslizamiento. En el modo de rotación, toda la sarta de perforación rota, como ocurre en la perforación rotativa convencional y tiende a perforar hacia adelante. Para iniciar un cambio en la dirección del pozo, la rotación de la sarta de perforación es detenida en una posición tal, que la sección curva del motor de fondo se encuentre ubicada en la dirección de la nueva trayectoria deseada.

Este modo, denominado modo por deslizamiento, se refiere al hecho de que la porción de la sarta de perforación que no realiza un movimiento rotativo, se desliza por detrás del conjunto direccional. Si bien esta tecnología ha funcionado en forma extraordinaria, se requiere una extrema precisión para orientar correctamente la sección curva del motor. Debido a la elasticidad torsional, la sarta de perforación se comporta casi como un resorte en espiral y se retuerce hasta tal punto que resulta difícil orientarlo. Las variaciones litológicas y otros parámetros también influyen en la posibilidad de lograr la trayectoria de perforación planeada.

Quizás el mayor problema que se presenta en la perforación por deslizamiento convencional sea la tendencia a sufrir aprisionamientos, por parte de la sarta que no gira. Durante la perforación por deslizamiento, la falta de rotación disminuye la capacidad del fluido de perforación de remover los recortes, de manera que se puede formar un colchón de recortes sobre el lado inferior del pozo ya que la limpieza del hoyo se ve afectada, entre otros factores, por la velocidad de rotación, la tortuosidad del hueco y el diseño de los conjuntos de fondo.

Con la perforación en el modo de deslizamiento la potencia disponible para hacer mover la barrena disminuye, lo cual, sumado a la fricción de

deslizamiento, reduce la tasa de penetración (ROP, por sus siglas en inglés). Finalmente, debido al camino tortuoso en proyectos de perforación de gran alcance, las fuerzas de fricción durante el deslizamiento se acumulan hasta tal punto que el peso axial resulta insuficiente para hacer frente al arrastre de la tubería de perforación contra el hoyo, haciendo imposible continuar la perforación.

Si se cambia del modo de deslizamiento al modo de rotación durante la perforación con herramientas direccionales, es probable que se obtenga una trayectoria más tortuosa en dirección al objetivo. El uso de un sistema rotativo direccional (RSS) elimina el modo de deslizamiento mientras se perfora direccionalmente y produce un hoyo más suave debido a que permite la rotación continua, además las herramientas RSS proporcionan una respuesta casi inmediata a los comandos provenientes de la superficie cuando el perforador necesita cambiar la trayectoria del pozo, lo cual reduce considerablemente la tortuosidad en el pozo (Maehs *et al.*, 2010)

4.1.5 Cómo medir el torque y arrastre

4.1.5.1 Medición de arrastre: si se quiere conocer el arrastre en el campo se utiliza un sensor para medir cargas, como se muestra en la figura 4.9 de la siguiente página, 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.



Figura 4.9 Sensor de carga

Fuente: Samuel, (2010)

4.1.5.2 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, bien sea, en N-m o Lbf-ft.

4.1.6 Importancia de la reducción del torque y arrastre en la perforación direccional y horizontal.

En la perforación direccional existe la necesidad de obtener un rendimiento efectivo en costos. Con el desarrollo de la perforación direccional creció la demanda por herramientas de perforación que permita la reducción de los esfuerzos de torsión y arrastre asociados con pozos de alcance extendido.

Las operaciones con los reductores de torque y arrastre desempeñan un rol vital en el proceso de la perforación direccional, reducen el tiempo y los costos de la unidad de perforación a través de:

- Aumentar el control y eficiencia de perforación direccional.
- Reducir el torque y arrastre hasta el 70% (dependiendo de las características del pozo) para mantener el peso de la sarta de perforación.
- Prevenir daño o fallas del equipo de fondo y superficie.
- Reducir el desgaste en las secciones entubadas del pozo.
- Mejorar el proceso general de perforación.
- Orientar con precisión las herramientas de perforación y completación.

4.1.7 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:

$$F_f = \mu * F_N \quad (4.13)$$

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:

- Lubricidad del fluido.
- Rigidez de la tubería.
- Acumulación de recortes.
- Asientos llave.
- Pegadura por diferencial
- Severidad de la pata de perro.
- 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 (Samuel, 2010).

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; en la siguiente página se

tiene la Tabla 4.1 que contiene los tipos de fluidos con sus respectivos rangos de factores de fricción.

Tabla 4.1 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 polimérico	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
Aireado	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 4.1, en la industria petrolera los valores más usados son de 0,20 para agujero entubado y 0,25 para agujero descubierto (Aadnoy, Fazaelizadeh, & Hareland, 2010).

4.2 EXPLICACIÓN DE LOS MODELOS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE TORQUE Y ARRASTRE DURANTE LA PERFORACIÓN DE POZOS DIRECCIONALES Y HORIZONTALES

Existen dos modelos básicos para predecir el torque y arrastre, los cuales son, el modelo de sarta suave y el modelo de sarta rígida. 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, Sellami, Tijani, & Stab, 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.

4.2.1 Modelo sarta suave

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” (Fig.4.10). 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 & Samuel, 2007).

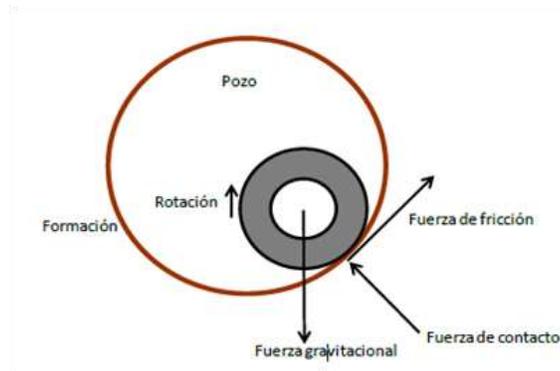


Figura 4.10 Sarta rotando en posición de equilibrio

Fuente: Menand *et al.*, (2006).

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.4.11).

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 provocará errores en los resultados del cálculo de torque y arrastre.

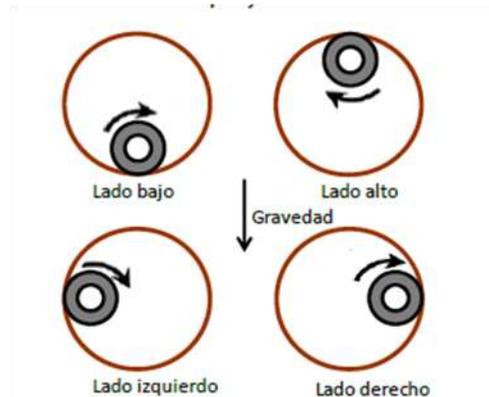


Figura 4.11 Posición de la sarta en relación con el pozo

Fuente: Menand *et al.*, (2006).

4.2.2 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 *et al.*, (2006) 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 (Menand *et al.*, 2006), 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.

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, por ello y por fines prácticos en esta tesis solo se trabajara con el modelo de sarta suave.

4.2.3 Modelo matemático 3D para el cálculo de torque y arrastre

Aadnoy & Andersen, (2001), desarrollaron 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 & Andersen, (2001), 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.

Ellos consideraron 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 dice que al pasar un cable por una superficie curva (como se muestran en las figuras 4.12 y 4.13), 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.

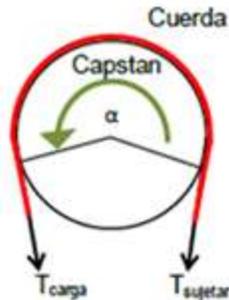


Figura 4.12 Efecto Capstan al levantar la carga. El cable rojo representa un aumento en la tensión al levantar la carga

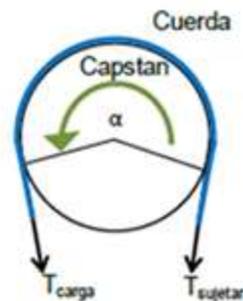


Figura 4.13 Efecto Capstan al bajar la carga. El cable azul representa una disminución en la tensión al bajar la carga

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.

4.2.3.1 Modelado de secciones rectas

La principal característica de una sección recta, es que la tensión de la sarta de perforación no está relacionada con la fuerza normal entre la tubería y el pozo, por lo tanto la fuerza de tensión no afecta a la fuerza de fricción.

Debido a que la gravedad actúa empujando a la tubería hacia abajo, solo se utiliza el ángulo de inclinación de pozo (α) y los cambios de azimut no tienen ninguna contribución para el cálculo de arrastre en secciones rectas (Tveitdal 2011). La siguiente figura muestra el equilibrio de fuerzas en una tubería que se desliza en un plano inclinado (sección recta):

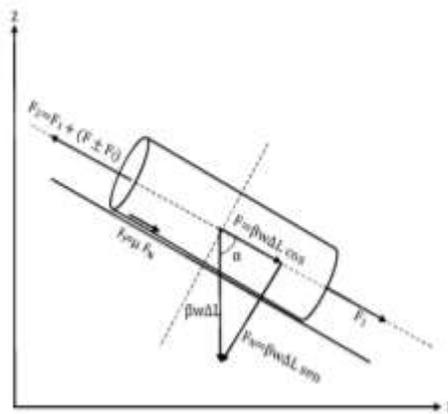


Figura 4.14 Fuerzas de fricción en un tubo deslizando a través de un plano inclinado

Fuente: Aadnoy *et al.* (2010)

La figura anterior muestra que la fuerza necesaria para levantar la tubería es:

$$F_2 = F_1 + (F \pm F_f) \quad (4.14)$$

El signo positivo (+), es usado para levantamiento y el negativo (-) para bajar la tubería.

Dónde: w =peso unitario [Nm], F_1 =Fuerza provocada por la sección de tubería anterior [N].

$$F_f = \mu \cdot F \cdot N = \text{Fuerza de fricción [N].} \quad (4.15)$$

$$F = \beta w \Delta L \cos \alpha = \text{Peso de la sección anterior [N].} \quad (4.16)$$

$$F_N = \beta w \Delta L \sin \alpha = \text{Fuerza normal [N].} \quad (4.17)$$

Sustituyendo las equivalencias de cada fuerza en la ecuación 4.14, tenemos la siguiente ecuación (Johancsik, Friesen, & Dawson, 1984)

$$F_2 = F_1 + (\beta w \Delta L \cos \alpha \pm \mu \beta w \Delta L \sin \alpha) \quad (4.18)$$

Factorizando $\beta w \Delta L$ de la ecuación anterior

$$F_2 = F_1 + \beta w \Delta L (\cos \alpha \pm \mu \sin \alpha) \quad (4.19)$$

El primer término F_1 de la ecuación 4.18 se refiere al peso del elemento de la sección que anteriormente fue calculada y el segundo término a la fuerza de fricción necesaria para mover el elemento de tubería seleccionado. Si la inclinación de α fuese igual a cero grados, quiere decir que en esa sección la tubería está en posición vertical y por lo tanto la fricción se anula. Si α tiene un valor de 90 grados, significa que en tal sección de la tubería se encuentra horizontal, por lo tanto, el arrastre de la sarta será menor, ya que el peso de la tubería se encuentra totalmente recargado en la parte baja del pozo (Aadnoy *et al.* 2010).

Aadnoy y sus colegas infirieron las siguientes ecuaciones:

- ✓ Componente axial de peso es:

$$w(\alpha) = w\Delta L \cos\alpha \quad (4.20)$$

- ✓ Altura vertical es:

$$\Delta z = \Delta L \cos\alpha \quad (4.21)$$

Sustituyendo la ecuación 4.21 en la ecuación 4.20:

$$w(\alpha) = w\Delta z \quad (4.21)$$

La ecuación anterior dice que la carga estática axial de la tubería, es igual al peso unitario multiplicado por la altura vertical proyectada. Si un pozo vertical tiene una profundidad "D", y un pozo desviado tuviera la misma profundidad vertical proyectada, el peso estático de la sarta de perforación sería el mismo para ambos casos, como se muestra en la siguiente figura.

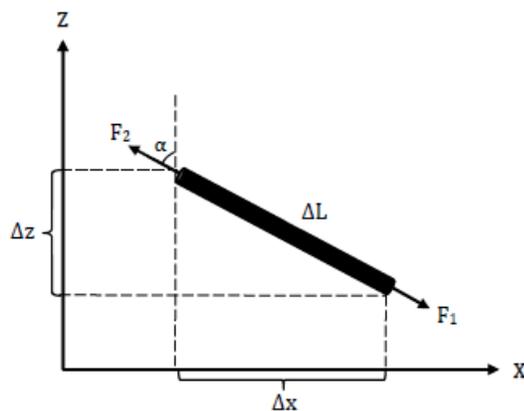


Figura 4.15 Geometría de una tubería dentro de una sección inclinada

Fuente: Aadnoy *et al.* (2010).

Una vez que se tiene la descripción de la sarta de perforación, el survey y se especifica el coeficiente de fricción, los cálculos de arrastre comienzan

desde la parte más baja de la sarta de perforación y se procede a calcular sección por sección hacia arriba.

Si la sarta es dividida en n elementos, F_{i-1} es la fuerza en la parte baja de cada elemento y F_i es la fuerza en la parte alta del elemento. A veces el pozo es llenado con fluidos de perforación de diferentes densidades, lo cual resulta en tener diferentes factores de flotabilidad β_i en las secciones del pozo. Si el pozo es llenado con un solo fluido de perforación, el factor de flotabilidad β_i será el mismo en todas las secciones del pozo. También existen casos en que la sarta de perforación tiene componentes con diferentes pesos unitarios w_i , como lo son la tubería de perforación, tubería de perforación pesada y el ensamble de fondo (Fazaelizadeh, Hareland, & Aadnoy, 2010).

Usando el coeficiente de fricción μ , existen dos enfoques para calcular el torque y arrastre. El primero asume un solo coeficiente de fricción para todo el pozo incluyendo la tubería de revestimiento y las secciones para el agujero descubierto, tratando de obtener una igualdad entre la correlación de los resultados obtenidos en el campo y los resultados del modelo. La segunda asume diferentes coeficientes de fricción, uno para la tubería de revestimiento (pozo entubado) y otro para pozo descubierto. Los coeficientes de fricción μ_i pueden ser iguales o diferentes en todo el pozo, esto depende del enfoque que se seleccione.

Si la sarta de perforación es dividida en $n-1$ elementos, la ecuación general para calcular el arrastre en una sección recta, puede ser escrita de la siguiente manera según (Fazaelizadeh, Hareland, & Aadnoy, 2010):

$$F_n = \sum \{ \beta w \Delta L (\cos \alpha \pm \mu \sin \alpha) \}; n_i = 2 \quad (4.22)$$

Cuando el coeficiente de fricción es igual a cero, la ecuación 4.22 puede usarse para calcular el peso estático de la sarta en una sección recta.

El mismo principio aplica para la fricción de rotación cuando se aplica un torque. El torque es el coeficiente de fricción multiplicado por el momento normal y el radio de la herramienta. La siguiente ecuación postulada por Johancsik en 1986, se utiliza para calcular el torque en una sección recta. En este caso las fuerzas axiales no afectan al torque y este se considera independiente de la dirección de rotación.

$$T = \mu \times \beta w \Delta L \sin \alpha \times r \quad (4.23)$$

Cuando la inclinación del ángulo α es igual a cero el valor del torque presentado es casi cero, debido a que la fuerza normal es insignificante cuando la tubería está completamente vertical, por el contrario, si hay un ángulo α de 90 grados, se tendrá un alto torque debido a que las fuerzas normales en una sección horizontal son máximas. En el año 2013 Mohammad Fazaelizadeh, generaliza la ecuación de torque a lo largo de la tubería de perforación en una sección recta, cuando es dividida en $n-1$ elementos.

$$T_n = \sum \{ \mu \times \beta w \Delta L r \sin \alpha \}; n_i = 2 \quad (4.24)$$

Es necesario mencionar que la sarta de perforación se compone de diferentes herramientas y cada una con sus respectivos radios r_i . Si la barrena está en contacto con la roca, el torque de la barrena será añadido al torque total calculado.

4.2.3.2 Modelado de secciones curvas

Para las secciones curvas del pozo, la fuerza de contacto entre la sarta y el pozo depende de la carga axial de la tubería, debido a que en este proceso domina la tensión de la sarta. Se asume que la tubería no tiene peso, aunque en la ecuación final se añade el peso (Aadnoy *et al.* 2010):

$$F_2 = F_1 e^{\pm \mu |\theta_2 - \theta_1|} + \beta w \Delta L \{(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \alpha_2 - \alpha_1\} \quad (4.25)$$

Cuando la sarta está rotando, aplican las mismas fuerzas de contacto que en el arrastre y solo la dirección de la fricción es tangencial.

El torque de la tubería cuando solamente está girando y no intervienen fuerzas de arrastre, se define con la siguiente ecuación, propuesta por Aadnoy:

$$T = \mu r N = \mu r F_1 |\theta| \quad (4.26)$$

El ángulo de la pata de perro θ depende de la inclinación y el azimut. Debido a que la tubería está en contacto con la parte alta o la parte baja del pozo, su superficie de contacto está dada por el plano de la pata de perro.

Las fuerzas de torque y arrastre de un pozo con cierto perfil direccional, se calculan dividiendo el pozo en sus elementos rectos y curvos. Las cargas y torques se van sumando empezando desde el fondo del pozo.

Para el cálculo de arrastre en secciones curvas la ecuación general se muestra a continuación (Fazaelizadeh, 2013):

$$F_n = \sum \{F_{i-1} \times e^{\pm \mu_i |\theta_i|} + \beta_i w_i \Delta L_i \times [(\sin \alpha_i - \sin \alpha_{i-1}) \alpha_i - \alpha_{i-1}]\} n_i = 2 \quad (4.27)$$

El torque para el número del elemento n que se tenga será:

$$T_n = \sum \mu_i r_i F_{i-1} |\theta_i| n_i = 2 \quad (4.28)$$

4.2.3.3 Combinación de movimiento axial y rotacional

Las ecuaciones presentadas en las secciones 4.2.3.1 y 4.2.3.2, el arrastre y el torque se calculan por separado, pero cuando se presenta la combinación de ambas fuerzas, es necesario modificar las ecuaciones. Aadnoy y Andersen (2001), presentaron ecuaciones para descomponer a la fricción en dos direcciones a la vez (combinación del movimiento axial y rotacional). Se sabe que el efecto de este movimiento combinado, facilita la introducción de la tubería al pozo. Un alto movimiento rotacional reduce considerablemente las fuerzas de arrastre, por ejemplo, cuando se requieren de grandes fuerzas para levantar o bajar a la tubería, debido a que el pozo es estrecho, la solución a la reducción de estas fuerzas es hacer rotar a la tubería de perforación, en el campo esta gran diferencia es observada gracias a la medición del peso realizada por el gancho de perforación.

Las siguientes ecuaciones son usadas para calcular el torque y arrastre durante la combinación de estas dos fuerzas:

$$F_2 = F_1 + F_1 (e^{\pm |\theta|} - 1) \sin \psi + \Delta L \beta w \{ \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 \alpha_2 - \alpha_1 \} \quad (4.29)$$

$$T = \mu r F_1 |\theta| \cos \psi \quad (4.30)$$

Para el cálculo de arrastre en secciones rectas y curvas durante el movimiento combinado, las ecuaciones generales se muestran a continuación (Fazaelizadeh, 2013):

Secciones rectas.

$$F_n = F_{i-1} + \sum_{i=2}^n \{\beta w \Delta L \cos \alpha\}_{i=2} \pm \sum_{i=2}^n \{\mu \beta w \Delta L \sin \alpha\}_{i=2} \quad (4.31)$$

$$T_n = \sum_{i=2}^n \{\mu \cdot \beta w \Delta L r \sin \alpha \cos \psi\}_{i=2} \quad (4.32)$$

Secciones curvas.

$$F_n = \sum_{i=2}^n \{F_{i-1} \cdot (e^{\pm \mu_i |\theta_i|} - 1) \sin \psi_i + \beta_i w_i \Delta L_i \cdot [(\sin \alpha_i - \sin \alpha_{i-1}) \alpha_i - \alpha_{i-1}]\}_{i=2} \quad (4.33)$$

$$T_n = \sum_{i=2}^n \mu_i r_i F_{i-1} |\theta_i|_{i=2} \cdot \cos \psi_i \quad (4.34)$$

4.2.3.4 ¿Cómo aplicar el modelo 3D?

A continuación, se muestra cómo aplicar el modelo tridimensional, en un caso real, el cual fue resuelto por Aadnoy, Fazaelizadeh, & Hareland, “3-Dimensional Analytica Model for Wellbore Friction”, (2010). La figura 4.16 muestra un pozo tridimensional, el cual tiene cambios en inclinación y a la vez en azimut. El análisis será similar al del caso A, con la excepción de que este pozo está limitado por un plano en 3D.

La profundidad desarrollada es de 2104 m. Las especificaciones del ensamble de fondo (BHA) tiene un peso unitario de 2,13 kN/m y una longitud de 161 m, los otros 1943 metros se componen de tubería de perforación de 5 pulgadas, con un peso de 19,5 lb/pies (0,285 kN/m). El pozo es perforado con un fluido que tiene una gravedad específica (SG) de 1,3 y el coeficiente de fricción es aproximadamente 0,2. El pozo se compone de tres secciones curvas y tres rectas, como se muestra en la siguiente figura 4.16.

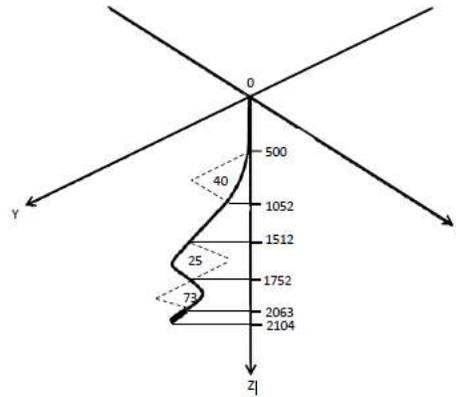


Figura 4.16 Pozo tridimensional

Fuente: Aadnoy, (2010)

La solución del análisis del caso, se muestra en la Figura 4.17; los resultados se calcularon con un programa comercial para facilitar el análisis de torque y arrastre, de este y otros casos que más adelante se presentarán.

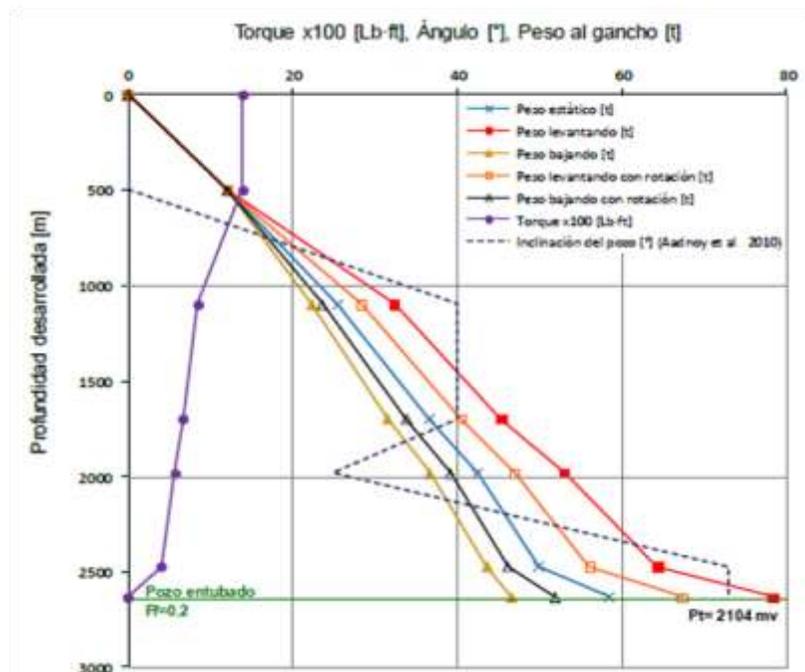


Figura 4.17 Fuerzas de torque y arrastre

Fuente: Aadnoy, (2010)

En la gráfica 4.17 se aprecia una reducción en el arrastre al levantar la tubería, esto se debió a que al aumentar la velocidad de rotación y disminuir la velocidad de levantamiento o bajada, el ángulo del vector de fricción (ψ) tiende a reducirse a 0° , provocando que las fuerzas de arrastre se aproximen a tener un peso estático. En otras palabras, la alta rotación elimina a la fricción axial.

En la Figura 4.18 de la siguiente página, el torque durante el levantamiento y bajada de la tubería es comparado con el torque estático. El torque durante el levantamiento disminuye ligeramente y durante bajada disminuye de manera notoria.

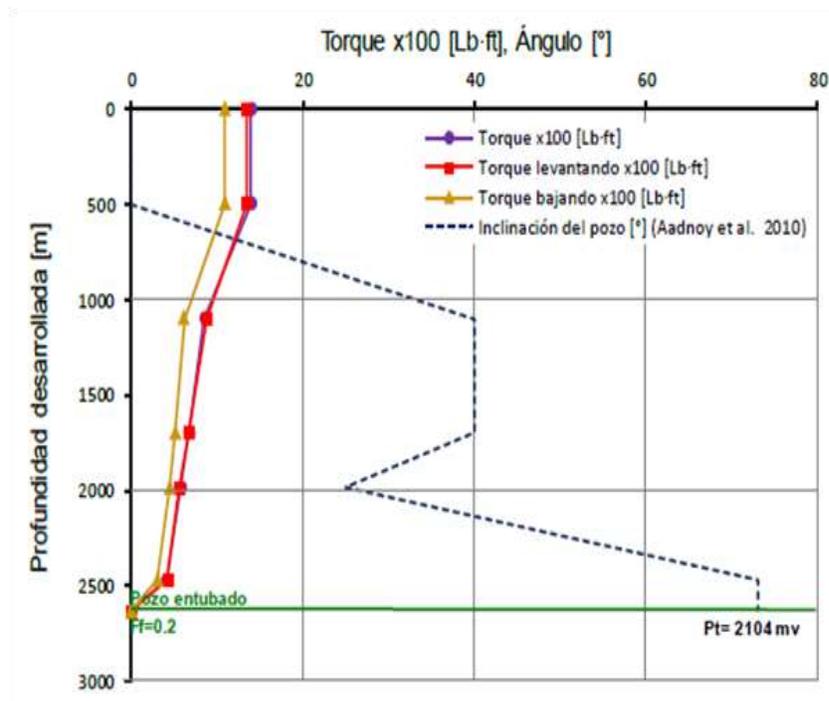


Figura 4.18 Fuerzas de torque en distintas operaciones
Fuente: Aadnoy, (2010)

4.3 ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS QUE MINIMIZAN LOS PROBLEMAS DE TORQUE Y ARRASTRE

En esta sección de la investigación no se contemplarán el uso de lubricantes como elementos reductores de torque y arrastres, solo sistemas mecánicos y el empleo de la simulación.

4.3.1 Sistema LoTORQ

El sistema de reducción de fricción (torque y arrastre) LoTORQ es completamente mecánico y funciona de manera independiente de los fluidos de perforación y completación, como se muestra en la figura 4. 19 en la siguiente página. Este sistema único que utiliza rodillos bidireccionales, ha sido comprobado en los pozos más difíciles en el mundo. Los rodillos bidireccionales reducen el torque y el arrastre, están en contacto con la tubería interna, y pueden lograr factores de fricción excepcionalmente bajos, con coeficientes rotativos en cemento tan bajos como 0,04.

Los rodillos con un perfil más alto para hacer contacto con la pared externa del agujero, han reducido los factores de fricción axial en el 60% de manera rutinaria. La mayoría de las herramientas LoTORQ han sido utilizadas en pozos de alcance extendido para reciprocarse y rotar tuberías de revestimiento. El sistema de reducción de fricción mecánica LoTORQ ahora hace posible la rotación de tubería que alguna vez se limitó por torsión, proporcionando la capa protectora de cemento óptima. El LoTORQ alcanza su máximo desempeño cuando:

- Se corren revestidores, *liners*, *liners* ranurados, en pozos horizontales de alcance extendido (ERW).
- *Liners* largos (más de 800 pies) y que son rotados durante la cementación.

4.3.2 Beneficios

- Mejora la cementación permitiendo al cemento colocarse de forma uniforme.
- Efectividad probada en pozos de largo alcance.



Figura 4.19 Sistema LoTORQ

Fuente: Weatherford, (2012)

4.3.3 Sistema LoDRAG

El sistema LoDRAG es un centralizador y además un sistema completo de reducción de fricción mecánica, que funciona de manera independiente de la resistencia o lubricidad de la película de lodo de perforación/completación, como se muestra en la figura 4.20. El área de contacto reducida de los rodillos con las paredes de la tubería de revestimiento o del agujero, funciona de manera excepcional bajo condiciones de sub presión cuando el riesgo de atascamiento diferencial sea alto.

Las herramientas LoDRAG han sido utilizadas principalmente para correr mallas de control de arena en yacimientos de areniscas no consolidada. Utilizar herramientas LoDRAG en estos yacimientos puede reducir el arrastre axial hasta el 60%. Las herramientas LoDRAG pueden reducir la fricción axial en hoyos entubados en porcentajes similares. Las Herramientas LoDRAG logran un desempeño óptimo cuando:

- Se usa tubería de revestimiento y mallas en pozos horizontales y de alcance extendido.
- Se requiere una reducción en el arrastre axial para un agujero entubado y/o abierto.



Figura 4.20 Sistema LoDRAG

Fuente: Weatherford, (2012)

4.3.4 Beneficios

- Efectividad comprobada permite tecnología de pozos extrema.

4.3.5 Sistema LoTAD

El sistema LoTAD, es más que una herramienta de perforación para reducir torsión y arrastre. Es un sistema completo para reducir fricción mecánica que funciona independientemente del lodo de perforación/

completación, como se muestra en la figura 4.21. Los análisis han mostrado que el área de contacto reducida de rodillos con la pared del agujero funciona de manera excepcional en condiciones sub presurizadas donde el riesgo de atascamiento diferencial sea alto.

Las herramientas LoTAD han sido utilizadas en pozos de alcance extendido para reducir el torque, arrastre, desgaste de la tubería de revestimiento, desgaste de Tool Joints y atascamiento diferencial, al mismo tiempo que se mejoran el control direccional, las tasas de penetración (ROP) y la limpieza del agujero.



Figura 4.21 Sistema LoTAD

Fuente: Weatherford, (2012)

La herramienta LoTAD alcanza su mejor desempeño en las siguientes condiciones:

- ✓ La reducción del torque y arrastre son un problema.
- ✓ Donde las condiciones de HSE y/o de costos prohíban la utilización de lodos a base de aceite.
- ✓ Formaciones sub presurizadas que puedan causar pega diferencial.
- ✓ El desgaste de la tubería de revestimiento o del Tool joint son un problema.
- ✓ Donde la perforación en deslizamiento (Slide Drilling) requiera un desempeño óptimo.

4.3.5.1 Beneficios

- Operación en hoyo abierto y revestido.
- Instalación y mantenimiento simple.

La herramienta LoTAD es la más empleada actualmente, como se muestra en la figura 4.22, por ello se realizó una explicación más profunda.

4.3.5.2 Componentes de las herramientas

La descripción de la herramienta de LoTAD se ilustra en la Figura 4.22, que consiste de:

- Una unión substituta de tubería de perforación.
- Camisa de polímeros.
- Camisa de acero.
- Rodillos y ejes.

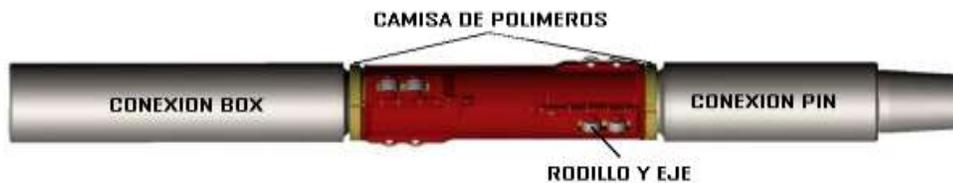


Figura 4.22 Herramienta LoTAD

Fuente: Weatherford, (2012)

4.3.5.3 Aplicación de LoTAD en la sarta de perforación

Reducción del torque: el torque generado por la sarta de perforación dentro del hoyo está dado por la siguiente ecuación:

$$\tau = F_N \cdot r \cdot \mu \frac{|A|}{|V|} \quad (4.35)$$

Donde:

F_N : fuerza normal

r : radio de giro

μ : Coeficiente de fricción

$|A|$: Velocidad angular = diámetro. π .RPM/60

$|V|$: Velocidad resultante = $\sqrt{T^2 + A^2}$

T : Velocidad de viaje.

En condiciones estáticas, considerando un DP de 5" donde $r = (6 \text{ 5/8} \text{ pulgadas}) / 2$ (ToolJoint).

$$\tau = F_N \cdot 3,3125 \cdot 0,3 \quad (4.36)$$

El torque será igual a 0,99375 veces la fuerza normal.

Cuando el LoTAD, mostrado en la figura 4.23, es incluido en la sarta de perforación dentro del agujero con un diámetro externo (OD) mayor, es la primera superficie de contacto entre la pared y el ToolJoint del DP. La sarta de perforación (Drill String) rotará a través del mandril del LoTAD durante la perforación rotaria. La única fricción torsional en la sarta será generada entre la camisa de polímero y el cuerpo del LoTAD.

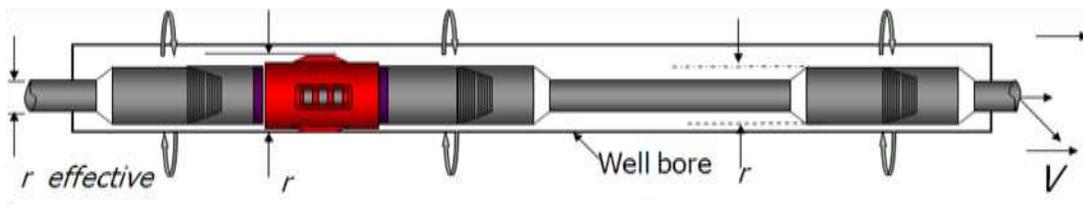


Figura 4.23 Ensamblaje de la herramienta LoTad

Fuente: Weatherford, (2012)

Como resultado r , el OD del ToolJoint en la fórmula de cálculo del torque es reemplazado por el radio efectivo de giro r efectivo, el cual

corresponde al diámetro externo del cuerpo del DP. Asimismo, el factor de fricción fue reemplazado con el factor de fricción entre la camisa de polímero y el cuerpo del LoTAD el cual tiene un factor de fricción más bajo (0,09). El torque generado por la sarta de perforación incluida los LoTAD dentro del hoyo esta dado por la siguiente ecuación:

$$\tau = F_N \cdot r \cdot \mu \frac{A}{V} \quad (4.37)$$

Considerando condiciones estáticas

$$\tau = F_N \cdot r \cdot \mu \quad (4.38)$$

Debido a que estamos utilizando el LoTAD el radio será el radio efectivo del cuerpo del DP de 5 pulgadas. Sabiendo que el coeficiente de fricción será entre la camisa de polímero y el mandril es $\mu = 0,09$. Así, El torque será igual a 0,225 veces la fuerza normal. Por lo tanto, el torque usando LoTAD es reducido al menos 3,68 veces con respecto al torque original.

Reducción de arrastre: el arrastre es producido por el contacto entre la superficie de contacto de la sarta de perforación y el agujero.



Figura 4.24 Tool Joint en contacto con una de las paredes del agujero en una sección inclinada

Fuente: Weatherford, (2012)

Este contacto es el de las conexiones de la tubería (Tool Joint mostrada en la figura anterior) durante sus viajes dentro y fuera del pozo, se produce por asentamiento de tubería en el lado inferior.

La reducción del arrastre aplicando LoTAD, se inicia con la ubicación de la herramienta. La figura 4.25, muestra la superficie de contacto entre la sarta de perforación y las paredes del pozo que es reducida utilizando LoTAD, el rodillo de la herramienta será el contacto del Tooljoint de la junta, entonces la superficie de contacto se reduce, de la superficie del Tooljoint a la superficie del rodillo. El sistema de LoTAD con rodillo permite minimizar el área de contacto, permitiendo reducir la tendencia a presentar pega de la sarta a las paredes del pozo por presión diferencial.

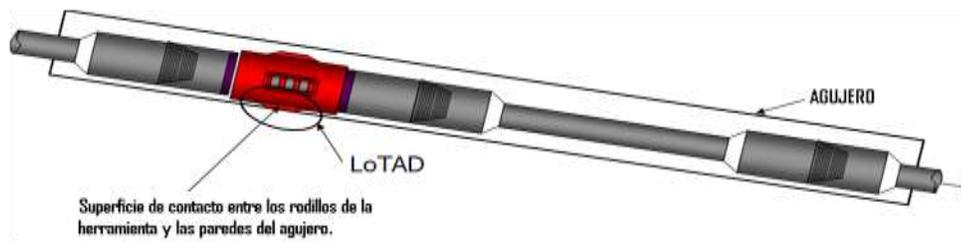


Figura 4.25 Aplicación de LoTAD a la sarta de perforación en una sección inclinada

Fuente: Weatherford, (2012).

4.3.6 Simulación de torque y arrastre

Existen diversos programas para simular el proceso de torque y arrastre. No obstante, uno de los más empleados a nivel mundial es el software de Análisis de Torque y Arrastre, WELLPLAN, el cual es instalado sobre el Modelo de Datos de Ingeniería (*Engineer's Data Model*, EDM) de Landmark Graphics Inc. La plataforma es una serie programas de ingeniería de pozos y análisis de datos completamente integrados de aplicaciones que

proporcionan datos de entrada (one-time), y también proporciona apoyo para las aplicaciones de perforación y completación en un modelo de datos compartidos.

El WELLPLAN permite al usuario identificar los potenciales problemas durante la planeación, suministro y ubicación de las herramientas de *standoff*, la optimización de flotación del revestidor y otras herramientas para investigar y modificación el diseño del ensamblaje para ser mejorado, si es necesario. Además, los ingenieros pueden determinar si el taladro seleccionado tiene las especificaciones mecánicas adecuadas para manejar los requerimientos de diseño de pozo.

Los parámetros necesarios para una Simulación y modelaje en WELLPLAN son:

- ¿Se está perforando?.
- ¿Bajando tubería de revestimiento?.
- Profundidades de interés.
- Perfil del Pozo.
- Diámetros de Hoyos.
- Sarta de Perforación.
- Parámetros de Operación.
- Fuerzas de Contacto.
- Tensión efectiva.
- Torque.
- Fatiga de Tubería.
- Peso Medido.
- Localización de Herramientas dentro de la Sarta.
- Propiedades de los Fluidos.

No obstante, en el país Sol, (2012), se desarrolló un modelo computacional para determinar el torque y arrastre, en él se planteó estimar las cargas encontradas durante la bajada, reciprocación o rotación de la tubería. Este modelo, a diferencia de otros, toma en cuenta la rigidez de la tubería y la presencia de centralizadores; modelando así la tubería de manera más real. El principio del modelo es que tanto el torque como el arrastre, son debidos principalmente a la fricción entre el hoyo y la tubería. Se supone que el contacto ocurre en los centralizadores. El método se basa en modelar la sarta como un conjunto de vigas continuas usando la teoría de vigas continuas de Timoshenko.

Para su ejecución, primero se describe el modelado de la sarta, y luego se desarrollan las ecuaciones analíticas para la determinación de cargas. Las ecuaciones se deducen tanto para bajada como para subida de la tubería, así como para secciones cóncavas y convexas de un hoyo. También se discuten los efectos de la flotación en el peso efectivo de la sarta y el perfil de tensiones de la misma. Las siguientes figuras son ejemplos del programa de Sol, (2012).

Profundidad	Inclinación	Dirección	D Interno	D Externo	Peso	D Hoyo	Fricción	Centraliza	Standoff
0.00	0.00	0	6.76	7.62	33.7	9.875	0.2	0	10986328
7.56	0.00	0	6.76	7.62	33.7	9.875	0.2	0	10986328
15.12	0.00	0	6.76	7.62	33.7	9.875	0.2	0	10986328
22.68	0.00	0	6.76	7.62	33.7	9.875	0.2	0	10986328
30.24	0.00	0	6.76	7.62	33.7	9.875	0.2	0	10986328
37.80	0.00	0	6.76	7.62	33.7	9.875	0.2	0	10986328

Figura 4.26 Introducción de los datos

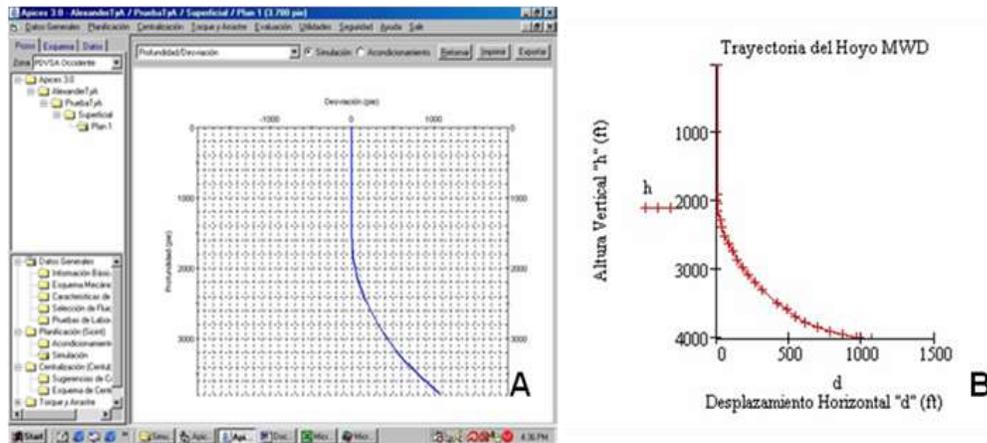


Figura 4.27 Trayectoria del Hoyo MFB-San Tomé. A) Interpolación del Programa. B) Interpolación en MathCad

Fuente: Sol, (2002)

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Principios básicos de torque y arrastre están sujetos a las leyes físicas de los cuerpos en equilibrio estático y dinámico.
- Las fuerzas actuantes sobre la tubería son: tensión, compresión, fatiga y el peso de la tubería, las cuales ocasionan pandeo y vibraciones.
- Durante la perforación horizontal y direccional se hace importante vencer el torque y el arrastre con el fin de evitar la pega de tubería.
- Los nuevos modelos en 3D y diferencias finitas (no contemplado en el presente estudio) se basan en los modelos de sarta suave y sarta rígida.
- El modelo tridimensional tiene el potencial para determinar factores friccionales a partir de resultados de torque y arrastre obtenidos en el campo.
- Para reducir el torque y arrastre se emplean agentes lubricantes, elementos mecánicos y simulaciones.
- La eficiencia de los elementos mecánicos estudiados está sujetos a la tortuosidad del hoyo.

5.2 RECOMENDACIONES

- Ampliar los estudios de modelos matemáticos de torque y arrastre.
- Realizar estudios de elementos mecánicos con otros materiales poliméricos.
- Indagar sobre los problemas de torque y arrastre en Venezuela.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aadnoy, B., & Andersen, K. (2001). Design of Oil Wells Using Analytical Friction Models. *Journal of Petroleum Science and Engineering* .
- Aadnoy, B., Fazaelizadeh, M., & Hareland, G. (2010). A 3-Dimensional Analytical Model for Wellbore Friction. *Journal of Canadian Petroleum Technology*.
- Arias, F. (2016). *El Proyecto de Investigación*. Caracas: Episteme.
- Baker Hughes. (2012). BakerHughes.com. Recuperado el enero de 2019, de <http://gis.bakerhughesdirect.com/RigCounts/>
- Barberii, E. (1995). *El pozo Ilustrado*. Caracas: Artes.
- Cambou, B. (2012). UNAM.mx. Recuperado el Febrero de 2018, de www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/modeladonumerico/ModeladoNumerico.pdf
- 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.
- Datalog. (2002). *Manual de perforación, procedimiento y operaciones en el pozo*. Alberta: S.E.
- Fazaelizadeh, M. (2013). *Real time torque y drag analysis during directinal drilling*. Calgary: University of Calgary.
- Fazaelizadeh, M., Hareland, G., & Aadnoy, B. (2010). Application of New 3-D Analytical Model for Directional Wellbore Friction. *Journal of Modern Applied Science* , 4 (2).

- Fontaine, T. (2012). Metodología de la investigación. Caracas: Jupiter Editores.
- Garibay, R. (2015). Aplicación del modelo analítico 3d de torque y arrastre en pozos direccionales y horizontales de México. Ciudad de México: Universidad Autónoma de México.
- Gaynor, T., Chen, D., D., S., & Comeaux, B. (2001). Tortuosity versus Micro-Tortuosity: Why Little Things Mean aLot. SPE/IADC Drilling Conferencein . Amsterdam: SPE.
- Ghiselin, D. (2009). Best practices emerging for ERD wells. Hart's E & P , 45-61.
- Giannesini, J., Horwell, S., & Bosio, J. (1997). Horizontal Wells Cut Offshore Production Costs. SPE Papers , 88-127.
- Ismayilov, O. (2012). Model of Hook Load During Tripping Operation. Oslo: Norwegian University of Science and Technology.
- Johancsik, C., Friesen, D., & Dawson, R. (1984). "Torque and Drag in Directional Wells", Prediction and Measurement. S.E.
- Johansick, C., Friesen, D., & Dawson, R. (1983). Torque and drag in directional wells - prediction and measurement. OnePetro , 20-23.
- Lambe, W., & Whitman, V. (1997). Mecánica de suelos. México: S.E.
- Lubinski, A. (1950). A study of the Buckling of Rotary Drillstrings, Drilling and Production Practice," Proceedings of the American Petroleum Institute. New York: S.E.
- 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. Drilling Conference and Exhibition. New Orleans.

- Menand, S., Sellami, H., Tijani, M., & Stab, O. (2006). *Advancements in 3D Drillstring Mechanics: From the Bit to the Topdrive*. Drilling Conference. SPE.
- Mitchell, B. (1995). *Advanced Oilwell Drilling Engineering Handbook*. USA: SPE.
- Mitchell, R., & Samuel, R. (2007). How good is the torque-drag model?, (pág. SPE/IADC Drilling Conference). Amsterdam.
- Molero, J. (2006). *Perforación direccional (Teoría, diseño y cálculo)*. Caracas: Drilling Consulting C.A.
- Nazari, T., & Hareland, G. (2010). *Review of Cutting Transport in Directional Well Drilling Systematic Approach*. Western Regional Meeting. Anaheim: SPE.
- PDVSA. (2002). *Diseños de sartas de perforación*. Caracas: CIED PDVSA.
- Pemex-IPM. (2002). *Procedimientos para la perforación de pozos horizontales*. Ciudad de México: S.E.
- Pineda, G. (2012). *Modelado numérico de fenómeno de torque y arrastre en tuberías de pozos y gas*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Pineda, G., Martinez, M., Ciccola, V., & Chacón, Z. (2015). *Modelado numérico del fenómeno de torque y arrastre y centralización en tuberías de completación de pozos de petróleo y gas*. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia 2015 (págs. 1-19). Lisboa: S.E.
- PyG Consultores. (2018). <http://pygconsultores.com.ve>. Recuperado el Febrero de 2019, de Perforación direccional, Tipos de perforación, Propósitos y motores de fondo: <http://pygconsultores.com.ve/wp-content/uploads/2018/03/perforaci%C3%B3n-Direccional-b.pdf>

- Samuel, R. (2010). "Friction Factors: What are they for Torque, Drag, Vibration, Bottom Hole Assembly and Transient Surge/Swab Analyses?" Drilling Conference and Exhibition. New Orleans.
- Sheppard, M. (1987). Designing well path to reduce torque and drag. OnePetro , 5-8.
- Sol, A. (2002). Desarrollo de un simulador para estimar torque y arrastre sobre tuberías de revestimiento en pozos petroleros. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Tviedal, T. (2011). Torque and Drag analyses of North sea Wells using new 3D model. University of Stavanger.
- Weatherford. (2012). Manual de Reducción de torque y arrastre,. Ottawa: S.E.

HOJAS METADATOS

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 1/6

Título	Análisis del torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales
---------------	--

El Título es requerido. El subtítulo o título alternativo es opcional.

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
Navas Sánchez, Yolaevan Nairibe	CVLAC	C.I: 23.898.441
	e-mail	Yolaevan1809@gmail.com
López Ruíz, Olga Milagros Del Valle	CVLAC	C.I: 23.239.496
	e-mail	Olgamlopezr.94@gmail.com

Se requiere por lo menos los apellidos y nombres de un autor. El formato para escribir los apellidos y nombres es: "Apellido1 InicialApellido2., Nombre1 InicialNombre2". Si el autor esta registrado en el sistema CVLAC, se anota el código respectivo (para ciudadanos venezolanos dicho código coincide con el numero de la Cedula de Identidad). El campo e-mail es completamente opcional y depende de la voluntad de los autores.

Palabras o frases claves:

torque
arrastre
modelos matemáticos
pozos horizontales
pozos direccionales
tesis de grado

El representante de la subcomisión de tesis solicitará a los miembros del jurado la lista de las palabras claves. Deben indicarse por lo menos cuatro (4) palabras clave.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 2/6

Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Sub-área
Tecnología y Ciencias Aplicadas	Ingeniería de Petróleo

Debe indicarse por lo menos una línea o área de investigación y por cada área por lo menos un subárea. El representante de la subcomisión solicitará esta información a los miembros del jurado.

Resumen (Abstract):

Con el incremento de pozos horizontales y direccionales de alto ángulo, es importante realizar una predicción confiable del torque y arrastre de tal manera que permita disminuir las posibles detenciones de las operaciones de perforación debido a pegas de tuberías. En tal sentido, el presente trabajo documental pretende sentar las bases sobre el referido tema, por ello se abarcan aspectos como: a) Los principios teóricos de torque y arrastre en pozos direccionales y horizontales que permitió conocer los principios físicos y mecánicos que rigen la materia, b) Los modelos para la solución del problema de torque y arrastre durante la perforación de pozos direccionales y horizontales, los cuales se sustentan en dos criterios (sarta suave y sarta rígida) y que han dado sustentos a modelos matemáticos denominados 3D y, c) Las nuevas tecnologías que minimizan los problemas de torque y arrastre como LoTORQ, LoDRAG y LoTAD, así como simuladores. Se concluyó que la eficiencia de los elementos mecánicos estudiados está sujetos a la tortuosidad del hoyo.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 3/6

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
Msc. Rubén Vega	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	C.I. 10.100.632
	e-mail	rvegas@udo.edu.ve
MSc. Deasy Osuna	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	C.I. 10.148.701
	e-mail	Deasyo@hotmail.com
Ing. Francisco Hernández	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	C.I 10.306.488
	e-mail	fhernandezl@udo.edu.ve

Se requiere por lo menos los apellidos y nombres del tutor y los otros dos (2) jurados. El formato para escribir los apellidos y nombres es: "Apellido1 InicialApellido2., Nombre1 InicialNombre2". Si el autor esta registrado en el sistema CVLAC, se anota el código respectivo (para ciudadanos venezolanos dicho código coincide con el numero de la Cedula de Identidad).. La codificación del Rol es: CA = Coautor, AS = Asesor, TU = Tutor, JU = Jurado.

Fecha de discusión y aprobación:

Año	Mes	Día
2020	02	11

Fecha en formato ISO (AAAA-MM-DD). Ej: 2005-03-18. El dato fecha es requerido.

Lenguaje: spa Requerido. Lenguaje del texto discutido y aprobado, codificado usando ISO 639-2. El código para español o castellano es spa. El código para ingles en. Si el lenguaje se especifica, se asume que es el inglés (en).

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 4/6

Archivo(s):

Nombre de archivo
NMOTTG_NSYN2020

Caracteres permitidos en los nombres de los archivos: **A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 _ - .**

Alcance:

Espacial: inespacial
Temporal: intemporal

Título o Grado asociado con el trabajo:

Ingeniero de Petróleo

Dato requerido. Ejemplo: Licenciado en Matemáticas, Magister Scientiarum en Biología Pesquera, Profesor Asociado, Administrativo III, etc

Nivel Asociado con el trabajo: Ingeniería

Dato requerido. Ejs: Licenciatura, Magister, Doctorado, Post-doctorado, etc.

Área de Estudio:

Tecnología y Ciencias Aplicadas

Usualmente es el nombre del programa o departamento.

Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado:

Universidad de Oriente Núcleo Monagas

Si como producto de convenciones, otras instituciones además de la Universidad de Oriente, avalan el título o grado obtenido, el nombre de estas instituciones debe incluirse aquí.

Hoja de metadatos para tesis y trabajos de Ascenso- 5/6



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CUN°0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Leído el oficio SIBI - 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.

Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

RECIBIDO POR [Firma]
FECHA 5/8/09 HORA 5:30

Cordialmente,
[Firma]
JUAN A. BOLANOS CURTEL
Secretario

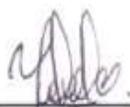
C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Teleinformática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YOC/manaja

Hoja de metadatos para tesis y trabajos de Ascenso- 6/6

De acuerdo al Artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado:

Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización.



Yolaevan Navas



Olga López

Autoras



MSc. Ruben Vega

Asesor