

01124
37



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DISEÑO
PARA LA TRAYECTORIA DE POZOS
DIRECCIONALES”

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A

JUAN MANUEL ROMERO ANDUAGA

DIRECTOR

M. en I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ

ASESOR

ING. JAIME BLANCO GALÁN



Ciudad Universitaria, Noviembre 2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-690

SR. MANUEL ROMERO ANDUAGA
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. en I. José Martínez Pérez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

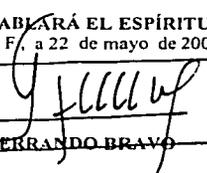
ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DISEÑO PARA LA TRAYECTORIA DE POZOS DIRECCIONALES

- RESUMEN
- INTRODUCCIÓN
- I GENERALIDADES SOBRE LA PERFORACIÓN DIRECCIONAL
- II MÉTODOS CONVENCIONALES DE DISEÑO PARA LA TRAYECTORIA DE POZOS DIRECCIONALES
- III MÉTODO DE LA CATENARIA
- IV COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO PARA LA TRAYECTORIA DE POZOS DIRECCIONALES
- V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F. a 22 de mayo de 2002
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO
GPB*RLLR*gtg

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

TESIS

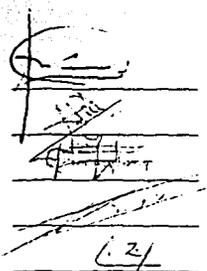
“Análisis comparativo de métodos de diseño para la trayectoria de pozos direccionales”

PRESENTADA POR: JUAN MANUEL ROMERO ANDUAGA

DIRIGIDA POR: M. en I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ

JURADO

PRESIDENTE: M. en I. Néstor Martínez Romero
VOCAL: M. en I. José Martínez Pérez
SECRETARIO: Ing. Marfa Cristina Avilés Alcántara
1ER. SUPLENTE: Ing. Martín Terrazas Romero
2DO. SUPLENTE: Ing. Carlos Lira Sil



The image shows four horizontal lines representing the signatures of the jury members. The first line has a signature that appears to be 'Néstor Martínez Romero'. The second line has a signature that appears to be 'José Martínez Pérez'. The third line has a signature that appears to be 'Marfa Cristina Avilés Alcántara'. The fourth line has a signature that appears to be 'Martín Terrazas Romero'. There is also a signature 'Lira Sil' written below the fourth line.

Ciudad Universitaria, noviembre de 2003

Agradecimientos

A la UNAM por haberme aceptado como parte de su comunidad y haberme formado tanto en la parte académica como en la humana.

A la **Preparatoria 9** en donde conocí gente muy importante en mi vida, con quienes viví, vivo y sé que seguiré viviendo momentos inolvidables, gracias Jorge, Jesús, Toño, Felipe, Nadia, Mónica, Rocío, Miguel en especial a Selene y Antonio Espinosa, gracias Ingeniero Vicente en donde quiera que se encuentre porque usted me oriento en la elección de mi carrera.

A la **Facultad de Ingeniería**, donde conocí a mis amigos y hermanos de profesión, gracias Jazael, Ramón, Eric, Rafael, Omar, Ángel, Roberto, Edgar, Julio, Raúl, Rodrigo y Hegel. Gracias nuevamente querida UNAM, mi *alma mater*, la máxima casa de estudios.

Gracias a mi Padre, Luis Eduardo Romero, a mi Madre, Silvia Anduaga y a mis hermanas, Diana, Eduardo, José y Alejandro por su amor infinito que me han brindado.

A mi familia que es lo más sagrado que tengo y de quienes no he recibido más que apoyo incondicional en todo momento. A mi abuela Cointa Ibarra y a todos mis tíos.

Gracias Alicia Ortiz, Evelia Hernández y Gilberto Anduaga Hernández porque en cada éxito en mi vida siento su apoyo y en cada fracaso son la fuerza que me mueve a seguir adelante, gracias abuelos en donde quiera que se encuentren, los llevo en mi corazón.

Al Instituto Mexicano del Petróleo por haberme permitido realizar este trabajo en sus instalaciones brindándome asesoría por parte de su personal.

Al personal del laboratorio de fluidos de perforación del IMP; Ingeniero María Cristina Avilés Alcántara, Dr. Arturo Díaz Pérez, Ingeniero Ignacio Cortes, Ingeniero Gabriel, Licenciada Guadalupe, Bióloga Matilde, Técnicos Julián Ortiz y Oscar de la Torre y desde luego a mis queridas amigas Ana Elia y Loana

Especialmente al Ingeniero Jaime Blanco Galán quien compartió su tiempo esfuerzo y conocimientos durante poco más de un año para poder realizar este trabajo.

Índice

| | Página |
|---|--------|
| Resumen | 1 |
| Introducción | 3 |
| Capítulo 1 Generalidades sobre la perforación direccional | |
| 1.1 Introducción | 5 |
| 1.2 Conceptos básicos | 5 |
| 1.3 Aplicación de la perforación direccional | 8 |
| 1.3.1 Pozos laterales | 8 |
| 1.3.2 Perforación de obstáculos geológicos | 9 |
| 1.3.3 Localizaciones inaccesibles | 10 |
| 1.3.4 Control de la verticalidad | 11 |
| 1.3.5 Perforación de pozos de alivio | 11 |
| 1.3.6 Desarrollo de campos costa afuera | 12 |
| 1.3.7 Pozos multilaterales | 13 |
| 1.3.8 Perforación horizontal | 14 |
| 1.3.9 Aplicaciones no petroleras | 15 |
| 1.4 Ventajas de la perforación direccional | 16 |
| 1.5 Técnicas y herramientas empleadas para desviar pozos | 16 |
| 1.5.1 Herramientas para iniciar la desviación | 17 |
| 1.5.2 Técnicas especializadas | 22 |
| 1.5.3 Aparejos de fondo (BHA) | 25 |

Capítulo 2 Métodos convencionales de diseño para la trayectoria de pozos direccionales

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1 | Introducción | 33 |
| 2.2 | Problemas que se presentan durante la perforación de un pozo direccional | 34 |
| 2.2.1 | Patas de perro | 34 |
| 2.2.2 | Inestabilidad en el agujero | 35 |
| 2.2.3 | Pegaduras por presión diferencial | 36 |
| 2.3 | Trayectoria incrementar mantener (trayectoria "Slant") | 37 |
| 2.4 | Trayectoria de incremento continuo | 40 |
| 2.5 | Trayectoria incrementar mantener disminuir (trayectoria "S") | 42 |
| 2.6 | Trayectoria incrementar mantener disminuir parcialmente mantener (trayectoria "S" modificada) | 45 |

Capítulo 3 Método de la catenaria

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Introducción | 49 |
| 3.2 | Catenaria | 50 |
| 3.3 | Método de la catenaria para el diseño de la trayectoria de pozos direccionales | 51 |
| 3.4 | Método de la catenaria modificada para el diseño de la trayectoria de pozos direccionales | 56 |
| 3.5 | Condición de entrada para la sección catenaria | 57 |

| | | |
|---|--|----|
| 3.6 | Ventajas y desventajas del método de la catenaria | 59 |
| Capítulo 4 Comparación de los métodos de diseño para la trayectoria de pozos direccionales | | |
| 4.1 | Introducción | 62 |
| 4.2 | Torque y arrastre | 63 |
| 4.3 | Análisis del arrastre que se presenta en el pozo | 65 |
| 4.3.1 | Análisis de la fuerza de arrastre en las diferentes secciones de un pozo | 66 |
| 4.3.2 | Arrastre total para cada tipo de trayectoria | 71 |
| 4.4 | Análisis del torque que se presenta en el pozo. | 76 |
| 4.4.1 | Torque en secciones rectas | 76 |
| 4.4.2 | Torque en secciones curvas | 77 |
| 4.4.3 | Torque en la sección de la catenaria | 77 |
| 4.5 | Adaptación de las ecuaciones para la catenaria modificada | 78 |
| 4.6 | Procedimiento propuesto para el cálculo de la sección catenaria | 78 |
| 4.7 | Ejemplo de aplicación del método de la catenaria | 80 |
| 4.8 | Análisis comparativo del torque y arrastre en diferentes trayectorias con el empleo de un software comercial | 82 |
| 4.8.1 | Primer caso | 84 |
| 4.8.2 | Segundo caso | 89 |
| Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones | | |
| 5.1 | Conclusiones | 96 |
| 5.2 | Recomendaciones | 98 |

Bibliografía

99

Apéndice A

103

PAGINACION DISCONTINUA

Resumen

"Análisis comparativo de métodos de diseño para la trayectoria de pozos direccionales" es un esfuerzo realizado para determinar la trayectoria óptima para un pozo direccional con un criterio de torque y arrastre, así como documentar el "método de la catenaria" para el diseño de pozos direccionales. El trabajo se divide en 5 Capítulos los cuales se describen de manera general a continuación.

En el Capítulo 1 se definen algunos conceptos básicos, empleados en la perforación de pozos direccionales, de manera que quien lea el presente trabajo le resulte más fácil entenderlo. También se presentarán las aplicaciones de la perforación direccional, tanto en el ámbito petrolero como no petrolero.

En el Capítulo 2 se hace una revisión a las diferentes trayectorias con las que se puede diseñar un pozo direccional para llegar al objetivo, las cuales podemos clasificar dentro de la siguiente manera:

- Trayectoria Construir – Mantener o tipo "Slant".
- Trayectoria Construir - Mantener – Disminuir o tipo "S".
- Trayectoria Tipo Catenaria.

También se hace una revisión de la información básica para poder realizar dichos diseños y los factores que influyen en el mismo. La selección y/o diseño de estas variables depende de las características de las formaciones a perforar, así como de las limitaciones técnicas y tecnológicas que se tengan, con la finalidad de evitar o disminuir los problemas que se pudieran presentar durante la etapa de perforación.

En el Capítulo 3 se presenta una revisión, desde sus orígenes hasta la actualidad, de la trayectoria tipo catenaria y sus variantes así como las ventajas y desventajas

que presenta dicha catenaria desde el punto de vista de los diferentes autores que se han dado a la tarea de investigar sobre ella.

En el Capítulo 4 se estudia el torque y el arrastre que se presentan en la sarta de perforación debido a la fricción entre ésta y las paredes del pozo, ya que estos son factores importantes que determinan la viabilidad de perforar un pozo direccional con alguna trayectoria específica y limitan el alcance del pozo. También se presentan las ecuaciones desarrolladas por Aadnoy¹³ para determinar el torque y arrastre en cualquier trayectoria de un pozo. Por último se realizó un análisis de torque y arrastre para tres trayectorias específicas.

Finalmente en el Capítulo 5 se plasman las conclusiones a las que se llegó después de realizar el trabajo y se presentan algunas recomendaciones.

Introducción

Desde la utilización de herramientas primitivas empleadas para perforar en busca de sal durante cientos de años, hasta el desarrollo de las técnicas actuales, se han realizado impresionantes avances en la tecnología de perforación. Lo cual se refleja en las modernas técnicas que se emplean en la perforación direccional, sin las cuales sería poco menos que imposible desarrollar económicamente muchos campos petroleros.

Los orígenes de la perforación direccional en la industria petrolera mundial, se remontan a finales del siglo XIX en Estados Unidos de Norteamérica. La primera aplicación de la perforación direccional fue perforar pozos laterales cuando en el pozo sucedía algún accidente mecánico y se quedaba atrapada parte de alguna herramienta (pescado). Ya en 1895 herramientas y técnicas especiales eran empleadas con estos fines. El primer pozo perforado deliberadamente de manera direccional fue en Huntington Beach, California, EEUU, en los años 1930's.

La perforación direccional tomó un fuerte impulso cuando, a finales de la Segunda Guerra Mundial, la demanda de hidrocarburos se incrementó, obligando a explorar y desarrollar regiones remotas y hostiles. Surgió entonces la necesidad de desarrollar campos marinos, para lo que resultaba incosteable tener tantas plataformas como pozos, por lo que se impulsaron los pozos direccionales como solución, ya que se pueden perforar varios pozos desde una plataforma, lo que hace económicamente factible el desarrollo del Campo.

La reducción de los costos de perforación y sus implicaciones sociales y ambientales, son factores importantes que motivan el constante desarrollo de nuevas herramientas y técnicas para la perforación direccional. Mientras menores sean los riesgos durante la perforación y ésta se haga en un menor tiempo, se

INTRODUCCIÓN

podrán seguir explorando y explotando los recursos hidrocarburos en zonas cada vez menos accesibles.

Una manera de reducir los riesgos y el tiempo que nos toma perforar un pozo es hacer un buen diseño del mismo. Hoy en día es posible diseñar diferentes tipos de trayectorias. Estas trayectorias van desde las comúnmente empleadas tipo "Slant" y "S" hasta la trayectoria poco conocida tipo "Catenaria".

Es importante determinar cuál trayectoria presentará menor costo y tiempo, y por lo tanto, será la óptima al construir el pozo. De esta manera se podrá coadyuvar en un proceso de perforación más eficiente, seguro y rentable.

De acuerdo con lo antes mencionado el objetivo del presente trabajo es definir los criterios para comparar los métodos de diseño de las trayectorias de pozos direccionales, así como documentar el método de la catenaria que ha sido tan poco recurrido.

CAPÍTULO 1

Generalidades sobre la perforación direccional

1.1 Introducción

En este Capítulo se definirán algunos conceptos básicos, empleados en la perforación de pozos direccionales, de manera que quien lea el presente trabajo le resulte más fácil entenderlo. También se presentarán las aplicaciones de las técnicas de perforación direccional, tanto en el ámbito petrolero como no petrolero, así como las herramientas y técnicas que se emplean para desviar y/o mantener la trayectoria de un pozo.

1.2 Conceptos básicos

Localización: Punto en la superficie de la tierra desde donde se perfora el pozo.

Sistema de coordenadas x y: El origen de este sistema coordenado se ubica en la mesa rotaria. Por convención el eje y está orientado hacia el Norte, mientras que el eje x se orienta hacia el Este.

Trayectoria del pozo: El camino seguido por la barrena para conectar la mesa rotaria con un punto en el subsuelo al cual se desea llegar es conocido como "trayectoria del pozo".

Objetivo: El objetivo está definido por las coordenadas de un punto en el subsuelo al cual se pretende llegar. La exactitud es frecuentemente muy relativa, por lo que

la definición de las coordenadas del objetivo lleva implícita una cierta tolerancia en la posición del fondo del pozo.

La perforación direccional: Es el proceso de desviar un pozo a lo largo de una trayectoria definida, con el fin de alcanzar un objetivo predeterminado, localizado a un cierto desplazamiento horizontal de la localización del equipo de perforación.

Pozo direccional: Es un pozo perforado intencionalmente desviado de la vertical, para lo cual se hace uso de la perforación direccional.

Ángulo de inclinación: Es el ángulo al cual el pozo es desviado de la vertical durante la perforación.

Desplazamiento horizontal del pozo: Un pozo direccional se caracteriza por el hecho de que una línea imaginaria vertical que pase a través del objetivo se encuentra a cierta distancia horizontal de una línea imaginaria vertical que pase a través de la cabeza del pozo. Esta distancia es llamada "el desplazamiento horizontal del pozo".

El control de la desviación: Es el proceso de mantener la trayectoria de un pozo dentro de ciertos límites preestablecidos, relativos al ángulo de inclinación, desplazamiento horizontal o ambos.

Severidad o ritmo de incremento de ángulo: La severidad es expresada como el cambio en el ángulo de inclinación por cada 30 metros perforados, por lo que se mide en $^{\circ}/30$ m o en $^{\circ}/100$ pies.

Profundidad vertical y profundidad desarrollada: La distancia vertical entre la mesa rotaria y el objetivo se conoce como profundidad vertical, mientras que la longitud de la trayectoria real es llamada la profundidad desarrollada. La profundidad vertical y la profundidad desarrollada solo son iguales cuando el pozo

es completamente vertical, para el caso de un pozo direccional la profundidad desarrollada siempre será mayor que la profundidad vertical.

Proyección de la trayectoria real: El curso del pozo se caracteriza por dos proyecciones:

- a) Una proyección a través de un plano vertical (plano que contiene la línea vertical que pasa por la mesa rotaria y la línea vertical que pasa por el objetivo del pozo).
- b) Una proyección en un plano horizontal.

Estas proyecciones nos permiten identificar la dirección promedio o el **azimut** (ángulo entre el norte y el plano vertical) y el ángulo de inclinación del pozo.

Punto de inicio de desvío: Normalmente la perforación del pozo se inicia verticalmente, para después, en algún punto a lo largo de la trayectoria se inicie la desviación del pozo con respecto a la vertical. A este punto se le conoce como "punto de inicio de desvío" (KOP por sus siglas en inglés). El ángulo del pozo se construye después continuamente, hasta alcanzar el máximo ángulo programado.

Punto de inicio de decremento de ángulo: Si la trayectoria del pozo es tal que se requiera que el ángulo de inclinación del pozo disminuya, se tendrá un punto en el que esto comienza a ocurrir se le llama "punto de inicio de decremento de ángulo" (DOP por sus siglas en inglés).

Sección tangente: Una vez que se ha alcanzado el máximo ángulo programado, es común perforar manteniendo el ángulo, lo que genera una sección recta inclinada la cual es conocida como "sección tangente".

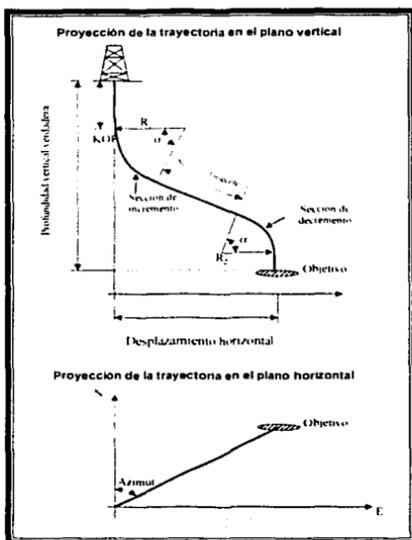


Figura 1.1 Proyección vertical y horizontal de la trayectoria de un pozo direccional

1.3 Aplicación de la perforación direccional

La perforación direccional hoy en día es ampliamente usada tanto en campos marinos como terrestres, esto se debe a las distintas ventajas que presentan los pozos direccionales con respecto a los pozos verticales.

Dentro de las principales aplicaciones que ha venido teniendo esta tecnología tenemos las siguientes:

1.3.1 Pozos laterales

Durante la perforación de un pozo, existe el riesgo de que se quede atrapada en el fondo del pozo parte de la sarta de perforación, obligando a abandonar parte del

fondo del pozo y generar una trayectoria desviada a partir de cierta profundidad (donde no hay problema). Anteriormente, si la herramienta no podía ser sacada, se colocaba un tapón de cemento en el pozo y se abandonaba en su totalidad, para iniciar nuevamente la perforación en otra localización. Otra aplicación para los pozos laterales es la explotación en un nuevo objetivo una vez que no se tengan expectativas en el intervalo actual. Una vez que se ha hecho la perforación alrededor de la obstrucción, el pozo se continúa hasta alcanzar el objetivo. De esta manera se salva el pozo y la inversión inicial, tanto en tiempo como en costo.

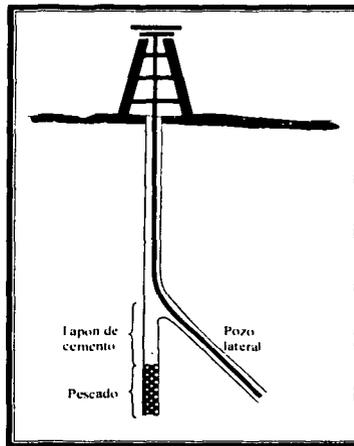


Figura 1. 2 Perforación de un pozo lateral por accidente mecánico

1.3.2 Perforación de obstáculos geológicos

Los yacimientos petroleros algunas veces están asociados con estructuras de domos salinos. Parte del domo salino podría estar directamente encima del yacimiento, en este caso un pozo vertical tendría que atravesar el domo antes de alcanzar el objetivo. Perforar a través de un domo salino trae muchos problemas,

como pérdida de circulación, derrumbes y corrosión, por lo que realizar una perforación direccional para librar el domo salino resulta más conveniente. De igual manera al intentar perforar verticalmente estructuras con fallas, se corre el riesgo de que la trayectoria del pozo se desvíe del objetivo, entonces en estos casos también es recomendable emplear la perforación direccional.

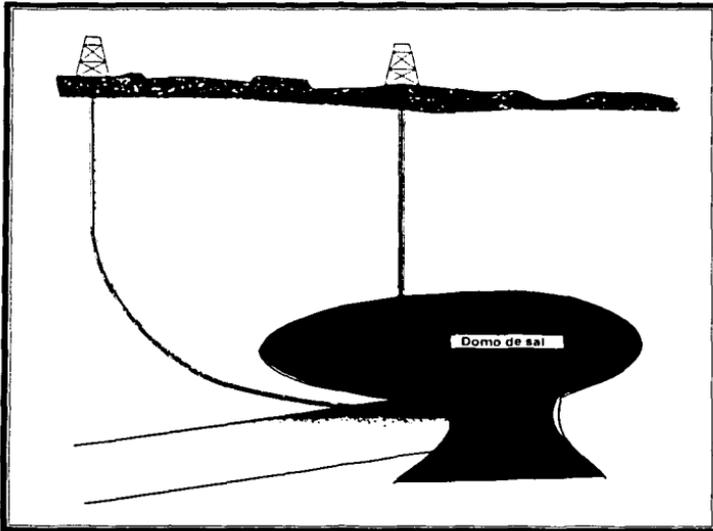


Figura 1. 3. Perforación en obstáculos geológicos

1.3.3 Localizaciones inaccesibles

Frecuentemente se encuentran campos petroleros bajo obstáculos naturales (inaccesibles) o zonas urbanas. Por otra parte, no pueden concederse permisos para perforar en áreas ecológicamente sensibles, ya que esto puede implicar un riesgo para el medio ambiente. En estos casos, es posible explotar las reservas perforando pozos direccionales desde localizaciones superficiales que estén fuera de las áreas restringidas o inaccesibles.

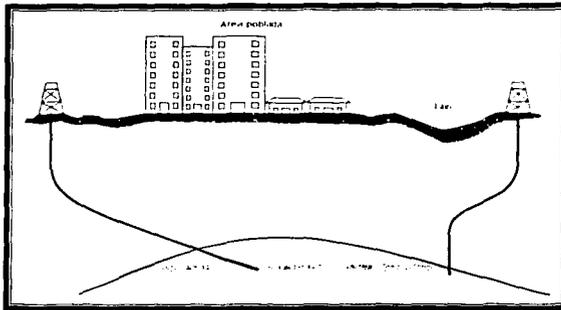


Figura 1. 4 Perforación en zonas inaccesibles

1.3.4 Control de la verticalidad

Las técnicas de perforación direccional han sido usadas para mantener dentro del objetivo trayectorias verticales en pozos que tengan la tendencia natural a la desviación, impidiendo que esto suceda. Las desviaciones de la trayectoria planeada se pueden corregir cambiando algunos parámetros operativos de perforación o empleando otro tipo de herramientas en el fondo del pozo (aparaje de fondo, BHA por sus siglas en inglés).

1.3.5 Perforación de pozos de alivio

Cuando sucede un descontrol de un pozo y este se incendia (reventón) y no es posible controlar el pozo desde superficie, es posible hacer una perforación direccional para controlar el reventón. Las mejoras en las técnicas de perforación direccional han hecho posible perforar pozos de alivio a menos de 30 metros del pozo descontrolado, de tal manera que se establezca una vía de comunicación entre los dos pozos. Mediante esta vía de comunicación será posible inyectar un fluido dentro de la zona productora, de esta manera el pozo descontrolado dejará de producir gas y/o aceite y así se podrá controlar.

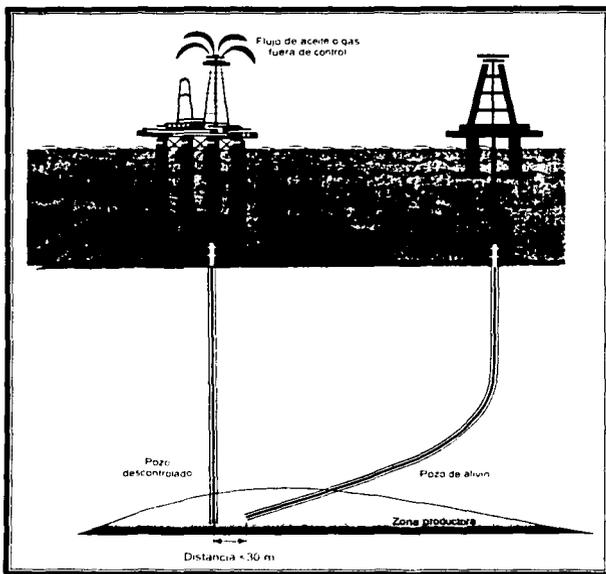


Figura 1. 5 Perforación de pozos de alivio

1.3.6 Desarrollo de campos costa afuera

Debido a que resultaría muy caro perforar únicamente pozos verticales para desarrollar los yacimientos ubicados costa afuera, se han perforado pozos direccionales para el desarrollo de los campos. Esto se ha hecho perforando varios pozos direccionales desde una plataforma, espaciando los objetivos tanto como sea necesario para obtener una máxima recuperación de hidrocarburos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

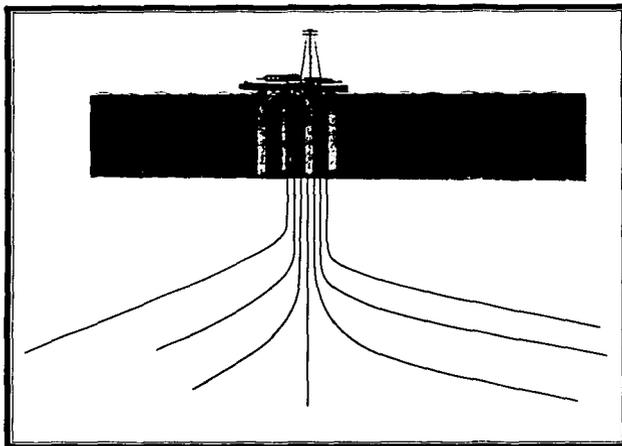


Figura 1. 6 Desarrollo de campos costa afuera

1.3.7 Pozos multilaterales

El concepto básico de un pozo multilateral es la construcción de uno o más pozos laterales partiendo de un tronco común o pozo principal. Tanto el pozo principal como los laterales pueden seguir cualquier tipo de trayectoria, ya sea vertical direccional u horizontal. El concepto de pozo multilateral nació en Rusia en la década de 1950's, cuando Alexander Mikhailovich Grygoryan perforó el pozo 66/45 (primer pozo multilateral a nivel mundial) en el Campo Bashkiria, en Bashkortostan, Rusia²⁴, con el objetivo de incrementar la superficie del yacimiento expuesta.

Posteriormente, se comenzó a aplicar a pozos direccionales con algún accidente mecánico que obligará a desviar nuevamente el pozo y así poder alcanzar el objetivo original. De esta manera los pozos multilaterales evolucionaron en la diversidad de sus configuraciones, sobre todo para aprovechar localizaciones en las que el acceso es muy difícil y costoso.

La aplicación de pozos multilaterales debe estar precedida de un buen conocimiento y caracterización del yacimiento a explotar.

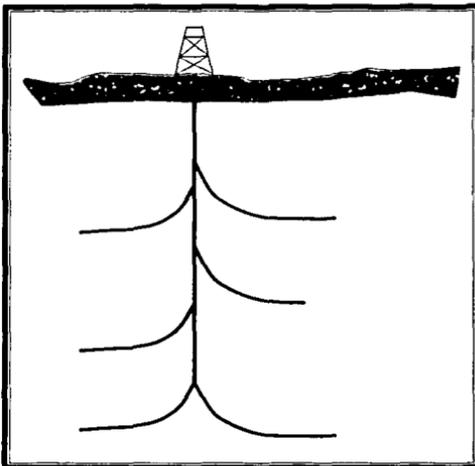


Figura 1. 7 Perforación de pozos multilaterales

1.3.8 Perforación horizontal

"La tecnología de perforación de pozos horizontales se considera actualmente en estado maduro, por lo que se dice que es tecnología de perforación convencional"⁶. Se considera un pozo horizontal aquel que se perfora con un ángulo cercano a los 60°, los pozos que tienen un ángulo mayor resultan más costosos debido al riesgo que conllevan los problemas que se presentan durante la perforación, tales como una mala limpieza del pozo o el control de la trayectoria, sin embargo ofrecen muchas ventajas, como las siguientes⁹:

- Se incrementa el área de drenaje
- Se previenen conificaciones de gas y/o agua

- Se incrementa la penetración en la formación productora, lo que incrementa la superficie expuesta de la formación
- Incrementa la eficiencia de las técnicas de recuperación mejorada (EOR por sus siglas en Inglés)
- Incrementa la productividad en yacimientos altamente fracturados, debido a que se intersecan mayor número de fracturas.

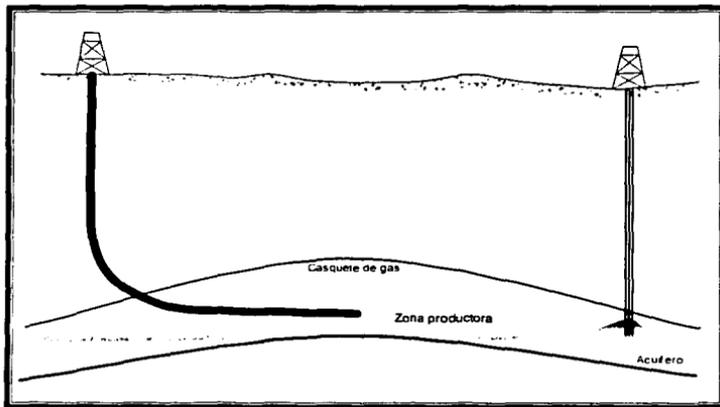


Figura 1. 8 Perforación de pozos horizontales

1.3.9 Aplicaciones no petroleras.

a) Industria minera: La perforación direccional es usada para producir gas metano que está contenido en vetas de carbón. El gas metano representa un riesgo por lo que debe ser extraído antes de iniciar las actividades mineras.

b) Industria de la construcción: Una aplicación inusual de la perforación direccional es la instalación de tuberías por debajo de ríos. Esta técnica se ha usado en ríos hasta de 70 metros de ancho.

c) Geotermia: en algunas áreas de la tierra, el alto gradiente geotérmico puede ser aprovechado para generar energía. Aprovechar el calor requiere de la perforación de pozos productores o inyectores, los pozos se hacen direccionales para aprovechar la orientación de las fracturas.

1.4 Ventajas de la perforación direccional

A manera de resumen se pueden mencionar las siguientes ventajas que tiene la perforación direccional:

- Reduce costos al perforar un menor número de pozos y al aprovechar la infraestructura existente.
- No sería posible el desarrollo de campos costa afuera sin el uso de la perforación direccional, ya que desde una misma localización se pueden perforar varios pozos.
- Reduce problemas de afectación superficial.
- Reduce problemas de contaminación ambiental.
- Reduce los problemas entre los contactos agua-aceite y gas-aceite.
- Permite la aplicación óptima de sistemas de recuperación mejorada y secundaria.
- Se incrementa la productividad en yacimientos naturalmente fracturados.

1.5 Técnicas y herramientas empleadas para desviar pozos

Para iniciar, mantener y/o disminuir la desviación de un pozo se han desarrollado diferentes técnicas y herramientas, las cuales se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Herramientas para iniciar la desviación
- Técnicas especializadas
- Aparejos de fondo

1.5.1 Herramientas para iniciar la desviación

El ángulo de desviación se puede obtener con un jet desviador, una cuchara desviadora o con un motor de fondo con sustituto curvo. El uso de una u otra herramienta depende mucho de la formación que se esté atravesando y del estado mecánico del pozo.

a) Jet desviador

La desviación con jet es una técnica que se usó ampliamente hace algunos años. Se debe emplear en formaciones con dureza de suave a media, donde la roca matriz se pueda erosionar con la fuerza del lodo de perforación.

La herramienta consiste en una barrena especial que tiene dos toberas pequeñas y una grande, la cual es usada para desviar el pozo de la vertical mediante la erosión que ocasiona a la cara de la formación. El diámetro de la tobera se encuentra en un rango de 3/4 a 7/8 de pulgada¹.

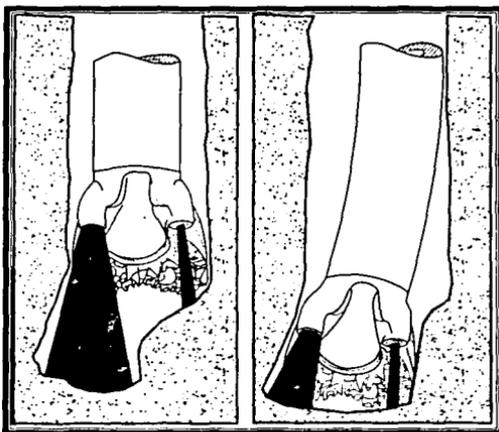


Figura 1. 9 Desviación del agujero empleando jet desviador

La barrena se baja y se orienta en la dirección en que se requiere desviar el pozo, con la sarta de perforación sin rotación y con un movimiento ascendente y descendente, se inicia el bombeo del lodo hasta que la tobera haya lavado dos o tres metros de la formación. La sarta de perforación se puede girar para ampliar la abertura y continuar con la construcción del ángulo a medida que se le aplica peso a la barrena.

Para tener un buen control de la desviación del pozo se deben tomar frecuentemente la orientación e inclinación del agujero. En caso de que éstas no resulten de acuerdo a lo planeado la herramienta debe ser reorientada e iniciar la operación nuevamente.

Las ventajas de usar un jet desviador son las siguientes:

- Un agujero de diámetro constante se puede perforar desde el principio, sin la necesidad de hacer una perforación inicial con un diámetro menor.
- Pueden hacerse varios intentos para iniciar la desviación del pozo sin sacar la sarta de perforación del pozo.

Sin embargo también presenta algunas desventajas:

- Su uso se limita a formaciones con dureza de suave a media, ya que en formaciones muy suaves o muy duras se pueden presentar problemas de control de la desviación.
 - Pueden ocurrir cambios abruptos en la dirección del pozo si no se tiene el cuidado adecuado.
 - Si no se cuenta con bombas de perforación de la potencia suficiente no se logrará erosionar la formación.
-

Con un buen monitoreo de la dirección del pozo y bajo condiciones geológicas favorables la desviación con jet representa una buena opción para iniciar el desvío de un pozo.

b) Cuchara desviadora

La cuchara desviadora es una herramienta muy simple para desviar un pozo. sus orígenes datan de finales del siglo XIX, y era empleada para perforar pozos laterales.

La herramienta consiste de una cuña de acero con una punta en forma de cincel, es cóncava en su interior, lo que obliga a la barrena a seguir la dirección deseada.

Hay tres tipos de cucharas desviadoras que se usan comúnmente

i. Cuchara desviadora removible

Se usa en agujeros descubiertos. La cuchara desviadora se sujeta normalmente a un estabilizador mediante un perno diseñado para fallar cuando se le aplica peso a la barrena. El estabilizador se coloca directamente sobre la barrena, con lo que la barrena se ve obligada a seguir la curvatura de la cuchara. Para colocar la cuchara desviadora en la dirección adecuada es necesario girar la sarta de perforación. Una vez colocada en la dirección deseada se coloca peso sobre la barrena, lo que fija la cuchara desviadora en la formación o en un tapón de cemento, rompiendo el perno y evitando que se mueva. Una vez fija la cuchara desviadora la perforación se inicia.

Se hace una perforación de unos 5 metros con un diámetro reducido, a este agujero inicial se le conoce como agujero de ratón, una vez hecho esto, se retira la barrena y la cuchara desviadora. Después se amplía el agujero de ratón al diámetro con que estaba trabajando. Una vez que se inicia la desviación del pozo, se puede emplear un aparejo con diseño especial, para seguir construyendo el ángulo.

ii. Cuchara desviadora con circulación

Esta herramienta es usada en pozos con problemas de limpieza. Este tipo contiene una sección interna para circular lodo de perforación, de tal manera que el fondo del pozo quede limpio, para que la herramienta pueda ser asentada y fijada de manera correcta.

iii. Cuchara desviadora permanente

Esta herramienta es usada en pozos además con problemas mecánicos, tales como tuberías de revestimiento colapsadas o que algún pescado no pueda ser recuperado. Se coloca un empacador a la profundidad que se desea iniciar la desviación del pozo, el cuál proporciona soporte para colocar la herramienta. La cuchara desviadora es corrida con un molino que hará una abertura en la tubería de revestimiento (ventana). Un a vez orientada la cuchara desviadora y roto el perno, se inician las operaciones de molienda. Con la ventana abierta, se reemplaza el molino por una barrena de diámetro pequeño y se perfora un agujero de ratón, para después ampliarlo al diámetro con el que se estaba trabajando.

Si se emplean de manera correcta las cucharas desviadoras resultan una herramienta muy efectiva para desviar el pozo, proporcionando un incremento gradual y controlado. Sin embargo la herramienta tiene algunas desventajas

- El agujero de ratón debe ser reperforado, lo que representa un incremento en el tiempo y costo de la perforación.
- Si la herramienta no se fija adecuadamente, ésta podría girar, desviando el pozo con una dirección diferente a la deseada.
- Cuando se abre una ventana con una cuchara desviadora permanente y un molino, la ventana frecuentemente resulta muy pequeña.

Debido a estas desventajas las cucharas desviadoras se han venido sustituyendo por otras herramientas y técnicas. Sin embargo aun es utilizada como alternativa en caso que otra técnica falle.

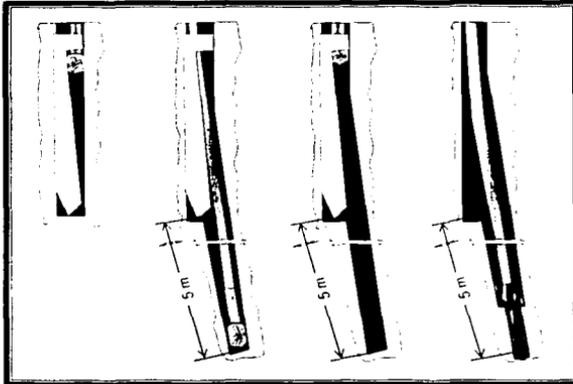


Figura 1. 10 Desviación del agujero empleando cuchara desviadora

c) Motor de fondo con sustituto curvo.

La desviación de un pozo también se puede hacer con el uso de un motor de fondo al que le proporciona la fuerza motriz el lodo de perforación. El motor de fondo transmite la energía que requiere la barrena para rotar, eliminando la necesidad de mantener a la sarta de perforación girando desde la superficie. El motor de fondo es colocado entre la barrena y el sustituto curvo, el cuál proporciona el ángulo de desviación que se requiere, empleando para ello herramientas de medición de inclinación y azimut. El torque que se genera debido al motor de fondo puede causar una tendencia de la sarta de perforación a dirigirse hacia la izquierda, para compensar este efecto se debe orientar el sustituto curvo hacia la derecha de la dirección requerida. Por lo que una herramienta MWD (Measurement While Drilling, por sus siglas en inglés) para

monitorear constantemente la dirección del pozo debe ser empleada y así corregir se manera inmediata las desviaciones en la trayectoria que se generen.

Las ventajas de usar un motor de fondo con sustituto curvo son las siguientes:

- Dan un mejor control de los cambios de la dirección del pozo.
- Dependiendo de la orientación del sustituto curvo, la herramienta se puede usar para construir o disminuir el ángulo.
- No hay necesidad de hacer un agujero de ratón, por lo que no se requiere re-perforar.
- Permite el empleo de herramienta MWD, lo que proporciona un mejor control de la dirección.

Existen dos tipos de motores de fondo, los motores de desplazamiento positivo y las turbinas de fondo, ambos tienen básicamente las mismas características. Los motores de desplazamiento positivo por su menor tamaño presentan una ventaja sobre las turbinas de fondo al iniciar la construcción del ángulo.

1.5.2 Técnicas especializadas

En la planeación de pozos direccionales, una práctica común, es empezar con una perforación vertical, para después iniciar la desviación del pozo en el KOP y continuar con la construcción del ángulo. Sin embargo, cuando el yacimiento es poco profundo y con una extensión areal considerable, es necesario emplear un ángulo grande para alcanzar objetivos alejados o iniciar la desviación del ángulo del pozo a una profundidad somera, lo cual no siempre es posible, debido a que las formaciones poco profundas son generalmente muy suaves.

Una alternativa es eliminar la sección vertical del pozo, iniciando la desviación desde la superficie. Haciendo esto, se elimina el problema de un ángulo elevado y es posible alcanzar objetivos más alejados. Hay dos técnicas para eliminar la sección vertical del pozo y son las siguientes:

a) Equipo de perforación Slant

Una técnica para iniciar la desviación de un pozo desde la superficie es colocar la torre de perforación con algún ángulo desde la vertical. El pozo se inicia con este ángulo y la perforación se continúa de manera convencional. Teóricamente es posible orientar la torre de perforación directamente hacia el objetivo.

Para adaptar un equipo de perforación estándar a un equipo tipo slant se deben hacer algunas modificaciones:

- La mesa rotaria debe ser inclinada a manera que quede perpendicular al eje de la grúa.
- La polea viajera y el gancho deben correrse sobre un riel guía dentro de la grúa.
- El arreglo de preventores debe ser montado en una estructura que pueda ser inclinada con el ángulo requerido.
- Un sistema estibador de tuberías hidráulicas hace el manejo de la tubería de perforación mucho más fácil.

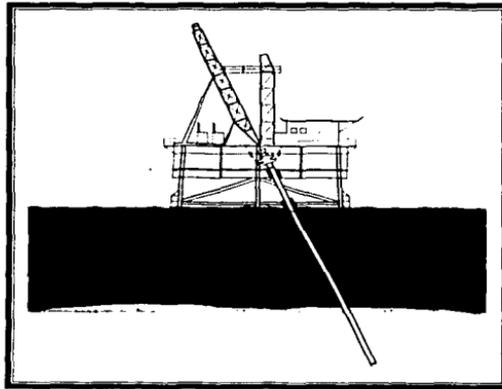


Figura 1. 11 Torre de perforación tipo "Slant"

b) Conductores curvos

Existen yacimientos costa afuera situados a una profundidad entre 1 y 2 km con un tirante de agua de 150 m o mayor. Desarrollar este tipo de yacimientos requiere de muchas plataformas, ya que los pozos direccionales convencionales no son capaces de alcanzar todo el yacimiento. Por lo que resulta muy caro tener muchas plataformas.

Desde los 70's ha sido posible instalar conductores curvos en estas plataformas. La curvatura de los conductores es de 3 a 6° por cada 30 m. Los conductores curvos pueden ser orientados hacia el objetivo mientras se trabaja con ellos. La desviación inicial es entre 10 y 20°. Los problemas que ha presentado esta técnica de perforación no han sido mayores que los que presentan otras técnicas.

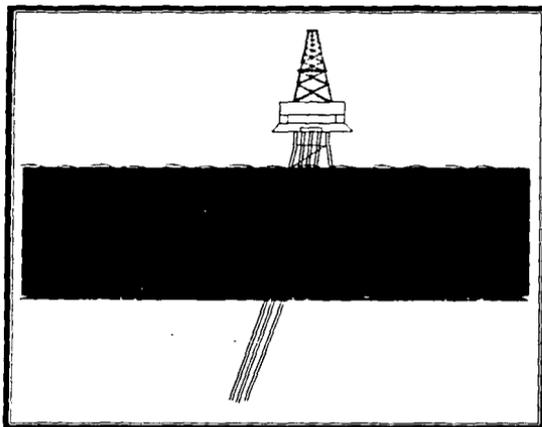


Figura I. 12 Conductores curvos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.5.3 Aparejo de fondo (BHA)

El objetivo del BHA es controlar una trayectoria predeterminada del pozo, con el uso de herramientas adecuadas para las diferentes necesidades durante cada etapa de la perforación.

Los arreglos de los componentes de un BHA pueden ir desde el más sencillo conformado por barrena y lastrarbarrenas, hasta los complejos conformados, por ejemplo, por barrena, amortiguador de vibraciones, lastrarbarrenas antimagnéticos, motor de fondo, lastrarbarrenas normales, estabilizadores, conformadores, martillo, tubería extra pesada y tubería de perforación.

El comportamiento del aparejo de fondo se ve influenciado por distintos parámetros inherentes a sus componentes, dentro de los más importantes tenemos los siguientes:

- Modulo de elasticidad
- Movimiento de inercia
- Rigidez
- Peso
- Carga axial
- Diámetro de la barrena

Uno de los conceptos básicos que se manejan en el control direccional de pozos es la fuerza axial, la causante de incrementar, mantener o disminuir el ángulo de inclinación. Esta fuerza es generada por el peso que proporciona el aparejo de fondo a la barrena. Otros dos conceptos básicos utilizados son la longitud de tangencia y el ángulo de inclinación de la barrena.

En un pozo desviado, los lastrarbarrenas tendrán contacto con el lado inferior del pozo. Dependiendo de la posición de los estabilizadores en el aparejo de fondo, el

contacto entre lastrabarrenas y el pozo se dará a la distancia L desde la barrena. La distancia L es conocida como la longitud de tangencia. Esta longitud determina cuanta fuerza está disponible para incrementar (signo positivo) o disminuir (signo negativo) el ángulo de inclinación.

Un estabilizador colocado inmediatamente arriba de la barrena actuará como un fulcro (punto de apoyo de una palanca). El peso de los lastrabarrenas arriba del estabilizador actuará como una palanca para hacer que la barrena construya ángulo. Con el incremento de la distancia entre los estabilizadores y la barrena, la fuerza hacia arriba de la barrena se reduce.

Si se coloca el primer estabilizador muy alejado de la barrena, éste determinará la longitud del punto de tangencia y producirá un efecto de péndulo sobre la barrena, lo que provoca una tendencia de la sarta a regresar a la vertical, es decir se disminuye el ángulo del pozo.

Si lo que se quiere es mantener el ángulo, se deben usar más estabilizadores para nulificar el efecto de fulcro o de péndulo, a este arreglo se le conoce como agujero empacado. El número y colocación de los estabilizadores dependerá de la tendencia natural de la formación a desviar el agujero. Los estabilizadores proporcionan rigidez en la sarta con lo que se mantiene el ángulo del pozo.

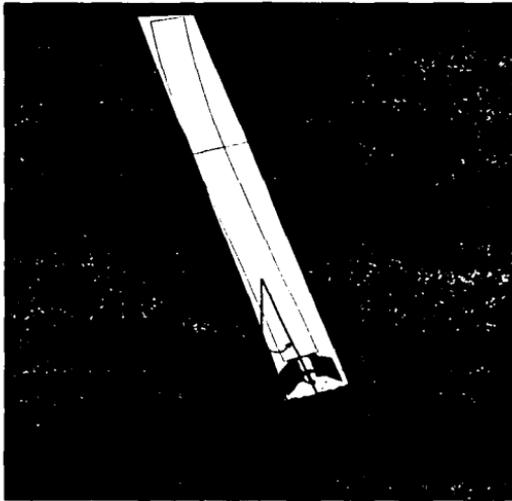


Figura 1. 13 Longitud de tangencia

El ángulo de inclinación de la barrera es el ángulo formado entre su eje axial y la vertical, este ángulo genera una fuerza positiva o negativa que contribuirá a incrementar o disminuir el ángulo del pozo.

La fuerza lateral máxima puede ser determinada por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{LW_c \text{sen}\theta}{2}$$

donde

- F= Fuerza lateral máxima (lb)
- L= Longitud de tangencia (ft)
- W_c = Peso por unidad de longitud de los lastrabarrenas (lb/ft)
- θ = Ángulo de inclinación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para una selección adecuada del aparejo se debe considerar el tipo de formación a ser perforada, la longitud del aparejo, el punto de contacto de los componentes con la pared del agujero y su ubicación en el aparejo.

1.5.3.1 Aparejo para construir ángulo

Este tipo de aparejos se corre normalmente después del KOP, es decir después de que se ha usado alguna herramienta para iniciar la desviación del pozo.

Un estabilizador colocado inmediatamente arriba o a unos pies de la barrena causará una sección de incremento de ángulo, debido al efecto fulcro. La colocación de más estabilizadores modificara el ritmo de incremento para alcanzar la trayectoria requerida. El ritmo de incremento de ángulo se debe mantener por debajo de los 2° grados por cada 30 metros perforados, con la finalidad de reducir el riesgo de un cambio abrupto en la inclinación del pozo ya que de presentarse este, la sarta podría quedar atrapada al momento de intentar sacarla.

El peso aplicado sobre la barrena (WOB) en este tipo de aparejo también modifica su comportamiento, por lo que demasiado peso causará un elevado ritmo de incremento.

El arreglo de los estabilizadores también depende de la dureza de la formación. En formaciones muy blandas se vuelve difícil que el aparejo de fondo pueda construir el ángulo debido a que no alcanza la fuerza lateral necesaria, esto se debe a la baja resistencia compresiva de la formación. La selección adecuada del BHA en formaciones muy blandas también depende de los problemas, como pegaduras por presión diferencial o una mala limpieza del agujero, a los que se tenga que enfrentar mientras se perfora la sección de incremento.

Para formaciones de dureza media se tiene un mayor dominio de los principios y los parámetros que influyen en el aparejo de fondo debido a que son formaciones en las que se tiene una mayor experiencia.

En formaciones duras los aparejos se enfrentan a una mayor resistencia de la formación para el corte lateral de la barrena y para la estabilización. La cara lateral de la barrena y del estabilizador se desgastan debido a la dureza de la formación por lo que se recomienda el empleo de barrenas de diamante y un bajo ritmo de incremento de ángulo

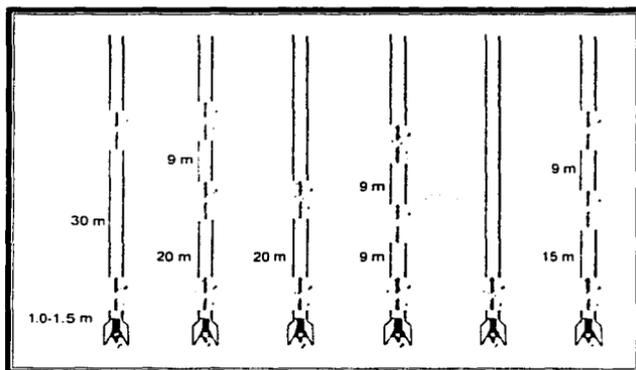


Figura 1. 14 Aparejos de fondo para incrementar el ángulo

1.5.3.2 Aparejo para mantener ángulo

Una vez que se ha alcanzado la inclinación requerida, la sección tangencial del pozo es perforada empleando un aparejo para mantener el ángulo. El objetivo aquí es reducir la tendencia del BHA de construir o disminuir el ángulo. Pero esto en la práctica es muy difícil de lograr, ya que los efectos de la formación pueden modificar el ángulo del pozo. Para eliminar la tendencia del BHA a construir o disminuir ángulo se debe colocar estabilizadores a intervalos muy pequeños, es

decir aprovechar el efecto del agujero empacado. Normalmente se usan tres estabilizadores, a menos que se tengan problemas de pegaduras por presión diferencial. Los cambios en el WOB no afectan de manera considerable el comportamiento de este aparejo, así que se puede aplicar un WOB óptimo para lograr el máximo ritmo de penetración.

En formaciones blandas mantener el ángulo del pozo es relativamente fácil, siempre que se tenga un buen diseño de la hidráulica y se mantenga un control adecuado del WOB. Un problema que se presenta en este tipo de formaciones es la acumulación de sólidos alrededor de las paletas de los estabilizadores, lo que provoca un incremento en la fuerza lateral que se transfiere a la barrena. Para prevenir este tipo de problemas se pueden sustituir los estabilizadores por tubería extra pesada.

Para formaciones de dureza media si se requiere de un aparejo de fondo multi estabilizado hay que tomar en consideración algunas situaciones que pudieran presentarse. Por ejemplo, se debe verificar que no haya alguna sección con un cambio abrupto en la inclinación del pozo en el cuál se pudiera quedar atrapada la sarta.

Si el aparejo de fondo que se ha diseñado para mantener la inclinación del pozo comienza a construir o disminuir ángulo rápidamente se debe sacar la sarta de perforación para realizar una revisión a todos los componentes de la sarta, ya que las aletas de los estabilizadores o el calibre de la barrena pudieran estar desgastados. También hay que revisar el gasto de circulación, ya que con elevados gastos se pueden erosionar la pared del pozo mientras que un gasto muy bajo pudiera provocar una mala limpieza del agujero.

En formaciones duras se presentan problemas de pérdida de calibre en la barrena, por lo que se requiere del empleo de un conformador cerca de la barrena. Otra herramienta que se vuelve muy importante son los escariadores ya que si los

conformadores están a una distancia de 1.5 a 3 m de la barrena, ésta puede perforar ligeramente fuera de su eje, con lo que no se mantendrá el ángulo del pozo.

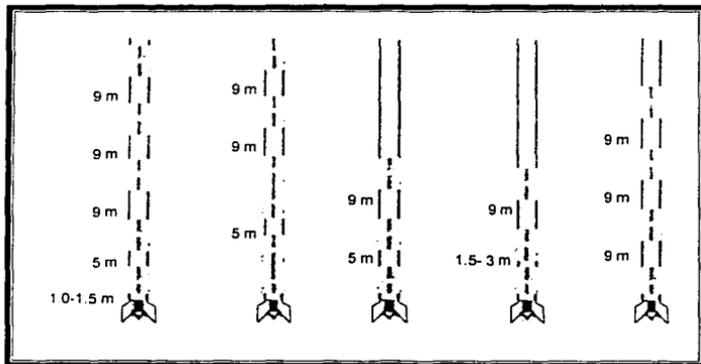


Figura 1. 15 Aparejos de fondo para mantener el ángulo

1.5.3.3 Aparejos para disminuir el ángulo

Existen trayectorias que requieren de secciones de decremento de ángulo. En ocasiones es necesario regresar el pozo a la vertical, debido a que éste se salió de la trayectoria planeada.

La reducción en la inclinación del pozo se obtiene incrementando la fuerza que la barrena ejerce hacia el lado bajo del pozo. Esto se logra colocando un estabilizador a una cierta distancia de la barrena y permitiendo que el peso de los lastrabarrenas provoque un efecto de péndulo sobre la sarta de perforación.

Generalmente cuando se emplea el principio de péndulo se incrementan las revoluciones por minuto y se disminuye el peso sobre la barrena. Las formaciones

suaves son más adecuadas para iniciar el decremento del ángulo, ya que la respuesta en formaciones duras es lenta.

A mayor inclinación del pozo se necesitará una menor distancia entre la barrena y el primer estabilizador.

Estos tipos de aparejos son más efectivos en pozos con un ángulo grande. Si el ángulo del pozo no se reduce, será necesario reducir el peso sobre la barrena, lo que traerá como consecuencia la disminución del ritmo de penetración.

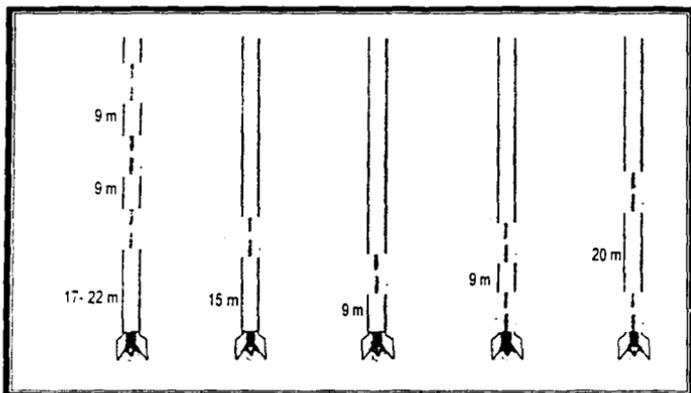


Figura 1. 16 Aparejos de fondo para disminuir el ángulo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 2

Métodos convencionales de diseño para la trayectoria de pozos direccionales.

2.1 Introducción

En el diseño de pozos se pueden considerar diferentes tipos de trayectorias para llegar al objetivo, sin embargo podemos clasificarlas dentro de los siguientes grupos:

- Trayectoria Construir – Mantener o tipo "Slant".
- Trayectoria Construir - Mantener – Disminuir o tipo "S".
- Trayectoria Tipo Catenaria (ver Capítulo 3).

Para diseñar un pozo siempre se requerirá de dos datos básicos; las coordenadas del equipo de perforación o coordenadas superficiales, llamadas también localización, y las coordenadas del objetivo. Sin embargo, muchas otras variables influyen en la trayectoria final de un pozo direccional. Las variables que se deben identificar y/o determinar son las siguientes:

- Tipo de trayectoria.
- Coordenadas X-Y, latitud – longitud o UTM.
- Desplazamiento horizontal al objetivo.
- Profundidad del inicio de desvío (KOP).
- Ritmo de incremento y, en el caso que la trayectoria lo requiera, decremento del ángulo.
- Máximo ángulo de inclinación y, si la trayectoria o requiere, máximo ángulo de decremento.
- Longitud de la sección(es) tangente(s).

La selección y/o diseño de estas variables depende de las características de las formaciones a perforar, así como de las limitaciones técnicas y tecnológicas que se tengan, con la finalidad de evitar o disminuir los problemas que se pudieran presentar durante la etapa de perforación.

2.2 Problemas que se presentan durante la perforación de un pozo direccional

Los pozos direccionales presentan un número adicional de problemas a los encontrados en pozos verticales. Estos problemas se relacionan con la trayectoria del pozo, ya que conforme el ángulo de inclinación se incrementa también lo hacen los problemas.

Una manera de medir el grado de dificultad en la perforación de un pozo es mediante el tiempo que se requiere para perforarlo y terminarlo, en donde implícitamente tenemos vertido el costo total del pozo.

El tiempo total que requiere un pozo direccional es mayor al que requiere uno vertical, sobre todo si se presenta algún problema durante la perforación. De esta manera se vuelve indispensable conocer los problemas que se pueden presentar, para llevar a cabo una buena planeación de la operación, estando así en condición de evitarlos y en caso de presentarse saber como se debe proceder a fin de actuar con rapidez y eficacia en su solución.

2.2.1 Pata de perro

Una pata de perro es un cambio abrupto e involuntario en el ángulo o dirección del pozo. Indicadores de lo anterior son incrementos en el torque y el arrastre sobre la sarta de perforación. La magnitud de la pata de perro se puede calcular a partir de dos estaciones de medición, las cuales deben estar de 20 a 30 metros una de otra. Para el cálculo se puede usar la siguiente ecuación:

$$\phi = \cos^{-1} [\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\beta_2 - \beta_1)]$$

en donde

- ϕ = ángulo de la pata de perro (grados)
 θ_1, β_1 = ángulos de inclinación y azimut en la estación 1
 θ_2, β_2 = ángulos de inclinación y azimut en la estación 2

Si hay una pata de perro, la tubería estará bajo una constante tensión y compresión. La cara de la tubería que esta en la parte interna de la curva del pozo se verá sometida a esfuerzos de compresión, mientras que la cara que esta en la parte externa estará sometida a esfuerzos de tensión. Debido a la rotación de la tubería, cada cara se verá sometida a compresión y tensión a cada 180° que gire. Estos esfuerzos de tensión y compresión provocan que la tubería se fatigue disminuyendo su vida operativa.

2.2.2 Inestabilidad en el agujero

Una de las causas más comunes de que se atrape la sarta de perforación es la tendencia de algunas formaciones a ser inestables, lo cual causa que fragmentos de roca caigan en el agujero y se acumulen en los lastrarrenas o en la barrena. La inestabilidad del pozo ocurre cuando se presentan las siguientes condiciones:

- a) Zonas de lutitas que contengan un porcentaje alto de arcillas.
- b) Formaciones fracturadas
- c) Flujo turbulento en el espacio anular, lo que causa erosión en formaciones suaves.

Limpiar el pozo de recortes se vuelve más difícil a medida que la inclinación del pozo es mayor. La mayoría de los problemas de inestabilidad del agujero se relacionan con zonas de lutitas. Las lutitas tienen la capacidad de absorber gran cantidad de agua, lo que provoca que se hinchen. En lutitas quebradizas el agua

es absorbida a lo largo de los planos de fractura, debilitando la estructura y permitiendo que grandes fragmentos caigan al pozo. El grado de hinchamiento de las lutitas depende de su composición. Algunas lutitas tienen una deformación plástica al contacto con agua, lo que provoca que obstruyan el espacio anular y atrapen la tubería.

Se puede reducir el hinchamiento de las lutitas agregándole inhibidores al fluido de perforación. El inhibidor dependerá del tipo de lodo que se esté usando. Las propiedades del fluido de perforación deben ser seleccionadas cuidadosamente para prevenir este tipo de problemas.

2.2.3 Pegaduras por presión diferencial

Para prevenir el flujo de fluidos de formación hacia el pozo, la presión hidrostática del lodo debe igualar o exceder a la presión de poro. En zonas muy permeables, se tendrá un proceso natural de filtración en el que el fluido contenido en el lodo invadirá la formación, mientras que los sólidos del lodo forman un enjarre en las paredes del pozo. Si el enjarre llega a ser espeso los lastrarbarrenas pueden entrar en contacto con él e incluso atascarse. Si la presión diferencial es muy grande (alrededor de 1000 lb/pg^2)⁹, será difícil liberar la tubería. Este problema se presenta de forma más frecuente en pozos direccionales debido a que los estabilizadores en el BHA deben de estar en contacto con la cara de la formación. El riesgo de una pegadura por presión diferencial se incrementa cuando la tubería permanece estática en zonas permeables.

La fuerza requerida para liberar la tubería puede ser expresada como:

$$F = \Delta p A_c f$$

en donde

Δp = presión diferencial (lb/pg^2)

A_c = Área de contacto entre la tubería y las paredes del pozo.

f = Coeficiente de fricción entre la tubería y el pozo.

El problema se puede solucionar disminuyendo cualquiera de los tres factores que intervienen:

- a) La presión diferencial puede ser reducida disminuyendo la densidad del lodo. Se puede circular agua o diesel para liberar la tubería. Sin embargo, esta operación puede provocar una pegadura en otra zona del pozo descubierto.
- b) El área de contacto se puede reducir empleando espirales. Estos se recomiendan cuando se va a perforar una zona en la que es probable una pegadura por presión diferencial.
- c) El factor de fricción se puede reducir empleando lubricantes o lodos base aceite.

Ya que el riesgo de una pegadura se incrementa cuando la tubería se mantiene sin movimiento, es recomendable rotarla si la perforación se detiene.

2.3 Trayectoria Incrementar – Mantener (Trayectoria “Slant”)

Este tipo de trayectoria de pozos direccionales es muy común y simple. El pozo se inicia vertical hasta llegar a la profundidad del KOP (el cual se ubica en formaciones con una dureza media), a partir del cual se inicia la desviación del pozo hasta alcanzar el ángulo de inclinación requerido. Esta inclinación se mantiene constante hasta llegar al objetivo, a esta última sección se le llama sección tangente. Generalmente se tiene un KOP poco profundo en este tipo de trayectorias, esto con el objeto de entrar al objetivo con un ángulo e inclinación no muy grande, una práctica común es entrar al objetivo con un ángulo entre 15 y 55° al final de la sección de incremento. Este tipo de trayectorias se emplea cuando se requiere un desplazamiento horizontal grande y se tiene un objetivo relativamente poco profundo.

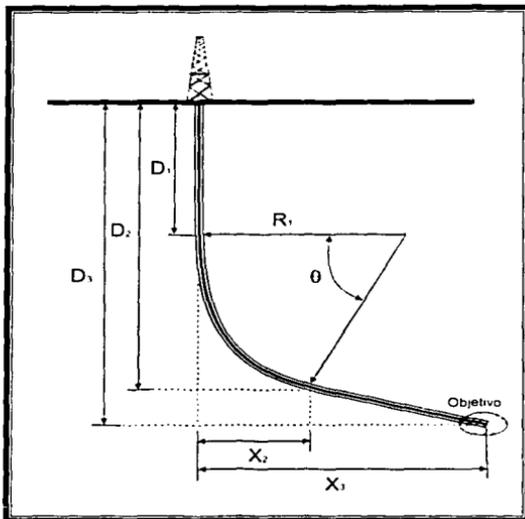


Figura 2. 1 Trayectoria Incrementar Mantener

Para realizar los cálculos de la geometría de este tipo de trayectorias se requiere de la siguiente información:

- Coordenadas de la localización superficial.
- Coordenadas al objetivo.
- Alguna de las siguientes combinaciones de datos.
 - i. Profundidad al KOP y ritmo de incremento de ángulo.
 - ii. Profundidad al KOP, longitud de la sección tangente y máximo ángulo de inclinación.
 - iii. Ritmo de incremento de ángulo, longitud de la sección tangente y máximo ángulo de inclinación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La figura 2.1 muestra este tipo de trayectoria. Las ecuaciones para calcular la geometría de esta trayectoria se muestran a continuación:

$$R_1 = \frac{180}{\pi q_{v1}}$$

Tenemos dos casos; uno cuando el radio de curvatura es mayor que el desplazamiento horizontal al objetivo y el caso contrario, cuando el radio de curvatura es menor al desplazamiento horizontal al objetivo.

Ángulo máximo de inclinación

Para el caso en que $R_1 > X_3$

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1} \left[\frac{R_1}{\left[(R_1 - X_3)^2 + (D_3 - D_1)^2 \right]^{1/2}} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{R_1 - X_3}{D_3 - D_1} \right]$$

Para el caso contrario, $R_1 < X_3$

$$\theta_1 = 180^\circ - \tan^{-1} \left[\frac{D_3 - D_1}{X_3 - R_1} \right] - \cos^{-1} \left[\left(\frac{R_1}{D_3 - D_1} \right) \text{sen} \left(\tan^{-1} \left(\frac{D_3 - D_1}{X_3 - R_1} \right) \right) \right]$$

Longitud de arco

$$L_{arc1} = \frac{\theta_1}{q_{v1}}$$

Desplazamiento horizontal al final de la curva de incremento

$$X_2 = R_1(1 - \cos \theta_1)$$

Longitud del tramo tangente

Para el caso en que $R_1 > X_3$

$$L_{TAN1} = \left[(R_1 - X_3)^2 + (D_3 - D_1)^2 - R_1^2 \right]^{1/2}$$

Para el caso contrario, $R_1 < X_3$

$$L_{TAV1} = [(X_3 - X_2)^2 + (D_3 - D_2)^2]^{1/2}$$

Profundidad total desarrollada

$$D_M = D_1 + L_{arc1} + L_{TAV1}$$

2.4 Trayectoria de Incremento Continuo

Este tipo de trayectoria es similar a la de incrementar mantener, con la diferencia de que ésta no cuenta con una sección tangente. En esta trayectoria se tiene una sección inicial vertical hasta alcanzar el punto de inicio de desvío, KOP, a partir de este punto se inicia la construcción del ángulo de desviación del pozo, la construcción se mantiene hasta llegar al objetivo. Normalmente se tiene un KOP profundo en este tipo de trayectorias, por lo que las formaciones en las que se inicia el desvío son más duras, presentando una mayor dificultad para la desviación. La aplicación de este tipo de trayectorias es recomendable cuando el objetivo se sitúa a poca distancia horizontal. Este tipo de trayectoria solo se emplea en situaciones particulares por ejemplo para evitar perforar a través de un domo salino o para librar algún obstáculo en el pozo (sidetracking).

La figura 2.2 muestra este tipo de trayectorias. Para realizar los cálculos de la geometría de una trayectoria de incremento continuo se requiere de la siguiente información:

- Coordenadas al objetivo
- Coordenadas del equipo de perforación
- Alguno de los siguientes parámetros
 - i. Profundidad al KOP
 - ii. Ritmo de incremento del ángulo
 - iii. Máximo ángulo de inclinación

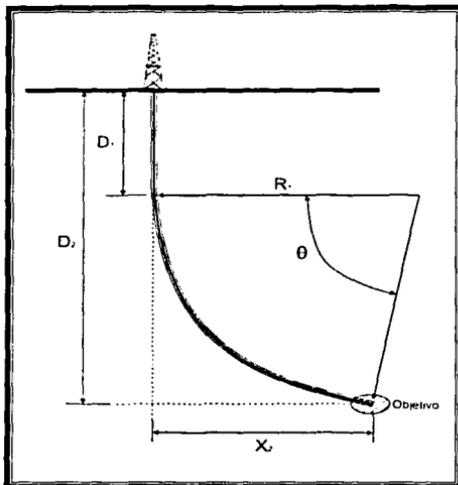


Figura 2. 2 Trayectoria Incremento Continuo

Conociendo estos parámetros podemos determinar los otros con las siguientes ecuaciones.

$$\theta_1 = 2 \tan^{-1} \left[\frac{X_2}{D_2 - D_1} \right]$$

$$R_1 = \frac{D_2 - D_1}{\text{sen } \theta_1}$$

$$q_{v1} = \frac{1800 \text{sen } \theta_1}{\pi(D_2 - D_1)} = \frac{1800}{\pi R_1} \text{ [}^\circ/100 \text{ pies]}$$

$$D_v = D_1 + R_1 \text{sen } \theta_1$$

$$X_v = R_1 (1 - \text{cos } \theta_1)$$

$$D_{v1} = D_1 + \frac{\theta_1}{q_{v1}} 100$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.5 Trayectoria Incrementar- Mantener- Disminuir (Trayectoria "S")

Esta trayectoria es similar a la Incrementar- Mantener, hasta la sección tangente. La sección tangente, para esta trayectoria, no se prolonga hasta la formación de interés, si no que al final de ésta se inicia el decremento del ángulo para alcanzar el objetivo. Se puede o no regresar a la vertical. Este tipo de trayectorias tiene un nivel de dificultad mayor que la trayectoria Incrementar- Mantener debido a los problemas que se presentan para controlar la sección de decremento. En esta trayectoria se presenta un torque y arrastre mayor debido a la curva adicional. Este tipo de trayectorias se emplea cuando el objetivo es profundo y el desplazamiento horizontal es relativamente pequeño. También se emplea para interceptar varias zonas productoras o cuando es necesario perforar un pozo de alivio si es necesario que el pozo de alivio sea paralelo al pozo descontrolado.

Para poder realizar los cálculos vamos a requerir de la siguiente información:

- Coordenadas superficiales.
- Coordenadas del objetivo.
- Ritmo de incremento de ángulo.
- Ritmo de disminución de ángulo.
- Profundidad al punto de inicio de desvío (KOP).
- Ángulo al final de la curva de decremento.

La figura 2.3 ilustra este tipo de trayectorias. Las ecuaciones para este tipo de trayectorias se muestran a continuación:

Radio de curvatura

$$R_1 = \frac{180}{\pi q_{1,1}}$$
$$R_2 = \frac{180}{\pi q_{1,2}}$$

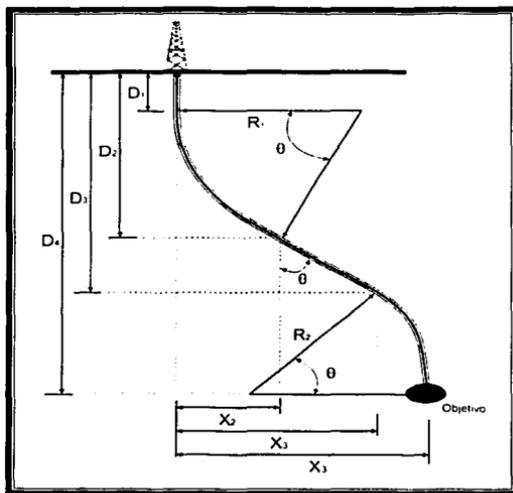


Figura 2.3 Trayectoria Incremental Mantener Disminuir

Ángulo máximo de inclinación-declinación:

$$R_1 < X_3 \left\{ \begin{array}{l} R_1 + R_2 > X_4 \\ R_1 + R_2 < X_4 \end{array} \right.$$

Para $R_1 + R_2 > X_4$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{D_4 - D_1}{R_1 + R_2 - X_4} \right) - \cos^{-1} \left(\left(\frac{R_1 + R_2}{D_4 - D_1} \right) \text{sen} \left(\tan^{-1} \left(\frac{D_4 - D_1}{R_1 + R_2 - X_4} \right) \right) \right)$$

Para $R_1 + R_2 < X_4$

$$\theta_1 = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{D_4 - D_1}{X_4 - R_1 - R_2} \right) - \cos^{-1} \left(\left(\frac{R_1 + R_2}{D_4 - D_1} \right) \text{sen} \left(\tan^{-1} \left(\frac{D_4 - D_1}{X_4 - R_1 - R_2} \right) \right) \right)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Desplazamiento horizontal al final de la sección de incremento

$$X_2 = R_1(1 - \cos\theta_1)$$

Desplazamiento horizontal al final de la sección tangente

$$X_3 = X_4 - R_2(1 - \cos\theta_2)$$

Desplazamiento vertical al final de la sección de incremento

$$D_2 = D_1 + R_1 \sin\theta_1$$

Desplazamiento vertical al final de la sección tangente

$$D_3 = D_2 + \frac{X_3 - X_2}{\tan\theta_1}$$

Longitud del tramo tangente

$$L_{tan} = \frac{X_3 - X_2}{\sin\theta_1}$$

Longitud de los arcos:

$$L_{arc1} = \frac{\theta_1}{q_{v1}}$$

$$L_{arc2} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{q_{v2}}$$

Profundidad total desarrollada

$$D_M = D_1 + L_{arc1} + L_{tan} + L_{arc2}$$

2.6 Trayectoria Incrementar- Mantener- Disminuir parcialmente - Mantener (Trayectoria "S" modificada)

Es similar a la tipo "S" con la diferencia de que se entra al objetivo con una sección tangente

La figura 2.4 ilustra este tipo de trayectoria. Las ecuaciones para este tipo de trayectoria se muestran más adelante:

Para poder realizar los cálculos vamos a requerir de la siguiente información:

- Coordenadas superficiales.
- Coordenadas del objetivo.
- Profundidad al punto de inicio de desvío (KOP).
- Ritmo de incremento de ángulo.
- Profundidad verdadera al final del decremento del ángulo.
- Ángulo al final de la curva de decremento.

Con esta información los cálculos son como siguen:

$$R_1 = \frac{180}{\pi q_{1,1}}$$

$$R_2 = \frac{180}{\pi q_{1,2}}$$

De la figura 2.4 encontramos que

$$\theta_1 = x + y'$$

Donde

$$\tan x = \frac{OQ}{OP}$$

$$\tan y' = \frac{QS}{PS}$$

TRUPO CON
FALLA DE ORIGEN

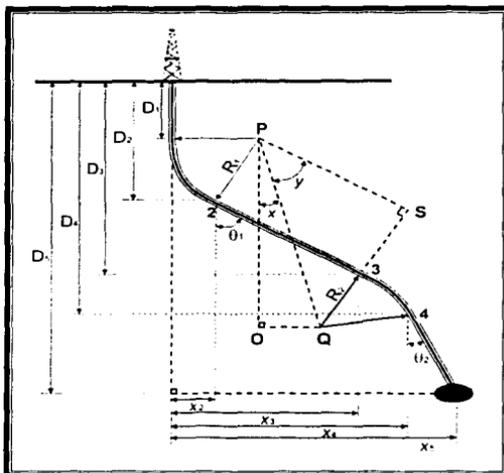


Figura 2. 4 Trayectoria "S" Modificada

Donde

$$OQ = X_4 - R_1 - R_2 \cos \theta_2 - (D_4 - D_3) \tan \theta_2$$

$$OP = D_3 - D_1 + R_2 \sin \theta_2$$

$$QS = R_1 + R_2$$

$$PS = (PQ^2 - QS^2)^2$$

$$PQ = (OP^2 + OQ^2)^2$$

Las coordenadas de los puntos 2, 3, 4 y 5 se pueden determinar como siguen:

Al punto 2

$$D_2 = D_1 + R_1 \sin \theta_1$$

$$X_2 = R_1 (1 - \cos \theta_1)$$

$$D_{M2} = D_{M1} + \frac{100\theta_1}{q_{v1}}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

| | |
|--------------------------------|---|
| Al punto 3 | $D_3 = D_2 + PS \cos \theta_1$ $X_3 = X_2 + PS \sin \theta_1$ $D_{M3} = D_{M2} + PS$ |
| Al punto 4 | $D_4 \text{ es conocido}$ $X_4 = X_3 + R_2 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)$ $D_{M4} = D_{M3} + \frac{100(\theta_1 - \theta_2)}{q_{v2}}$ |
| Al punto 5 | $D_5 \text{ y } X_5 \text{ son conocidos}$ $D_{M5} = D_{M4} + \frac{D_5 - D_4}{\cos \theta_2}$ |
| Longitud del tramo tangente | $L_{\tan 1} = \frac{X_3 - X_2}{\sin \theta_1}$ $L_{\tan 2} = \frac{X_5 - X_4}{\sin \theta_2}$ |
| Longitud de los arcos | $L_{\text{arc}1} = \frac{\theta_1}{q_{v1}}$ $L_{\text{arc}2} = \frac{\theta_2}{q_{v2}}$ |
| Profundidad total desarrollada | $D_{M5} = D_1 + L_{\text{arc}1} + L_{\tan 1} + L_{\text{arc}2} + L_{\tan 2}$ |

Donde:

R_1 = Radio de curvatura de la sección de incremento [m]

q_{v1} = Ritmo de incremento del ángulo [°/100 pies]

R_2 = Radio de curvatura de la sección de decremento [m]

q_{v2} = Ritmo de decremento del ángulo [°/100 pies]

D_M = Profundidad total desarrollada [m]

- X_2 = Desplazamiento horizontal al final de la curva de incremento [m]
 X_3 = Desplazamiento horizontal al final de la sección tangente [m]
 X_4 = Desplazamiento horizontal al final de la sección de decremento [m]
 X_5 = Desplazamiento horizontal al final de la segunda sección tangente [m]
 D_1 = Profundidad al KOP [m]
 D_2 = Profundidad vertical al final de la curva de incremento [m]
 D_3 = Profundidad vertical al final de la sección tangente [m]
 D_4 = Profundidad vertical al final de la sección de decremento [m]
 D_5 = Profundidad vertical al final de la segunda sección tangente [m]
 θ_1 = Máximo ángulo de inclinación [°]
 θ_2 = Ángulo al final de la sección de decremento [°]
 L_{arc1} = Longitud de la sección de incremento [m]
 L_{arc2} = Longitud de la sección de decremento [m]
 L_{TAN1} = Longitud de la sección tangente al final de la sección de incremento [m]
 L_{TAN2} = Longitud de la sección tangente al final de la sección de decremento [m]

CAPÍTULO 3

Método de la catenaria

3.1 Introducción

Las trayectorias que comúnmente se emplean en la perforación direccional quedaron descritas en el Capítulo 2 del presente trabajo, esto no quiere decir que sean las únicas que existen. Para lograr dichas trayectorias es necesario el empleo de las técnicas y herramientas de perforación que se mencionaron en el Capítulo 1. En la mayoría de los pozos direccionales es necesario corregir la trayectoria del pozo, incrementando o disminuyendo el ángulo de manera no programada, lo que resulta en una serie de cambios bruscos en la dirección del pozo, que al momento de introducir o sacar la sarta ésta tiende a entrar en contacto con las paredes del pozo formando los llamados ojos de llave. Esto incrementa la probabilidad de que se tengan problemas de atrapamiento de tubería, además de que incrementa significativamente la fricción entre las paredes del pozo y la tubería.

Una manera de atender estos problemas es buscar nuevas alternativas para el diseño de trayectorias de pozos direccionales. Edward O. Anders en 1979 presentó un desarrollo matemático para la definición de la trayectoria de un pozo desviado en la cual no se involucra una sección de incremento continuo. Dichas ecuaciones describen una catenaria.

Este capítulo tiene por objetivo describir el método de la catenaria y sus variantes, así como las posibles ventajas y desventajas que presentan.

3.2 Catenaria

La catenaria es la curva formada por un cable flexible homogéneo que cuelga bajo su propio peso desde dos puntos. Algunos cables de puentes colgantes y algunos unidos a postes telefónicos penden en esta forma. Más aun, si dos anillos circulares se mantienen verticales y no están muy separados entre sí, entonces una película de jabón desplegada entre los anillos formará una superficie de área mínima llamada catenoide, que es una catenaria de revolución. La palabra "catenaria" proviene de la palabra latina *catena*, que significa literalmente cadena colgante.

Se puede demostrar matemáticamente que la forma que toman dichos cables se expresa mediante la función coseno hiperbólico y no mediante una parábola como se pudiera pensar a primera vista.

Si se introduce un sistema de coordenadas, la forma asumida por una catenaria es la gráfica de la siguiente ecuación, en donde a y b son constantes.

$$y = a \cosh\left(\frac{x}{b}\right) = a \left(\frac{e^{\frac{x}{b}} + e^{-\frac{x}{b}}}{2} \right)$$

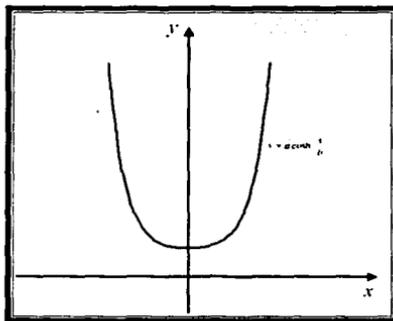


Figura 3.1 Representación gráfica de una catenaria

3.3 Método de la catenaria para el diseño de la trayectoria de pozos direccionales

El principio de la catenaria es el de una curva formada por un material flexible de densidad homogénea que cuelga bajo su propio peso desde dos puntos y que no está sometido a otras fuerzas. El perfil de la catenaria asume que una cuerda, cadena o línea toma la forma dada por una función de coseno hiperbólico (próxima a una parábola). Si un pozo es perforado con un perfil idéntico al de la mitad de una catenaria y se inserta una sarta con peso y tensión, dicha sarta teóricamente no tocará el pozo y, por lo tanto no habrá fricción. La aplicación de este principio a la perforación de pozos direccionales es minimizar la fricción entre la sarta y las paredes del pozo, manteniendo una fuerza normal mínima entre ambos.

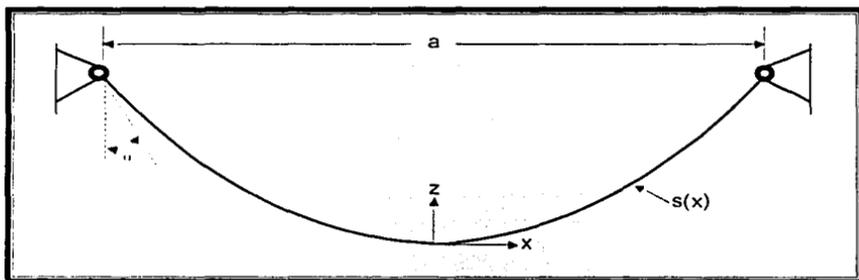


Figura 3. 2 Curva catenaria

El método de la curva catenaria para un pozo direccional es radicalmente diferente a los métodos convencionales. Las trayectorias que tradicionalmente se han empleado en pozos direccionales requieren de secciones de incremento o decremento de ángulo, para posteriormente tener secciones rectas, lo que en ocasiones resulta en trayectorias sinuosas. Las fuerzas para introducir o sacar la tubería se incrementan debido a que ésta entra en contacto con las paredes del

pozo precisamente en las secciones sinuosas. Esto incrementa significativamente las fuerzas de torque y arrastre, incrementando además la posibilidad de que la tubería quede atrapada. Por lo que en dichas trayectorias existen puntos en los que se puede presentar una tubería atrapada, lo que representa un grave riesgo de perder el pozo en caso de presentarse está.

La aplicación en perforación direccional se ve claramente esquematizado en la figura 3.3, donde se presenta la comparación de un pozo perforado con un método convencional y uno perforado con el método de la catenaria.

Durante las operaciones de perforación empleando un método convencional, la porción del pozo entre los puntos A y B es perforada a un ritmo de incremento constante, mientras que la porción entre B y C es perforada a una inclinación constante. La tubería yacerá contra la parte baja del pozo entre los puntos B y C y tendiendo a jalarla entre los puntos A y B. Esto significa que la tubería podría quedar atrapada, el jalón para liberar la tubería debe ser lo suficientemente grande no solo para superar la presión diferencial sino también para superar las fuerzas de fricción creadas cuando la tubería es forzada a través de un ojo de llave.

Cuando la tensión es aplicada a una sarta que toma la forma de una catenaria la sarta de perforación tiende a separarse de las paredes del agujero, reduciendo de esta manera el arrastre y el torque que se generan por la fricción, así podemos ver que las fuerzas ascendentes o descendentes para liberar una tubería atrapada pueden ser aplicadas más eficientemente. También, como el pozo no sigue una trayectoria sinuosa, la posibilidad de un ojo de llave es mínima, con lo que se reduce la posibilidad de perder el pozo por alguna tubería atrapada.

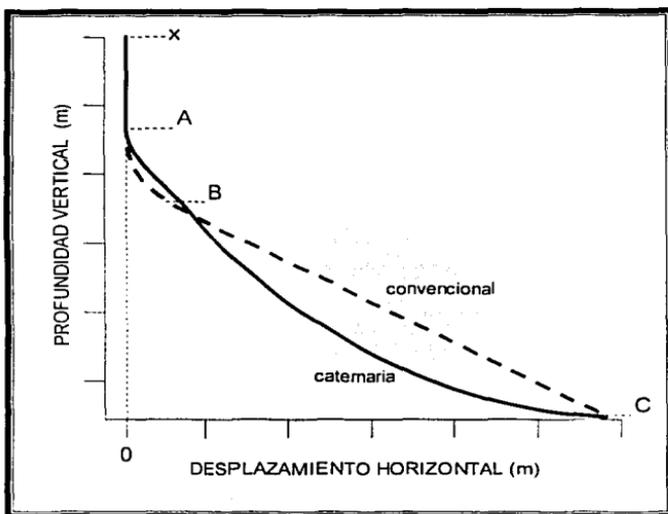


Figura 3.3 Trayectoria tipo catenaria

Una catenaria puede ser expresada matemáticamente mediante las siguientes ecuaciones:

$$z = \frac{a}{2} (e^{x/a} + e^{-x/a}) \quad y \quad s = \frac{a}{2} (e^{x/a} - e^{-x/a})$$

Estas son las ecuaciones generales para la curva catenaria. Edward O. Anders²¹ presentó por primera vez en 1979 su posible aplicación al diseño de pozos direccionales. En 1985 publicó la siguiente ecuación:

$$z = b \cosh\left(\frac{x}{b} + C_1\right) + C_2 \quad 3.1$$

En donde b es la relación de la componente horizontal de la tensión en la sarta entre el peso por unidad de longitud de la misma.

El ángulo a lo largo de la curva se encuentra derivando la ecuación 3.1

$$z' = \sinh\left(\frac{x}{b} + C_1\right) \quad 3.2$$

Las constantes C_1 y C_2 deben ser encontradas mediante la solución numérica de un sistema de dos ecuaciones.

Anders y McClendon¹¹ realizaron un estudio en los campos Geysers y Chaffe Canyon en California, EEUU, en donde se perforaron catorce pozos con el método de la catenaria y ocho con métodos convencionales. En el campo Geysers se perforaron trece pozos con una trayectoria catenaria y sólo tres con trayectorias convencionales mientras que en el campo Chaffe Canyon se perforaron cinco pozos con trayectorias convencionales y sólo uno con trayectoria catenaria.

En total se perforaron cerca de 24,500 metros con métodos convencionales, mientras que con el método de la catenaria se perforaron 37,000 metros.

Los parámetros que usaron para comparar ambos métodos fueron el costo por pozo, ritmo de penetración, y tiempo de perforación. Las tablas 3.1 a 3.5 muestran los resultados de este estudio.

| | Convencional | Catenaria |
|---|--------------|-----------|
| Distancia total perforada (pie) | 44308 | 51736 |
| Horas totales | 5081 | 3689 |
| Ritmo de penetración (pie/hr) | 8.72 | 14.03 |
| Incremento en el ritmo de penetración por el método de la catenaria | | 62.2% |

Tabla 3. 1 Comparación del ritmo de penetración

| Pozo | Longitud perforada | Tiempo (hrs) | Ritmo de penetración (pie/hr) |
|--|--------------------|--------------|-------------------------------|
| Neashea 1 | 9069 | 1100.5 | 8.24 |
| Bouschel 1 | 9021 | 1217 | 7.41 |
| 68-21 | 7344 | 863.5 | 8.5 |
| 68B-21 * | 8350 | 501.25 | 16.66 |
| 23*-22 * | 8514 | 572.5 | 14.87 |
| 23B-22 * | 9374 | 742.5 | 12.62 |
| 74*-21 * | 9006 | 802.75 | 11.22 |
| 87-21 * | 9084 | --- | --- |
| 87B021 * | 8357 | 575.25 | 14.28 |
| Ritmo de perforación promedio en pozos convencionales =8.00 pie/hr | | | |
| Ritmo de perforación promedio en pozos catenaria =13.65 pie/hr | | | |
| * Pozos con una trayectoria catenaria | | | |

Tabla 3. 2 Ritmo de perforación en los pozos del Campo Geysers

| Pozo | Longitud perforada | Tiempo (hrs) | Ritmo de penetración (pie/hr) |
|--|--------------------|--------------|-------------------------------|
| 14X-1 | 10022 | 1025.5 | 9.77 |
| 83X-1 | 8852 | 874.75 | 10.12 |
| 63X-1 * | 8135 | 494.5 | 16.45 |
| Ritmo de perforación promedio en pozos convencionales =9.93 pie/hr | | | |
| Ritmo de perforación promedio en pozos catenaria =16.45 pie/hr | | | |
| * Pozos con una trayectoria catenaria | | | |

Tabla 3. 3 Ritmo de penetración para los pozos del Campo Chaffea Canyon

| | Convencional | Catenaria |
|---|--------------|-----------|
| Tiempo del equipo de perforación (días) | 446 | 815 |
| Distancia total perforada (pie) | 53050 | 122600 |
| Pies totales por día | 116.95 | 150.43 |
| Reducción del equipo de perforación por el método de la catenaria | | 26.5% |

Tabla 3. 4 Comparación del tiempo de perforación

| | Convencional | Catenaria |
|---|--------------|-----------|
| Costo total de los pozos | 13030154 | 26655.97 |
| Costo total direccional | 561899 | 907967 |
| Pies totales | 43394 | 122535 |
| Costo total por pie (\$/pie) | 300.28 | 217.52 |
| Costo direccional total por pie (\$/pie) | 12.95 | 7.41 |
| Reducción de los costos por el método de la catenaria | | 27.6% |
| Reducción de los costos direccionales por el método de la catenaria | | 42.8% |

Tabla 3. 5 Comparación de costos

Los resultados de este estudio se pueden resumir como sigue:

- El costo total de los pozos se redujo en 27.6%
- El costo por servicios direccionales se redujo en 42.8 %
- El ritmo de penetración se incremento 62.2%
- El tiempo de perforación se redujo en 26.5%

3.4 Método de la catenaria modificada para el diseño de la trayectoria de pozos direccionales

La trayectoria que presentó inicialmente Edward O. Anders²¹ para la catenaria, aplica para un ángulo de 90° en el fondo del pozo, para posteriormente si se requiere, continuar perforando de manera horizontal, esto limita considerablemente su aplicación. Aadnoy y Andersen¹³ presentaron en 1998 unas ecuaciones que nos permiten una solución general para cualquier ángulo al final de la sección catenaria.

$$z = \frac{T_0 \sin \theta}{w} \left[\cosh \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} x + \sinh^{-1}(\cot \theta) \right] - \cosh[\sinh^{-1}(\cot \theta)] \right] \quad 3.3$$

$$s = \frac{T_0 (\sin \theta) \sinh \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} x + \sinh^{-1}(\cot \theta) \right] - T_0 \cos \theta}{w} \quad 3.4$$

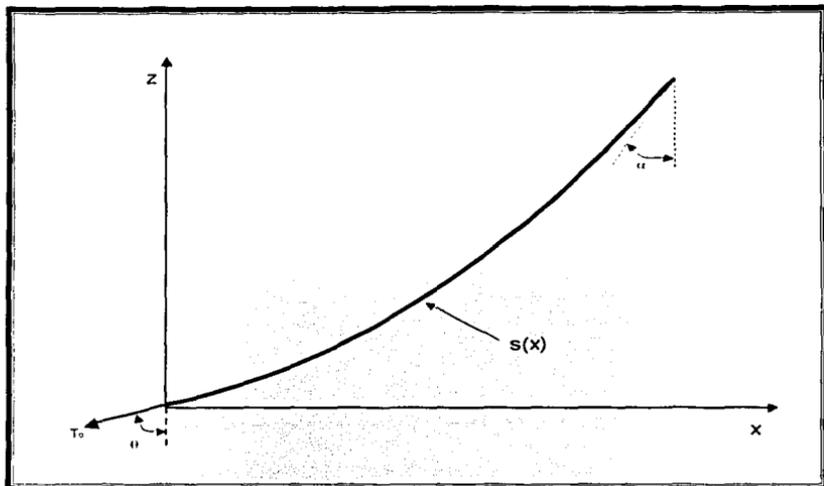


Figura 3. 4 Sección tipo catenaria propuesta por Aadny y Andersen¹³

3.5 Condición de entrada para la sección catenaria

Otro detalle que presenta la expresión original de la catenaria es que debido a la ecuación que la rige no es posible iniciar su construcción desde la vertical. Una solución que propusieron Aadny y Andersen¹³ ante esta particularidad, es hacer una sección de incremento continuo entre la vertical y la sección catenaria.

La figura 3.2 muestra el ángulo α , necesario para comenzar la construcción de una catenaria, el cual se puede lograr mediante una curva de incremento continuo. Los ángulos al final de la sección de incremento y al inicio de la catenaria deben ser iguales (figura 3.5).

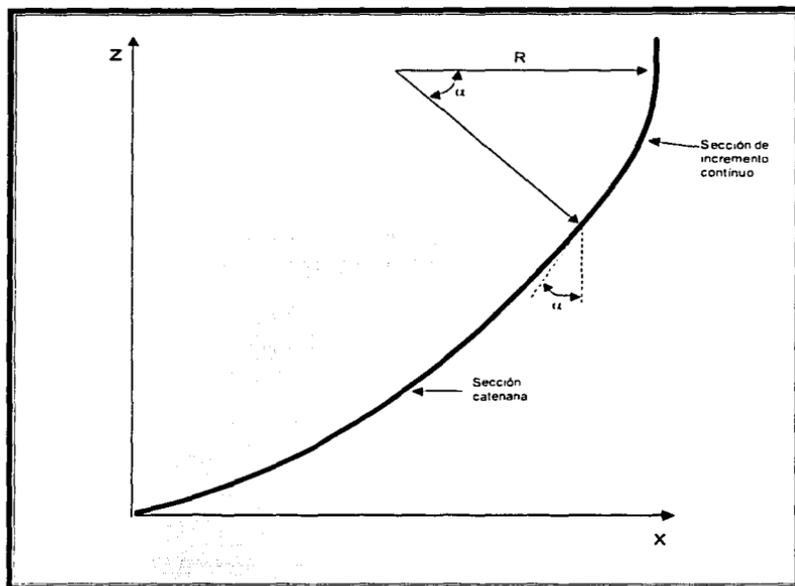


Figura 3.5 Sección de incremento previa a la sección catenaria

El radio de curvatura para la sección de incremento continuo se calcula con la siguiente ecuación que publicaron Aadnoy y Andersen¹³ en 1998:

$$R = \frac{T_0^2 + (ws)^2 + 2wsT_0 \cos \theta}{wT_0 \sin \theta} \quad 3.5$$

La consideración hecha por Aadnoy y Andersen para llegar a esta expresión fue que la transición debe ser suave, por lo que ambas secciones deben tener la misma curvatura.

3.6 Ventajas y desventajas del método de la catenaria

Ventajas del método de la catenaria

Entre las ventajas que reportan Anders²¹, McClendon y Anders^{11, 20}, Aadnoy y Andersen^{13, 19}, Aadnoy y Husgard¹⁵, quienes se han dado a la tarea de investigar sobre la trayectoria catenaria están las siguientes.

En las trayectorias tipo "S" y tipo "J" se tienen secciones de incremento o decremento de ángulo para después tener secciones en las que se mantiene, lo que provoca que al momento de correr la tubería, ésta esté en contacto con las paredes del pozo, sobre todo en los puntos en que el pozo pasa de una sección de incremento o decremento a una sección tangente, provocando una fricción muy grande e incrementando la probabilidad de que la tubería quede atrapada.

La trayectoria catenaria, en cambio, no presenta estos puntos, por lo que teóricamente presenta una fricción menor entre la sarta y las paredes del pozo, eliminando así la probabilidad de perderlo debido a una tubería atrapada. La baja fricción que presenta esta trayectoria se ve reflejada en un torque y un arrastre también bajos.

Otra característica que presenta la trayectoria tipo catenaria es que el mayor ángulo de inclinación se presenta en la parte más baja del pozo, que es en donde la sarta presenta una menor tensión. En yacimientos con presencia de fracturas es posible terminar el pozo horizontalmente, con lo que se atraviesan un mayor número de fracturas, aprovechándolas más eficientemente.

La presencia de un menor torque y arrastre en la trayectoria catenaria permiten poner un mayor peso sobre la barrena, lo que incrementa el ritmo de penetración reduciendo el tiempo de perforación.

Las principales ventajas las podemos resumir como sigue:

- La fricción por arrastre es menor que en las trayectorias convencionales.
- Presenta menor torque.
- El mayor ángulo se presenta en la parte baja del pozo, que es la parte con menor tensión.
- Debido a un menor torque y arrastre, es posible poner mayor peso sobre la barrena, lo que incrementa el ritmo de penetración.
- Cuando el yacimiento tiene fracturas, estas se pueden atravesar de manera más eficiente con una catenaria.
- Como el pozo no sigue una trayectoria sinuosa, la posibilidad de un ojo de llave es mínima, con lo que se reduce la posibilidad de perder el pozo por alguna tubería atrapada.

Desventajas del método de la catenaria

Aadnoy y Andersen¹⁹ mencionan algunos problemas que ha presentado la aplicación de la trayectoria catenaria, entre los que se encuentran los siguientes: se debe tener un cuidado extremo al controlar la carga axial (T_0), ya que de no tener cuidado se reflejará en un valor elevado de la fricción a lo largo del pozo. El ritmo de incremento no permanece constante, lo que genera problemas operativos. Una catenaria, por su naturaleza, no se puede construir desde la vertical, lo que hace necesario tener una sección de incremento continuo entre la vertical y la sección catenaria, esto incrementa significativamente la fricción a lo largo de la trayectoria final.

- Se requiere de un minucioso control de las cargas axiales que actúan sobre la sarta de perforación.
- El ritmo de construcción de ángulo cambia constantemente, por lo que se presentan muchos problemas operativos
- Es imposible comenzar la sección catenaria desde la vertical, por lo que se requiere de una sección de transición de ángulo.

Nomenclatura

s= longitud de la curva

a= claro de la catenaria

x= coordenada horizontal

z= coordenada vertical

D_{cat} = desplazamiento horizontal al final de la sección catenaria

w= peso unitario de la sarta de perforación

T= tensión en la parte superior de la sarta

T_0 = tensión en la parte inferior de la sarta

α = ángulo al principio de la curva catenaria

(l)= ángulo al final de la curva catenaria

R= radio de curvatura de la sección de incremento continuo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 4

Comparación de los métodos de diseño para la trayectoria de pozos direccionales

4.1 Introducción

El torque y el arrastre, que se presentan en la sarta de perforación debido a la fricción entre ésta y las paredes del pozo, son factores importantes que determinan la viabilidad de perforar un pozo direccional con alguna trayectoria específica, también limitan el alcance del pozo. Dado que el torque y el arrastre pueden limitar en gran medida la trayectoria del pozo, resulta conveniente como un criterio de diseño determinar cuál trayectoria presentará los menores valores de torque y arrastre.

De esta forma, para poder comparar las diferentes trayectorias que se pueden proponer como diseño es necesario establecer criterios bien definidos que nos lo permitan, los criterios que aquí se presentan son los siguientes:

- Criterio por arrastre
- Criterio por torque

El torque y arrastre en cualquier pozo pueden ser analizados sumando las contribuciones que cada sección del pozo aporta, iniciando desde el fondo. Lo que resulta en el cálculo de dichos factores a lo largo del pozo.

4.2 Torque y arrastre

El torque y el arrastre son factores críticos que determinan si la trayectoria diseñada de un pozo puede ser perforada y, además si se podrán colocar las tuberías de revestimiento a las profundidades diseñadas.

Algunos modelos empleados para predecir el torque y arrastre en el pozo toman en consideración la trayectoria del pozo, configuración de la sarta de perforación, cambios abruptos en el ángulo del pozo, factores de fricción y la profundidad de la tubería de revestimiento.

Como se mencionó anteriormente los modelos de torque y arrastre son usados para varios propósitos, incluyendo:

- Evaluación y optimización de la trayectoria del pozo.
- Ajustar la trayectoria del pozo para minimizar los efectos locales como cargas normales excesivas.
- La identificación de la capacidad y limitaciones de profundidad o alcance para la perforación y corridas de las tuberías de revestimiento.
- Identificación de los requerimientos del equipo de perforación para torque y arrastre.

Los modelos de torque y arrastre más utilizados en la industria petrolera están basados en los modelos de "sarta suave" desarrollados por Johancsik¹⁷ en 1983. En los que se hacen las siguientes suposiciones:

- La fricción es producto de la fuerza normal y el coeficiente de fricción.
- La fuerza normal tiene dos componentes
 - a) el peso de la tubería, afectado por el factor de flotación.
 - b) la fuerza lateral, resultado de la tensión de la sarta de perforación a través de la sección curva del pozo.

El diseño del pozo debe incluir la predicción de torque y arrastre con el peor factor de fricción que se pudiera presentar, esto para asegurar el avance y rotación de la sarta de perforación. Predicciones similares deben ser usadas para asegurar que la fricción no impedirá que se corra la tubería de revestimiento.

Una vez diseñada una trayectoria que presente valores mínimos de torque y arrastre, se deben calcular la tensión y compresión en cualquier punto de la sarta de perforación, para la trayectoria diseñada, y compararse con la torsión, la tensión y la capacidad de pandeo de la sarta, con el fin de evitar que esta falle en algún punto.

Los resultados de los análisis del torque y arrastre son expresados gráficamente, con torque y/o arrastre de la sarta de perforación en un eje y la profundidad en el otro, un ejemplo de esto lo podemos ver en la figura 4.1.

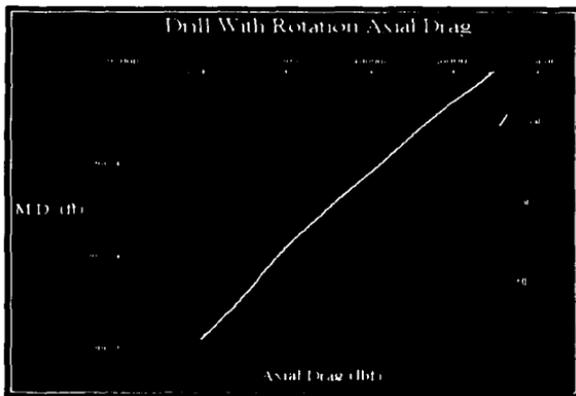


Figura 4. 1 Análisis del arrastre para un pozo

Durante la perforación, se deben llevar registros gráficos de torque y arrastre, los predichos y los reales. Dichos registros nos permitirán verificar y actualizar los

factores de fricción; si los factores de fricción reales son significativamente diferentes a los predichos, será necesario tomar las acciones adecuadas con el fin de prevenir o corregir problemas. Los registros también mostrarán el efecto que tienen sobre el torque y arrastre los cambios de barrena o la variación de otros parámetros; también revelará desgastes en las condiciones del pozo, como son la concentración de recortes, y características locales del pozo como cambios abruptos del ángulo de inclinación.

Entre las acciones tomadas durante la perforación para prevenir o corregir los problemas de torque y arrastre elevados, se pueden tener las siguientes:

- Mejorar la limpieza del agujero mediante elevados ritmos de bombeo o modificando la reología del fluido de perforación.
- Incrementar la rotación de la sarta ayudará en la limpieza del pozo.
- Hacer viajes cortos para reacondicionar el pozo.
- Cambiar el tipo de lodo.
- Si las acciones anteriores no dan buenos resultados, incluso se podrá cambiar el perfil del pozo rediseñándolo.

4.3 Análisis del arrastre que se presenta en el pozo

Aadnoy y Andersen¹⁹ presentaron en 2001 unas ecuaciones para el cálculo de la fuerza de arrastre de acuerdo a las diferentes trayectorias que puede tomar un pozo. Estas ecuaciones están basadas en el modelo de "sarta suave". Esta fuerza se presenta entre la sarta de perforación y las paredes del pozo cuando se está introduciendo o sacando la sarta del pozo sin que se tenga rotación en ésta.

El arrastre total a lo largo del pozo se puede obtener sumando el arrastre que se tiene en cada una de sus secciones (sección tangente, de incremento continuo, etc.), el análisis debe hacerse a partir del fondo del pozo.

Debido a que las fuerzas actúan de manera diferente en cada caso, Aadnoy y Andersen¹⁹ realizaron un análisis para cuando la sarta se esté sacando del pozo, posteriormente lo hicieron para cuando la sarta se introduce, para cada una de las secciones del pozo

4.3.1 Análisis de la fuerza de arrastre en las diferentes secciones de un pozo.

Para poder realizar el análisis de las fuerzas que actúan en la sarta de perforación es necesario apoyarnos en un diagrama de fuerzas y hacer su correspondiente equilibrio. Para facilitar el estudio dividiremos el pozo en secciones según la geometría que toma.

4.3.1.1 Secciones rectas

a) Secciones inclinadas

La figura 4.2 muestra las fuerzas que actúan sobre la sarta de perforación en secciones inclinadas cuando la sarta es desplazada hacia arriba.

$$F_2 = F_1 + w_{TP} L_{sc} (\cos\theta + \mu \operatorname{sen}\theta) \quad 4.1$$

Esta es la ecuación para calcular el arrastre en secciones inclinadas cuando la sarta se desplaza hacia arriba.

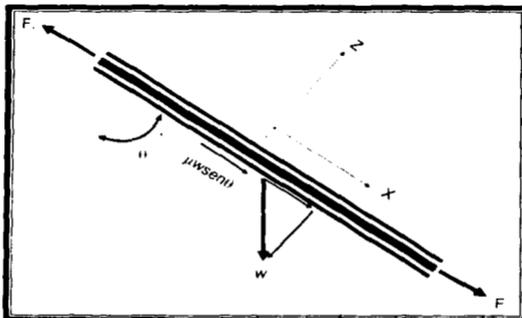


Figura 4.2 Fuerzas que actúan sobre una sarta inclinada

Para cuando la sarta se este desplazando hacia abajo en una sección inclinada la fuerza de fricción actúa en el sentido opuesto al movimiento, por lo que la ecuación para el arrastre queda como sigue:

$$F_2 = F_1 + w_{TP} L_{sc} (\cos\theta - \mu \sin\theta) \quad 4.2$$

4.3.1.2 Secciones Curvas

a) Sección de incremento continuo de ángulo

La figura 4.3 muestra las fuerzas que actúan sobre la TP, lo que permite analizar el comportamiento de las fuerzas en la sección en la que se construye el ángulo. Para el caso en que la sarta se este desplazando hacia arriba, $F_2 > F_1$, se tienen la siguiente ecuación para calcular el arrastre en esta sección.

$$F_2 = e^{-\mu\theta} (F_1 - w_{TP} R \sin\theta) \quad 4.3$$

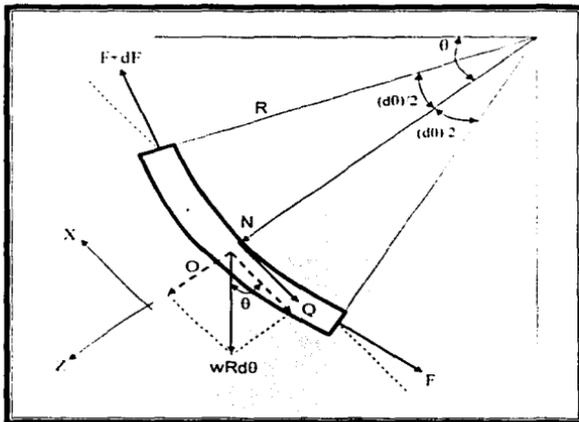


Figura 4.3 Fuerzas actuando sobre un elemento de tubería en una sección de incremento de ángulo (desplazándose hacia arriba).

El siguiente caso es para cuando la sarta se desplace hacia abajo, es decir $F_1 > F_2$, (figura 4.4). La siguiente ecuación sirve para calcular la fuerza necesaria para que la sarta se desplace hacia abajo en una sección de incremento de ángulo.

$$F_2 = F_1 e^{\mu\theta} + \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} [(2\mu\mu\cos\theta + (1 - \mu^2)\text{sen}\theta)e^{\mu\theta} - 2\mu] \quad 4.4$$

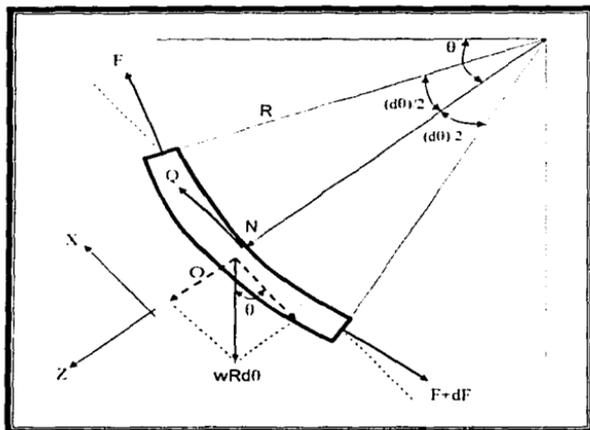


Figura 4.4 Fuerzas actuando sobre un elemento de tubería en una sección de incremento de ángulo (desplazándose hacia abajo).

b) Sección de decremento continuo de ángulo

De la figura 4.5, se puede llegar a la ecuación, que representa el caso en que la sarta se este desplazando hacia arriba, es decir $F_2 > F_1$, en una sección de decremento de ángulo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$F_2 = F_1 e^{-\mu\theta} + \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} [2\mu\mu c\theta + (1 - \mu^2) \text{sen } \theta - 2\mu e^{-\mu\theta}] \quad 4.5$$

Esta es la ecuación para calcular la fuerza necesaria para que la sarta se desplace hacia arriba en una sección de decremento de ángulo.

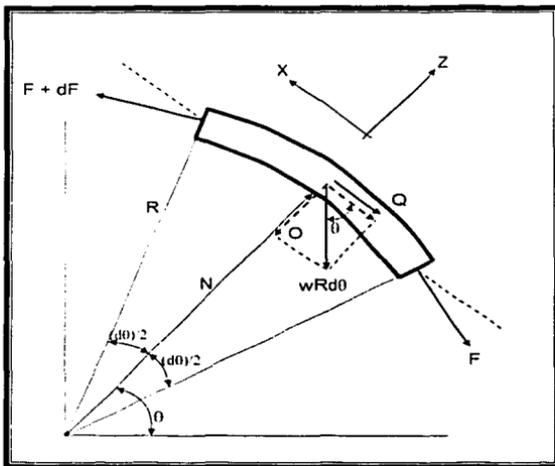


Figura 4.5 Fuerzas actuando sobre un elemento de tubería en una sección de decremento de ángulo (desplazándose hacia arriba).

La siguiente ecuación es para el caso en que la sarta se desplace hacia abajo, es decir $F_1 > F_2$. (figura 4.6), y la ecuación es la siguiente:

$$F_2 = e^{-\mu\theta} (F_1 + w_{TP} R \text{sen } \theta) \quad 4.6$$

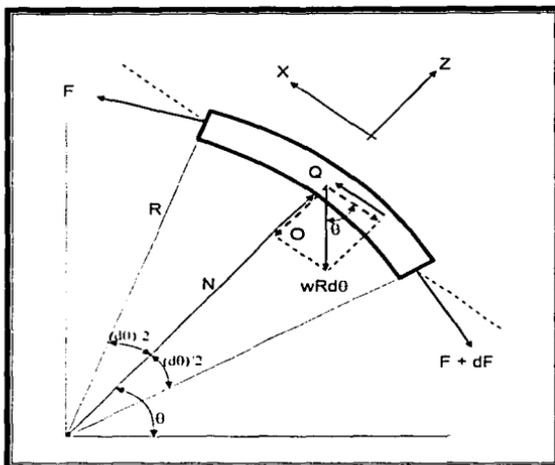


Figura 4.6 Fuerzas actuando sobre un elemento de tubería en una sección e decremento de ángulo (desplazándose hacia arriba).

4.3.1.3 Sección Catenaria

Idealmente, un pozo con una trayectoria catenaria no presenta fuerzas de fricción entre la tubería de perforación y las paredes del pozo, sin embargo, cuando la tubería se baja o se sube, sí existe contacto entre las paredes del pozo y la tubería, por lo tanto también hay fricción. Este contacto se debe a la sección de incremento continuo que se necesita para construir el ángulo de entrada a la catenaria.

Al momento de subir o bajar la sarta se tendrá una fuerza de fricción. Suponiendo que la fuerza adicional en el fondo del pozo es ΔF , si la sarta de perforación permanece constante, la fuerza adicional se verá reflejada en la cima de la sección de la catenaria.

La fuerza normal causada por esta fuerza adicional se puede calcular de la siguiente forma:

$$\Delta N = \left(\frac{d\alpha}{ds} \right) \Delta F$$

El arrastre en la cima de la catenaria se puede calcular con la siguiente ecuación

$$\Delta F_{cut} = \int \mu \Delta N ds = \mu \int \left(\frac{d\alpha}{ds} \right) \Delta F ds$$

$$\Delta F_{cut} = \mu \Delta F \tan^{-1} \left(\frac{ws + F_1 \cos \theta}{F_1 \sin \theta} \right)$$

La fuerza de arrastre en la parte superior de la catenaria esta dada finalmente por la siguiente expresión

$$F = F_{cut} + F_2 \quad 4.7$$

Para cuando la sarta se esta desplazando hacia abajo podemos calcular el arrastre con la siguiente ecuación

$$F = F_1 - F_{cut} \quad 4.8$$

4.3.2 Arrastre total para cada tipo de trayectoria

Con la suma de resultados parciales de arrastre de cada sección, podemos calcular el arrastre total en el pozo para las diferentes trayectorias. La carga real que registra el equipo de perforación es la suma del arrastre (la fuerza de fricción entre la sarta y las paredes del pozo) y la fuerza de fricción entre el fluido de perforación, los recortes y la sarta. Sin embargo aquí solo se considerará la fuerza de arrastre.

4.3.2.1 Arrastre para la trayectoria Incrementar- Mantener Disminuir

| Magnitud de la Fuerza en: | Ecuación con que se calcula el arrastre |
|--|---|
| <i>Mientras la sarta está siendo sacada</i> | |
| La barrena | 0 |
| Al inicio de la sección de decremento de ángulo | $F_2 = F_1 e^{-\mu\theta} + \frac{w_{TP}R}{\mu^2 + 1} [2\mu \cos\theta + (1 - \mu^2) \text{sen}\theta + 2\mu e^{-\mu\theta}]$ |
| Al final de la sección de construcción de ángulo | $F_3 = F_2 + w_{TP}L_{sec} (\cos\theta - \mu \text{sen}\theta)$ |
| En el KOP | $F_4 = F_3 e^{-\mu\theta} - \frac{w_{TP}R}{\mu^2 + 1} [(2\mu \cos\theta - (1 - \mu^2) \text{sen}\theta) e^{-\mu\theta} + 2\mu]$ |
| En la cima del pozo | $F_5 = F_4 + w_{TP}L_{KOP}$ |
| <i>Mientras la sarta está siendo introducida</i> | |
| La barrena | 0 |
| Al inicio de la sección de decremento de ángulo | $F_2 = e^{-\mu\theta} (F_1 + w_{TP}R \text{sen}\theta)$ |
| Al final de la sección de construcción de ángulo | $F_3 = F_2 + w_{TP}L_{sec} (\cos\theta - \mu \text{sen}\theta)$ |
| En el KOP | $F_4 = F_3 e^{\mu\theta} + \frac{w_{TP}R}{\mu^2 + 1} [(2\mu \cos\theta + (1 - \mu^2) \text{sen}\theta) e^{\mu\theta} - 2\mu]$ |
| En la cima del pozo | $F_5 = F_4 + w_{TP}L_{KOP}$ |

4.3.2.2 Arrastre para la trayectoria incremental mantener

| Magnitud de la Fuerza en: | Ecuación con que se calcula el arrastre |
|--|--|
| <u>Mientras la sarta está siendo sacada</u> | |
| La barrena | 0 |
| Al final del BHA | $F_1 = w_{BHA} L_{BHA} (\cos\theta + \mu \operatorname{sen}\theta)$ |
| Al final de la sección de construcción de ángulo | $F_2 = (w_{BHA} L_{BHA} + w_{TP} L_{TP}) (\cos\theta + \mu \operatorname{sen}\theta)$ |
| En el KOP | $F_3 = e^{-\mu\theta} (F_2 - w_{TP} R \operatorname{sen}\theta)$ |
| En la cima del pozo | $F_4 = F_3 + w_{TP} L_{KOP}$ |
| <u>Mientras la sarta esta siendo introducida</u> | |
| La barrena | 0 |
| Al final del BHA | $F_1 = w_{BHA} L_{BHA} (\cos\theta - \mu \operatorname{sen}\theta)$ |
| Al final de la sección de construcción de ángulo | $F_2 = (w_{BHA} L_{BHA} + w_{TP} L_{TP}) (\cos\theta - \mu \operatorname{sen}\theta)$ |
| En el KOP | $F_3 = F_2 e^{\mu\theta} + \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} [(2\mu \cos\theta + (1 - \mu^2) \operatorname{sen}\theta) e^{\mu\theta} - 2\mu]$ |
| En la cima del pozo | $F_4 = F_3 + w_{TP} L_{KOP}$ |

4.3.2.3 Arrastre para la trayectoria Incrementar- Mantener- Disminuir
Parcialmente- Mantener

| Magnitud de la Fuerza en: | Ecuación con que se calcula el arrastre |
|--|---|
| <u>Mientras la sarta está siendo sacada</u> | |
| La barrena | 0 |
| Al final de la sección de BHA | $F_1 = w_{BH1} L_{BH1} (\cos \theta_2 + \mu \operatorname{sen} \theta_2)$ |
| Al final de la sección de decremento parcial de ángulo | $F_2 = (w_{BH1} L_{BH1} + w_{TP} L_{TP}) (\cos \theta_2 + \mu \operatorname{sen} \theta_2)$ |
| Al inicio de la sección de decremento de ángulo | $F_2 = F_1 e^{\mu(\theta_1 - \theta_2)} + \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} \times$ $\times [2\mu \cos \theta_1 + (1 - \mu^2) \operatorname{sen} \theta_1 - e^{\mu(\theta_1 - \theta_2)} (2\mu \cos \theta_2 + (1 - \mu^2) \operatorname{sen} \theta_2)]$ |
| Al final de la sección de construcción de ángulo | $F_3 = F_2 + w_{TP} L_{sc} (\cos \theta - \mu \operatorname{sen} \theta)$ |
| En el KOP | $F_4 = F_3 e^{-\mu \theta} - \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} [(2\mu \cos \theta - (1 - \mu^2) \operatorname{sen} \theta) e^{-\mu \theta} + 2\mu]$ |
| En la cima del pozo | $F_5 = F_4 + w_{TP} L_{KOP}$ |
| <u>Mientras la sarta está siendo introducida</u> | |
| La barrena | 0 |
| Al final de la sección de BHA | $F_1 = w_{BH1} L_{BH1} (\cos \theta_2 + \mu \operatorname{sen} \theta_2)$ |
| Al final de la sección de decremento parcial de ángulo | $F_2 = (w_{BH1} L_{BH1} + w_{TP} L_{TP}) (\cos \theta_2 + \mu \operatorname{sen} \theta_2)$ |
| Al inicio de la sección de decremento de ángulo | $F_3 = F_2 e^{\mu(\theta_1 - \theta_2)} + w_{TP} R (e^{\mu(\theta_1 - \theta_2)} \operatorname{sen} \theta_1 - \operatorname{sen} \theta_2)$ |
| Al final de la sección de construcción de ángulo | $F_4 = F_3 + w_{TP} L_{sc} (\cos \theta_1 - \mu \operatorname{sen} \theta_1)$ |
| En el KOP | $F_5 = F_4 e^{\mu \theta} + \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} [(2\mu \cos \theta_1 + (1 - \mu^2) \operatorname{sen} \theta_1) e^{\mu \theta} - 2\mu]$ |
| En la cima del pozo | $F_6 = F_5 + w_{TP} L_{KOP}$ |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3.2.4 Arrastre para la trayectoria Incremento continuo

| Magnitud de la Fuerza en: | Ecuación con que se calcula el arrastre |
|--|---|
| <u>Mientras la sarta está siendo sacada</u> | |
| La barrena | 0 |
| En el KOP | $F_2 = F_1 e^{-\mu x} - \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} \left[(2\mu \cos \theta - (1 - \mu^2) \sec \theta) e^{-\mu x} + 2\mu \right]$ |
| En la cima del pozo | $F_3 = F_2 + w_{TP} L_{KOP}$ |
| <u>Mientras la sarta esta siendo introducida</u> | |
| La barrena | 0 |
| En el KOP | $F_2 = F_1 e^{\mu x} + \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} \left[(2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sec \theta) e^{\mu x} - 2\mu \right]$ |
| En la cima del pozo | $F_3 = F_2 + w_{TP} L_{KOP}$ |

4.3.2.5 Arrastre total para la trayectoria Catenaria

| Magnitud de la Fuerza en: | Ecuación con que se calcula el arrastre |
|---|---|
| <u>Mientras la sarta está siendo sacada</u> | |
| La barrena | 0 |
| Al inicio de la catenaria | $F_2 = \mu \Delta F \tan^{-1} \left(\frac{ws + F_1 \cos \theta}{F_1 \sin \theta} \right) + ws$ |
| En el KOP | $F_3 = F_2 e^{-\mu x} - \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} \left[(2\mu \cos \theta - (1 - \mu^2) \sec \theta) e^{-\mu x} + 2\mu \right]$ |
| En la cima del pozo | $F_4 = F_3 + w_{TP} L_{KOP}$ |
| <u>Mientras la sarta está siendo sacada</u> | |
| La barrena | 0 |
| Al inicio de la catenaria | $F_2 = ws - \mu \Delta F \tan^{-1} \left(\frac{ws + F_1 \cos \theta}{F_1 \sin \theta} \right)$ |
| En el KOP | $F_3 = F_2 e^{\mu x} + \frac{w_{TP} R}{\mu^2 + 1} \left[(2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sec \theta) e^{\mu x} - 2\mu \right]$ |
| En la cima del pozo | $F_4 = F_3 + w_{TP} L_{KOP}$ |

Para obtener mejores resultados en la predicción del arrastre es conveniente que los factores de fricción utilizados en estas ecuaciones sean obtenidos de casos históricos similares.

El peso de la sarta es el peso unitario, w , multiplicado por la longitud, L . Es importante recordar que el peso de la sarta debe ser afectado por el factor de flotación β .

El factor de flotación está dado por la siguiente ecuación:

$$\beta = 1 - \frac{\rho_{\text{fluido}}}{\rho_{\text{tubería}}}$$

4.4 Análisis del torque que se presenta en el pozo

El torque que se genera debido a la fricción se puede calcular como la fuerza normal multiplicada por el radio de la tubería.

$$T = \mu r N$$

El siguiente análisis es para una tubería que se mantiene girando sin ningún otro movimiento, es decir que no se actuó sobre ella una fuerza ascendente o descendente.

La fuerza de torque que genera dicho movimiento se puede calcular de la siguiente forma

4.4.1 Torque en secciones rectas

a) Secciones inclinadas

Para poder calcular el torque en una sección inclinada, partiendo de su definición para encontrar el valor de la normal, tenemos lo siguiente

$$N = wL \sin \theta$$

Sustituyendo el valor de la fuerza normal en la definición de torque tendremos la expresión para calcularlo en secciones rectas inclinadas

$$T = \mu w L \sin \theta \quad 4.9$$

4.4.2 Torque en secciones curvas

El peso estático de la tubería en una sección curva se puede calcular con la siguiente expresión

$$wR(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$$

Con la expresión anterior y con ayuda de la siguiente figura podemos encontrar una expresión para la fuerza normal en secciones curvas

$$N = F_1 + wR(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$$

Aplicando la definición de torque e integrando desde el fondo de la sección hasta la cima podemos encontrar la expresión de torque en secciones curvas.

Para la sección de incremento de ángulo tenemos que el torque lo podemos calcular con la siguiente ecuación

$$T = \mu w [(F_1 + wR \sin \theta_1) \Delta \theta + wR(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)] \quad 4.10$$

De igual manera que para la sección de incremento se puede encontrar una expresión para el torque a lo largo de la sección en la que se disminuye el ángulo.

$$T = \mu w [(F_1 - wR \sin \theta_1) \Delta \theta - wR(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)] \quad 4.11$$

4.4.3 Torque en la sección de la catenaria modificada

$$\Delta T = \mu w \Delta F \tan^{-1} \left(\frac{ws + F_1 \cos \theta_1}{F_1 \sin \theta_1} \right)$$

4.5 Adaptación de las ecuaciones para la catenaria modificada

Las ecuaciones para la sección catenaria presentadas por Aadnoy y Andersen¹³ (ecuaciones 3.3 y 3.4) consideran el punto de inicio de construcción de la catenaria al final de esta sección (en el fondo o parte baja del pozo), lo que dificulta el cálculo en el diseño del pozo en su aplicación, ya que convencionalmente éste se diseña de arriba hacia abajo.

Para facilitar el diseño de la sección catenaria, en el presente trabajo se ha cambiado el punto de inicio de construcción a la parte superior de la misma (ver Apéndice A). Las siguientes ecuaciones nos representan lo anterior:

$$z = \frac{T_0 \sin \theta}{w} \left[\cos h \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} (x - D_{cut}) + \sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) \right] - \cos h \left[\sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) - \frac{w}{T_0 \sin \theta} D_{cut} \right] \right] \quad 4.12$$

$$s = \frac{T_0 \sin \theta}{w} \left[\sinh \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} (x - D_{cut}) + \sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) \right] - \sinh \left[\sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) - \frac{w}{T_0 \sin \theta} D_{cut} \right] \right] \quad 4.13$$

Es importante conocer el ángulo de inclinación en cualquier punto de esta sección, para lo cual podemos emplear la siguiente ecuación:

$$\theta = 90^\circ + \tan^{-1} \left[\sinh \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} (x - D_{cut}) + \sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) \right] \right] \quad 4.14$$

4.6 Procedimiento propuesto para el cálculo de la sección catenaria

Para poder encontrar los parámetros que nos definen una trayectoria de tipo catenaria, ecuaciones 4.12 y 4.13, es necesario contar con la siguiente información:

- Coordenadas superficiales.
- Coordenadas del objetivo.
- Punto de inicio de desvío (KOP).
- Peso unitario del aparejo de perforación (multiplicado por el factor de flotación).
- Ángulo al final de la sección catenaria.

Con esta información el procedimiento para encontrar la tensión al fondo de la curva, T_0 , y la longitud de la sección, s , es el siguiente:

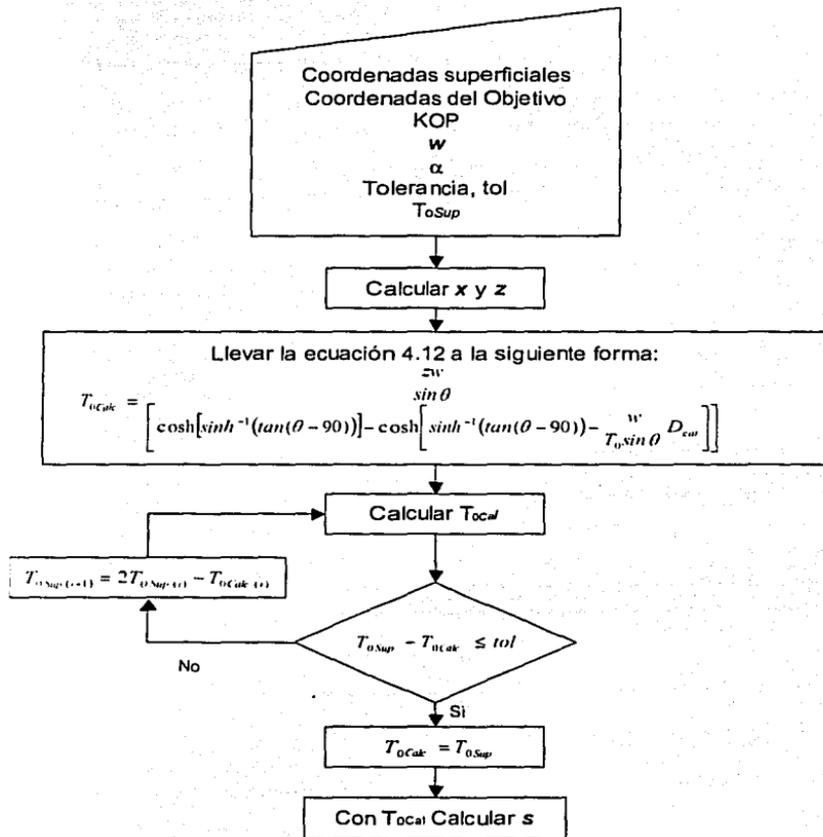
1. Con las coordenadas superficiales y las del objetivo encontrar el valor del desplazamiento horizontal (D_{cat}).
2. A partir de las coordenadas del KOP y las del objetivo encontrar el valor de z .
3. Llevar la ecuación 4.12 a la siguiente forma

$$T_{w_{cat}} = \left[\cosh[\sinh^{-1}(\tan(\theta - 90))] - \cosh \left[\overset{=w}{\sin \theta} \sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) - \frac{w}{T_0 \sin \theta} D_{cat} \right] \right]$$

4. Fijar una tolerancia, Tol.
5. Introducir un T_{0Sup} , y con este calcular T_{0Calc}
6. Hacer la diferencia de $(T_{0Sup} - T_{0Calc})$
7. Si $T_{0Sup} - T_{0Calc} \leq tol$, entonces $T_{0cat} = T_{0Sup}$
8. De lo contrario el nuevo T_{0Sup} será como sigue $T_{0Sup(i+1)} = 2T_{0Sup(i)} - T_{0Calc(i)}$ y regresar al paso 5.
9. Con el T_0 que hemos encontrado y la ecuación 4.13 podemos calcular la longitud de la sección catenaria, s .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El siguiente diagrama de flujo ilustra el procedimiento anterior:



4.7 Ejemplo de Aplicación del Método de la Catenaria

Se requiere perforar un pozo. El pozo tendrá un alcance horizontal de 1746.5 m. El ángulo al fondo del pozo es de 90° . Se planea perforar el pozo con un motor de fondo y la sarta de perforación estará sin rotación, por lo tanto la sarta de perforación deberá ser capaz de deslizarse a través del pozo. Para minimizar la fricción entre la sarta de perforación y el agujero se perforará siguiendo una trayectoria de tipo catenaria desde una profundidad vertical de 1000 hasta 3000 metros, el peso de la tubería de perforación es de 0.25 kN/m, (ya esta afectado por el factor de flotación).

Solución:

Para poder determinar la trayectoria que seguirá dicho pozo es necesario encontrar todos los parámetros que aparecen en las ecuaciones 4.1 y 4.2. De la información que tenemos podemos encontrar de manera directa todos los parámetros, menos la tensión al fondo de la catenaria, T_0 , para ello usaremos el método descrito en la sección 4.3 del presente Capítulo.

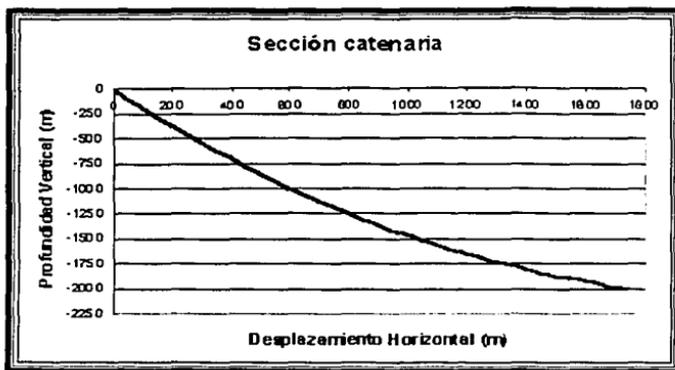
| T_{0Sup} | T_{0Calc} |
|------------|-------------|
| 200.0000 | 143.1294 |
| 256.8706 | 273.5605 |
| 240.1807 | 231.4123 |
| 248.9490 | 253.1623 |
| 244.7358 | 242.6022 |
| 246.8694 | 247.9247 |
| 245.8141 | 245.2857 |
| 246.3425 | 246.6055 |
| 246.0795 | 245.9482 |
| 246.2108 | 246.2763 |
| 246.1671 | 246.1670 |

Con una tolerancia de 1×10^{-4} encontramos que el valor de la tensión es de 246.1671 kN. La tabla anterior muestra los valores que se obtuvieron.

Una vez que tenemos todos los parámetros, podemos calcular la trayectoria, para ello introduciremos pequeños incrementos de x en la ecuación 4.1, así encontraremos el respectivo valor de z . Lo mismo se hará con la ecuación 4.2, para encontrar el valor de s y con la ecuación 4.3 para 0.

| x | z | S | 0 |
|--------|----------|---------|-------|
| 0 | 0.00 | 0.00 | 19.26 |
| 50 | -139.28 | 147.99 | 20.25 |
| 100 | -271.23 | 289.09 | 21.28 |
| 150 | -396.18 | 423.68 | 22.36 |
| 200 | -514.45 | 552.09 | 23.49 |
| 250 | -626.35 | 674.65 | 24.68 |
| 300 | -732.17 | 791.69 | 25.92 |
| 350 | -832.18 | 903.51 | 27.22 |
| 400 | -926.64 | 1010.39 | 28.58 |
| 450 | -1015.79 | 1112.60 | 30.01 |
| 500 | -1099.87 | 1210.42 | 31.50 |
| 550 | -1179.08 | 1304.10 | 33.05 |
| 600 | -1253.64 | 1393.87 | 34.67 |
| 650 | -1323.73 | 1479.97 | 36.36 |
| 700 | -1389.54 | 1562.63 | 38.12 |
| 750 | -1451.23 | 1642.04 | 39.95 |
| 800 | -1508.97 | 1718.42 | 41.86 |
| 850 | -1562.90 | 1791.97 | 43.83 |
| 900 | -1613.17 | 1862.88 | 45.89 |
| 950 | -1659.90 | 1931.32 | 48.01 |
| 1000 | -1703.21 | 1997.47 | 50.21 |
| 1050 | -1743.22 | 2061.51 | 52.48 |
| 1100 | -1780.03 | 2123.60 | 54.83 |
| 1150 | -1813.73 | 2183.91 | 57.24 |
| 1200 | -1844.41 | 2242.57 | 59.72 |
| 1250 | -1872.15 | 2299.76 | 62.26 |
| 1300 | -1897.02 | 2355.61 | 64.87 |
| 1350 | -1919.09 | 2410.26 | 67.53 |
| 1400 | -1938.40 | 2463.87 | 70.24 |
| 1450 | -1955.02 | 2516.56 | 73.00 |
| 1500 | -1968.98 | 2568.48 | 75.80 |
| 1550 | -1980.33 | 2619.76 | 78.64 |
| 1600 | -1989.08 | 2670.52 | 81.51 |
| 1650 | -1995.27 | 2720.91 | 84.39 |
| 1700 | -1998.90 | 2771.05 | 87.30 |
| 1725 | -1999.76 | 2796.06 | 88.75 |
| 1746.5 | -2000.00 | 2817.56 | 90.00 |

Con estos valores podemos graficar la sección de la catenaria.



Gráfica 4. 1 Sección catenaria del ejemplo

4.8 Análisis comparativo del torque y arrastre en diferentes trayectorias con el empleo de un software comercial

Durante el diseño de un pozo se pueden proponer diferentes trayectorias para alcanzar un objetivo desde una misma localización superficial. Entre los factores que ayudan a determinar la trayectoria final del pozo se encuentran los esfuerzos a los que se somete la tubería de perforación y el aparejo de fondo durante la perforación y los viajes de entrada y salida a que estos se someten.

Para determinar los esfuerzos a los que se somete la sarta de perforación se realizó un estudio entre tres trayectorias con las que se puede diseñar un pozo direccional con la finalidad de comparar en cual de ellas se presentan los menores esfuerzos. Para la realización del estudio se utilizó un software comercial, el cual emplea un modelo de torque y arrastre basado en los modelos de "sarta suave" desarrollados por Johancsik y Dawson en 1983.

4.8.1 Primer caso

La primer situación se diseño con un ángulo de entrada al objetivo de 20° , un punto de inicio de desvió de ángulo de 1,000 metros, ubicando el objetivo a un desplazamiento horizontal de 1,000 metros con una profundidad de 4,000 metros. Se empleo el mismo factor de fricción y las mismas características de las sarta de perforación para todas las trayectorias.

Se diseño una trayectoria tipo incrementar mantener (tipo "J").

| s (m) | θ ($^\circ$) | z (m) | x (m) |
|---------|-----------------------|---------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1000 | 0 | 1000 | 0 |
| 2909.79 | 30 | 2823.72 | 488.66 |
| 3259.79 | 30 | 3126.83 | 663.66 |
| 3459.8 | 20 | 3307.87 | 748.08 |
| 4196.36 | 20 | 4000 | 1000 |

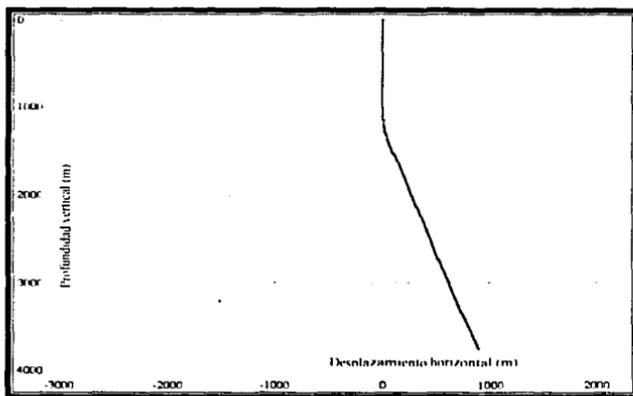


Figura 4.7 Trayectoria tipo "J" con un ángulo de entrada al objetivo de 20°

Para esta trayectoria se calculó el torque y el arrastre que se presenta en la sarta de perforación a lo largo del pozo durante la perforación.

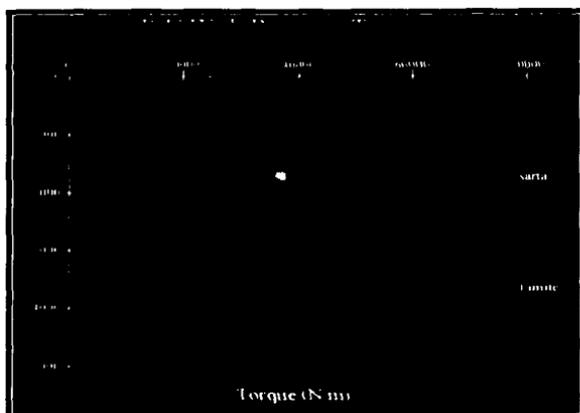


Figura 4.8 Torque que se presenta en la trayectoria tipo "J"

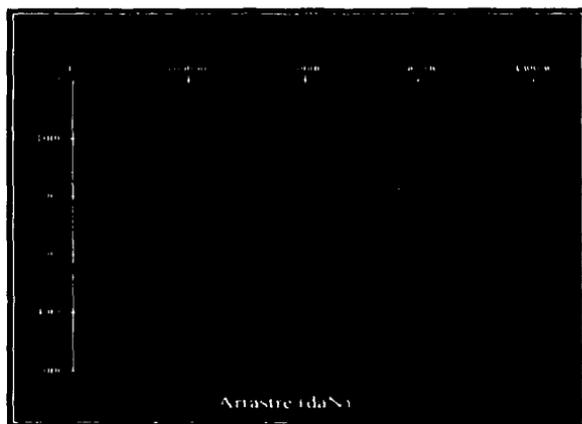


Figura 4.9 Arrastre que se presenta en la trayectoria tipo "J"

Para la trayectoria "S" tenemos los siguientes datos

| s (m) | θ (°) | z (m) | x (m) |
|---------|--------------|---------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1000 | 0 | 1000 | 0 |
| 2909.79 | 30 | 2823.72 | 488.66 |
| 3259.79 | 30 | 3126.83 | 663.66 |
| 3459.8 | 20 | 3307.87 | 748.08 |
| 4196.36 | 20 | 4000 | 1000 |

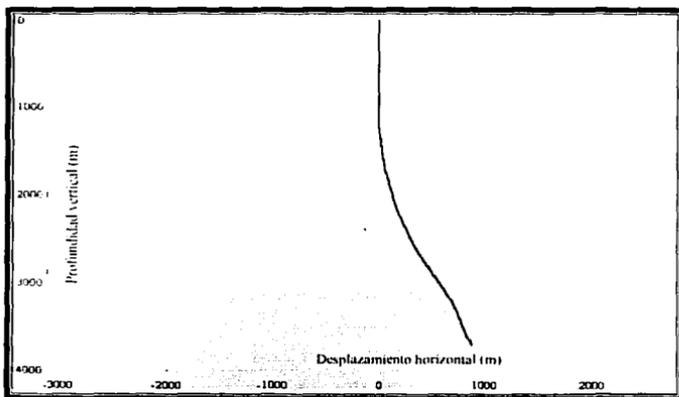


Figura 4.10 Trayectoria "S" con un ángulo de entrada al objetivo de 20°

Se calculó el torque y el arrastre que se presenta en la sarta de perforación para esta trayectoria a lo largo del pozo durante la perforación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

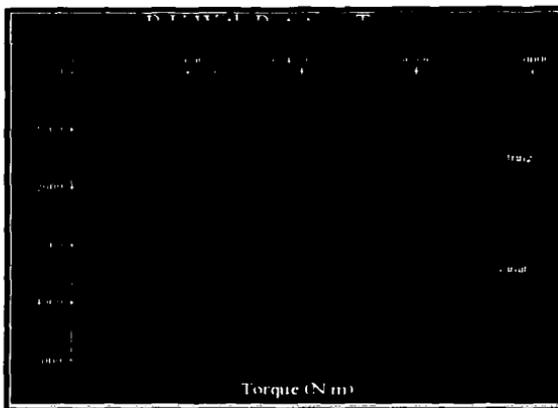


Figura 4.11 Torque en la trayectoria "S"



Figura 4.12 Arrastre en la trayectoria "S"

El diseño de la trayectoria tipo catenaria se realizó con las ecuaciones 4.12, 4.13 y 4.14, empleando la condición de entrada de la sección 3.5 del presente trabajo.

| S= | (H= | Z= | X= |
|---------|-------|----------|---------|
| 0 00 | 0 00 | 0 00 | 0 00 |
| 1000 00 | 0 00 | -1000 00 | 0 00 |
| 1364 16 | 17 62 | -1358 45 | 55 56 |
| 1545 86 | 17 99 | -1708 31 | 111 11 |
| 1635 35 | 18 18 | -1793 38 | 138 89 |
| 1898 53 | 18 75 | -2043 02 | 222 22 |
| 1984 52 | 18 94 | -2124 40 | 250 00 |
| 2069 66 | 19 14 | -2204 88 | 277 78 |
| 2237 42 | 19 54 | -2363 17 | 333 33 |
| 2482 90 | 20 15 | -2594 07 | 416 67 |
| 2721 21 | 20 79 | -2817 33 | 500 00 |
| 2952 58 | 21 44 | -3033 18 | 583 33 |
| 3323 42 | 22 57 | -3377 02 | 722 22 |
| 3395 45 | 22 80 | -3443 47 | 750 00 |
| 3537 42 | 23 27 | -3574 12 | 805 56 |
| 3607 38 | 23 51 | -3638 33 | 833 33 |
| 3745 29 | 24 00 | -3764 56 | 888 89 |
| 3947 26 | 24 75 | -3948 53 | 972 22 |
| 4013 30 | 25 00 | -4000 00 | 1000 00 |

Se calculó el torque y el arraste que se presenta en la sarta de perforación en la trayectoria catenaria a lo largo del pozo durante la perforación.



Figura 4.13 Torque en la trayectoria catenaria



Figura 4.14 Arrastre en la trayectoria catenaria

Comparando el torque que se presenta en cada una de las trayectorias podemos observar que la que presenta el menor es la trayectoria tipo "S". La trayectoria catenaria presenta el mayor torque de las tres, sin embargo podemos observar que más de la mitad de éste se presenta en la sección de incremento continuo, que comparativamente es una sección pequeña del pozo (menor al 10%). En la sección propiamente catenaria se pueden observar valores muy bajos de torque.

En lo que al arrastre respecta, se puede observar que no hay diferencia significativa entre las tres trayectorias, presentando cada una de ellas valores entre los 300,000 (daN).

4.8.2 Segundo caso

El segundo caso se diseño con un ángulo de entrada al objetivo de 60°, un desplazamiento horizontal de 1500 metros a una profundidad de 4000 metros. De igual manera se considero un mismo factor de fricción y características de la sarta

de perforación iguales, es decir la única variable fue la trayectoria que tomo el pozo.

Para la trayectoria tipo "J" se tiene lo siguiente

| s (m) | θ (°) | z (m) | x (m) |
|--------|--------------|---------|---------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1000 | 0 | 1000 | 0 |
| 4258.8 | 60 | 3861.17 | 1333.15 |
| 4475.6 | 60 | 4000 | 1500 |

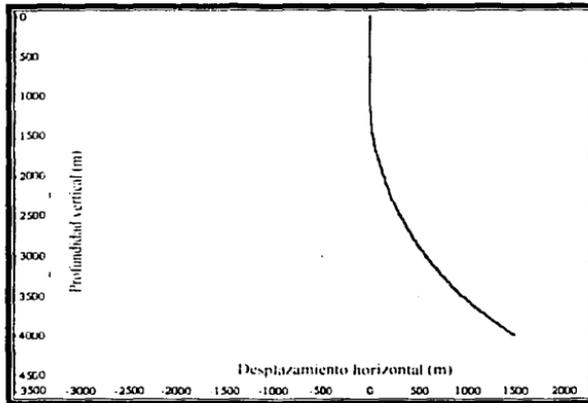


Figura 4.15 Trayectoria tipo "J" con un ángulo de entrada al objetivo de 60°

Los valores de torque y arrastre que se obtuvieron en esta trayectoria se presentan a continuación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

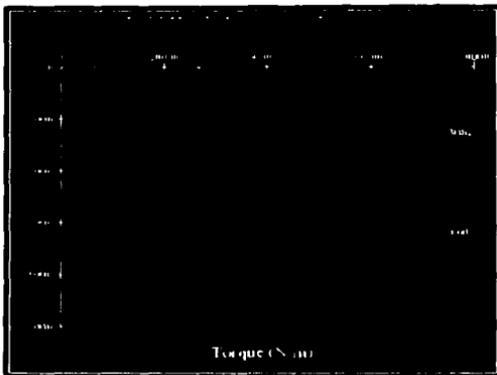


Figura 4.16 Torque en la trayectoria tipo "J" con un ángulo de entrada al objetivo de 60°



Figura 4.17 Arrastre en la trayectoria tipo "J" con un ángulo de entrada al objetivo de 60°

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para la trayectoria tipo "S" tenemos lo siguiente)

| s (m) | θ (°) | z (m) | x (m) |
|---------|--------------|---------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1000 | 0 | 1000 | 0 |
| 3328.57 | 75 | 3096.45 | 868.38 |
| 3403.57 | 75 | 3149.48 | 921.41 |
| 3986.07 | 60 | 3610.29 | 1275 |
| 4436.07 | 60 | 4000 | 1500 |

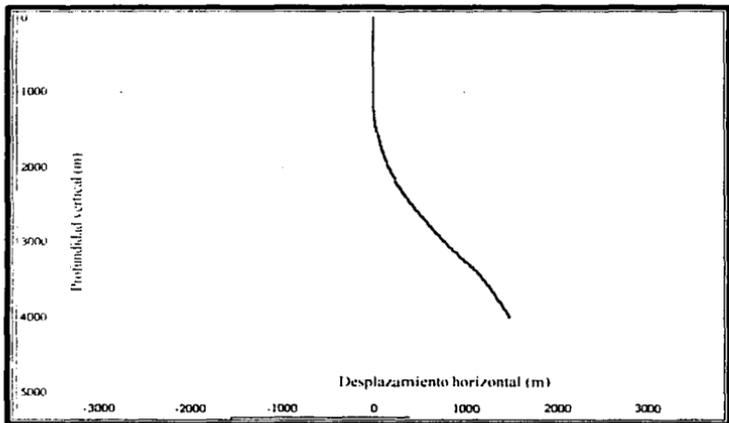


Figura 4.18 Trayectoria tipo "S" con un ángulo de entrada al objetivo de 60°

Los valores de torque y arrastre que presenta esta trayectoria se presentan a continuación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

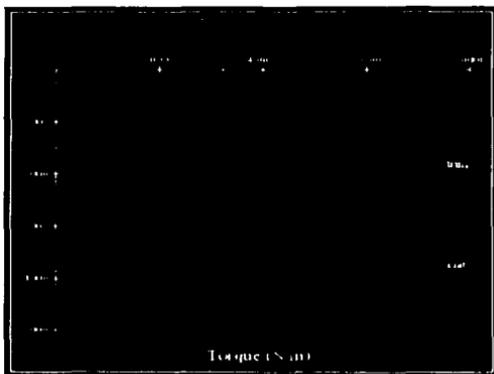


Figura 4.29 Torque en la trayectoria tipo "S" con un ángulo de entrada al objetivo de 60°

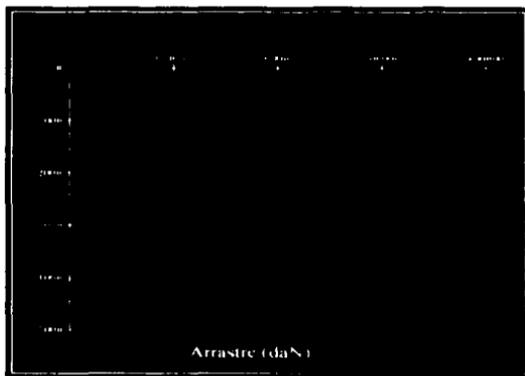


Figura 4.30 Arrastre en la trayectoria tipo "S" con un ángulo de entrada al objetivo de 60°

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El diseño de la trayectoria tipo catenaria se realizó con las ecuaciones 4.12, 4.13 y 4.14, empleando la condición de entrada de la sección 3.5 del presente trabajo.

| S= | (l)= | Z= | X= |
|---------|-------|----------|---------|
| 1000.00 | 0.00 | -1000.00 | 0.00 |
| 1522.22 | 18.44 | -1513.24 | 83.33 |
| 1651.61 | 19.13 | -1895.66 | 125.00 |
| 2013.59 | 21.35 | -2235.35 | 250.00 |
| 2126.08 | 22.14 | -2339.84 | 291.67 |
| 2234.74 | 22.96 | -2440.19 | 333.33 |
| 2339.74 | 23.81 | -2536.57 | 375.00 |
| 2441.21 | 24.69 | -2629.09 | 416.67 |
| 2539.30 | 25.60 | -2717.89 | 458.33 |
| 2634.14 | 26.54 | -2803.09 | 500.00 |
| 2900.50 | 29.55 | -3038.26 | 625.00 |
| 3064.15 | 31.73 | -3179.09 | 708.33 |
| 3217.74 | 34.05 | -3308.09 | 791.67 |
| 3431.11 | 37.81 | -3480.97 | 916.67 |
| 3498.09 | 39.14 | -3533.42 | 958.33 |
| 3626.43 | 41.91 | -3630.99 | 1041.67 |
| 3806.14 | 46.38 | -3760.05 | 1166.67 |
| 3862.97 | 47.94 | -3798.70 | 1208.33 |
| 4025.36 | 52.88 | -3902.27 | 1333.33 |
| 4127.61 | 56.37 | -3961.49 | 1416.67 |
| 4225.72 | 60.00 | -4013.24 | 1500.00 |

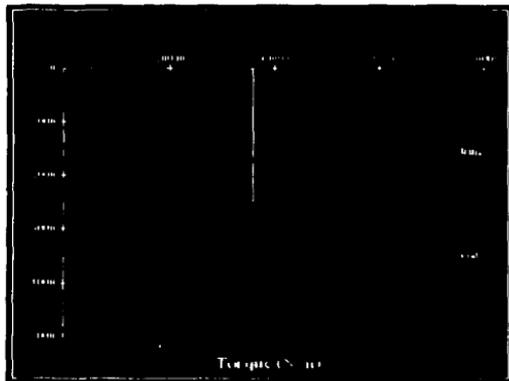


Figura 4.21 Torque en la trayectoria catenaria

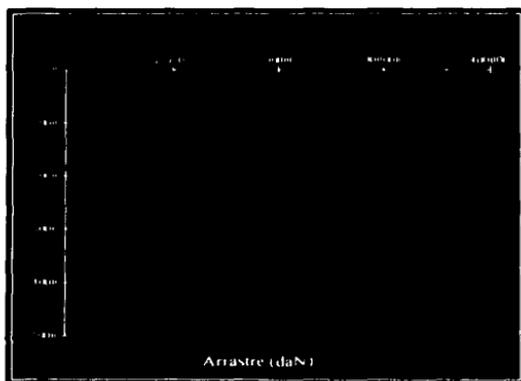


Figura 4.22 Arrastre en la trayectoria catenaria

Comparando el torque que se presenta en cada una de las trayectorias podemos observar que la que presenta el menor es la trayectoria tipo "J". La trayectoria catenaria presenta valores de torque ligeramente mayores que las otras trayectorias, sin embargo podemos observar que gran parte de este torque se presenta en la sección de incremento continuo. La sección de incremento continuo también presenta un ritmo de incremento de ángulo muy elevado. En la sección propiamente catenaria se pueden observar valores muy bajos de torque, por lo que de no tener necesidad de una sección de incremento continuo el valor del torque sería el más bajo.

De igual manera que en el caso anterior, en lo que a arrastre respecta, se puede observar que no hay diferencia significativa entre las tres trayectorias, presentando cada una de ellas valores entre los 300,000 (daN).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Cada día son más los yacimientos petroleros que requieren para su desarrollo de la tecnología de perforación direccional.
- Los pozos direccionales presentan un número adicional de problemas a los encontrados en pozos verticales. Estos problemas se relacionan con la trayectoria del pozo, ya que conforme el ángulo de inclinación se incrementa también lo hacen los problemas.
- Existen trayectorias que presentan mayores problemas que otras, por lo que es importante realizar un buen diseño de la trayectoria para minimizarlos.
- La curva catenaria aplicada al diseño de pozos direccionales representa una alternativa para disminuir los problemas de fricción que se presentan en trayectorias con elevados ritmos de incremento de ángulo.
- Debido a que la catenaria no es posible iniciarla desde la vertical, se vuelve necesario emplear una sección de incremento continuo para alcanzar el ángulo inicial de una catenaria.

- El ángulo de inicio de la sección catenaria esta en función del desplazamiento vertical y horizontal (ecuación 4.14), haciéndose menor (alrededor de 10°) cuando existe una relación de 2 a 1 entre los desplazamientos.
- La sección de incremento continuo necesaria para alcanzar el ángulo inicial de la catenaria se debe diseñar con un ritmo de incremento de ángulo bajo, con el fin de no incrementar el torque a lo largo de la trayectoria final.
- El torque y el arrastre que se presentan en los pozos direccionales son factores que determinan la viabilidad de perforar un pozo con una trayectoria específica, así como limitan el alcance del pozo.
- El torque y el arrastre están en función de la fuerza normal entre la sarta de perforación y el pozo, que a su vez es función de la trayectoria (geometría) que el pozo tenga.
- Ritmos de incremento de ángulo bajos conducen a menores valores de torque y arrastre.
- Las ventajas de la trayectoria catenaria son más claras para ángulos de entrada al objetivo grandes (mayores de 45°), que es cuando los pozos convencionales presentan mayores problemas.
- Aun cuando los softwares existentes no incluyen el diseño de las trayectoria catenaria, es posible simularla y así realizar los cálculos necesarios.

5.2 Recomendaciones

- Antes de proponer una trayectoria definitiva para un pozo es necesario determinar si ésta es la que presenta los valores más bajos de torque y arrastre, a fin de prevenir problemas por alguna tubería atrapada dentro del pozo.
- Para los casos en los que el ángulo de entrada al objetivo es bajo (menores a 45°), no se recomienda un diseño tipo catenaria, ya que sus ventajas sobre los otros diseños se ven opacadas por la sección de incremento continuo.
- Si se cuenta con el equipo "Slant" o con conductores curvos, es posible iniciar el pozo desviado con el ángulo adecuado para iniciar la catenaria, en lugar de la sección de incremento continuo.
- La trayectoria catenaria es recomendable para pozos con un ángulo de entrada al objetivo grande (mayor a 45°) y desplazamientos horizontales y verticales también grandes.
- Incluir en los softwares comerciales la trayectoria catenaria, con el fin de facilitar los cálculos al momento de emplearlos.

Bibliografía

1. H. Rabia, "*Oil Well Drilling Engineering Principles and Practice*"; Straight and Directional Hole Drilling
2. M. J. Economides, "*Petroleum well Construction*"; Directional Drilling.
3. Neal J. Adams, "*Drilling Engineering a complete well planning approach*";
4. Aadnoy, "*Modern Well Design*"; Introduction to the well design process.
5. Adam T. Bourgoyne Jr, "*Applied Drilling Engineering*"; Society of Petroleum Engineers, 1991.
6. Valtierra Hernandez Marlene, "Metodología para el diseño de los aparejos de fondo", Tesis I.P.N.
7. "*Directional drilling and deviation control technology*"; French Oil and Gas Industry Association Technical Committee, 1990.
8. González Carrillo F, "*La Industria Petrolera, Conceptos básicos*"; AIPM, 1999.
9. T. A. Inglis, "*Petroleum engineering and development studies*", Volume 2, Graham Trotman, 1987.

10. "Procedimiento para la determinación de la trayectoria de pozos direccionales" Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos, PEMEX, Mayo de 2002.
11. McClendon y Edwards O. Anders, "Directional drilling using the catenary method", SPE 13478, Marzo de 1985.
12. Sheppard, "Designing well paths to reduce drag and torque", SPE 15463, Octubre 1986.
13. Aadnoy y K. Andersen "Friction analysis for long-reach wells" SPE 39391, Marzo de 1998.
14. Aadnoy and K. Larsen, "Analysis of stuck pipe in deviated boreholes", SPE 56628, Octubre de 1999.
15. Aadnoy y Petur P. Husgard, "Analytical models for design of wellpath and BHA", SPE 77220, Septiembre de 2002.
16. Charlez y A. Onaisi, "Three history cases of rock mechanics related stuck pipes while drilling extended reach wells in north sea", SPE 47287, Julio de 1998.
17. Johancsik; Friesen and Rapier Dawson, "Torque and drag in directional wells – prediction and measurement", SPE 11380, Febrero de 1983.
18. S. Ong, Z. Zheng, A. S. Baim, M.Z. Ibrahim, "Geomechanical analysis for resak's extended-reach drilling- a case example", SPE 62727, Septiembre de 2000.

19. B.S. Aadnoy, K. Andersen, "*Design of oil wells using analytical friction models*", Journal of Petroleum Science and Engineering, Septiembre de 2001.
20. McClendon and E. O. Anders, "*Catenary directional drilling*"; World Oil, Junio de 1995.
21. E.O.Anders, Patente Británica 2 044 824, 1979.
22. Geoff Downton y Trond Skei Klausen, "*Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional*", Oilfield Review, Verano de 2000.
23. Frank Allen, Paul Toms y Greg Conran, "*Extended-reach Drilling: Breaking the 10-km barrier*", Oilfield Review, Invierno de 1997.
24. Steve Bosworth y Hussein Saad El-Sayed, "*Key Issues in Multilateral Technology*", Oilfield Review, Invierno de 1988.
25. Tom Bratton, J. Fuller, L. Murphy, "*Prevención de problemas durante la perforación*", Oilfield Review, Otoño de 2001.
26. Walt Aldred, Dick Plumb, Ian Bradford, "*Manejo del Riesgo de la Perforación*", Oilfield Review, Verano de 1999.
27. Steve Bonner y Trevor Burgess, "*Measurements at the bit: A new Generation of MWD tools*", Oilfield Review, Abril-julio de 1993.
28. Jiang Wu, "*Drill- Pipe bending and fatigue in rotary drilling of horizontal wells*", SPE 37353, Octubre de 1996.

29. Z. Li y J. Li, "*Fundamental Equation for dynamic Analysis of rod and pipe string in oil- gas wells and application in static buckling analysis*", Journal of Canadian Petroleum Technology, Abril de 2002.
30. Swokowski, "Precalculus functions and graphs", editorial books/Cole, novena edición 2002.
31. Swokowski, "Cálculo con geometría analítica", grupo editorial Iberoamericana, segunda edición 1996.
32. Leithold, "El cálculo con geometría analítica" editorial Harla, sexta edición 1992.
33. Zill, "Cálculo con geometría analítica", grupo editorial Iberoamericana, 1985.

Apéndice A

Desarrollo de las ecuaciones para el diseño de un pozo con una trayectoria tipo catenaria modificada

Para el desarrollo de las ecuaciones para una trayectoria tipo catenaria nos apoyaremos en el siguiente diagrama que representa una sección de la sarta de perforación que ha tomado la forma de una catenaria.

La figura A.1 muestra el fondo de la sección de la catenaria, aquí se puede ver el ángulo θ y la fuerza T_0 al final de la sección.

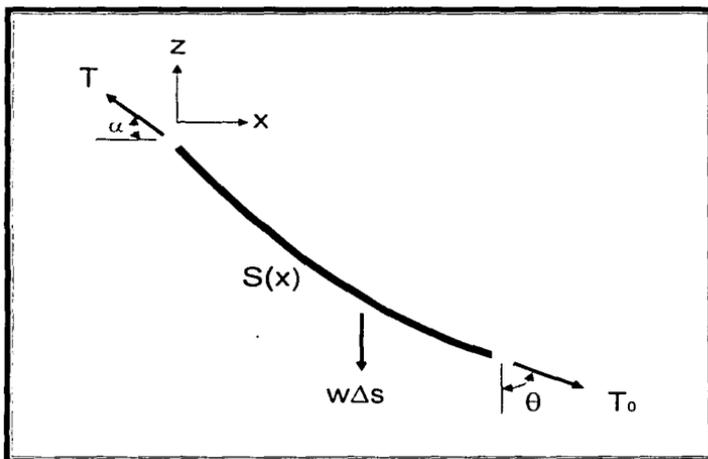


Figura A.1 Diagrama de cuerpo libre para una Catenaria Modificada

Haciendo un balance de fuerzas tenemos que:

$$\sum F_x = 0$$

$$T \cos \alpha = T_0 \sin \theta \quad \text{A.1}$$

$$\sum F_z = 0$$

$$T \sin \alpha = w \Delta s + T_0 \cos \theta \quad \text{A.2}$$

de aquí tenemos que

$$\frac{dz}{dx} = \tan \alpha = \frac{T_0 \cos \theta + w \Delta s}{T_0 \sin \theta} \quad \text{A.3}$$

tomando la segunda derivada de z con respecto a x

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{w}{T_0 \sin \theta} \frac{ds}{dx} \quad \text{A.4}$$

por otra parte sabemos que $ds^2 = dz^2 + dx^2$ sustituyendo ds en la ecuación anterior tenemos que

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{w}{T_0 \sin \theta} \left(1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right) \quad \text{A.5}$$

haciendo un cambio de variable tenemos lo siguiente

$$v = \frac{dz}{dx}$$

$$dv = \frac{w}{T_0 \sin \theta} (1 + v^2) dx$$

$$\frac{dv}{1 + v^2} = \frac{w}{T_0 \sin \theta} dx$$

Integrando en ambos lados de la igualdad

$$\int \frac{dv}{1 + v^2} = \int w T_0 \sin \theta dx$$

$$\sinh^{-1} v = \frac{w}{T_0 \sin \theta} x + C \quad \text{A.6}$$

Para encontrar el valor de C empleamos la ecuación A.3, tenemos las siguientes condiciones iniciales

$$\begin{aligned} & \text{cuando} \\ & x = D_{cat} \\ & \frac{dz}{dx} = \tan(\theta - 90) \end{aligned}$$

sustituimos estas condiciones en la ecuación A.6 y despejamos C

$$C = \sinh^{-1}[\tan(\theta - 90)] - \frac{w}{T_0 \sin \theta} D_{cat}$$

finalmente $\frac{dz}{dx}$ queda como sigue

$$\frac{dz}{dx} = \sinh \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} (x - D_{cat}) + \sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) \right] \quad A.7$$

Integrando la ecuación anterior tenemos la expresión para z , en función de x

$$z = \frac{T_0 \sin \theta}{w} \cosh \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} (x - D_{cat}) + \sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) \right] + C_2 \quad A.8$$

para encontrar la expresión final apliquemos las siguientes condiciones iniciales

$$\begin{aligned} & \text{para} \\ & x = 0 \quad z = 0 \quad \text{por lo tanto} \end{aligned}$$

$$C_2 = - \frac{T_0 \sin \theta}{w} \cosh \left[\sinh^{-1} \left(\tan(\theta - 90) - \frac{w}{T_0 \sin \theta} D_{cat} \right) \right]$$

$$z = \frac{T_0 \sin \theta}{w} \left[\cosh \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} (x - D_{cat}) + \sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) \right] - \cosh \left[\sinh^{-1}(\tan(\theta - 90)) - \frac{w}{T_0 \sin \theta} D_{cat} \right] \right] \quad A.9$$

para calcular la longitud de la sección de la catenaria, "s", simplemente la despejamos de la ecuación A.3

$$\Delta s = \frac{T_0 (\sin \theta) \sinh \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} (x - D_{cat}) + \sinh^{-1} (\tan(\theta - 90)) \right] - T_0 \cos \theta}{w}$$

$$s = \frac{T_0 \sin \theta}{w} \left[\sinh \left[\frac{w}{T_0 \sin \theta} (x - D_{cat}) + \sinh^{-1} (\tan(\theta - 90)) \right] - \sinh \left[\sinh^{-1} (\tan(\theta - 90)) - \frac{w}{T_0 \sin \theta} D_{cat} \right] \right] \quad A.10$$