



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño de software  
Especializado para el  
bosquejo de trayectorias de  
Pozos de Alcance Extendido  
(ERD).**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Petrolero**

**P R E S E N T A**

Edgar Misael Zarco Rodríguez

**DIRECTOR DE TESIS**

Ing. José Agustín Velasco Esquivel



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

## ***AGRADECIMIENTOS***

A mis padres:

Gilberto Arturo Zarco Hernández y Rosalba Rodríguez Morris que me han apoyado desde el principio para alcanzar mis objetivos, quienes me han proporcionado infinidad de valores para convertirme en la persona que ahora soy. Aquellos que siempre han anhelado convertirme en una persona de provecho y exitosa. Agradezco por todo lo que me han brindado y que jamás podre recompensarlo.

A mi Hermano:

Ing. Arturo Iván Zarco Rodríguez, aquel que siempre ha sido un ejemplo en mi vida, proporcionandome fortaleza para seguir adelante a pesar de los obstáculos que antepone la vida.

A mi tía Patricia Rodríguez Morris:

A esa persona que siempre fue considerada como una segunda madre, que siempre arrancaba sonrisas porque jamás conocí un disgusto de su parte. Para esa persona que ahora no está en cuerpo, pero sigue en cada espasmo de mi vida a mi lado en pensamientos y alma.

A mi familia en general:

Para todos aquellos que fueron parte de esto y que me brindaron su apoyo para hacer realidad este sueño que ahora estoy cumpliendo, muchas gracias a todos.

Al Ingeniero Ricardo Morales

A mi amigo y hermano que siempre ha proporcionado a mi persona esa persistencia para alcanzar cada uno de los objetivos propuestos tanto académicos como personales.

*EDGAR MISAEL ZARCO RODRÍGUEZ*

***Agradecimientos:***

Darío López Pérez

Nydia Ivette Sinecio Rodríguez

Luis Reyna

Armando González

*La incertidumbre es la única certeza que hay, y saber cómo vivir con la inseguridad es la única seguridad.*

John Allen Paulos

## JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen en el mercado una variedad de softwares de difícil acceso académico en las diferentes áreas de la Ingeniería Petrolera. Sin embargo, la capacidad ingenieril académica nacional es muy amplia, y difícilmente un grupo de especialistas mexicanos cuenta con acceso a las necesidades de una empresa petrolera para el desarrollo de un software. Además, debe implementarse el trabajo en conjunto de diferentes profesionistas, ya que es de suma importancia, tanto programadores, geólogos, petroleros, geofísicos y matemáticos.

Por tal motivo, el diseño de un programa pretende brindar acceso a la sociedad al uso de material práctico y visual que ayude a los estudiantes de ingeniería petrolera a comprender de manera clara uno de una serie de factores que en conjunto muestran la manera óptima para casos específicos la extracción de hidrocarburo.

## OBJETIVO

Desarrollar un software especializado en el diseño de trayectorias de pozos de alcance extendido (ERD por sus siglas en ingles), de fácil manejo para el usuario y con una interfaz amigable, al cual con trabajos posteriores pueda ejemplificar a detalle todos los factores involucrados en un diseño óptimo para la perforación de un pozo ERD.

## RESUMEN

Un pozo ERD por sus siglas en inglés “Drilling Extenden-Reach” se define como un pozo de alcance extendido el cual es una relación de desviación de desplazamiento horizontal Vs profundidad vertical verdadera (HD/TVD) de más de 2.0. Muchos son los factores a considerar para el desarrollo de un proyecto de este calibre, sin embargo, el primero y uno de los más importantes es el diseño de la trayectoria. Actualmente existen una gran variedad de métodos para el diseño de trayectorias de ERD, pero una gran mayoría se basa en el método de mínima curvatura, diseñado en un principio para pozos direccionales. Por tal motivo, al considerarse un pozo ERD meramente una evolución de los pozos direccionales, el método de mínima curvatura se

adapta al problema en cuestión, por lo tanto, el uso de un algoritmo en lenguaje C++ para la representación de un pozo mediante mínima curvatura se convierte en la mejor alternativa. Una vez que se ha seleccionado el método, mediante el uso de Qt interfaces graficas se desarrolla un software amigable para el usuario y de fácil manejo que muestre variables importantes y una visión en 3D de la trayectoria del pozo.

Una vez que se tiene el diseño de la trayectoria es necesario tomar en cuenta otros factores, como el diseño del BHA, torque y arrastre, diseño del fluido de perforación, entre otros.

Índice.

**Capítulo 1.** Perspectiva histórica, Pozos de Alcance Extendido (ERD).

1.1 Perspectiva Histórica de pozos ERD a nivel mundial.

1.2 Perspectiva Histórica de pozos ERD Nacional.

**Capítulo 2.** Pozos de Alcance Extendido (ERD).

2.1 Definición de pozos de Alcance Extendido (ERD)

2.2 Clasificación de pozos ERD.

**Capítulo 3.** Métodos para el diseño de trayectorias de pozos.

3.1 Conceptos fundamentales

3.2 Métodos para el diseño de trayectorias en 3D

**Capítulo 4.** Diseño de trayectorias de pozos ERD.

4.1 Introducción.

- 4.2 Diseño de trayectoria.
- 4.3 Consideraciones para el diseño.
- 4.4 Diseño del perfil de pozos de Alcance Extendido.
- 4.5 Método para el diseño de trayectorias en 3D.

## **Capítulo 5. Diseño del Software.**

- 5.1 Herramientas para el diseño del software.
- 5.2 BanksOil Well Design.
- 5.3 Ejemplo Adka-11.
- 5.4 Ejemplo Real, Cullen Norte N° 1.

## **Capítulo 6. Conclusiones**

## **NOMENCLATURA.**

**HD** (Horizontal Displacement). - Desplazamiento horizontal.

**TVD** (True Vertical Depth). - Profundidad vertical verdadera.

**LWD** (Loggig While Drilling). -Toma de registros durante la perforación.

**MWD** (Measurement While Drilling). – Midiendo mientras se perfora.

**ERD** (Extended Reach Drilling). – Perforación de alcance extendido.

**MD** (Measured Depth). – Profundidad medida.

**RSS** (Rotary Steerable System). - Sistema Rotario Orientable.

**UOPV.** – Unidad Operativa de Perforación Veracruzana.

**EOR** (Enhanced Oil Recovery). – Recuaperación mejorada del hidrocarburo.

**ECD** (Equivalent Circulating Density). – Densidad Equivalente de Circulación.

**TR.** Tuberia de revestimiento.

**TP.** Tuberia de perforación.

**KOP** (Kick Off Point). - Punto de inicio de la desviación.

**DLS** (Dogleg Severity). – Severidad de pata de perro.

**BHA** (Bottom Hole Assembly). – Aparejo de fondo del pozo.

**TF**–Tubería flexible.

**BUR** (Build Up Rate). – Sección de construcción angular.

**POO** – Programación orientada a objetos

**SURVEYS** – Estaciones

## INDICE DE FIGURAS.

DESCRIPCIÓN	PAG
Capitulo 1.0 Perspectiva histórica, pozos e alcance extendido (ERD).	
<i>Figura 1, Campo Wytch Farm en Reino Unido</i> <i>perforado por BP desde 1993.</i> _____ 22	
<i>Figura 2, Campo Ara e Hidra, en Tierra de Fuego,</i> <i>Argentina perforado por Deminex y Pan American Energy.</i> _____ 24	
<i>Figura 3, comparación de pozos del campo Sakhalin</i> <i>y pozos ERD globales.</i> _____	
27	
<i>Figura 4. Pozos de alcance medio en México.</i> _____ 29	

## Capitulo 2.0 Pozos de alcance extendido (ERD).

*Figura 5, representación de un pozo de Alcance Extendido (ERD), costa afuera y terrestre para alcanzar objetivos lejanos.*

\_\_\_\_\_ 35

*Figura 6, gráfica de relación de desviación horizontal Vs profundidad vertical verdadera un indicador de la complejidad de un pozo de alcance extendido.*

\_\_\_\_\_ 39

## Capitulo 3.0 Métodos para el diseño de trayectorias EN 3D.

*Figura 7. Parámetros para el cálculo de trayectorias.*

\_\_\_\_\_ 46

*Figura 8, Parámetros de medición de un pozo direccional.*

\_\_\_\_\_ 48

*Figura 9, Severidad de Pata de Perro alta y baja, DLS.*

\_\_\_\_\_ 50

#### Capitulo 4.0 Diseño de trayectorias de un pozo de alcance extendido (ERD).

*Figura 10. Fuerza sobre la tubería en un pozo con desviación.*

\_\_\_\_\_ 63

*Figura 11 y 12. Relación KOP Vs Longitud del pozo vs Curvatura Máxima.*

*Y relación directa del incremento de torque ya arrastré en función de la profundidad del KOP.*

\_\_\_\_\_ 66

*Figura 13 y 14, incremento del torque y arrastre al tirar de la tubería del pozo y al rotar con el incremento del BUR.*

\_\_\_\_\_ 69

*Figura 15, Variación de los tipos de perfiles de pozos.*

\_\_\_\_\_ 72

*Figura 16, Perfil pseudo-catenario para pozos de alcance*

*Extendido, Misael Zarco Rodríguez, enero del 21018.*

\_\_\_\_\_ 75

*Figura 17, Geometría general de un pozo horizontal.*

\_\_\_\_\_ 78

*Figura 18, M.L. Wiggins and H.C. Juvkam-Wold, 1990; Simplified Equations for Planning Directional and Horizontal Wells.*

\_\_\_\_\_ 86

*Figura 19, Método de mínima curvatura, aproximación mediante mediciones de inclinación y dirección.*

\_\_\_\_\_ 89

*Figura 20, 21 y 22, Grafica de los resultados obtenidos en diferentes vistas, la cual muestra la trayectoria del pozo en los planos “xy”, “yz” y “xz”.*

\_\_\_\_\_ 98

## **Capitulo 5.0 Diseño del software**

*Figura 23, Uso de C++ en framework Qt para desarrollo*

*de BanksOil Well Design.*

\_\_\_\_\_106

*Figura 24, Ventana Inicial BanksOil Well Design Versión 1.0.*

\_\_\_\_\_109

*Figura 25, Sección para el desarrollo de un perfil de pozo ERD.*

\_\_\_\_\_112

*Figura 26, Visualización del perfil y parámetros obtenidos.*

\_\_\_\_\_ 113

*Figura 27, Sección de simulación de pozo en 3D.*

\_\_\_\_\_ 115

*Figura 28, Ventana emergente para introducir datos generales del pozo y surveys para cálculo de trayectoria del pozo ERD.*

\_\_\_\_\_ 116

*Figura 29, Método para cargar archivo .txt.*

\_\_\_\_\_117

*Figura 30, Proyección Final de un pozo.*

\_\_\_\_\_ 118

*Figura 31, Simulación Trayectoria Pozo Adkal-11 vista perfil*

*mediante BanksOil Well Design.* \_\_\_\_\_

121

*Figura 32, Simulación Trayectoria Pozo Adkal-11 vista planta*

*mediante BanksOil Well Design.* \_\_\_\_\_

122

*Figura 33, Record establecido por el pozo Cullen Norte N° 1.*

*DH comparado con algunas edificaciones significantes*

*de gran tamaño en Argentina.* \_\_\_\_\_

123

*Figura 34, Visualización de parámetros para la planeación del*

*Pozo Cullen Norte N° 1 mediante Banks Oil Well Design.*

\_\_\_\_\_ 125

*Figura 35, Figura 35, Visualización del Pozo Cullen Norte N° 1*

*mediante Banks Oil Well Design.* \_\_\_\_\_

129

## INDICE DE TABLAS

DESCRIPCIÓN	PAG
-------------	-----

### Capitulo 3.0 Métodos para el diseño de trayectorias EN 3D.

*Tabla 1. Principales métodos para diseño de trayectoria de pozos en la industria petrolera.*

---

52

*Tabla 2. Ecuaciones fundamentales para los 6 métodos más importantes en la industria petrolera.*

---

53

### Capitulo 4.0 Diseño de trayectorias de un pozo de alcance extendido (ERD).

*Tabla 3. Información por survey ejemplo Adka-11.*

---

92

*Tabla 4. Resultados obtenidos mediante el método de mínima curvatura.*

---

95

### Capitulo 5.0 Diseño del software.

*Tabla 5. Información de inclinación, MD y azimuth por cada survey*

*para el pozo Adka-11.* \_\_\_\_\_

118

*Tabla 6. Resultados obtenidos mediante BanksOil Well Design,*

*pozo Adka-11.* \_\_\_\_\_ 119

*Tabla 7. Resultados Obtenidos (Parámetros para planeación de trayectoria).*

\_\_\_\_\_ 124

*Tabla 8. Información de inclinación, MD y azimut por cada survey*

*para el pozo Cullen Norte N° 1.* \_\_\_\_\_

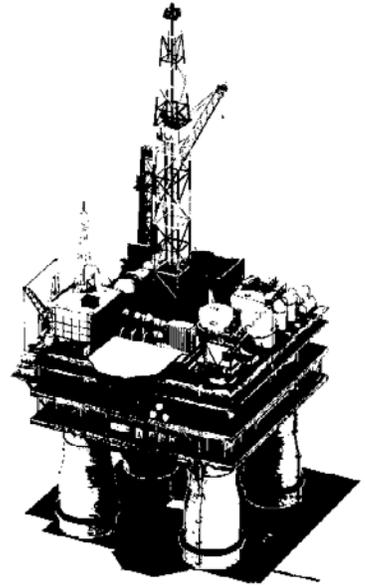
126

*Tabla 9. Resultados obtenidos mediante BanksOil Well Design,*

*pozo Cullen Norte N° 1.* \_\_\_\_\_

127

# Capítulo 1.0



# Perspectiva histórica, Pozos de Alcance Extendido (ERD).

## 1.1 Perspectiva histórica de pozos ERD a nivel mundial.

Los yacimientos de aceite que fueron desarrollados entre la década de 1970 – 1980 tenían ciertas limitantes asociados al área de contacto con el yacimiento, es decir al área de drene con cada pozo. Por lo que algunos de los Campos fueron desarrollados inicialmente con una máxima inclinación del pozo de 60°, resultando en un máximo alcance de 3,000[m] de desplazamiento horizontal. Por tal motivo, para drenar los yacimientos de manera óptima en dichos proyectos fue necesario el uso de tres plataformas diferentes, además fue necesaria mejoras en la tecnología de perforación. Esto llevo a un continuo empuje en los límites establecidos por los tipos de perfiles disponibles para trayectorias horizontales largas, lo cual impulso las perforaciones de alcance extendido.

El término perforación de alcance extendido fue utilizado por vez primera durante la década de los 80's por la compañía Mobil Oil en la perforación de pozos direccionales al lograr un desplazamiento horizontal (HD) del doble de la profundidad vertical verdadera (TVD). Un precedente a esta tecnología era la perforación de alto ángulo, sin embargo, las necesidades que demandan los escenarios de los yacimientos descubiertos actualmente o simplemente el desarrollo óptimo de yacimientos descubiertos desde años atrás han llevado al desarrollo de tecnologías como la perforación de alcance extendido, la cual involucra diferentes avances en la perforación rotaria continua y toma de información de los pozos (LWD y MWD), entre otras tecnologías.

Para describir un poco más a detalle la evolución de los pozos de alcance extendido a continuación se menciona por compañía, algunos de los más importantes pozos desarrollados mediante tecnología de alcance extendido, desde empresas pioneras en dicha tecnología hasta los últimos record impuestos en pozos de alcance extendido (ERD).

### **Shell Corporation.**

Algunos de los acontecimientos más remotos respecto a pozos de alcance extendido fueron presentados por la empresa Shell, la cual registro record para ese tiempo con el pozo Cormorant A-13, en mar del norte con una desviación de 4.7[Km] en 1988. Sin embargo, en fechas más recientes registra al pozo Tern A-5 el cual alcanza 5[Km] de desviación a 2,770[m] de TVD, mientras que el pozo Galleon PN02 alcanza los 5,7[Km] de MD a una TVD de 2,500[m], lo cual arroja una relación HD/TVD de 2.3.

### **Amoco UK Corporation.**

Mientras que en la empresa Amoco UK es uno de los líderes en ERD en los campos Arbroath y Hutton, en Reino Unido costa afuera. Posterior a un fallido intento en 1991, el pozo T19 alcanza una MD de 5.8[Km] y una desviación de 4.6[Km] a una profundidad vertical verdadera de 2,600[m] en 1992. Para el siguiente año, el logro fue superado por el pozo SEER-T12 con una MD de 7.5[Km] y una desviación de 6.4[Km].

Para los pozos del campo Stafjord en el sector noruego del mar del norte se estimó una TVD de 2,700[m] hasta entrar al yacimiento. La distancia horizontal desde la plataforma “C” hasta el campo es aproximadamente de 4,000[m]. El pozo C10 alcanza una desviación de 5[Km] entre los años 1989

y 1990. Ya para el año 1991 el primer pozo con desviación de 6.1[KM] fue alcanzado por Statfjord con el pozo C3.

Por otro lado, el campo Gullfaks, pozo A36 alcanzo una desviación de 5[Km] pero a una profundidad menor, de solo 2,160[m] de TVD. Lo cual arrojaba una relación MD/TVD de 2.79 una de las más altas en ese tiempo.

### **Statoil Corporation.**

Para finales de 1992 y principios de 1993, la empresa Statoil implemento un nuevo record mundial y rompió la barrera de los 7[Km] de desviación con el pozo C2. Este pozo alcanzo los 8.7[Km] MD y una desviación de 7.3[Km] en el yacimiento Stafjord con una TVD de 2,700[m]. En el año 1994 un nuevo record mundial fue establecido con el pozo C26, este alcanzo los 9.3[Km] de MD y una desviación de 7.85[Km] a una profundidad vertical verdadera de 2,770[m].

### **BP.**

Una de las empresas pioneras en tecnología para pozos de alcance extendido ha sido BP Exploration, en campos como Wytch Farm en Reino Unido (Tierra). Aquí destacan el yacimiento Sherwood, el cual fue desarrollado en un periodo de menos de dos años, entre 1993 y 1994. Para finales de 1994 el pozo M2, con una profundidad de 6,760[m] fue perforado y para principios de 1995 el pozo M3 con una profundidad de 6,618[m].

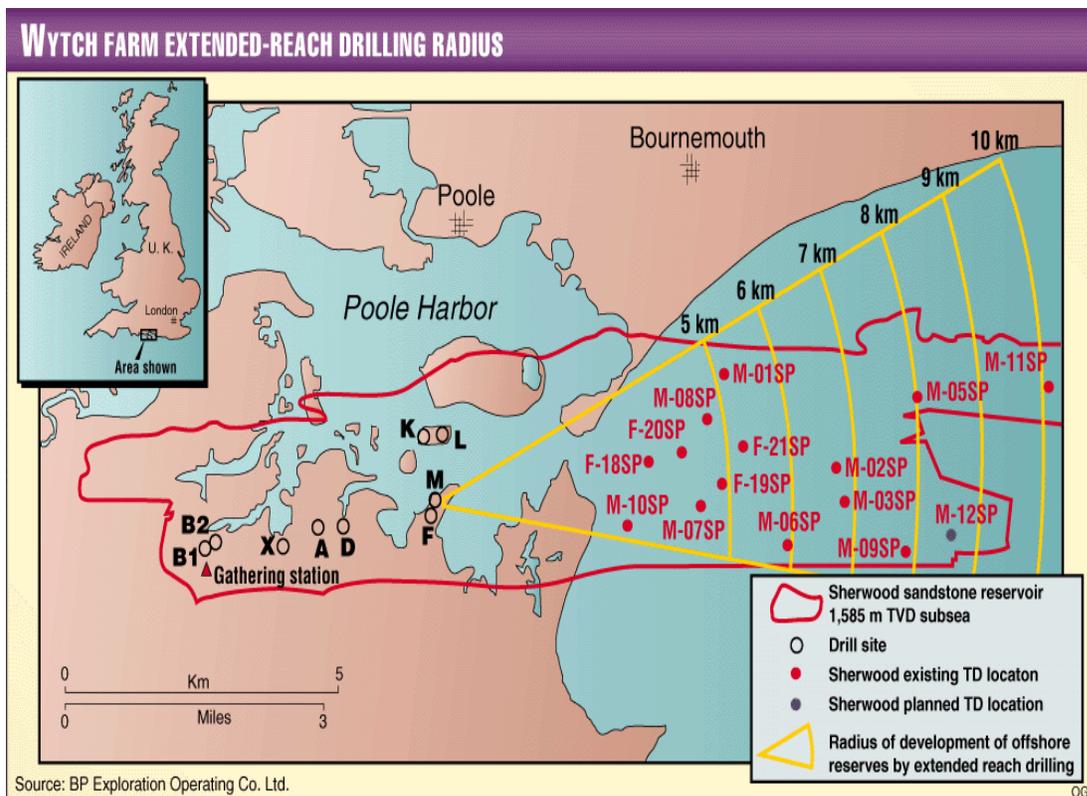


Figura 1, Campo Wytch Farm en Reino Unido perforado por BP desde 1993.

DAVID KNOTT. BP completes record extended-reach well. En: Oil & Gas Journal [en línea]. 19 Enero 1998. [Consulta: 2 Mayo 2017]. Disponible en:

*<http://www.ogj.com/articles/print/volume-96/issue-3/in-this-issue/drilling/bp-completes-record-extended-reach-well.html>*

El pozo M-05 había establecido un record de 8,035[m] MD en 1995, sin embargo, en 1996, Phillips China, Inc. Perforo el pozo Xijiang 24-3 en el sur del mar de China con un HD de 8,063[m]. Ya para la década de los 90's, en 1999 la compañía BP comenzó la tercera fase del campo Wytch Farm logrando algunos records en el área de alcance extendido con la perforación del pozo M-16, el cual contaba con una profundidad medida (MD) de 11,278[m]. La distancia total de desplazamiento para este pozo fue de 10,728[m], y una profundidad verdadera (TVD) de 1,637[m]. Esta meta alcanzada por BP impulso innumerables desarrollos tecnológicos y técnicas en ERD. El principal de ellos fue la perforación rotativa direccional o RSS.

## **Maersk Oil**

Mientras que en el medio oriente, Maersk Oil estableció un conjunto de records mundiales con sus pozos Al Shaheen 2 y 3 en 1994. Los pozos involucran secciones horizontales de  $8\frac{1}{2}$ " de 3.1[Km] y 3.9[Km] para una desviación total cerca de 3.9[Km] y 4.6[Km] a una profundidad vertical

verdadera cerca de 1,060[m], lo cual arroja una relación MD/TVD de 3.2 y 4.3.

Posteriormente, en mayo del 2008, se completó la perforación del pozo BD-04A costa afuera en Qatar. Este pozo estableció record mundial, alcanzo una MD de 40,320[ft], es decir el pozo más largo alcanzado hasta ahora. Con una sección horizontal de 35,770 [ft].

### **Deminex y Pan American Energy.**

En 1995, Deminex y Pan American Energy perforaron su primer pozo de alcance extendido, el pozo HNP-7 está localizado cerca de los campos Ara, Kaus y Canadon Alfa a lo largo de la costa Este de Tierra de Fuego, Argentina. Este pozo alcanzo un record en todo América en alcance extendido con una MD de 6,982[m] con un desplazamiento horizontal (HD) de 6,253[m]. Posteriormente, otros dos pozos fueron perforados en esta área costa afuera.

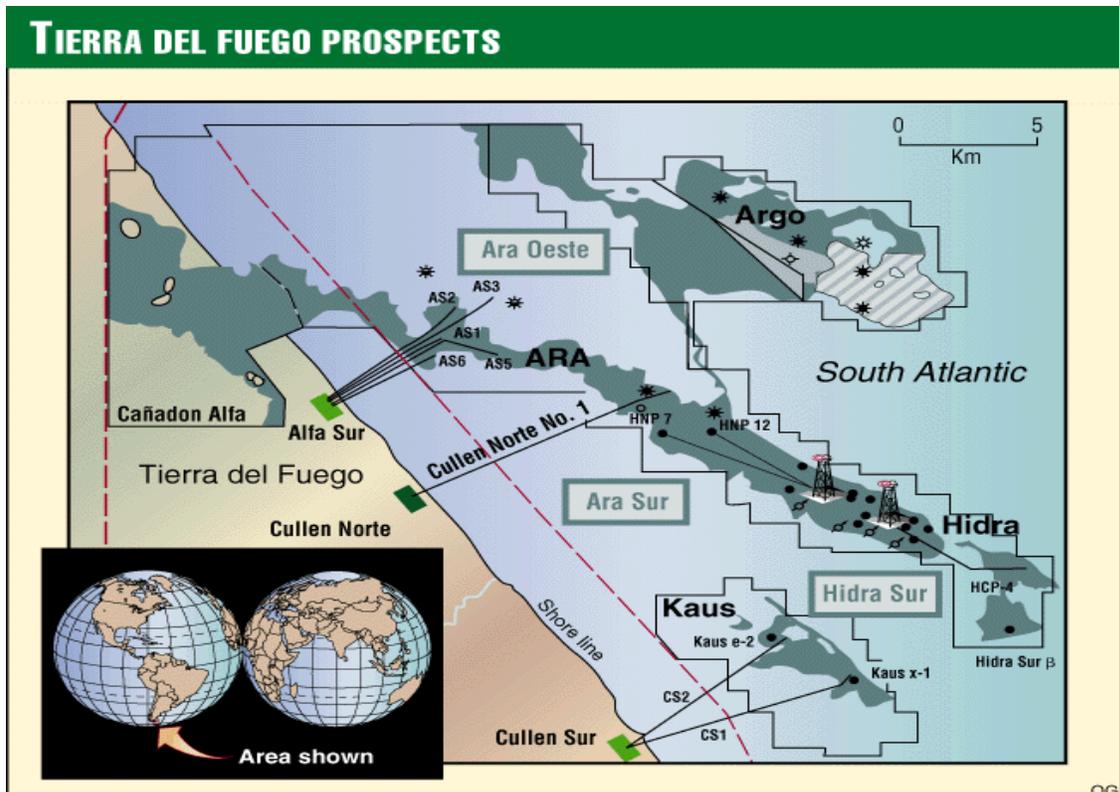


Figura 2, Campo Ara e Hydra, en Tierra de Fuego, Argentina perforado por Deminex y Pan American Energy. ROLAND VIGHETTO, MATTHIEU NAEGEL, EMMANUEL PRADI. Total drills extended-reach record in Tierra del Fuego En: Oil & Gas Journal [en línea]. 17 Mayoe 1999. [Consulta: 10 Julio 2017].

En marzo de 1999, la compañía operadora Total Austral S.A., Deminex, y Pan American Energy establecieron record en alcance extendido con el pozo Cullen Norte-1, con un desplazamiento horizontal (HD) de 10,585[m] perforado en una locación en tierra de fuego, Argentina.

**Exxon.**

La empresa Mobil perforo el pozo Excalibur E5 que alcanzo 6.9[Km] de MD a una TVD de 2,660[m], para una relación MD/TVD de 2.6. Posteriormente en agosto de 2003, se perforo el primer pozo de alcance extendido, el cual comenzó en un pozo en tierra en Chayvo en el Noreste de Sakhalin.

El 28 de enero de 2011, Exxon Neftegas Limited anuncio un nuevo record en la perforación de un pozo de alcance extendido en el campo Odoptu, costa afuera del Este de Rusia. El pozo OP-11 alcanzo una profundidad total medida de 12,345[m] para establecer un nuevo record mundial de alcance extendido. Así mismo este pozo también alcanzó un record mundial en desplazamiento horizontal alcanzado, el cual fue de 11,475[m] y 1,784 de profundidad vertical verdadera (TVD). La compañía Exxon Neftegas estableció este record en tan solo 60 días mediante la integración de tecnología de perforación rápida.

Actualmente 8 de los 10 pozos más largos del mundo pertenecen al consorcio de Sakhalin-1. En abril del 2013, el pozo Z-43 rompió el record anterior establecido en Sakhalin, alcanzo 12,450[m] de profundidad medida. Sin embargo, para junio del mismo año el record fue batido por el pozo Z-42, con

una profundidad medida de 12,700[m] y un desplazamiento horizontal de 11,739[m].

Desde 2003, un total de 51 pozos de alcance extendido han sido perforados en Sakhalin-1 para el desarrollo de ambos campos, Chayvo y Odoptu. En abril del 2015, el consorcio de Sakhalin-1 anuncio un nuevo record ERD con la terminación del pozo O-14 en el campo costa fuera Chayvo. Este pozo fue perforado a una MD de 13,500[m] y un alcance horizontal de 12,033[m].

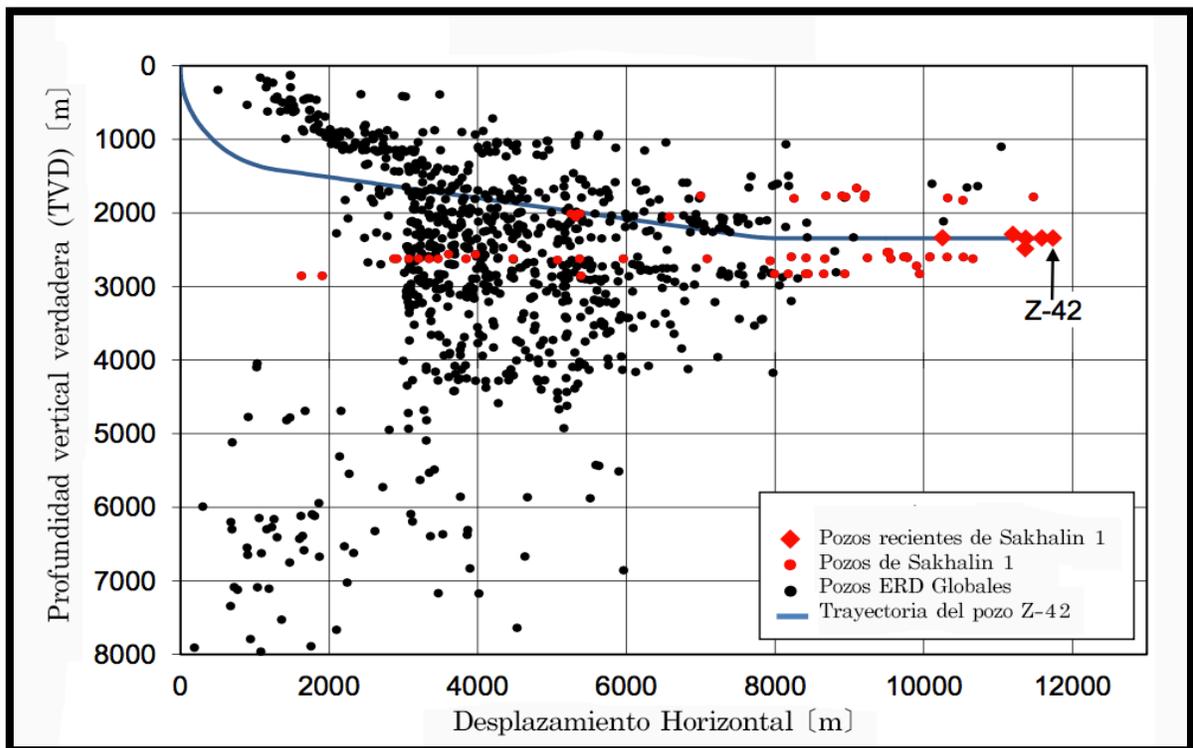


Figura 3, comparación de pozos del campo Sakhalin y pozos ERD globales. VISHWAS P.

GUPTA (ExxonMobil Development Company), ANGEL H. P. YEAP, KYLE M. FISCHER

*(SPE), RANDALL S. MATHIS (Exxon Neftegas Ltd), MICHAEL J. EGAN, AIPC  
(Consultant to Exxon Neftegas Ltd); 2014, Expanding the Extended Reach Envelope at  
Chayvo Field, Sakhalin Island.*

## **1.2 Perspectiva histórica de pozos ERD Nacional.**

En el periodo que comprende entre los años 2000 y 2005, en la Unidad Operativa de Perforación Veracruzana se tiene registro de la perforación de pozos de alcance medio, si llegar a un desplazamiento significativo para ser considerados como pozos de alcance extendido, sin embargo, esto solo era el principio de una campaña de evolución de la perforación direccional de alto ángulo.

Tres de los pozos de alcance medio perforados por la UOPV fueron:

- Lizamba 221, TVD de 1,799[m], una MD de 3,912[m], un ángulo de 78° y un desplazamiento horizontal de 2,839[m].
- Tortuguilla 1, TVD de 2,125[m], una MD de 3,414[m], ángulo de 69.99° y un desplazamiento horizontal de 2,793[m].
- Lizamba 81, TVD de 1,557[m], MD de 3,067[m], un ángulo de 74.78° y un HD de 2,246[m].

Estos pozos como ya se mencionó, solo alcanzaron la clasificación de pozos de alcance medio, los cuales, al ser comparados con algunos pozos de alcance extendido internacionales, están muy lejos de alcanzar los grandes records mundiales en desplazamiento horizontal, pero el proceso continuo.

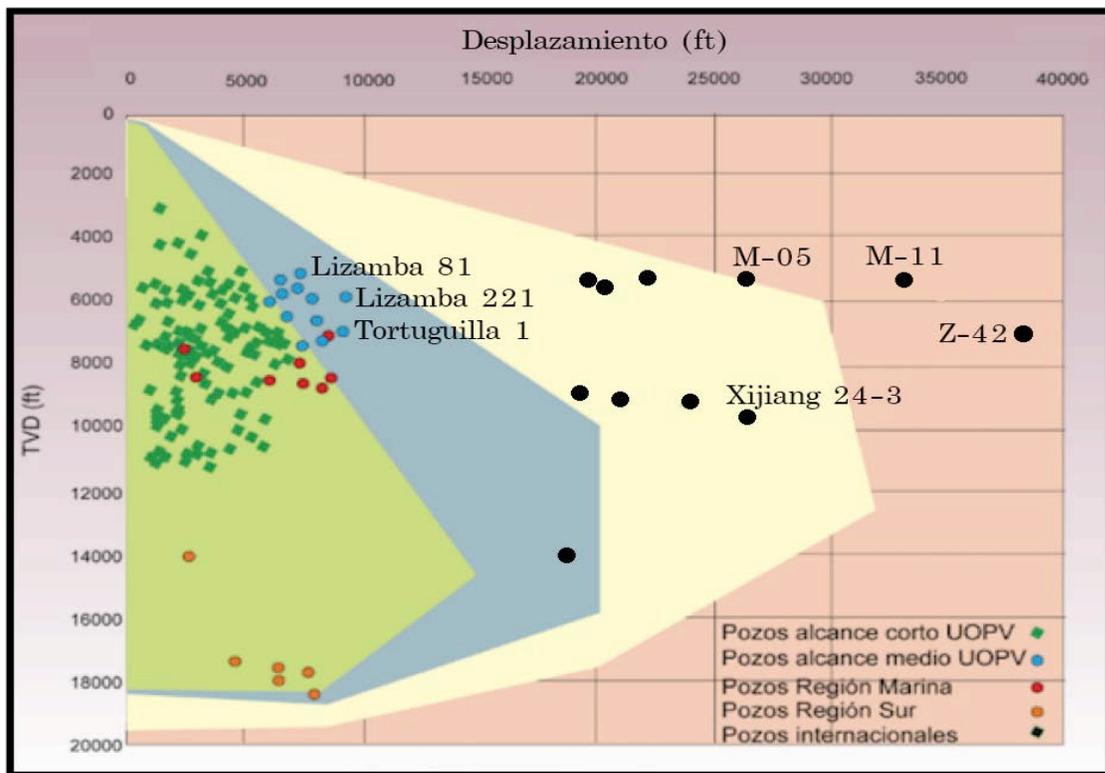


Figura 4. Pozos de alcance medio en México. Gerencia de estrategias de Ingeniería y diseño, Volumen 4, No. 21 Noviembre/Diciembre 2005, Boletín de Ingeniería de Perforación y Mantenimiento de Pozos. (Editada).

Por lo tanto hablar de una técnica de perforación de alcance extendido es relativamente nueva en nuestro país, puesto que en ningún pozo ha sido implementada, ya que hasta el momento solo se han perforado pozos del tipo vertical, desviados, direccionales, horizontales y multilaterales, y en el caso de desplazamiento horizontal solo se ha logrado una clasificación de pozos de alcance medio, sin embargo la documentación mostrada por la Comisión Nacional de Hidrocarburos en 2013 “Dictamen técnico del proyecto de explotación Costero Terrestre (Nuevo)”, muestra 3 alternativas para el desarrollo del campo Ribereño, presentadas por PEMEX en el periodo 2013-2039, en las cuales se habla de la perforación de 4 pozos de desarrollo de alcance extendido, sin llegar a ser un hecho hasta el momento (solo un proceso hasta su culminación).

Otra alternativa para la implementación de tecnología de alcance extendido se llevó a cabo en el proyecto El Golpe – Puerto Ceiba (Explotación), Ubicado al noreste del estado de Tabasco. Los campos involucrados son: Ayapa, Castarrical, El golpe, Mayacaste, Puerto Ceiba, Santuario, Tajón, Tintal y Tupilco. La estrategia de explotación en dicho proyecto considera la perforación de 24 pozos de desarrollo (una combinación de pozos de alcance extendido y direccionales, desde macroperas existentes).

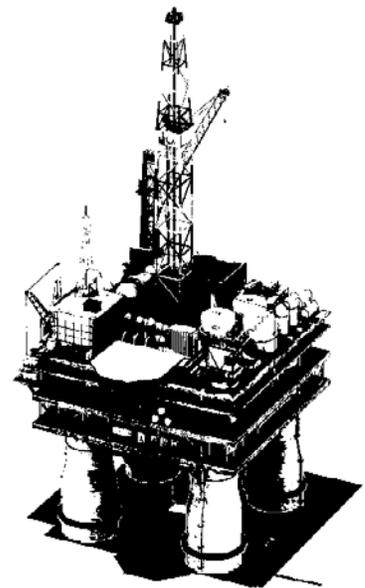
## REFERENCIAS

1. <http://www.ogj.com/articles/print/volume-97/issue-20/in-this-issue/general-interest/total-drills-extended-reach-record-in-tierra-del-fuego.html>.
2. <http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-72/issue-9/drilling-and-completion/extended-reach-drilling-advances-to-meet-industry-need.html>
3. <http://www.sakhalin-1.com/Sakhalin/Russia-English/Upstream/default.aspx>
4. <http://www.theoilandgasyear.com/news/sakhalin-1-consortium-sets-drilling-record/>
5. <http://news.exxonmobil.com/press-release/sakhalin-1-project-drills-worlds-longest-extended-reach-well>

6. Frank Allen, Paul Tooms; BP Exploration Operating Co. Ltd. Poole, England. Greg Conran; Poole, England. Bill Lesso, Patrick Van de Slijke; Sugar Land, Texas, USA (Verano de 1997). Extended-Reach Drilling: Breaking 10-Km Barrier.
  
7. Vishwas P. Gupta, ExxonMobil Development Company; Angel H.P. Yeap, Kyle M. Fischer, SPE, Randall S. Mathis, Exxon Neftegas Ltd.; Michel J. Egan, AIPC, Consultant to Exxon Neftegas Ltd. (2014). Expanding the Extended Reach Envelope at Chayvo Field, Sakhalin Island. IADC/SPE-168055
  
8. Harald Blikra, K.E. Drevclal, and T.V. Aarrestad, Statoil A/S. (1994). Extended Reach, Horizontal, and Complex Design Wells: Challenges, Achievements and Cost-Benefits. SPE-28005-MS
  
9. M. L. Payne, B. S. Wilton, and G. G. Ramos, ARCO Exploration and Production Technology SPE Members. (1995). Recent Advances and Emerging Technologies for Extended Reach Drilling. SPE-29920-ms

10. Comisión Nacional de Hidrocarburos, Dictamen del Proyecto de explotación El Golpe – Puerto Ceiba (mayo 2012).

# Capitulo 2.0



*Pozos de Alcance Extendido*

*(ERD).*

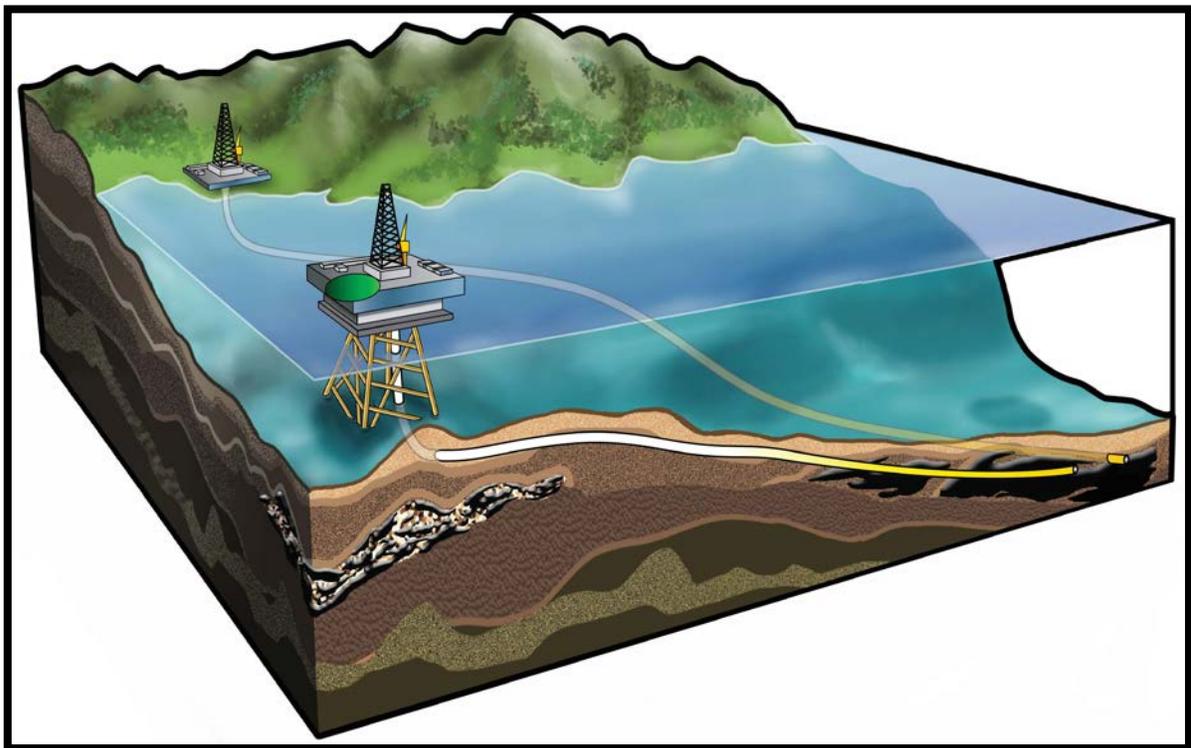
## **2.1 Descripción de pozos de alcance extendido, ERD.**

Un pozo de alcance extendido desde un punto de vista progresivo puede referirse al apogeo actual de la evolución de la perforación direccional. Esto representa una metodología de perforación de pozos de alto-ángulo con desplazamientos horizontales muy largos.

Las perforaciones de alcance extendido (ERD) generalmente se asocian a escenarios donde el acceso al yacimiento puede realizarse en una locación en tierra y mediante una trayectoria de varios kilómetros se puede alcanzar un objetivo más allá de la localización original. Sin embargo, existen otros escenarios donde la implementación de un pozo ERD es la mejor alternativa. Por ejemplo, en el caso de un campo que ya cuenta con la infraestructura para la perforación y producción en una localidad es innecesario desplazar dicha maquinaria, en estos casos se puede realizar una perforación de alcance extendido.

Por otro lado, esta técnica, busca reducir los impactos ambientales, incrementa la productividad y el área de drene del yacimiento. Además, respecto al beneficio-costos es una excelente alternativa, ya que reduce el número de

plataformas y/o anula el uso de infraestructura marina. Mientras que, en escenarios terrestres, puede reducir el número de perforaciones a lo largo del yacimiento, a través de trayectorias horizontales largas y con cambios de azimut (Pozos complejos). Por lo tanto, un pozo de alcance extendido en la mayoría de los casos es la opción más acertada, puesto que las limitaciones técnicas, económicas o ambientales de muchos escenarios no permiten realizar perforaciones del tipo convencional, asimilando como mejor alternativa la perforación de un pozo de alcance extendido.



*Figura 5, representación de un pozo de Alcance Extendido (ERD), costa afuera y terrestre para alcanzar objetivos lejanos. Katle Mazerov, Editor colaborador. Noviembre 2, 2012,*

*Technology Development: A game of risks vs rewards. Url:*

[http://www.drillingcontractor.org/wp-content/uploads/2012/10/web\\_ReelwellExtended-](http://www.drillingcontractor.org/wp-content/uploads/2012/10/web_ReelwellExtended-)

[Reach-Drilling.jpg](#) (Editada).

Debido a que la perforación de pozos de alcance extendido es una evolución de pozos horizontales y direccionales, muchas de las ventajas de este tipo de pozos son intrínsecas de los pozos ERD, por lo tanto, otras ventajas de estos pozos se mencionan a continuación.

#### VENTAJAS.

*Incremento de la Exposición a la formación.* Una de las mayores razones para considerar una perforación horizontal es el incremento del área de exposición con la formación, de esta manera aquellas formaciones con baja permeabilidad o yacimientos con crudo pesado son más factibles de producir económicamente mediante un pozo horizontal y no uno vertical. Por lo tanto, candidatos excelentes para perforaciones ERD son objetivos de formaciones estrechas.

*Reducción de Conificación de agua y gas.* Comúnmente un yacimiento de hidrocarburo en la sección inferior posee un acuífero asociado mientras que en

la parte superior el gas se encuentra presente en yacimientos saturados, mientras que en el caso de un yacimiento no saturado el gas comienza a aparecer al abatir la presión formando un casquete de gas. Por lo tanto, en la terminación de un pozo, normalmente se evita tocar estas dos secciones de gas y agua, sin embargo, después de un periodo de producción el agua o gas pueden migrar hacia el pozo en producción provocando un fenómeno nombrado como conificación. El resultado de este fenómeno es una zona de producción reducida y estrangulada en las cercanías del pozo.

Por tal motivo un pozo de alcance extendido al finalizar en una sección horizontal, y en este caso los pozos cuentan con presiones de extracción menores que los verticales, por ende, disminuyen la posibilidad de generar conificación.

*Intersección de fracturas verticales.* Muchos de los yacimientos importantes a nivel mundial se han localizado en calizas o dolomías, este tipo de formaciones se fracturan con facilidad debido a las fuerzas geológicas a las que se encuentran sometidas, por lo tanto, comúnmente estas, poseen innumerables fracturas, las cuales tienden a encontrarse perpendiculares al

plano vertical, por tal motivo la intersección de estas con un pozo vertical se vuelve un poco complicado, pero ideales para pozos horizontales.

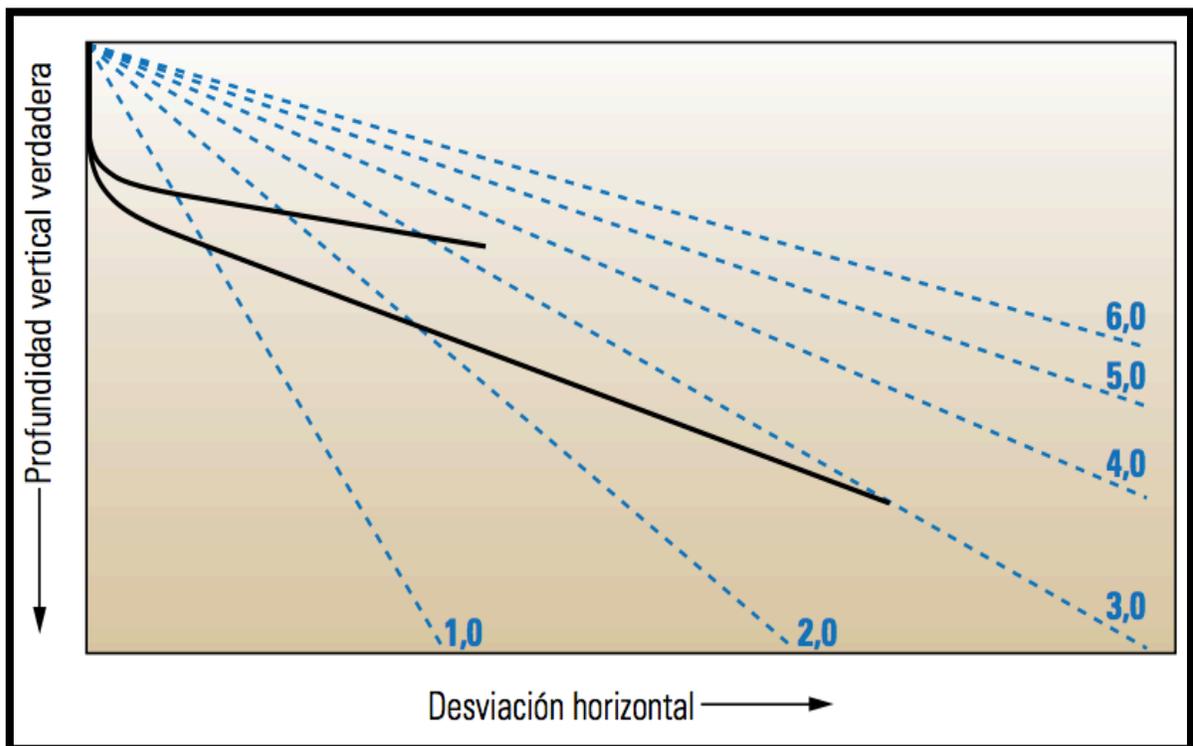
Recuperación Mejorada. La larga exposición con la formación de un pozo horizontal permite la aplicación de técnicas de EOR (Inyección de agua o vapor) para una mayor recuperación de hidrocarburo, extendiendo la vida de campos maduros.

## **2.1 Definición de pozos de alcance extendido (ERD).**

Un perforación de alcance extendido por sus siglas en inglés “Drilling Extenden-Reach” se define como un pozo de alcance extendido el cual es una relación de desviación de desplazamiento horizontal vs profundidad vertical verdadera (HD/TVD) de más de 2.0, es decir se le llama pozo de alcance extendido cuando el desplazamiento horizontal es aproximadamente dos veces el desplazamiento vertical, sin embargo hasta la fecha los desplazamientos en la horizontal han ido más allá siendo hasta casi 5 veces el desplazamiento horizontal con respecto a la vertical, este último recibe el nombre de pozos de ultra alcance.

## 2.2 Clasificación de pozos de alcance extendido (ERD).

La relación desviación horizontal – profundidad vertical verdadera (HD/TVD) constituye un indicador de la complejidad de un pozo de alcance extendido, cuanto más alta sea esta relación más compleja será el pozo. Sin embargo, se trata de un indicador básico de la dificultad que implica perforar un pozo ERD.



*Figura 6, gráfica de relación de desviación horizontal Vs profundidad vertical verdadera un indicador de la complejidad de un pozo de alcance extendido. Bjarne Bennetzen (Maersk Oil Qatar AS), John Fuller (Gatwick, Inglaterra), Erhan Isevcan (Doha, Qatar); Tony Krepp, Richard Meehan y Nelson Mohammed (The Woodlands, Texas, EUA), Jean-Francois Poupeau (Houston, Texas) y Kumud Sonnwal (Zakum Development Company, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos); Otoño de 2010, Pozos de alcance extendido.*

Una vez que el pozo ha sido clasificado como un pozo ERD por la variante HD/TVD de más de 2.0 los pozos ERD en general pueden clasificarse en pozos con una TVD muy profunda o muy somera, cada uno con sus respectivos desafíos.

Los pozos con una TVD muy somera normalmente se perforan en formaciones suaves, no consolidadas con gradientes de fractura relativamente bajos. La estrecha ventana entre el gradiente de fractura y el de poro resultante cobra mayor importancia conforme se incrementa el desplazamiento horizontal y las densidades equivalentes de circulación (ECD) se incrementan. Además, cuando la distancia entre el equipo de perforación y la sección objetivo del yacimiento es relativamente corta, es probable que los pozos someros serán desviados formando un ángulo agudo. Esta trayectoria

resultante ocasiona problemas de torque y flexión (buckling) en la sarta de perforación.

En el caso de pozos ERD con TVD profunda, estos se ven limitados por la tensión en la sarta de perforación y los grandes esfuerzos laterales que provocan desgaste en la TR. Un subconjunto de este tipo de pozos son los pozos en aguas profundas, sin embargo, estos son poco comunes debido a que es más factible, técnica y económicamente desplazar una plataforma flotante de perforación hacia la formación objetivo que perforar en sentido horizontal. No obstante, con el declive de las tasas de producción en las plataformas de producción fijas, es probable que los campos en donde operan se conviertan en candidatos para perforación de pozos ERD, diseñados para conectar con yacimientos lejanos. Por otro lado, los pozos 3D complejos aumentaron en los últimos años, involucrando nuevas herramientas de perforación rotativa direccional y MWD más sofisticadas. Estos pozos se caracterizan por los numerosos y significativos cambios de azimut diseñados para mantener el pozo en dirección de sus objetivos.

Además de la relación HD/TVD y TVD somera y profunda (Profundidad del agua), existen otra serie de factores que definen la complejidad de un pozo ERD.

- Capacidades de la plataforma en cuestión.
- Tamaños y profundidades del agujero.
- Tipo y propiedades de los fluidos de perforación.
- Factores litológicos.
- Estrategia de perforación direccional.

#### LIMITACIONES.

- Excesivo torque y arrastre. (Herramientas de perforación convencionales son propensas a sufrir atascamiento).
- No existe una buena limpieza del agujero en secciones largas y de gran inclinación angular.
- Posible pandeo de la TP o TR.
- Correr tubería de revestimiento hasta el fondo del pozo.
- Dirigir un pozo con precisión hasta alcanzar la zona objetivo.
- Control direccional no tan óptimo, particularmente crítico en algunos yacimientos complejos.

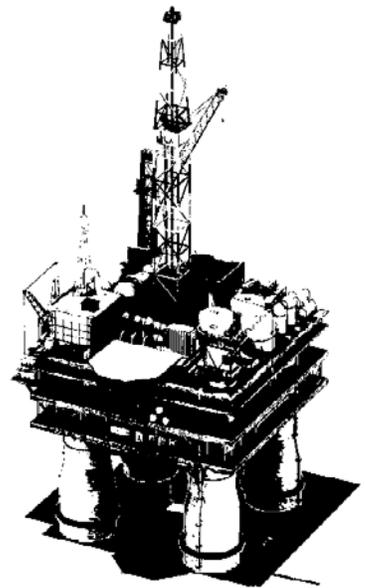
- Inestabilidad del pozo.

## **REFERENCIAS**

1. Bjarne Bennetzen (Maersk Oil Qatar AS), John Fuller (Gatwick, Inglaterra), Erhan Isevcan (Doha, Qatar); Tony Krepp, Richard Meehan y Nelson Mohammed (The Woodlands, Texas, EUA), Jean-Francois Poupeau (Houston, Texas) y Kumud Sonwal (Zakum Development Company, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos); Otoño de 2010, Pozos de alcance extendido.

2. Harald Blikra, K.E. Drevdal, y T.V. Aarrestad, Statoil A/S. 1994,  
Extended Reach, Horizontal, and Complex Design Wells: Challenges,  
Achievements and Cost-Benefits.

# Capitulo 3.0



# *Métodos para el diseño de trayectorias en 3D.*

## **3.1 Conceptos fundamentales.**

Para cualquier tipo de perforación direccional, existen tres componentes, los cuales pueden ser medidos para cualquier punto en la trayectoria del pozo con el objetivo de determinar su posición en el espacio. Esta técnica de medición de los tres componentes es llamada survey. Dichos componentes a medir son:

- La profundidad
- El ángulo
- Azimuth

*Azimuth*: Es el ángulo ( $^{\circ}$ ) entre la dirección norte y el plano que contiene la línea vertical de la cabeza del pozo y la línea vertical a través del objetivo. O medida angular en grados, forma la componente horizontal de la trayectoria o del eje de la herramienta de medición, con el Norte verdadero, Norte magnético o Norte de grilla; por convención este parámetro es medido en grados en dirección positiva de acuerdo a las manecillas del reloj. Además, puede ser expresado en grados ( $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ) o en cuadrantes (Noreste, Sureste, Suroeste o Noroeste).

En cada corrida de profundidad verdadera (MD), la inclinación y la dirección del pozo es registrada en una estación survey (Figura 7), por lo que el conjunto de varias mediciones puede representar la trayectoria en 3 dimensiones del pozo.

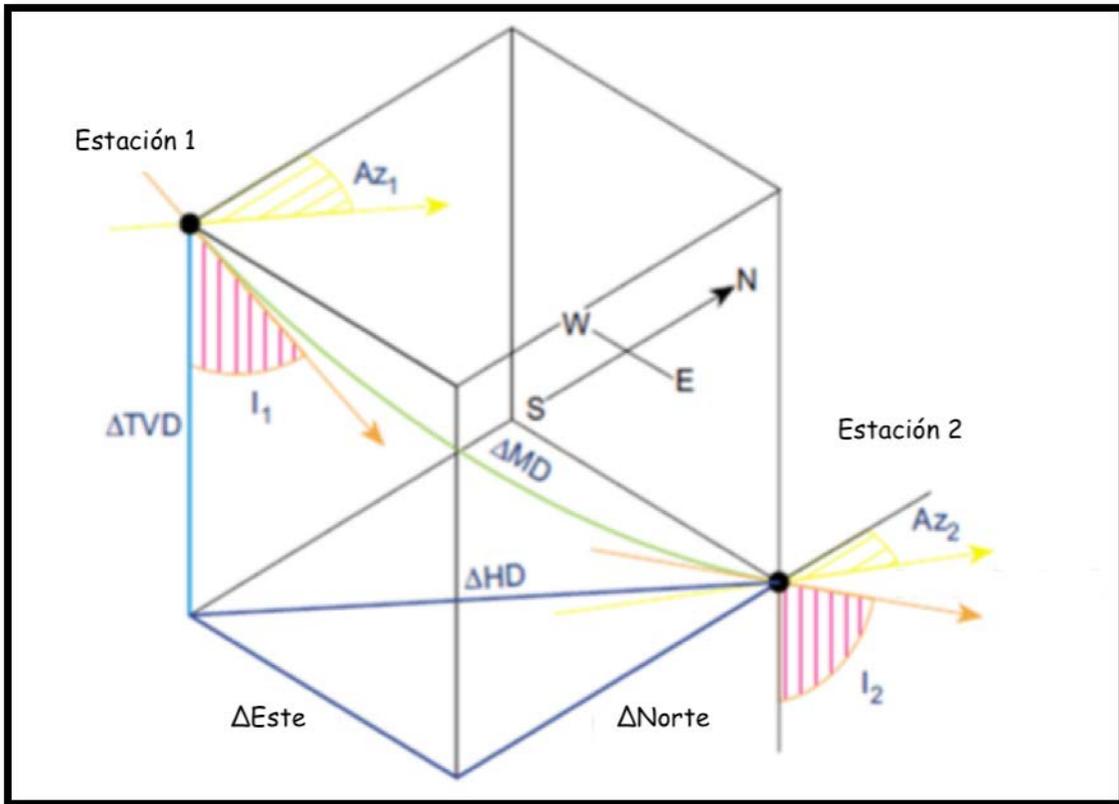


Figura 7. Parámetros para el cálculo de trayectorias. Farah Omar Farah. Reports 2013, *Directional well design, trajectory and survey calculation, with case study in Fiale, Asal rif, Djibouti (Editada).*

*Sección de construcción angular (Build-Up Rate):* Se refiere a la sección de construcción angular, es decir el punto de inicio de construcción contante (fase de Incremento angular). Además, se puede expresar como la velocidad a la cual se construye la inclinación del pozo ( $^{\circ}/30[m]$ ).

*Sección de decremento angular (Drop-Off Point):* Se refiere a la profundidad donde el ángulo del agujero comienza a descender.

*Inclinación:* ángulo ( $^{\circ}$ ) formado por la sección tangencial del pozo y la vertical.

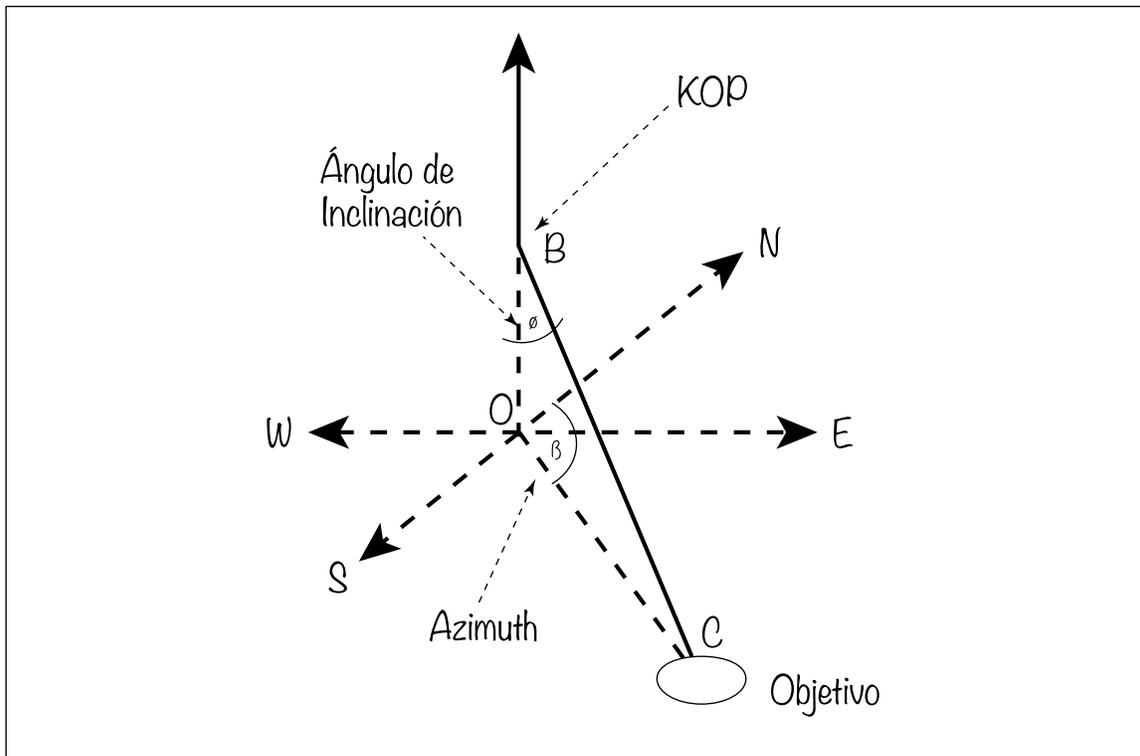
*Profundidad Medida (MD).* La profundidad medida o Measured depth (MD por sus siglas en ingles), corresponde a la profundidad actual del hoyo medida desde la superficie, a lo largo de la tubería de perforación.

*Profundidad Vertical Verdadera (TVD).* Distancia vertical entre el Kelly Bushing y la estación survey.

*Desplazamiento Horizontal (DH).* Distancia horizontal entre la línea vertical del pozo y el objetivo.

*Sección Tangencial.* Es la sección del pozo donde la trayectoria del pozo mantiene una cierta inclinación, con el intento de incrementarla TVD y la sección vertical.

*Severidad de pata de perro (Dog Leg Severity)*. Es una medida del cambio en la inclinación y/o azimut de un pozo, por lo general se expresa en grados por cada 100[ft] o 30[m], es decir  $^{\circ}/100[\text{ft}]$  o  $30[\text{m}]$ .



*Figura 8, Parámetros de medición de un pozo direccional. Farah Omar Farah. Reports 2013, Directional well design, trajectory and survey calculation, with case study in Fiale, Asal rif, Djibouti (Editada).*

Durante el proceso de planificación de la trayectoria de un pozo es muy importante considerar tres parámetros fundamentales:

- *Punto de comienzo de la desviación (Kick Off Point)*: profundidad medida o punto inicial a la cual comienza una desviación provocada en la trayectoria del pozo, es decir el pozo es orientado en alguna dirección en particular (Norte, sur y Oeste). Por lo general cuando existe un objetivo muy distante poseen los Kop's más superficiales, ya que de esta forma se reduce la inclinación de la sección tangente.
- *Tasa de construcción angular (Grados de Inclinación)*: se refiere a las velocidades a las cuales el pozo es desviado de la vertical, generalmente se mide en grados por cada 30 m o 100 ft. La tasa de construcción se elige con base a la experiencia de perforación previa de la zona y por la disponibilidad de herramientas.

Debido a que las tasas de incremento y decremento angular son constantes en pozos convencionales varían entre 1° y 3° cada 30 m o 100 ft, por lo tanto, por definición estas secciones forman una sección circular. Mientras que tasas superiores a 3° causan secciones curvas cerradas en pozos desviados convencionales. La tasa de acumulación a menudo recibe el nombre de Dogleg Severity (Severidad de pata de perro o DLS por sus siglas en ingles).

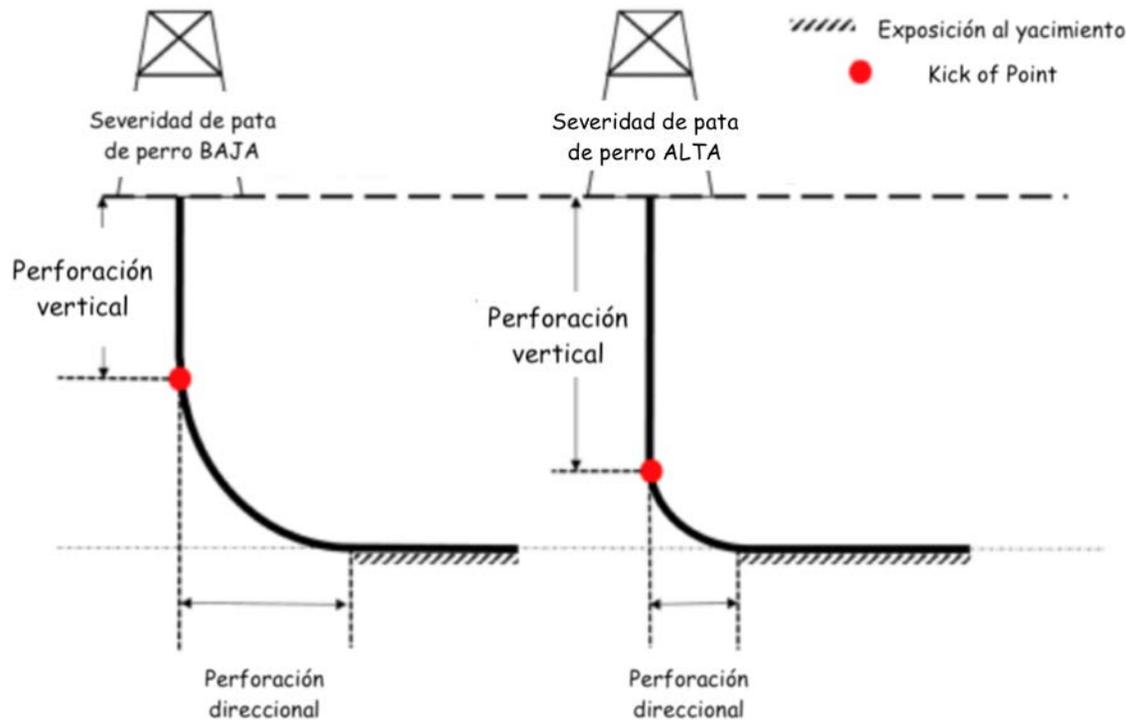


Figura 9, Severidad de Pata de Perro alta y baja, DLS. Jongheon Kim and Hyun Myung, 31 de Octubre 2017. Development of a Novel Hybrid-Type Rotary Steerable System for

Directional Drilling. URL:

<http://ieeexplore.ieee.org/document/8090529/?part=undefined%7Cfig1#fig1>

- *Angulo Tangente del pozo (Drift Angle):* Es la inclinación (En grados desde la vertical) de la sección recta más larga del pozo posterior a la sección de incremento angular del pozo. Esta sección se denomina tangente debido a la creación de una tangente en el arco formado por la sección de incremento del pozo.

El ángulo de la sección tangente comúnmente se encuentra entre  $10^\circ$  y  $60^\circ$ , ya que es difícil de controlar trayectorias de pozos con ángulos por debajo de  $10^\circ$  y además es muy complicado el uso de herramientas de línea de cable en ángulos superiores a  $60^\circ$ . Sin embargo, este último factor solo es importante de considerar el pozos direccionales o desviados, en el caso de los pozos ERD es descartado.

### **3.2 Métodos de diseño de trayectorias en 3D.**

Aproximadamente existen más de 18 métodos actualmente para calcular o determinar la trayectoria de un pozo convencional. Sin embargo, existe una diferencia muy marcada entre todos estos métodos, el primero de estos grupos se caracteriza por hacer aproximaciones mediante secciones cortas de líneas rectas mientras que el segundo grupo asume que el pozo se encuentra constituido por más de una curva por lo que la aproximación se lleva a cabo mediante segmentos curvos. A continuación, se muestra una tabla con 6 de los métodos más utilizados actualmente en la industria petrolera

*Tabla 1. Principales métodos para diseño de trayectoria de pozos en la industria petrolera*

<i>MÉTODO</i>	<i>TVD</i>	<i>DIF. REAL [ft]</i>	<i>DESP. NORTE</i>	<i>DIF. REAL[ft]</i>
<i>Tangencial</i>	<i>1,628.61</i>	<i>-25.38</i>	<i>998.02</i>	<i>43.09</i>
<i>Tangencial Balanceado</i>	<i>1,653.61</i>	<i>-0.38</i>	<i>954.72</i>	<i>-0.21</i>
<i>Mercury</i>	<i>1,653.62</i>	<i>-0.37</i>	<i>954.89</i>	<i>0.04</i>
<i>Ángulo promediado</i>	<i>1,654.18</i>	<i>0.19</i>	<i>955.04</i>	<i>0.11</i>
<i>Radio de curvatura</i>	<i>1,653.99</i>	<i>0</i>	<i>954.93</i>	<i>0</i>
<i>Mínima curvatura</i>	<i>1,653.99</i>	<i>0</i>	<i>954.93</i>	<i>0</i>

Como puede observarse el método Tangencial presenta un error considerable respecto a la dirección Norte, Este y en la elevación por lo que este no es el más asimilado por la industria del petróleo. Mientras que los demás métodos muestran una mínima diferencia y cualquiera de estos puede ser utilizado para calcular la trayectoria de un pozo. Sin embargo, el método más utilizado en la industria es el de mínima curvatura ya que este puede ser utilizado en cualquier tipo de trayectoria, mientras que Radio de Curvatura suele usarse estrictamente en pozos con secciones curvas y, por último, el método Tangencial, Tangencial Balanceado, Mercury y Ángulo Promediado son aplicables a pozos que siguen una trayectoria recta. La ecuación para cada uno

de los métodos mencionados anteriormente se muestra a continuación en la siguiente tabla.

*Tabla 2. Ecuaciones fundamentales para los 6 métodos más importantes en la industria petrolera.*

<b>TANGENCIAL</b>	$\Delta E = \Delta MD * \text{sen}I_2 * \text{sen}A_2$ $\Delta N = \Delta MD * \text{sen}I_2 \text{cos}A_2$ $\Delta V = \Delta MD * \text{cos}I_2$
<b>TANGENCIAL BALANCEADO</b>	$\Delta E = \frac{\Delta MD}{2} * [\text{sen}I_1 * \text{sen}A_1 + \text{sen}I_2 * \text{sen}A_2]$ $\Delta N = \frac{\Delta MD}{2} * [\text{sen}I_1 * \text{sen}A_1 + \text{sen}I_2 * \text{sen}A_2]$ $\Delta V = \frac{\Delta MD}{2} * [\text{cos}I_1 + \text{cos}I_2]$
<b>MERCURY</b>	$\Delta E = \frac{1}{2} [\Delta MD - STL] [\text{sen}I_1 * \text{sen}A_1$ $+ \text{sen}I_2 \text{sen}A_2] + A$ $\Delta N = \frac{1}{2} [\Delta MD - STL] [\text{sen}I_1 * \text{cos}A_1$ $+ \text{sen}I_2 \text{cos}A_2] + B$

	$\Delta V = \frac{1}{2} [\Delta MD - STL] [\cos I_1 + \cos I_2] + (STL) * \cos I_2$ <p>Donde:</p> $A = STL * \sin I_2 * \sin A_2$ $B = STL * \sin I_2 * \cos A_2$
<p><b>ÁNGULO PROMEDIADO</b></p>	$\Delta E = \Delta MD * \sin(I_{AVG}) * \sin(A_{AVG})$ $\Delta N = \Delta MD * \sin(I_{AVG}) * \cos(A_{AVG})$ $\Delta V = \Delta MD * \cos(I_{AVG})$ <p>Donde:</p> $I_{AVG} = \frac{I_1 + I_2}{2}$ $A_{AVG} = \frac{A_1 + A_2}{2}$
<p><b>RADIO DE CURVATURA</b></p>	$\Delta E = \frac{\Delta MD (\cos I_1 + \cos I_2) (\cos A_1 + \cos A_2)}{(I_2 - I_1) (A_2 - A_1)}$ $\Delta N = \frac{\Delta MD (\cos I_1 - \cos I_2) (\sin A_2 + \sin A_1)}{(I_2 - I_1) (A_2 - A_1)}$ $\Delta V = \frac{\Delta MD (\sin I_2 + \sin I_1)}{(I_2 - I_1)}$

<p><b>CURVATURA MÍNIMA</b></p>	$\Delta E = \frac{\Delta MD}{2} * [\text{sen}I_1 * \text{sen}A_1 + \text{sen}I_2 * \text{sen}A_2] * RF$ $\Delta N = \frac{\Delta MD}{2} * [\text{sen}I_1 * \text{cos}A_1 + \text{sen}I_2 * \text{cos}A_2] * RF$ $\Delta V = \frac{\Delta MD}{2} * [\text{cos}I_1 + \text{cos}I_2] * RF$ <p>Donde:</p> $\beta_i = \text{cos}^{-1}[\text{cos}(I_2 - I_1) - \text{sen}I_1 * \text{sen}I_2[1 - \text{cos}(A_2 - A_1)]]$ $RF = \frac{2}{\beta_i} * \text{tang}\left(\frac{\beta_i}{2}\right)$
------------------------------------	--

### Nomenclatura.

$\Delta E$ : Cambio en dirección este

$\Delta N$ : Cambio en dirección norte

$\Delta V$ : Cambio en dirección vertical

$\Delta MD$ : Profundidad medida entre 2 estaciones

$I_2$ : Inclinación en estación (survey) superior

$I_1$ : Inclinación en estación (survey) inferior

$A_2$ : Azimuth en estación (survey) superior

$A_1$ : Azimuth en estación (survey) inferior

STL: Longitud de la herramienta en la estación (survey)

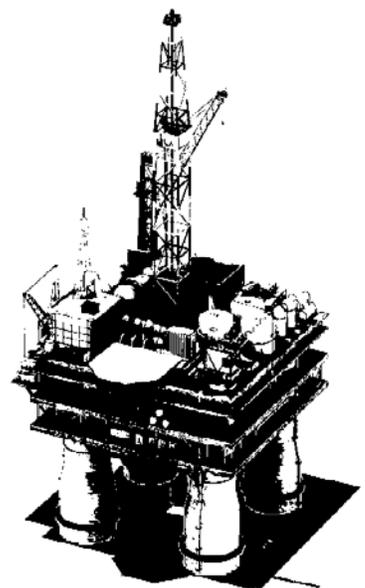
$\beta_i$  o DL: ángulo severidad de pata de perro

Una vez que se han mencionado los métodos más utilizados en la industria petrolera y cada una de sus ecuaciones. Cabe mencionar que el método con mayor eficiencia para ser aplicado en el diseño de un pozo de alcance extendido es el de curvatura mínima, ya que, este método es considerado el más eficiente en el cálculo de trayectorias de pozos direccionales, y, al ser considerado un pozo de alcance extendido una evolución de un pozo direccional se vuelve el método ideal para este caso.

REFERENCIAS.

1. Farah Omar Farah (Ministry of Energy and Natural Resources), Reports 2013, Directional Well Design, Trajectory and Survey calculations, with case study in Fiale, Asal rift, Djibouti.
2. J.A. "JIM" Short, 1993. Directional and horizontal drilling.

# Capitulo 4.0



# *Diseño de trayectorias de pozos ERD.*

## **4.1 Introducción.**

Debido a las problemáticas que se presentan este tipo de pozos (ERD), como limitaciones de torque y arrastre, limpieza del agujero, estabilidad del agujero, administración de la densidad equivalente de circulación (ECD) y reología para el control de sólidos, se debe realizar una muy buena planeación en los diferentes procesos de perforación de un pozo de alcance extendido; Por lo que proyectos recientes han determinado una serie de factores que son parte primordial para el desarrollo de un pozo ERD. Estos factores se mencionan a continuación:

- ✓ Diseño de la trayectoria del pozo.
- ✓ Torque, arrastre y Buckling.
- ✓ Diseño del revestimiento.
- ✓ Diseño de la sarta de perforación y BHA.
- ✓ Estabilidad del pozo.
- ✓ Limpieza del agujero
- ✓ Administración de la ECD (Densidad equivalente de circulación).

Los limitantes en el desplazamiento horizontal en un pozo de alcance extendido ocurren debido a las fuerzas de fricción entre la sarta de tubería flexible (TF) y al momento de correrse dentro del pozo. Lo cual provoca

buckling helicoidal y posteriormente bloqueos de la tubería flexible. Entonces, para evitar la generación de buckling es necesario reducir el coeficiente de fricción en el contacto de la TF y el pozo. Además, si se incrementa la rigidez de la tubería flexible en cualquier sección del pozo, también se puede reducir una posible aparición de buckling. Además, las pérdidas de presión ocasionadas por la fricción entre el fluido de perforación y las paredes del pozo son un componente de la ECD. Comúnmente en pozos verticales el incremento de la ECD se hace a un ritmo más lento comparado con el gradiente de fractura, sin embargo, en secciones horizontales el incremento del gradiente de fractura es igual a 0, mientras que el incremento de la ECD aumenta con la longitud del pozo.

***DISEÑO DE TRAYECTORIA.*** Para un proyecto de perforación de pozos de alcance extendido, uno de los factores a considerar es el diseño de la trayectoria o perfil del pozo. Comúnmente la trayectoria de un pozo ERD está constituida por una sección vertical, sección de construcción y por último la sección para mantener el ángulo. Este particionamiento de la trayectoria en tres secciones particularmente se debe al diseño de profundidades verticales más cortas para lograr mayor alcance horizontal. Sin embargo, para un óptimo diseño de un pozo ERD deben considerarse otros factores. Los esfuerzos en la

sarta de perforación y desgaste del revestimiento, obligadamente la plataforma de perforación y la capacidad del top drive, y como se ha mencionado reiteradamente el torque y arrastre.

El diseño del perfil de pozo optimo no es solo un simple diseño de curvas geométricas, en realidad debe considerarse como un proyecto integrado estrechamente relacionado con la mecánica de perforación y la ingeniería de perforación.

Dicho lo anterior, los tres principios fundamentales para el diseño de una trayectoria de pozos de alcance extendido son:

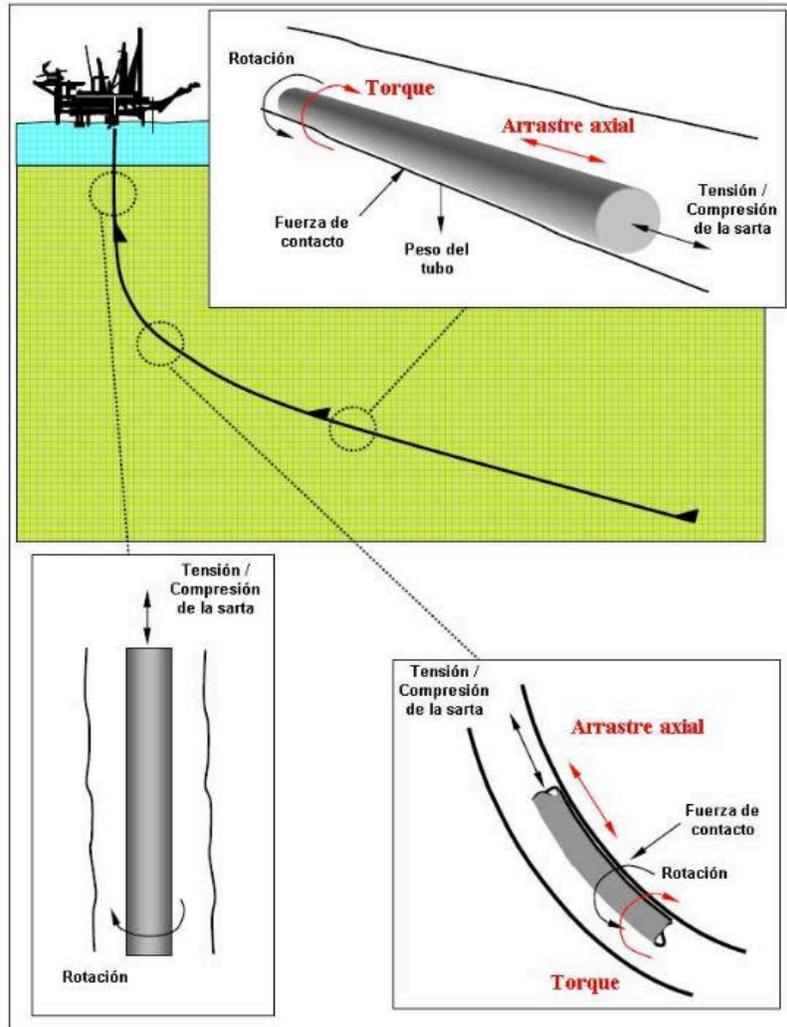
***TORQUE Y ARRASTRE.*** El torque es una fuerza de carga rotacional que se genera por diferentes razones dentro del pozo: torque friccional, torque mecánico y torque en la barrena.

*Torque Friccional.* Carga generada debido a las fuerzas de contacto entre la sarta de perforación y de revestimiento de la sección anterior o del agujero abierto.

*Torque Mecánico.* Es generado por la interacción de la sarta de perforación y el aparejo de fondo del pozo (BHA – Bottom Hole Assembly) con los hinchamientos o derrumbes de la formación, formaciones inestables.

*Torque en la Barrena.* E generado directamente por el contacto entre la barrena y la formación que se está perforando.

El arrastre, es una fuerza axial que se genera de manera similar al torque, por lo tanto, el arrastre toma el lugar del torque cuando la rotación de la sarta se detiene y la tubería únicamente se desplaza de manera axial. De igual manera que en el torque existe un factor de fricción y una componente mecánica.



*Figura 10. Fuerza sobre la tubería en un pozo con desviación. Alberto Cardona, Paul H. Kohan, Ricardo D. Quinteros, Mario A. Storti (Eds). Mecánica Computacional Vol XXXI, pags. 1085-1108 (2012). Salta, Argentina, 13-16 Noviembre 2012.*

Las claves en valores altos de torque y arrastre para la sarta de perforación y de revestimiento son las trayectorias horizontales largas y altas inclinaciones.

Las limitaciones generadas por el fenómeno de Torque y arrastre en pozos ERD se encuentran principalmente en las fases de perforación y terminación del pozo. El modelo más usado para estimar el Torque y Arrastre se basa en el modelo de Johansick et al (1983), ya que es muy simple, sin embargo, experiencia en campo demuestra que los resultados analíticos obtenidos suelen ser inexactos.

***MINIMIZACIÓN DE LA LONGITUD DEL POZO.*** La longitud del pozo difiere en cada uno de los perfiles que se mencionaran posteriormente, sin embargo, la selección de la trayectoria más corta brinda mayor certeza de un diseño óptimo de un pozo ERD.

#### **4.2 Consideraciones para el diseño.**

Asumiendo que el objetivo y la plataforma de perforación tienen un sitio seleccionado, las consideraciones para el diseño de una trayectoria direccional o de cualquier tipo son las siguientes:

- Desplazamiento lateral u horizontal.

- Punto de KickOff (KOP). El diseño de este parámetro influye directamente a la longitud del pozo y el incremento del torque y arrastre al aumentar la profundidad del KOP.

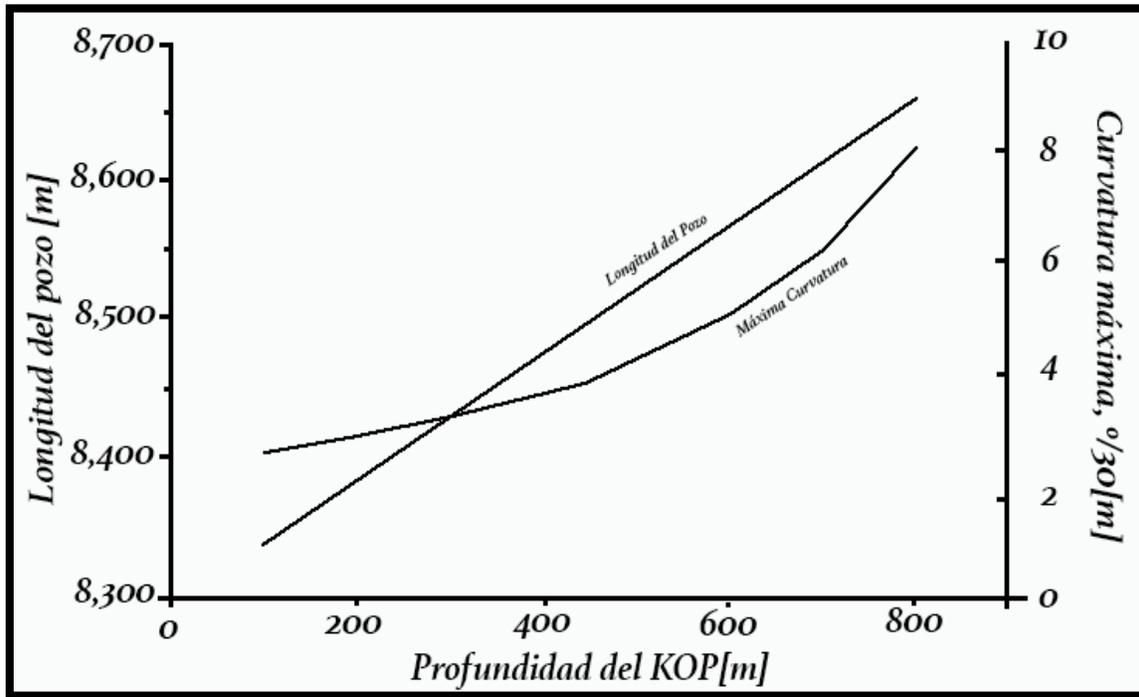


Figura 11. Profundidad del KOP en relación a la longitud del pozo y la curvatura máxima .Ma Shanzhou, Huang Genlu, Zhang Jianguo and Han Zhiyong, Petroleum University, East China. 1998, Study on Design of Extended Reach Well trajectory.

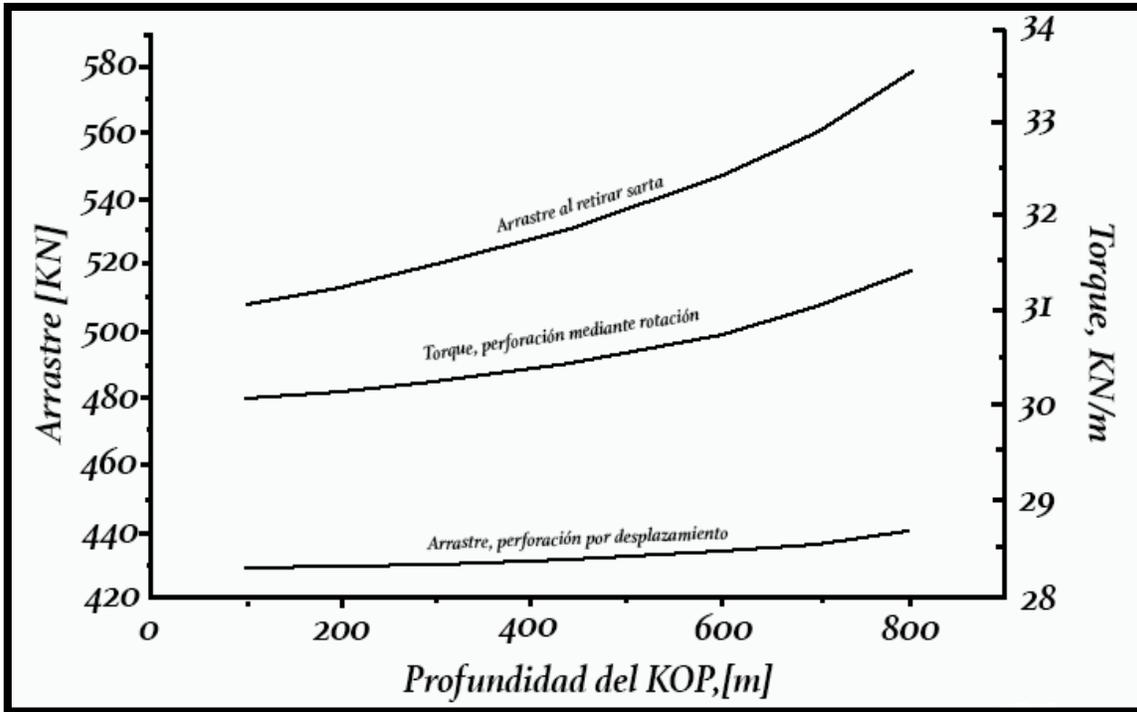


Figura 12. Relación del torque y arrastre respecto a la profundidad del KOP. Ma Shanzhou, Huang Genlu, Zhang Jianguo and Han Zhiyong, Petroleum University, East China. 1998, Study on Design of Extended Reach Well trajectory.

- o Ritmo de construcción de ángulo (BUR, por sus siglas en inglés). Este parámetro describe el incremento angular posterior al KOP, hasta alcanzar la inclinación objetivo. Los rangos más comunes para este parámetro oscilan entre los valores de 1-4 grados por cada 100 pies (1-4°/100[ft]), sin embargo, actualmente el cambio angular es más agresivo lo cual genera problemas de pata de perro (dogleg). La severidad de pata de perro es muy importante ya que define la factibilidad de un pozo para ser perforado. El registro DLS proporciona

la curvatura del pozo entre dos puntos de referencia, cada uno con su respectiva profundidad medida, azimut e inclinación.

En el caso de trayectorias de pozos ERD, el punto KOP se recomienda a poca profundidad para lograr ritmos de construcción de ángulo de casi  $90^\circ$  y lograr niveles de torque aceptables.

Las figuras 11 y 12, proporcionan información acerca del incremento del torque y arrastre al tirar de la tubería del pozo y al rotar con el incremento del BUR. El ritmo de construcción angular debe ser bajo, de esta manera lograr bajos valores de torque y arrastre. Sin embargo, un ritmo de construcción angular bajo provoca altos ángulos de retención y largas longitudes del pozo. Por lo que una adecuada selección de este parámetro es necesaria.

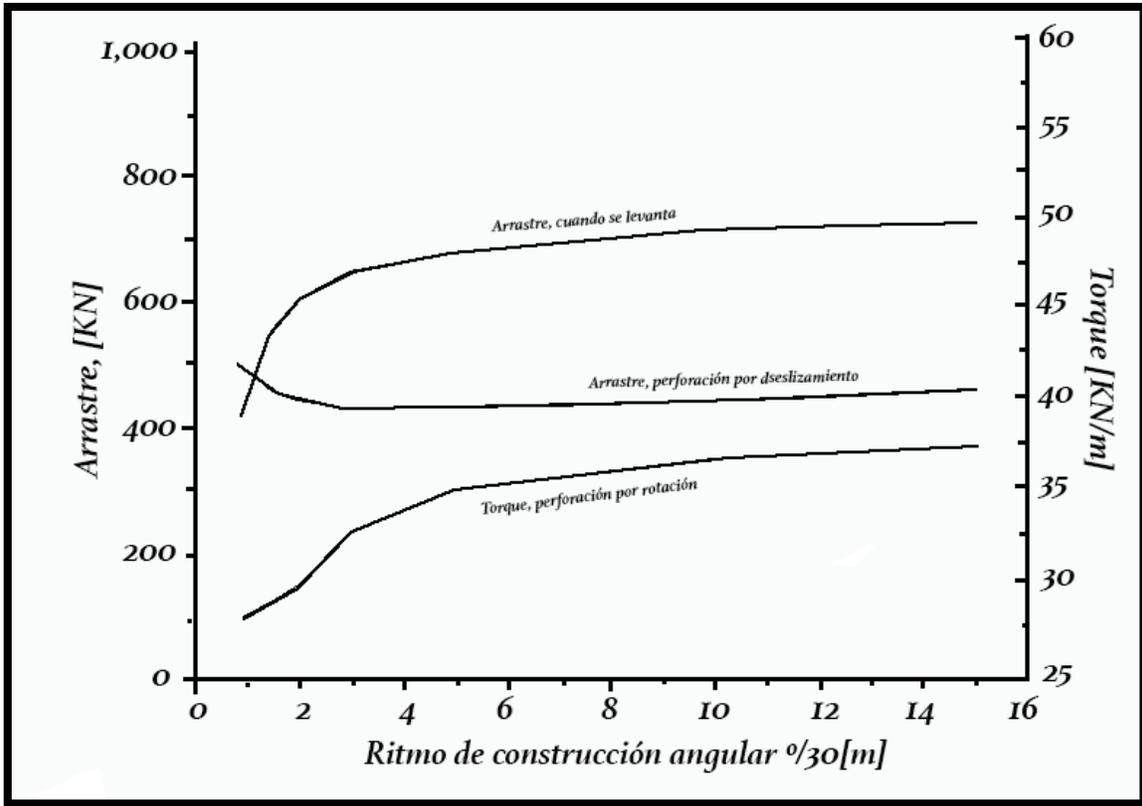


Figura 13. incremento del torque y arrastre al tirar de la tubería del pozo y al rotar con el incremento del BUR. Ma Shanzhou, Huang Genlu, Zhang Jianguo and Han Zhiyong, Petroleum University, East China. 1998, Study on Design of Extended Reach Well trajectory.

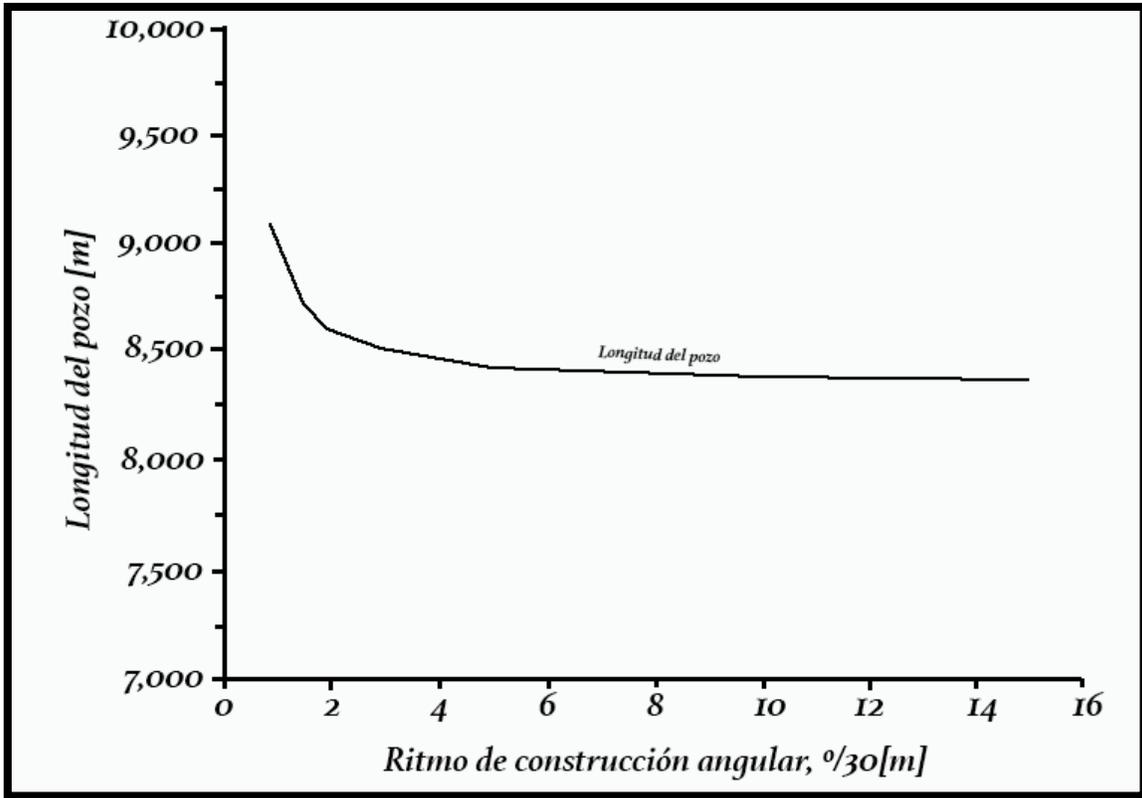


Figura 14, Alcance máximo de la longitud del pozo respecto al ritmo de construcción angular.

- o Elección del tipo de perfil: B&H, forma de “S”, Catenaria o Complejos.

Uno de los tantos métodos para la minimización del torque y arrastre es mediante la optimización del perfil de pozo. Los perfiles más utilizados en trayectorias de pozos de alcance extendido son: B&H, forma de “S”, Complejos y del tipo Catenaria, este último es el tipo de perfil más

recomendable en pozos ERD por lo que se le dará mayor énfasis más adelante.

**FORMA DE “S”.** Este perfil se caracteriza por su alto ángulo en la sección tangencial, mucho mayor que el tipo B&H. Además, presenta problemas respecto al torque y arrastre.

La sección más crítica se encuentra en la sección del decremento angular (Drop Point), al final de la sección tangente. Ya que, para lograr entrar al yacimiento será necesario incrementar el peso sobre la barrena.

**COMPLEJOS.** Estos perfiles se generan mediante el agregado de uno o varios giros azimutales a los pozos de alto ángulo. Si bien estos son más complicados de ejecutar que otros, los trayectos de estos pozos permiten al operador atravesar diferentes objetivos. Estos pozos suelen tener una sección horizontal orientada en un objetivo específico para un desarrollo óptimo de la producción.

**B&H.** Este perfil inicia de manera vertical hasta alcanzar el KOP, posteriormente se comienza a un incremento angular (Sección Tangencial).

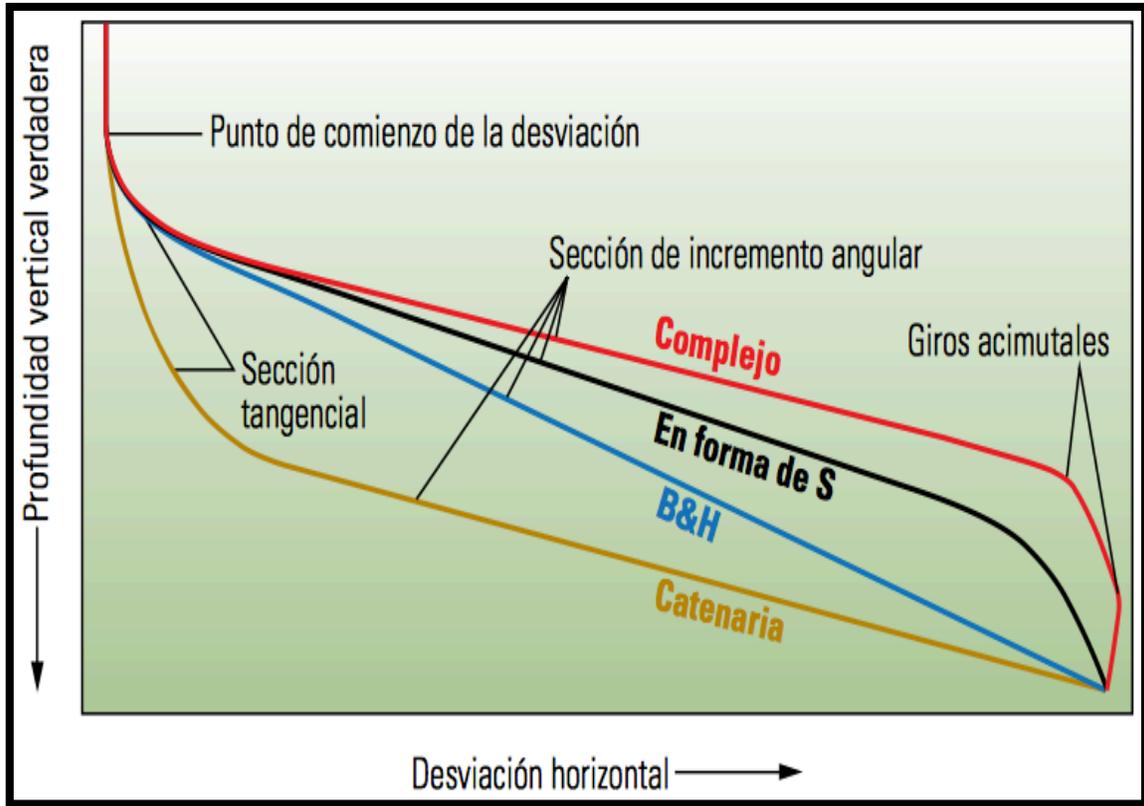
Posteriormente se alcanza un nuevo KOP y se comienza a disminuir el ángulo hasta alcanzar el objetivo.

**CATENARIA.** Este perfil representa una variación del tipo B&H, la tasa de incremento angular es más baja, por lo que este tipo de perfil puede incrementar significativamente la longitud del pozo, así como el ángulo. Sin embargo, el perfil tipo catenaria asocia problemas de arrastre, los cuales son directamente proporcionales a las dimensiones del pozo.

Un perfil de catenaria típico consta de 4 secciones principalmente: una sección recta inclinada hasta el KOP, una sección de incremento angular hasta la unidad catenaria, unidad de catenaria y finalmente una sección recta hasta el objetivo. La 1ª sección se hace llamar recta inclinada debido a que puede realizarse una perforación inclinada desde tierra, la 2ª sección es muy importante e indispensable ya que la unidad catenaria no puede comenzar verticalmente y finalmente la 4ª sección es indispensable para pozos de alcance extendido y ultra alcance.

Siempre que se realiza la planificación de un perfil de pozos, se tienen dos variables: la profundidad vertical total y desplazamiento horizontal hasta el objetivo. Los demás parámetros necesarios son los siguientes:

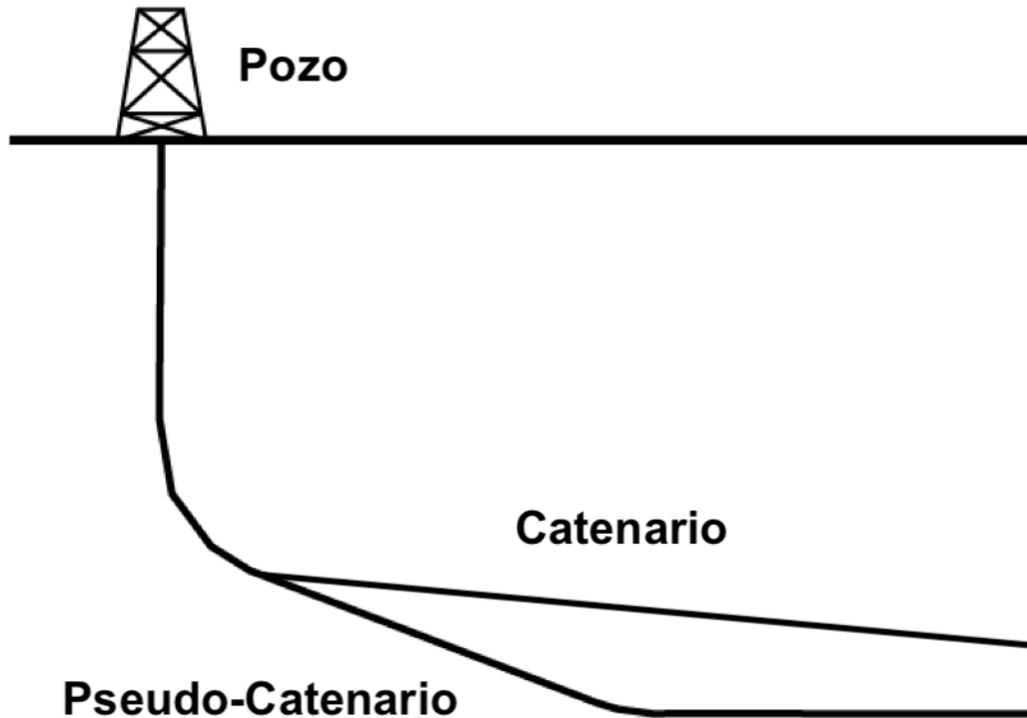
- ✓ Inclinación de la sección inclinada.
- ✓ Longitud de la sección inclinada.
- ✓ Radio de curvatura de la sección de construcción angular.
- ✓ Parámetro catenario.
- ✓ Inclinación de inicio de la sección catenaria.
- ✓ Inclinación final de la sección catenaria.
- ✓ Longitud de la sección recta.



*Figura 15, Variación de los tipos de perfiles de pozos. Bjarne Bennetzen (Maersk Oil Qatar AS), John Fuller (Gatwick, Inglaterra), Erhan Isevcan (Doha, Qatar); Tony Krepp, Richard Meehan y Nelson Mohammed (The Woodlands, Texas, EUA), Jean-Francois Poupeau (Houston, Texas) y Kumud Sonwal (Zakum Development Company, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos); Otoño de 2010, Pozos de alcance extendido.*

Una vez que se han presentado los perfiles de pozos más importantes o característicos de la industria, cabe destacar que el modelo más utilizado en la planeación de pozos de alcance extendido es el perfil tipo catenaria, debido a sus características que ayudan a alcanzar distancias más largas hasta el objetivo. A continuación, se presentan modelos tipo pseudo-catenaria con dos

secciones tangenciales y modelo catenario utilizados en pozos de alcance extendido a nivel mundial, ya que de esta manera se puede perforar de manera convencional mediante desplazamiento (control direccional y no rotario) y además simplifica las operaciones de revestimiento.



*Figura 16, Perfil pseudo-catenario para pozos de alcance extendido, Misael Zarco*

*Rodríguez, enero del 2018.*

1.- Campo Wytch Farm, Gran Bretaña. Los pozos perforados en este campo usaron el perfil catenario o pseudo-catenario con tasas de construcción angular de  $1-1.5^{\circ}/30$  m, incrementando en intervalos máximos de tasas de

construcción de 2.5°/30 m. La velocidad en el incremento angular fue diseñada aproximadamente de 0.5°/400 m.

2.- Cullen Norte #1, Tierra de fuego, Argentina. Al igual que en otros pozos de alcance extendido a nivel mundial, se utilizaron perfiles pseudo-catenario con tasas de construcción angular de 1.5 – 3.5° /30 [m], además con dos secciones tangenciales, una sección de inclinación larga de 5,215 [m] a 81° y una sección larga sub horizontal aproximada al yacimiento a 88°

3.- Z-42, campo Chayvo, isla Sakhalin. Se utilizó perfil tipo pseudo-catenario, con una tasa de construcción angular de 1.5 – 2° /30 [m], sección de inclinación larga de 7,000 [m] a 80 – 82° y una sección larga sub horizontal próxima al yacimiento a

4.- Pozo BD-04A, campo Al-Shaheen en Qatar. Se utilizó un perfil catenario con una pata de perro planeada de 3°/100[ft] máximo, con un ángulo de inclinación total de 89.8°. Alcanzo una longitud record de 40,320 [ft] profundidad medida.

#### **4.3 Diseño del perfil de pozos horizontales y de alcance extendido.**

*DISEÑO DE PERFIL DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO.* Los pozos Horizontales son pozos que se perforan de manera paralela a la zona productora o de interés, con la finalidad de tener un mayor contacto con el área a producir. Estos pozos se caracterizan por alcanzar altos ángulos de inclinación, en algunos casos hasta los 90°, es por ello que la geometría de estos pozos en el diseño y construcción nunca es específica para todos los casos, ya que dependiendo del escenario podrá definirse como pozo de alto, medio o bajo radio.

Uno de los primeros pasos en el diseño de trayectorias en pozos direccionales es el cálculo del desplazamiento horizontal y la dirección, mediante la definición de la ubicación de la barrena o de la plataforma y las coordenadas geográficas del objetivo de interés, mediante la siguiente función:

$$\text{Dirección} = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{\text{Diferencia de Coordenadas Obj} - \text{Sup}, E - O}{\text{Diferencia de Coordenadas Obj} - \text{Sup}, N - S} \right)$$

$$DH = ((DC. Obj. Sup. E - O)^2 + (DC. Obj. Sup. N - S)^2)^{1/2}$$

La geometría general de un pozo horizontal puede apreciarse en la figura 16, la cual puede modificarse y adaptarse a una trayectoria de alcance extendido.

La derivación de una ecuación para este tipo de pozos es muy similar a la derivación de una ecuación en los casos de pozos direccionales.

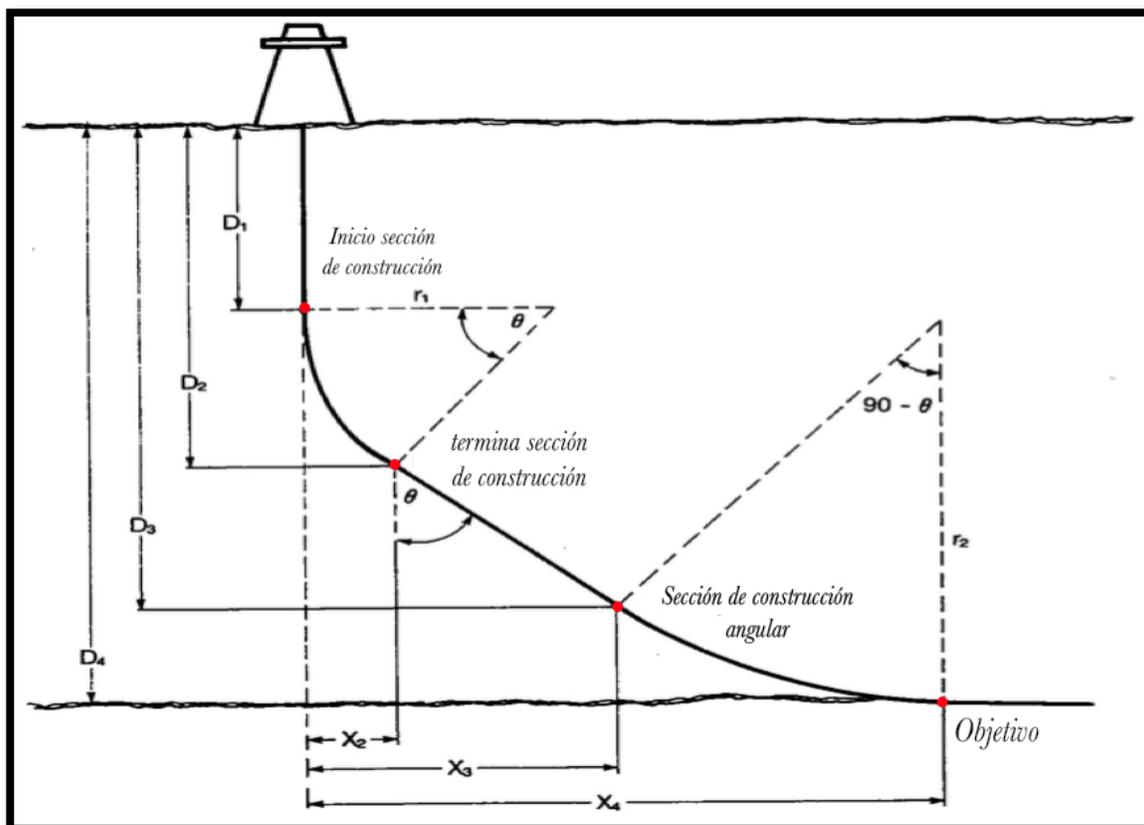


Figura 17, Geometría general de un pozo horizontal. Farah Omar Farah, 2013.

*Directional Well Design, Trajectory and Survey Calculations, with a case study in Fiale, Asal Rift, Djibouti.*

A continuación, se presentan las ecuaciones para el cálculo de cada una de las variables presentadas en la imagen 16.

El cálculo para obtener el máximo ángulo de inclinación se realiza mediante la siguiente ecuación.

$$\tan\theta = \frac{x_3 - x_2}{D_3 - D_2} \dots \dots \dots (1)$$

y para el radio de curvatura tanto en la sección de construcción como de decremento se puede obtener de la siguiente manera.

$$r = \frac{180}{\pi} \left( \frac{1}{q} \right) \dots \dots \dots (2)$$

Las dos ecuaciones anteriores pueden relacionarse directamente con las siguientes:

$$X_2 = r_1 - (r_1 * \cos\theta) \dots \dots \dots (3)$$

$$X_3 = X_4 - r_1 + (r_2 * \cos\theta) \dots \dots \dots (4)$$

$$D_2 = D_1 + (r_1 * \sin\theta) \dots \dots \dots (5)$$

$$D_3 = D_4 - (r_2 * \sin\theta) \dots \dots \dots (6)$$

Si relacionamos las ecuaciones 3 y 4 con la 5 y 6 se obtiene:

$$X_3 - X_2 = X_4 - r_1 - r_2 + [(r_1 + r_2) * \text{sen}\theta] \dots \dots \dots (7)$$

$$D_3 - D_2 = D_4 - D_1 - [(r_1 + r_2) * \text{sen}\theta] \dots \dots \dots (8)$$

Ahora sustituimos las ecuaciones 7 y 8 en ecuación 1 y reorganizando se obtiene

$$\begin{aligned} \tan\theta [D_4 - D_1 - (r_1 + r_2) * \text{sen}\theta] \\ = X_4 - r_1 - r_2 + (r_1 + r_2) * \text{cos}\theta \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

Multiplicando ecuación 9 por  $\text{cos}\theta \dots$

$$\text{sen}\theta (D_4 + D_1) = \text{cos}\theta * (X_4 - r_1 - r_2) + (r_1 + r_2) \dots \dots \dots (10)$$

Mediante el uso de identidades trigonométricas

$$\text{cos}2\theta = 2\text{cos}^2\theta - 1$$

$$\text{sen}2\theta = 2\text{sen}\theta * \text{cos}\theta$$

$$\text{sec}^2\theta = 1 + \text{tan}^2\theta$$

$$\theta = 2 * \left(\frac{\theta}{2}\right)$$

sustituyendo en ecuación 11 y dividiendo entre

$$\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

se obtiene la ecuación que se muestra a continuación.

$$2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * (D_4 - D_1) = X_4 + \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) * [2 * (r_1 + r_2) - X_4] \dots \dots \dots (11)$$

Rescribiendo la ecuación en forma de polinomio se obtiene

$$[2(r_1 + r_2) - X_4] * \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) - 2(D_4 - D_1) * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + X_4 = 0 \dots \dots \dots (12)$$

Resolviendo la ecuación 12 para un ángulo  $\theta$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{(D_4 - D_1) - \sqrt{(D_4 - D_1)^2 - 2(r_1 + r_2)X_4 + X_4^2}}{2(r_1 + r_2) - X_4} \right] \dots \dots \dots (13)$$

Para la ecuación 13 el valor positivo de la raíz no es considerada en la aplicación para diseños de trayectorias de pozos.

$$D_4 = D_5 + r_2 * \text{sen}\phi \dots \dots \dots (14)$$

$$X_4 = X_5 + r_2(1 - \text{cos}\phi) \dots \dots \dots (15)$$

En estas dos ecuaciones,  $D_4$  y  $X_4$  representan

$$D_1 = D_4 + A - B \dots \dots \dots (16)$$

Donde:

$$A = \frac{X_4^2 - 2(r_1 + r_2)X_4}{2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (2(r_1 + r_2) - X_4)}$$

$$B = \frac{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (2(r_1 + r_2) - X_4)}{2}$$

Tanto la ecuación 13 y la 16 pueden ser usadas en pozos de alcance extendido siempre y cuando solo cuenten con una sección de construcción angular en la trayectoria.

**Ejemplo:** Dadas las coordenadas del taladro 410,261 E, 6,833,184.2 N [m] y las coordenadas del objetivo 412,165.0 E, 6,834,846.0 N, Calcular el desplazamiento horizontal del pozo y la dirección del objetivo.

$$\text{dirección} = \text{tang}^{-1} \left( \frac{412,165 - 410,261}{6,834,846.0 - 6,833,184.2} \right) = \text{tan}^{-1} \left( \frac{1,904.0}{1,661.8} \right)$$

$$\text{dirección} = \text{tang}^{-1}(1.1) = 48.9[m]$$

$$DH = \sqrt{(412,165 - 410,261)^2 - (6,834,846 - 6,833,184.2)^2}$$

$$DH = \sqrt{(1,904)^2 - (1,661.8)^2} = \sqrt{863,636.00} = 929.3[m]$$

Para determinar el ángulo de inclinación  $\theta$  de la Figura 16, el ángulo debe relacionarse con la sección de retención del pozo.

$$\tan\theta = \frac{x_3 - x_2}{D_3 - D_2}$$

Las 5 variables mostradas en la ecuación 1 son desconocidas, por lo tanto, deben relacionarse con parámetros que sean conocidos. Por lo que las variables  $X_2$  y  $D_2$  pueden determinarse con las siguientes ecuaciones.

$$X_2 = r_1 - (r_1 * \cos\theta)$$

$$D_2 = D_1 + (r_1 * \sin\theta)$$

Sin embargo, ya que en el caso de pozos horizontales existe una segunda sección de construcción, deben agregarse dos nuevas ecuaciones para determinar las coordenadas del inicio de dicha sección,  $X_3$  y  $D_3$ .

$$X_3 = X_4 - (r_2 * \cos\theta)$$

$$D_3 = D_4 - r_2 + (r_2 * \sin\theta)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3, 5, 18 y 19 en la ecuación 1 obtenemos la siguiente relación.

$$\tan\theta = \frac{X_4 - r_1 - [(r_2 - r_1) * \cos\theta]}{D_4 - D_1 - r_2 + [(r_2 - r_1) * \sin\theta]}$$

Reorganizando términos se tiene lo siguiente

$$\tan\theta * (D_4 - D_1 - r_2 + [(r_2 - r_1) * \text{sen}\theta]) = X_4 - r_1 - [(r_2 - r_1) * \text{cos}\theta]$$

Multiplicando la ecuación 21 por  $\text{cos}\theta$  y reagrupando términos

$$\text{sen}\theta * (D_4 - D_1 - r_2) = \text{cos}\theta * (X_4 - r_1)$$

Considerando la identidad trigonométrica  $\theta = 2 \frac{\theta}{2}$  y dividiendo entre

$\text{cos}^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$ , y agrupando términos;

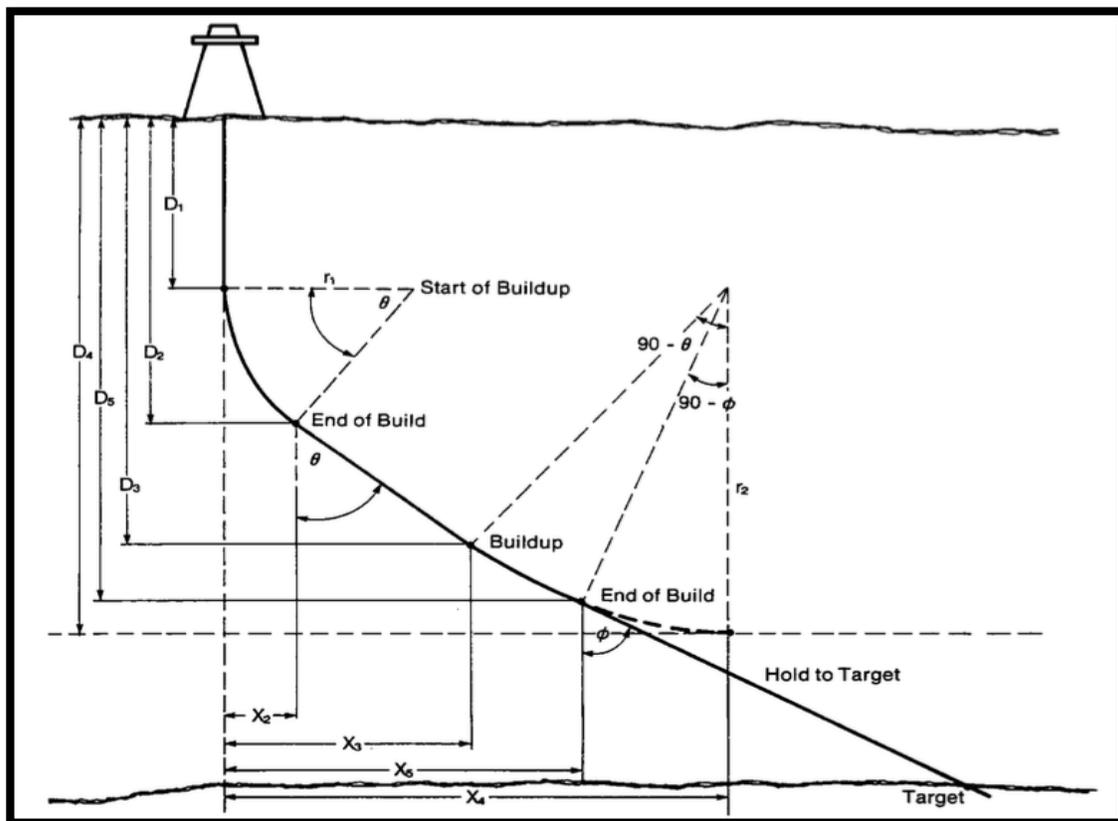
$$(r_2 - 2 * r_1 + X_4) * \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + 2 * (D_4 - D_1 - r_2) * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + r_2 - X_4 = 0$$

La ecuación 23, es de grado 2 por lo que puede resolverse con una fórmula cuadrática para  $\theta$ , es decir el ángulo de la sección de retención del pozo.

$$\theta = 2 * \tan^{-1} \left[ \frac{(D_1 - D_4 + r_2) + \sqrt{(D_4 - D_1 - r_2)^2 - (r_2 - 2r_1 + X_4) * (r_2 - X_4)}}{r_2 - 2r_1 + X_4} \right]$$

La ecuación 24 puede utilizarse para diseños con una o dos secciones de construcción, si el pozo es horizontal y cuenta con una sola sección de construcción  $r_2$  será igual a 0.

Entonces si la ecuación 24 desea utilizarse en un diseño de trayectoria de alcance extendido, esta debe ser modificada. Ya que las trayectorias de alcance extendido cuentan con dos secciones de construcción. La figura 12 muestra un boceto de la trayectoria de estos pozos.



*Figura 18, M.L. Wiggins and H.C. Juvkam-Wold, 1990; Ecuaciones simplificadas para la planificación de pozos horizontales y direccionales.*

En este caso,  $D_4$  y  $X_4$  deberían calcularse de la siguiente manera.

$$D_4 = D_5 + r_2 * (1 - \text{sen}\phi)$$

$$X_4 = X_5 + (r_2 * \text{cos}\phi)$$

*Donde:*

El ángulo  $\phi$  representa el ángulo deseado al final de la sección de retención en el pozo. Ya que  $D_4$  y  $X_4$  han sido determinados, dicho ángulo puede ser determinado con la ecuación 24. En el caso de que la trayectoria fuese direccional,  $D_5$  y  $X_5$  representan el desplazamiento al inicio de la última sección de retención en el pozo.

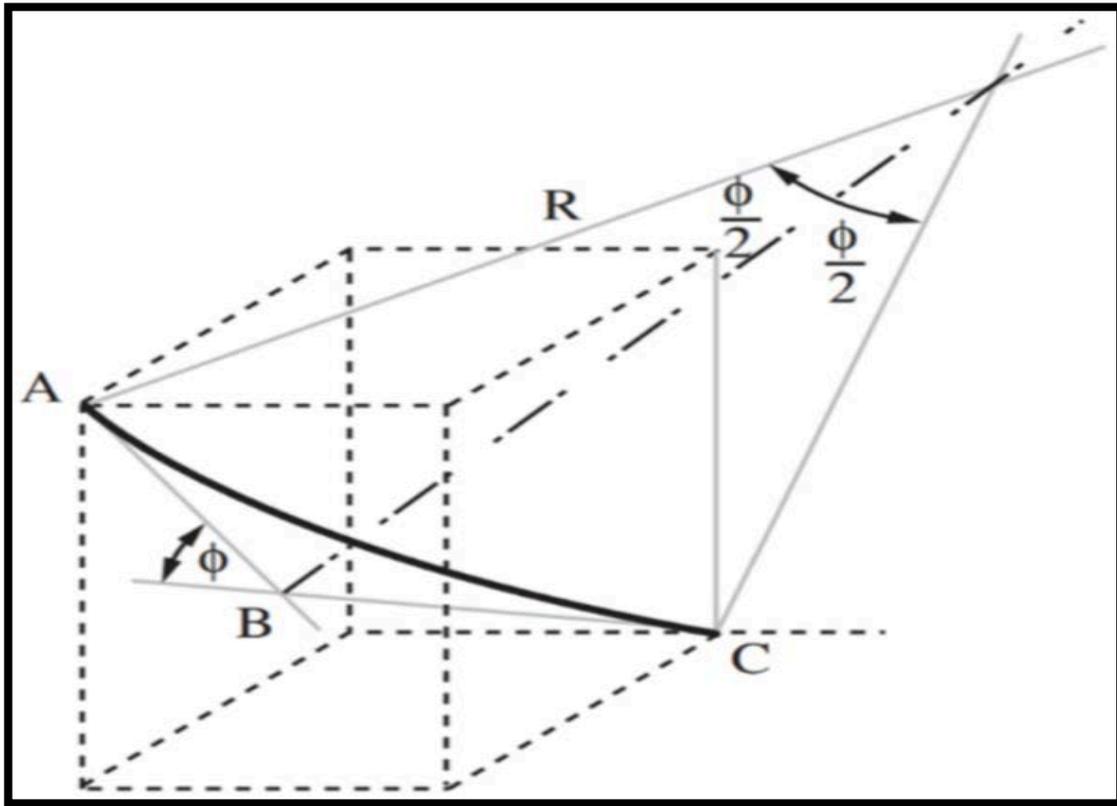
#### **4.4 Método para el diseño de trayectorias en 3D.**

En China, tres métodos han sido utilizados principalmente para el diseño y rediseño de perfiles de pozos horizontales:

- ✓ Método de Mínima Curvatura (Método del plano inclinado). Este método se basa en la suposición de que el pozo es un arco esférico con una curvatura mínima. Por tal motivo, existe un radio máximo de curvatura entre dos estaciones o surveys.
  
- ✓ Radio de Curvatura (Método de Espiral Cilíndrica). Este método se basa en la suposición de que el recinto del pozo es un arco constante y esférico I dos surveys. Este método es muy preciso, sin embargo, no suele aplicarse con facilidad en campo ya que requiere programación de algoritmos para su solución.
  
- ✓ Método de simulación de trayectoria.

*MÉTODO DE MÍNIMA CURVATURA.* Este modelo realmente es una modificación del método de balance tangencial, el método de mínima curvatura toma como base, vectores en el espacio definidos por mediciones de inclinación y dirección y los suaviza en la curva del pozo. Además, este método se aproxima a la trayectoria de un pozo mediante arcos circulares y no con líneas rectas como en otros métodos. Este arco se calcula mediante un

factor de escala de pata de perro con base a la cantidad de cambio angular a lo largo de la trayectoria.

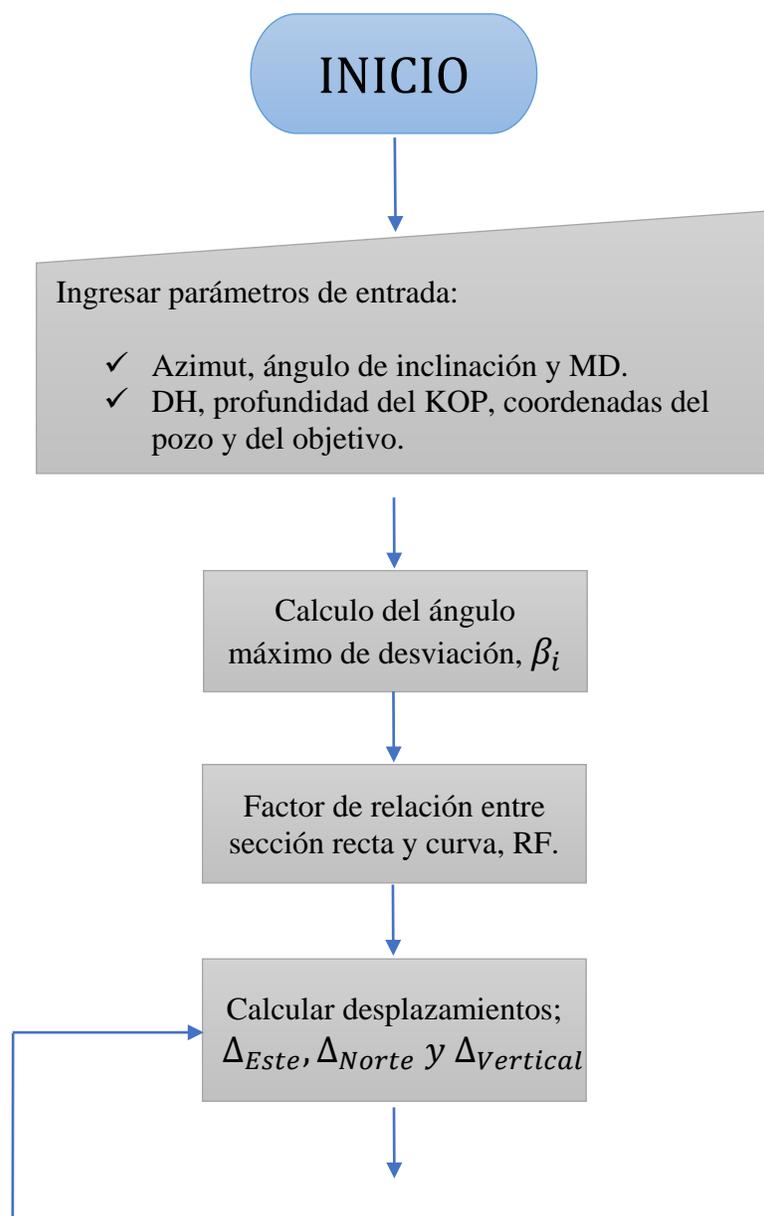


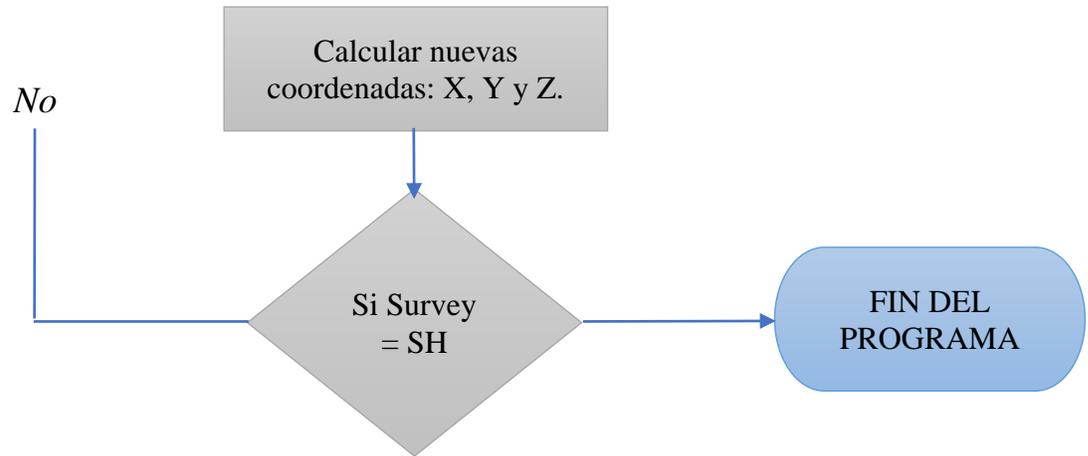
*Figura 19, Método de mínima curvatura, aproximación mediante mediciones de inclinación y dirección. Farah Omar Farah, 2013. Directional Well Design, Trajectory and Survey Calculations, with a case study in Fiale, Asal Rift, Djibouti.*

Con el fin de ejemplificar el proceso para el cálculo de trayectorias en 3 dimensiones, a continuación, se presentan un diagrama de flujo para la

representación del proceso y posteriormente cuatro pasos a seguir y finalmente dicho proceso con valores reales de un pozo.

### DIAGRAMA DE FLUJO





1. Primer Paso.

Se calcula el parámetro referente al ángulo máximo de desviación del segmento, es decir  $\beta_i$  con la siguiente ecuación.

$$\beta_i = \cos^{-1}[\cos(I_2 - I_1) - \text{sen}I_1 * \text{sen}I_2 * [1 - \cos(A_2 - A_1)]]$$

2. Segundo Paso.

A continuación, se obtiene el siguiente parámetro, el factor de relación entre la sección recta y la sección curva.

$$RF = \frac{2}{\beta_i} * \text{tang} \left( \frac{\beta_i}{2} \right)$$

3. Tercer Paso.

Calcular los desplazamientos en cada una de las direcciones.

$$\Delta_{Este} = \frac{\Delta MD}{2} * [senI_1 * senA_1 + senI_2 * senA_2] * RF$$

$$\Delta_{Norte} = \frac{\Delta MD}{2} * [senI_1 * cosA_1 + senI_2 * cosA_2] * RF$$

$$\Delta_{VERTICAL} = \frac{\Delta MD}{2} * [cosI_1 + cosI_2] * RF$$

4. Cuarto Paso

Finalmente, se calcula las nuevas coordenadas de la trayectoria.

$$X = x_1 + \Delta_{Este} \quad Y = y_1 + \Delta_{Norte} \quad Z = z_1 + \Delta_{VERTICAL}$$

Ejemplo: Pozo Adka-11

Suponiendo que las coordenadas del pozo son las siguientes:  $x: 0$ ,  $y: 100$ ,  $z: 0$  con un desplazamiento horizontal de 28,000[ft] y profundidad del KOP a 1,800[ft] y como coordenadas del objetivo el punto  $x: 0$ ,  $y: 12,600$ ,  $z: 3,350$ . Calcular la trayectoria del pozo con la siguiente información.

*Tabla 3. Información por survey ejemplo Adka-11*

Survey Point	MD[ft]	Angulo de Inclinación $I_n$ [°]	Azimet $A_n$ [°]
A	0	0	0
B	1,000	0	0
C (KOP)	1,800	8	5
D	2,600	32	15
E	3,200	54	20
F	3,900	80	24
G	4,400	88	30
SH	4,400	90	25

Para el segmento del survey A hasta el survey B, la sección es meramente vertical por lo que la trayectoria se obtiene de la siguiente manera.

$$\Delta_{Este} = \frac{1,000}{2} [\text{sen}(0) * \text{sen}(0) + \text{sen}(0) * \text{sen}(0)]$$

$$\Delta_{Este} = 0[ft]$$

$$\Delta_{Norte} = \frac{1,000}{2} * [\text{sen}(0) * \cos(0) + \text{sen}(0) * \cos(0)]$$

$$\Delta_{Norte} = 0[ft]$$

$$\Delta_{VERTICAL} = \frac{1,000}{2} * [\cos(0) + \cos(0)]$$

$$\Delta_{VERTICAL} = 1,000[ft]$$

Este procedimiento debe realizarse para los survey consecutivos, hasta el punto KOP. Posteriormente debe considerarse el factor de relación entre la sección recta y la sección curva.

Tomando como Survey 1 el punto C y Survey 2 el punto G, entonces tenemos: para el ángulo de inclinación  $I_2 = I_C$  e  $I_1 = I_B$  y en cuanto al azimut se tiene que  $A_2 = A_C$  e  $A_1 = A_B$

$$\cos(\beta_i) = [\cos(8 - 0) - \text{sen}(0) * \text{sen}(8) * [1 - \cos(5 - 0)]]$$

$$\cos(\beta_i) = [\cos(8) - 0]$$

$$\cos(\beta_i) = 0.9902$$

$$\beta_i = 8^\circ \text{ o } 0.1396[\text{rad}]$$

Calculamos ahora el factor de relación RF.

$$RF = \frac{2}{0.1396} * \text{tang}\left(\frac{8}{2}\right)$$

$$RF = 1.001$$

A continuación, se calculan los desplazamientos en cada una de las direcciones.

$$\checkmark \Delta_{Este} = \frac{1,800-1,000}{2} * [\text{sen}(0) * \text{sen}(0) + \text{sen}(8) * \text{sen}(5)] *$$

$$1.001$$

$$\Delta_{Este} = 400 * [0.012] * 1.001$$

$$\Delta_{Este} = \mathbf{4.85[ft]}$$

$$\checkmark \Delta_{Norte} = \frac{1,800-1,000}{2} * [\text{sen}(0) * \cos(0) + \text{sen}(8) * \cos(5)] * 1.001$$

$$\Delta_{Norte} = 400 * [0.1386] * 1.001$$

$$\Delta_{Norte} = \mathbf{55.51[ft]}$$

$$\checkmark \Delta_{VERTICAL} = \frac{1,800-1,000}{2} * [\cos I_1 + \cos I_2] * RF$$

$$\Delta_{VERTICAL} = 400 * [\cos(0) + \cos(8)] * 1.001$$

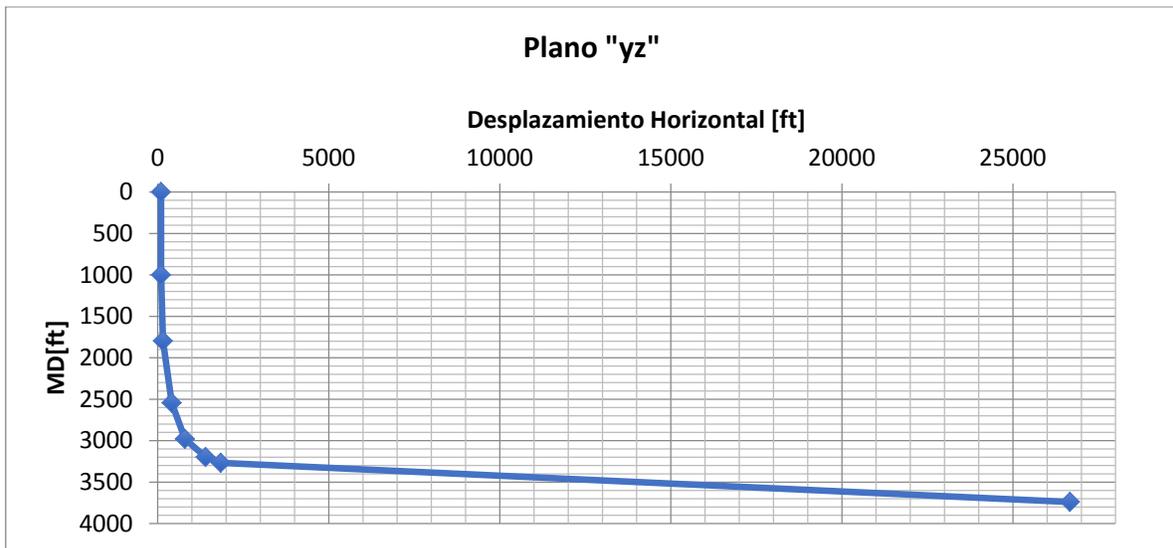
$$\Delta_{VERTICAL} = \mathbf{796.90[ft]}$$

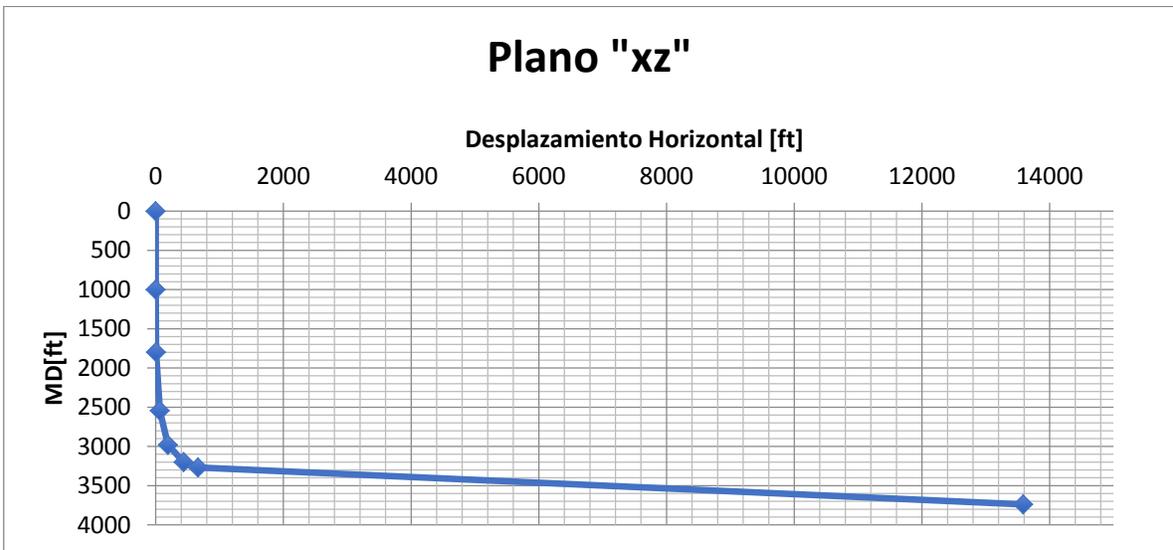
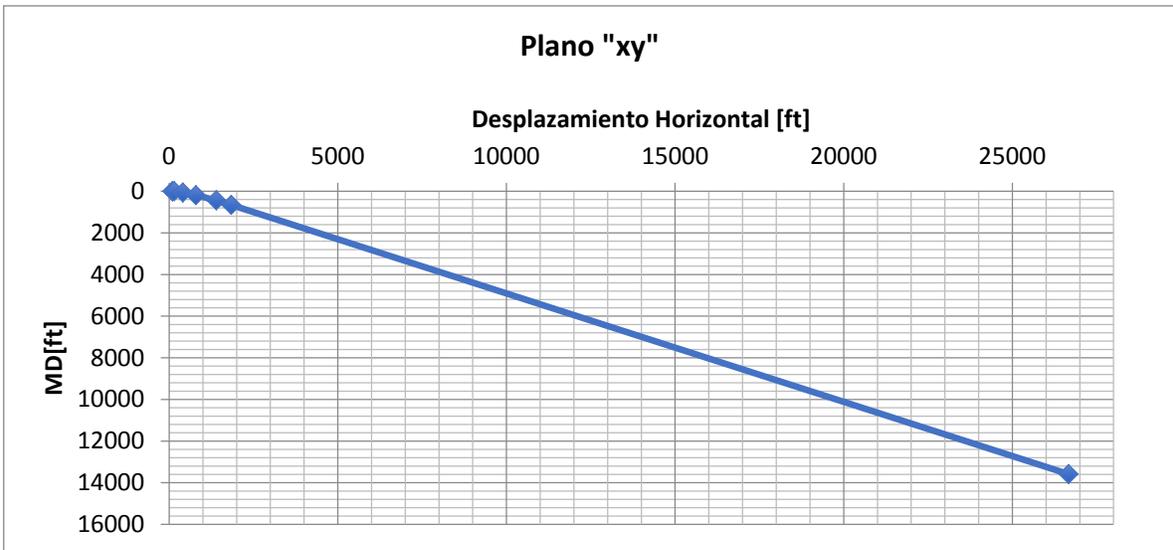
A continuación, se muestra una tabla con los resultados calculados mediante el método de mínima curvatura para cada uno de los puntos de la trayectoria.

*Tabla 4. Resultados obtenidos mediante el método de mínima curvatura*

<i>Survey</i>	$\Delta_{Este}$	$\Delta_{Norte}$	$\Delta_{VERTICAL}$	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
<i>1</i> <sub>INICIO</sub>	0	0	0	0	100	0
<i>1</i> <sub>A-B</sub>	0	0	1,000	0	100	1,000
<i>2</i> <sub>B-C</sub>	4.85	55.54	797.40	4.85	155.54	1,797.40
<i>3</i> <sub>C-D</sub>	60.61	264.12	746.41	65.46	409.66	2,543.81
<i>4</i> <sub>D-E</sub>	125.74	386.49	436.24	191.20	796.15	2,980.05
<i>5</i> <sub>E-F</sub>	246.99	604.91	218.75	438.19	1,401.06	3,198.80
<i>6</i> <sub>F-G</sub>	225.63	442.40	52.26	663.82	1,843.46	3,251.06
<i>7</i> <sub>SH</sub>	12,921.93	24,823.53	488.5	13,585.75	26,666.99	3,739.56

La representación del pozo en los planos “yz”, “xy” y “xz” se presenta en los gráficos siguientes.





*Figura 20, 21 y 22, Grafica de los resultados obtenidos en diferentes vistas, la cual muestra la trayectoria del pozo en los planos "xy", "yz" y "xz".*

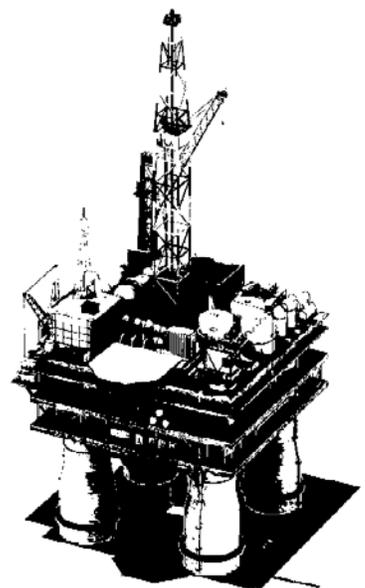
## REFERENCIAS.

1. Ma Shanzhou, Huang Genlu, Zhang Jianguo and Han Zhiyong, Petroleum University, East China. 1998, Study on Design of Extended Reach Well trajectory. SPE-50900-MS
2. Alberto Cardona, paul H. Kohan, Ricardo D. Quinteros, Marios A. Storti, Argentina 13-16 noviembre 2012. Modelado numérico del fenómeno de torque y arrastre en tuberías de terminación de pozos de petróleo y gas.
3. JIA Jianghong, YAN Zhenlai, DOU Yuling, HUANG Genlu and MA Qingtao. 27 September 2014, The New Method and Application of friction torque for extended reach well.
4. Bjarne Bennetzen (Maersk Oil Qatar AS), John Fuller (Gatwick, Inglaterra), Erhan Isevcan (Doha, Qatar); Tony Krepp, Richard Meehan y Nelson Mohammed (The Woodlands, Texas, EUA), Jean-Francois Poupeau (Houston, Texas) y Kumud Sonwal (Zakum Development

Company, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos); Otoño de 2010, Pozos de alcance extendido.

5. M.L. Wiggins and H.C. Juvkam-Word, Texas A&M U. Simplified equations for planning directional and horizontal wells. SPE-21261-MS.

# Capitulo 5.0



# *Diseño del Software.*

## **5.1 Herramientas para el diseño del Software.**

En esta sección se mencionan las herramientas utilizadas para el diseño del Software, es decir, el lenguaje de programación utilizado y framework multiplataforma para el desarrollo de interfaces amigables para el usuario. Posteriormente se hablará a detalle del contenido del software desarrollado y finalmente se ejemplificará su uso mediante un caso real.

### **Lenguaje de Programación C++.**

El lenguaje de programación C fue desarrollado por Brian Kernighan y Dennis Ritchie a mediados de los años 70's, este fue desarrollado a partir de lenguajes anteriores, BCPL y posteriormente el lenguaje B. El lenguaje C está elaborado para programadores intrínsecos ya que este proporciona una gran flexibilidad de programación aunado a una muy baja corroboración de incorrecciones, por tal motivo C deja a consideración del programador acciones que otros lenguajes realizan por si mismos.

Durante la década de los 80's el lenguaje C fue reconocido como universal a nivel mundial, debido a su eficiencia y debido a que hizo posible migrar en un gran rango de PC's. Posteriormente, el lenguaje C++ fue creado para reducir los niveles de dificultad en la programación. Sin embargo, esto no garantiza la

creación de software de una mayor calidad, por lo que para obtener mejores resultados, el usuario debe adoptar nuevas formas de programación.

C++ fue creado por Bjarne Stroustrup como una extensión de C. Los paradigmas de programación que abarca son los siguientes:

- Programación Estructurada
- Programación Genérica
- Programación Orientada a Objetos

### **Programación Orientada a Objetos POO.**

Para mucha gente el lenguaje de programación C++ es sinónimo de POO, sin embargo, la programación orientada a objetos no es consecuencia absoluta de este lenguaje de programación, sino del resultado de los métodos específicos que son empleados.

¿Por qué POO?... Prácticamente lo que se buscaba era que el programador realizara la misma cantidad de trabajo que en un lenguaje de bajo nivel, en cambio los resultados son mayores, debido a esto los programadores buscaron

desarrollar lenguajes más complejos para potenciar el poder de un programador mediante la reducción de tiempos y minimizando costos en los proyectos.

Pero fue hasta 1970 que el concepto de *objeto* se volvió popular e importante, debido a dos muy importantes razones: “Representan una abstracción directa de elementos que se utilizan comúnmente y ocultan la mayor parte de la complejidad de su implantación a los usuarios”.

Ted Faison, Borland C++ 3.1 PROGRAMACION ORIENTADA A OBJETOS.

### **Qt, Framework para el desarrollo de interfaces gráficas.**

“Qt es un marco de desarrollo de aplicaciones C++ para crear aplicación GUI multiplataforma utilizando un enfoque ‘Escribe una vez, compila en cualquier lugar. Qt permite al programador utilizar un único árbol de código fuente para las aplicaciones en diferentes sistemas operativos: Windows, Mac OS X, Linux, Solaris y otras versiones de Unix”. Blanchette Jasmin y Summerfield Mark, C++ GUI Programming with Qt 4, Second Edition, February 04, 2008.

Todo comenzó con el interés de Haavard en el desarrollo de aplicaciones GUI mediante C++ en 1988, posteriormente en 1990 Haavar y Eirik trabajaron juntos en proyectos de base de datos C++ para imágenes de ultrasonido lo cual dio inicio al interés Para desarrollar un sistema de visualización POO. Para 1991, Haavar escribió las primeras clases que posteriormente se convertirían en QT, con ayuda en el diseño de Eirik. Para el año siguiente Eirik comenzó con la definición de un paradigma nuevo en ese momento, pero muy efectivo que actualmente es adoptado por muchos otros kits de herramientas; “Señales y Ranuras”. En 1993, Eirik y Haavar habían desarrollado el primer kernel gráfico de QT y pudieron implementar sus propios widgets.

La letra Q se eligió como prefijo de la clase y por lo bella que parecía en la fuente de Emacs de Haavar. La t se agregó para representar el kit de herramientas, inspirado en Xt, X Toolkit. La compañía se incorporó el 4 de marzo de 1994, originalmente como Quasar Technologies, posteriormente como Troll Tech y finalmente Trolltech. Un año más tarde a través de la influencia de uno de los profesores de Haavard de la universidad, la compañía noruega Metis les proporciono la oportunidad para desarrollar software basado

en Qt, durante ese tiempo Trolltech contrato a Arnt Gulbrandsen quien desarrollo el ingenioso sistema de documentación.

El 20 de Mayo de 1995, Qt 0.9 fue alojado en sunsite.unc.edu y seis días más tarde fue anunciado en comp.os.linux.announce. Por lo que en este año se dice que fue el primer lanzamiento público de Qt, disponible bajo dos licencias; uso comercial y edición de software libre. En 1996, Qt había alcanzado la versión 1.1; con 8 clientes potenciales en diferentes países adquiriendo un total de 18 licencias.

Durante los dos siguientes años se lanzaron Qt 1.2, 1.3 y 1.4 hasta 1999 la última versión más importante Qt 2.0 con una nueva licencia de código abierto (QPL) y en agosto de ese mismo año fue otorgado a Qt el premio LinuxWord por la mejor library/tool.

Actualmente Qt continúa creciendo y su éxito se debe tanto a la calidad como a la flexibilidad para la manipulación del usuario. Qt paso de ser un producto que solo conocían algunos a uno que utilizan diariamente miles de desarrolladores de código abierto alrededor del mundo.

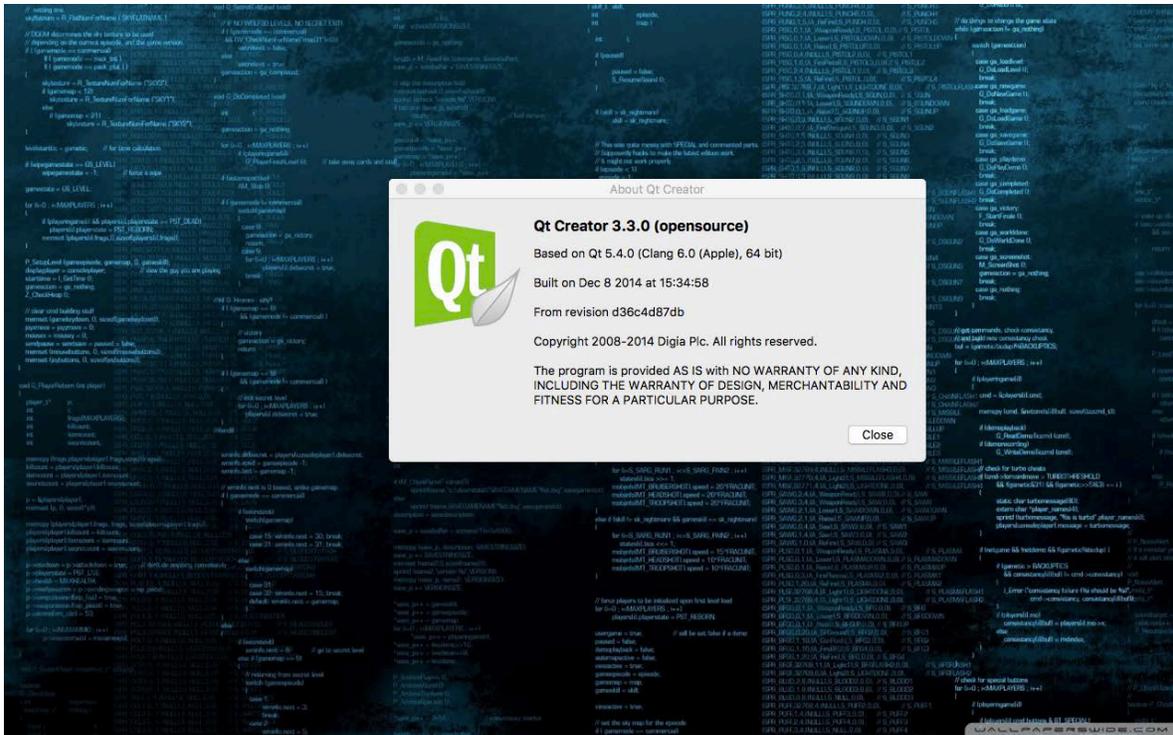


Figura 23, Qt Creator 3.3.0. Zarco Rodríguez, Edgar Misael, 5 de enero del 2018.

*BanksOil Well Design,*

## Librería OpenGL.

OpenGL es un motor 3D cuyas rutinas están integradas en tarjetas gráficas 3D. La compañía que desarrolla esta Librería es Silicon Graphics Inc (SGI) en 1992, a favor de realizar un estándar en la representación 2D/3D gratuito y con código abierto (Open Source). Está basado en sus propios OS y lenguajes IRIS, de modo que es completamente adaptable a otros lenguajes, como C ,

C++, etc y ya que cuenta con librerías dinámicas puede adaptarse sin ningún problema a Visual Basic, Fortran, Java, etc.

La última versión OpenGL 4.6 API Specification (updated July 30, 2017).

Se divide en tres secciones funcionales:

- La librería OpenGL suministra lo necesario para introducir a los parámetros de dibujo de OpenGL.
- La librería GLU (OpenGL Utility Library), es una librería que proporciona acceso rápido a algunas funciones OpenGL mediante comandos de bajo nivel.
- GLX (OpenGL Extension to the X Windows System), proporciona acceso a OpenGL para poder interactuar con un sistema de ventanas X Window.

Además de estas tres, la librería GLUT (OpenGL Utility Toolkit) proporciona una interfaz independiente de plataforma para crear aplicaciones de ventanas totalmente portables.

Para desarrollar aplicaciones OpenGL es necesario contar con las siguientes herramientas:

1.- Binarios de la librería OpenGL, ya sea Mesa (Compilado e instalado a partir de código fuente), xlibmesa (incluido con Xfree86 4 y posteriores) o drivers propios.

2.- Los paquetes de desarrollo de estas librerías (xlibmesa-dev, en el caso de xlibmesa, glutg3-dev... para drivers propios dependerá del fabricante, y para Mesa, si se ha instalado compilando el código fuente, no debería tener ningún problema).

3.-Un compilador del lenguaje en el que se va a programar, en este caso C++, por lo cual usaremos el compilador g++.

4.- Editor de texto.

Sin embargo, para el software en cuestión se utilizó Qt como framework para facilitar algunos procesos en la programación.

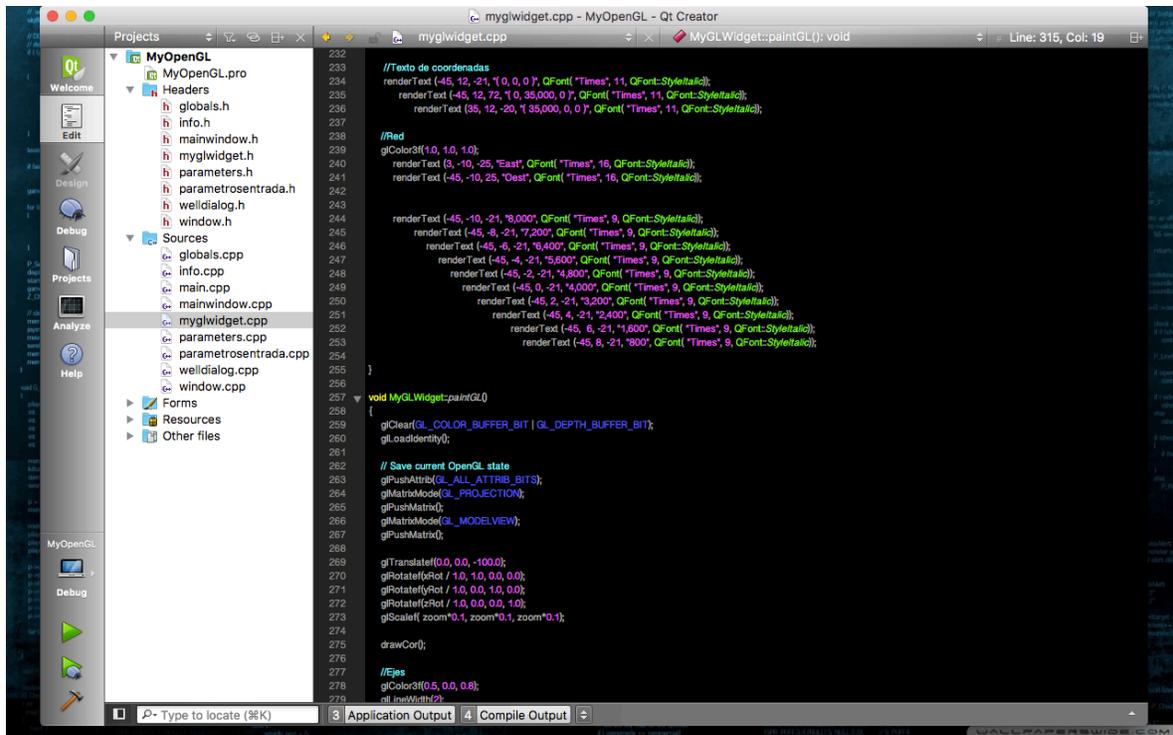
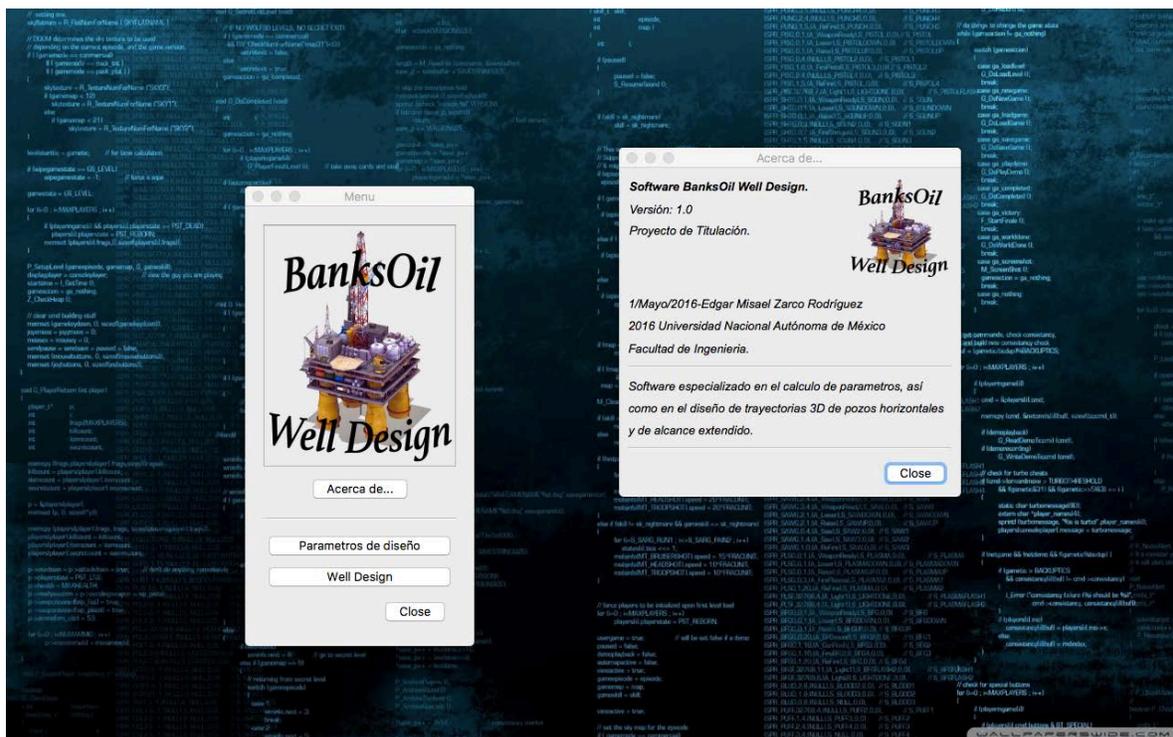


Figura 24, Uso de C++ en framework Qt para desarrollo de BanksOil Well Design. Zarco Rodríguez Edgar Misael, 5 de enero del 2018. BanksOil Well Design,

## 5.2 BanksOil Well Design

BanksOil Well Design versión 1.0 es un software programado especialmente para el diseño de perfiles de pozos ERD y además para la simulación de trayectorias en 3D mediante herramientas como Qt, lenguaje de programación C++ y librería OpenGL, es compatible con Windows y MacOS.

En la interfaz de inicio se pueden apreciar tres secciones de las cuales dos son las destacadas, primeramente, se encuentra Acerca de; la cual muestra información acerca de la versión del software y otras características, enseguida y como primer segmento de importancia se muestra parámetros de diseño y finalmente Well Design Trajectory, de las cuales se habla a detalle a continuación.



*Figura 24, Ventana Inicial BanksOil Well Design Versión 1.0. Zarco Rodríguez, Edgar Misael, 5 de enero del 2018. BanksOil Well Design.*

***PARAMETROS DE DISEÑO.*** En esta sección, podemos encontrar una interfaz muy amigable donde el usuario proporciona una serie de parámetros con el objetivo de visualizar la construcción de perfiles de pozos de alcance extendido, el método utilizado para la obtención de dichos parámetros se menciona y ejemplifica en el capítulo 4.0 de la tesis en cuestión.

Como primera sección y obligatoria, la interfaz solicita información acerca del pozo para su documentación; nombre del proyecto, nombre del campo, nombre del pozo, fecha, localización, etc., enseguida el usuario procede a dar click en aceptar para confirmar dicha información y trasladarla a un cuadro de visualización de toda la información proporcionada. Posteriormente, ya que el usuario ha realizado dicho sondeo el usuario debe proporcionar 6 variables referentes al pozo en la sección inferior izquierda y oprimir el botón calcular.

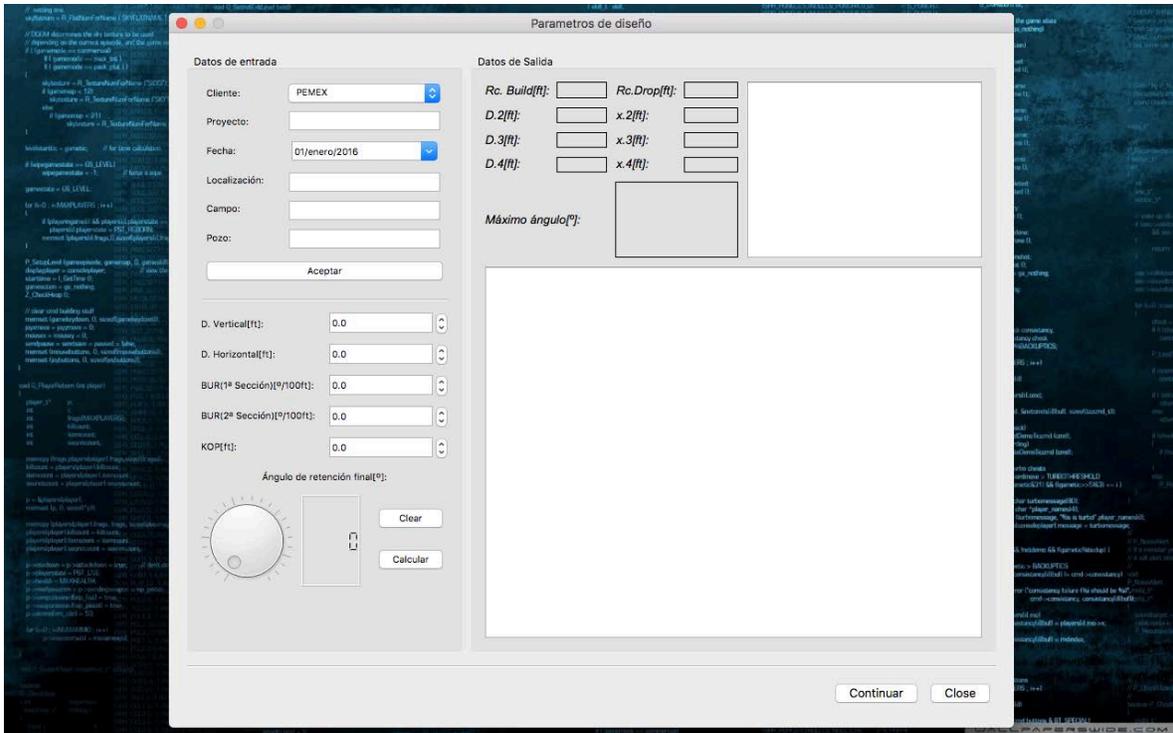


Figura 25, Sección para el desarrollo de un perfil de pozo ERD. Zarco Rodríguez, Edgar

Misael, 5 de enero del 2018. BanksOil Well Design.

Los parámetros son obtenidos y se muestran en la sección Datos de Salida, en los recuadros correspondientes,

- Radio de Curvatura de Construcción Angular
- Radio de Curvatura de Caída Angular
- Distancias y Alturas
- Máximo Angulo

además, una vez que el usuario proporciona la información solicitada y el software ha realizado los cálculos necesarios la interfaz muestra el perfil del pozo de alcance extendido mediante una imagen y los valores calculados en su lugar correspondiente como se muestra en la siguiente imagen.

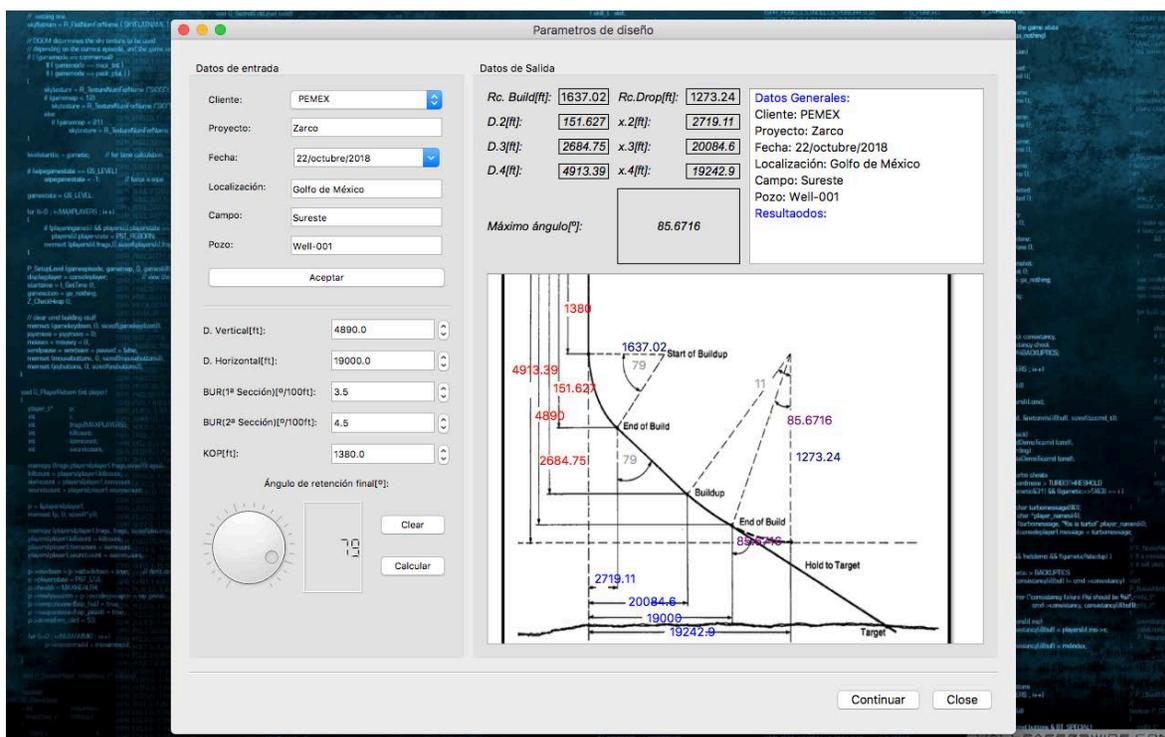


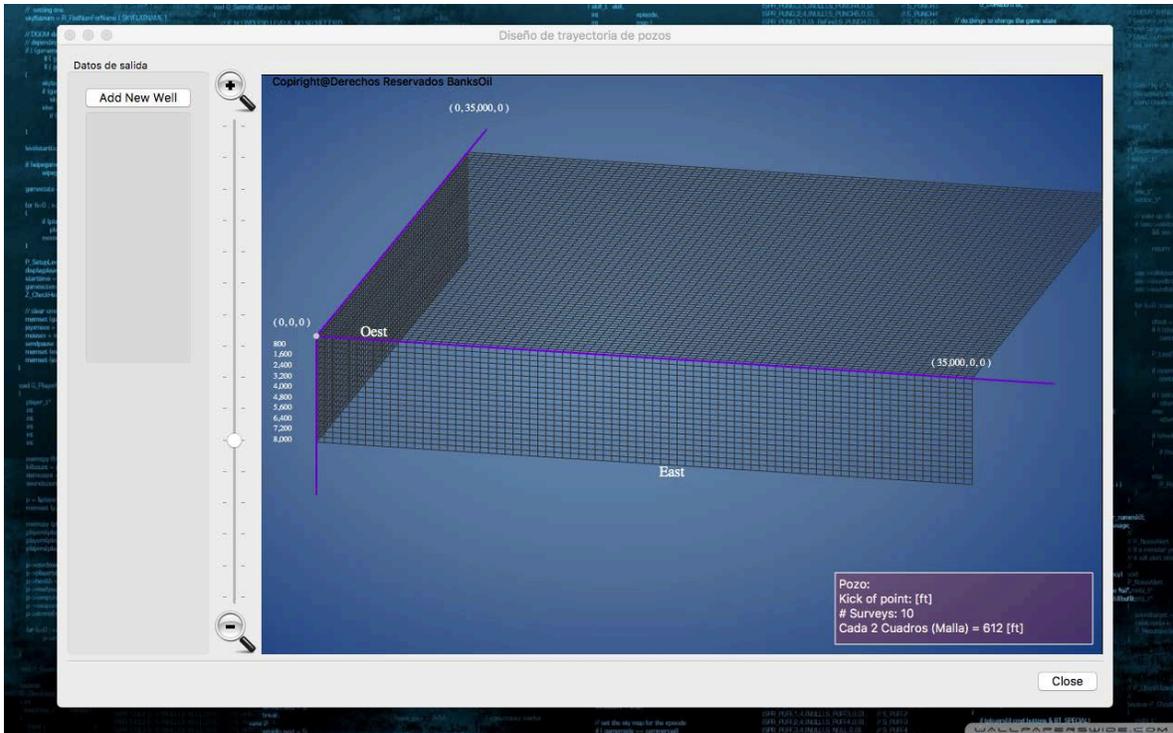
Figura 26, Visualización del perfil y parámetros obtenidos. Zarco Rodríguez, Edgar Misael, 5 de enero del 2018. BanksOil Well Design.

**TRAYECTORIA EN 3D DE UN POZO ERD.** En esta sección, el diseño de trayectorias en 3D representa la parte más importante de este software.

Consta como ítem principal de un widget para la visualización en 3D, esta área puede ser manipulada mediante el cursor en cualquier dirección del eje coordenado; “x”, “y” y “z”.

En esta área se puede observar un eje coordenado, en dirección Este, Oeste y Profundidad, cuenta con un cuadrículado para orientar al usuario respecto a los puntos que trazan la trayectoria del pozo. Además, este eje coordenado se encuentra a escala 1/5,000 para mejorar la visualización del pozo. En la parte inferior derecha del widget de visualización se agregó un cuadro mediante código html para observar información referente al pozo, como nombre, KOP y numero de surveys.

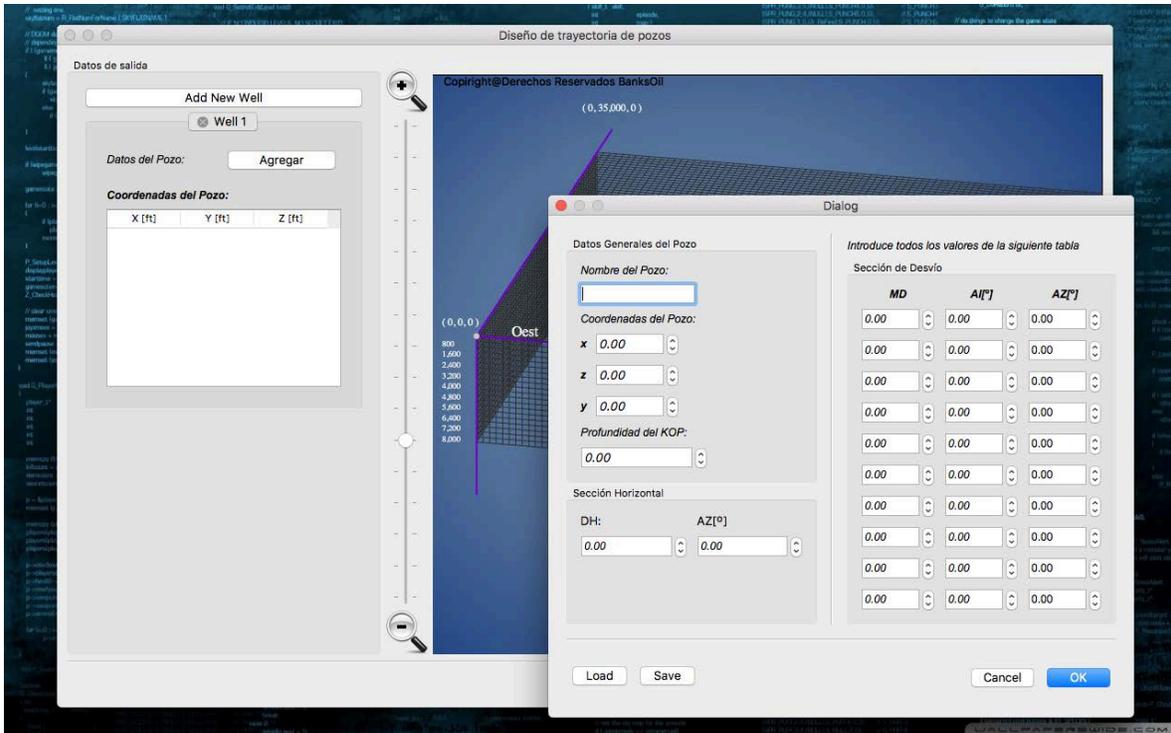
En el área de datos de salida, primeramente, es necesario agregar un pozo, posteriormente la interfaz solicita al usuario introducir datos del pozo mediante el botón “Agregar”.



*Figura 27, Sección de simulación de pozo en 3D. Zarco Rodríguez, Edgar Misael, 5 de enero del 2018. BanksOil Well Design.*

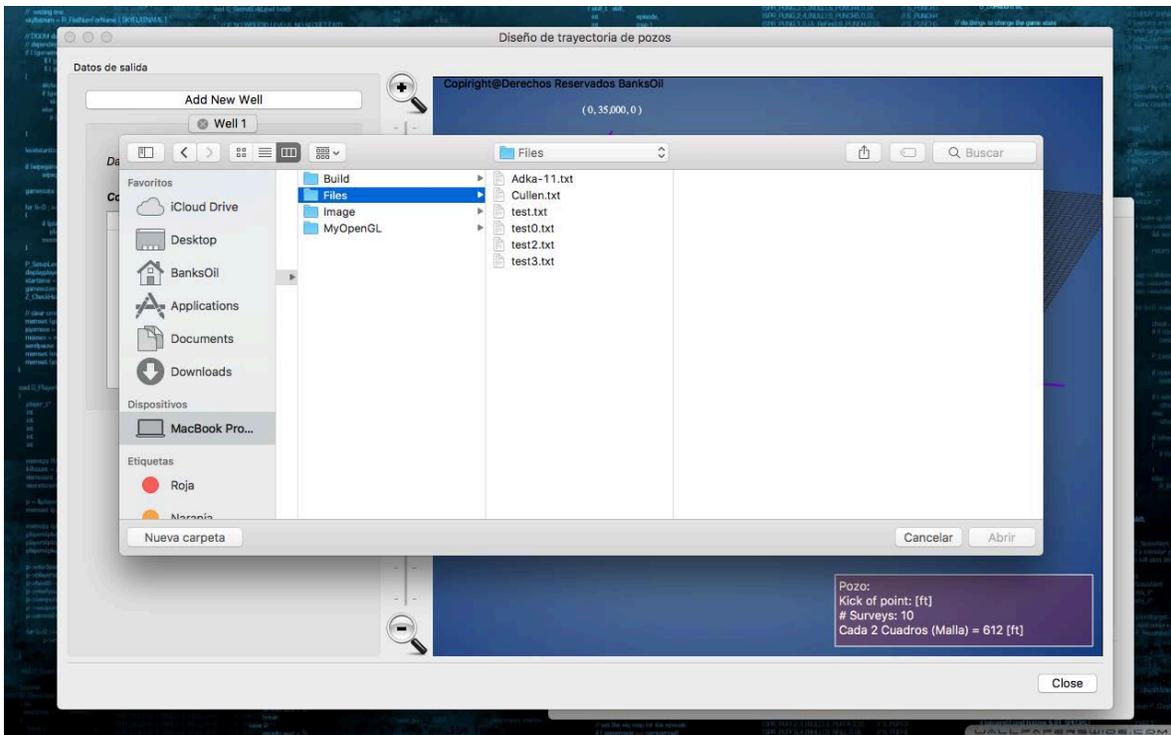
Ya que el usuario a dado “click” al botón agregar de despliega un formulario para introducir los Surveys o estaciones necesarias para calcular la trayectoria del pozo mediante el método de mínima curvatura.

Además, se debe introducir cierta información general como nombre del pozo y coordenadas del pozo.



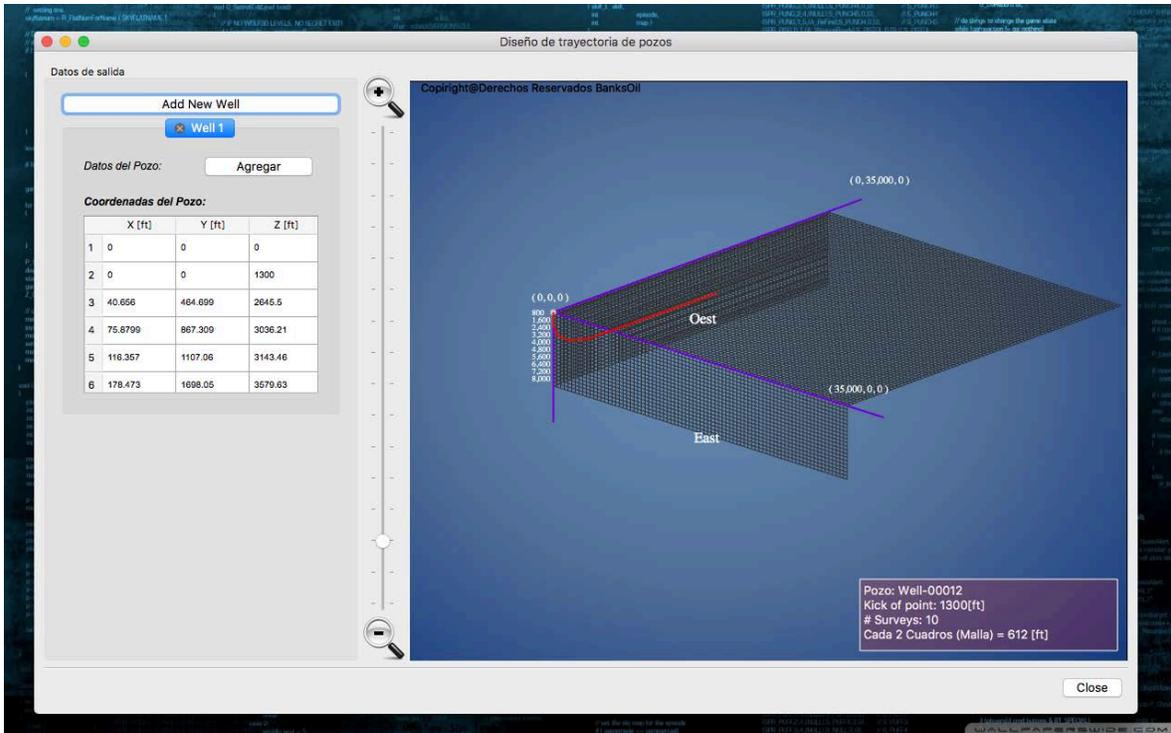
*Figura 28, Ventana emergente para introducir datos generales del pozo y surveys para cálculo de trayectoria del pozo ERD. Zarco Rodríguez Edgar Misael, 5 de enero del 2018. BanksOil Well Design.*

Para hacer más rápida la introducción de valores se ha implementado la opción de guardar archivos formato .txt que son almacenados en una carpeta dentro de la dirección raíz del programa llamada Files, de esta manera el usuario puede introducir solo una vez los valores deseados, y posteriormente mediante el botón “Cargar” abrir algún archivo guardado para ser trabajado modificando solo algunos de los valores sin tener que volver a llenar todo el formulario.



*Figura 29, Método para cargar archivo .txt. Zarco Rodríguez, Edgar Misael, 5 de enero del 2018. BanksOil Well Design.*

Ya que hemos introducido todos los datos o en su defecto hemos cargado algún archivo .txt el software realiza los cálculos necesarios y el resultado de estos se muestran en la tabla inferior a la sección coordenadas del pozo. Y la trayectoria del pozo en 3D se puede visualizar en el widget central de la ventana en color rojo.



*Figura 30, Proyección Final de un pozo. Zarco Rodríguez Edgar Misael, 5 de enero del 2018. BanksOil Well Design.*

### 5.3 Ejemplo Adka-11

En el capítulo 4 se realizó el diseño de la trayectoria del pozo Adka-11 la cual fue mostrada mediante graficas elaboradas en Excel, en esta sección se desarrollará de igual manera dicho ejemplo, pero mediante el software BanksOil Well Design y se mostrará la comparativa de los valores calculados y el diseño mostrado por el software en las diferentes perspectivas de la trayectoria. A continuación, se muestra la información referente al pozo.

Datos Pozo Adka-11:

Coordenadas del pozo: (0,100,0)

DH [ft]: 28,000

KOP [ft]: 1,800

Coordenadas Objetivo: (0,12600,3350)

Además, en la siguiente tabla se muestran los valores de inclinación y Azimut para los diferentes Surveys.

*Tabla 5. Información de inclinación, MD y azimut por cada survey para el pozo Adka-11*

Survey Point	MD[ft]	Angulo de Inclinación $I_n$ [°]	Azimut $A_n$ [°]
A	0	0	0
B	1,000	0	0
C (KOP)	1,800	8	5
C	2,000	12	7
D	2,400	18	12
E	2,600	32	15
F	2,800	38	16

G	3,000	46	18
H	3,200	54	20
I	3,600	64	22
J	3,900	80	24
K	4,200	84	28
L	4,600	88	30
SH	4,600	89	25

Los resultados obtenidos para las coordenadas del pozo en cada uno de los surveys o estaciones se muestran a continuación en la tabla.

*Tabla 6. Resultados obtenidos mediante BanksOil Well Design, pozo Adka-11*

Survey (Estación)	X[ft]	Y[ft]	Z[ft]
1	0	0	100
2	0	0	1,800
3	211.251	788.397	2,946.45
4	281.931	983.208	3,070.51
5	399.589	1,229.81	3,146.33
6	598.365	1,643.99	3,533.57

7	791.077	1,957.98	3,479.49
8	1,006.43	2,260.48	3,505.72
9	1,411.91	2,655.40	3,559.64
10	14,142.10	10,829.30	3,559.54

Estos parámetros calculados se muestran en un gráfico 3D, la vista en diferentes planos se muestra en las siguientes figuras.

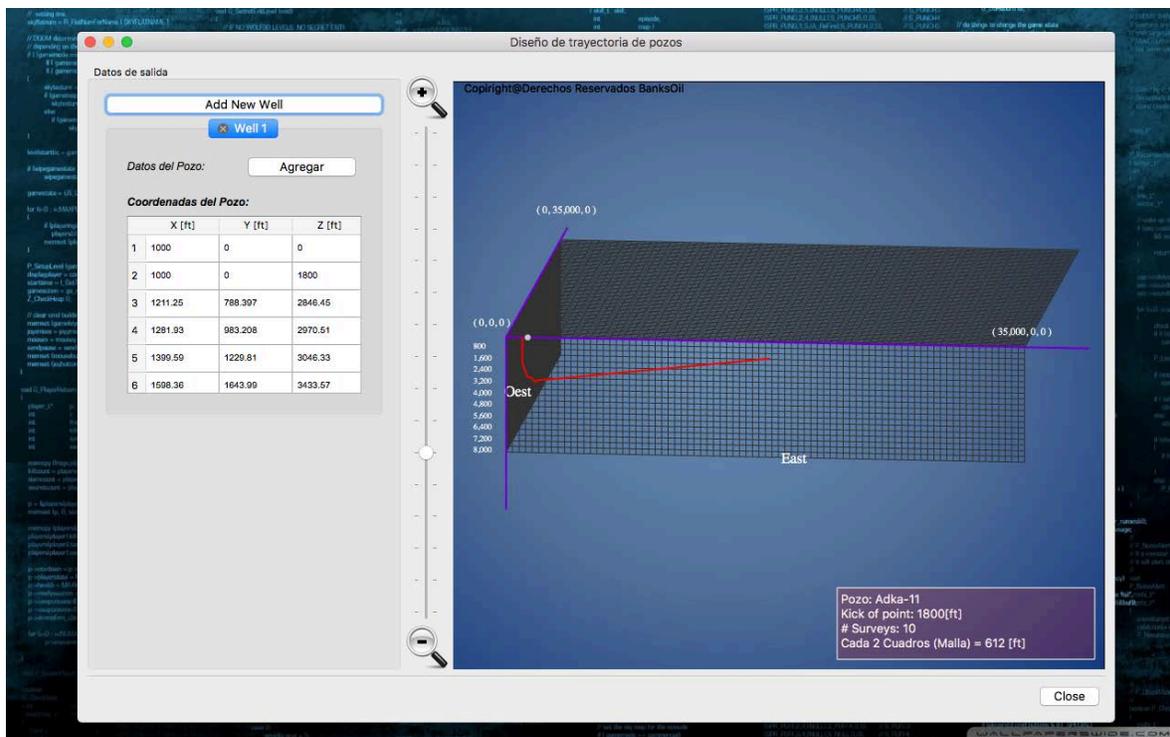
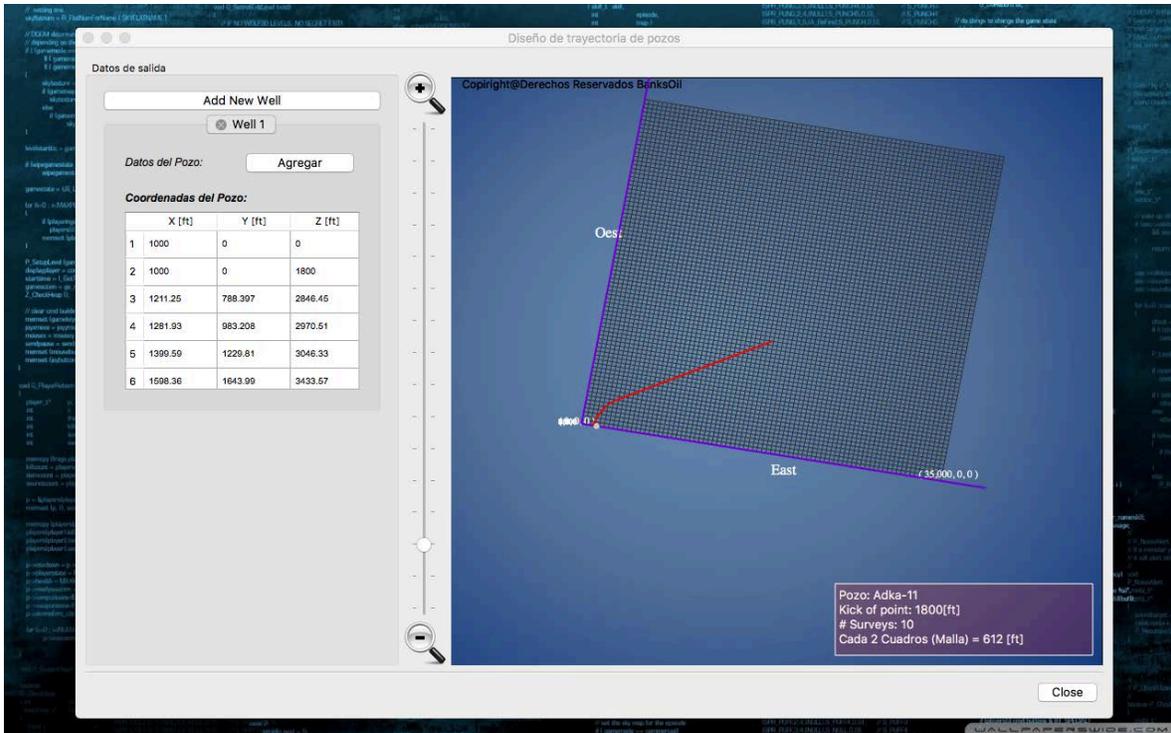


Figura 31, Simulación Trayectoria Pozo Adka-11 vista perfil mediante BanksOil Well Design.

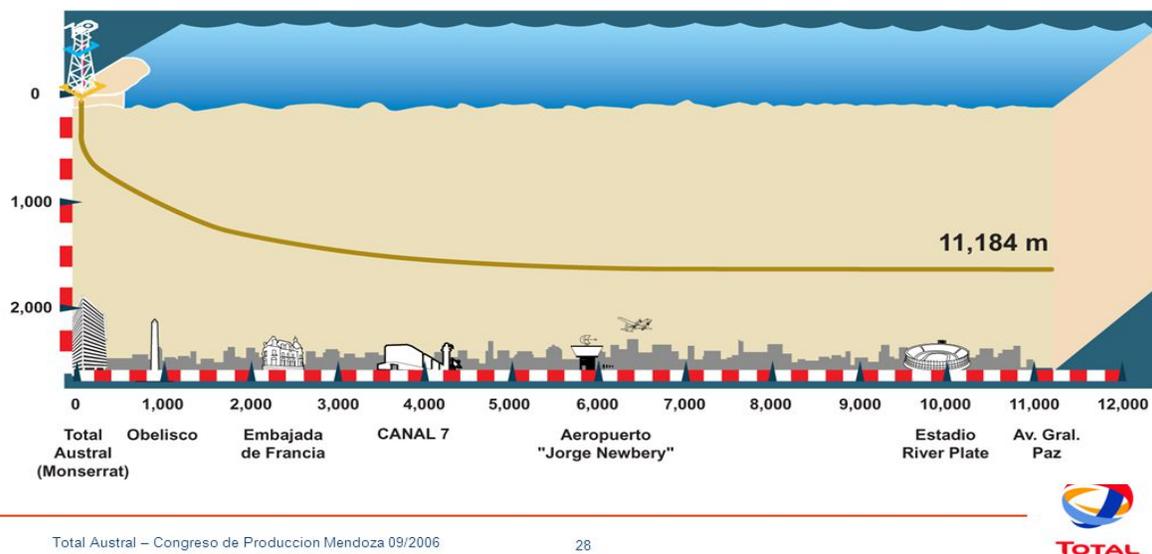


*Figura 32, Simulación Trayectoria Pozo Adka-11 vista planta mediante BanksOil Well Design. Zarco Rodríguez Edgar Misael, 5 de enero del 2018. BanksOil Well Design.*

## **5.4 Ejemplo Real, Cullen Norte N° 1**

En esta sección se realizará un caso práctico, el pozo Cullen Norte N° 1 perforado por la compañía Total, localizado en el campo de Ara Sur en el extremo sur de América del Sur en Tierra de Fuego, Argentina. Este pozo estableció un record mundial mediante una perforación horizontal de 10,585 [m] alcanzando un desplazamiento verdadero (TD) de 11,184 [m] en marzo de 1999. Plataforma propietaria de Forasol 1625/3, ubicada en el océano atlántico Sur.

## Cullen Norte 1: El pozo récord



*Figura 33, Record establecido por el pozo Cullen Norte N° 1. DH comparado con algunas edificaciones significantes de gran tamaño en Argentina. JAVIER RIELO. Total Austral 3 er Congreso de Producción. En: SlidePlayer [en línea]. Septiembre 2006. [Consulta: 10 Octubre 2017]. Disponible en: <http://slideplayer.es/slide/4021450/>*

La cual utiliza una variedad de técnicas especializadas en la perforación horizontal de alcance extendido.

Para el cálculo de la trayectoria del pozo, a continuación, se presenta información referente al pozo que es de gran utilidad.

## Datos Pozo Cullen Norte N° 1:

Distancia Vertical [ft]: 5,433.00

Relación: HD/TVD = 6.39

Coordenadas del pozo: (0,0,0)

DH [ft]: 34,728.00

KOP [ft]: 492.12

BUR [°/100 (ft)]: 1.5 a 3.5

Angulo de retención final [°]: 88

A partir de la información anterior se puede obtener una planeación simple de los parámetros fundamentales de la trayectoria de un pozo de alcance extendido.

Los resultados obtenidos mediante BanksOil Well Design se muestran a continuación:

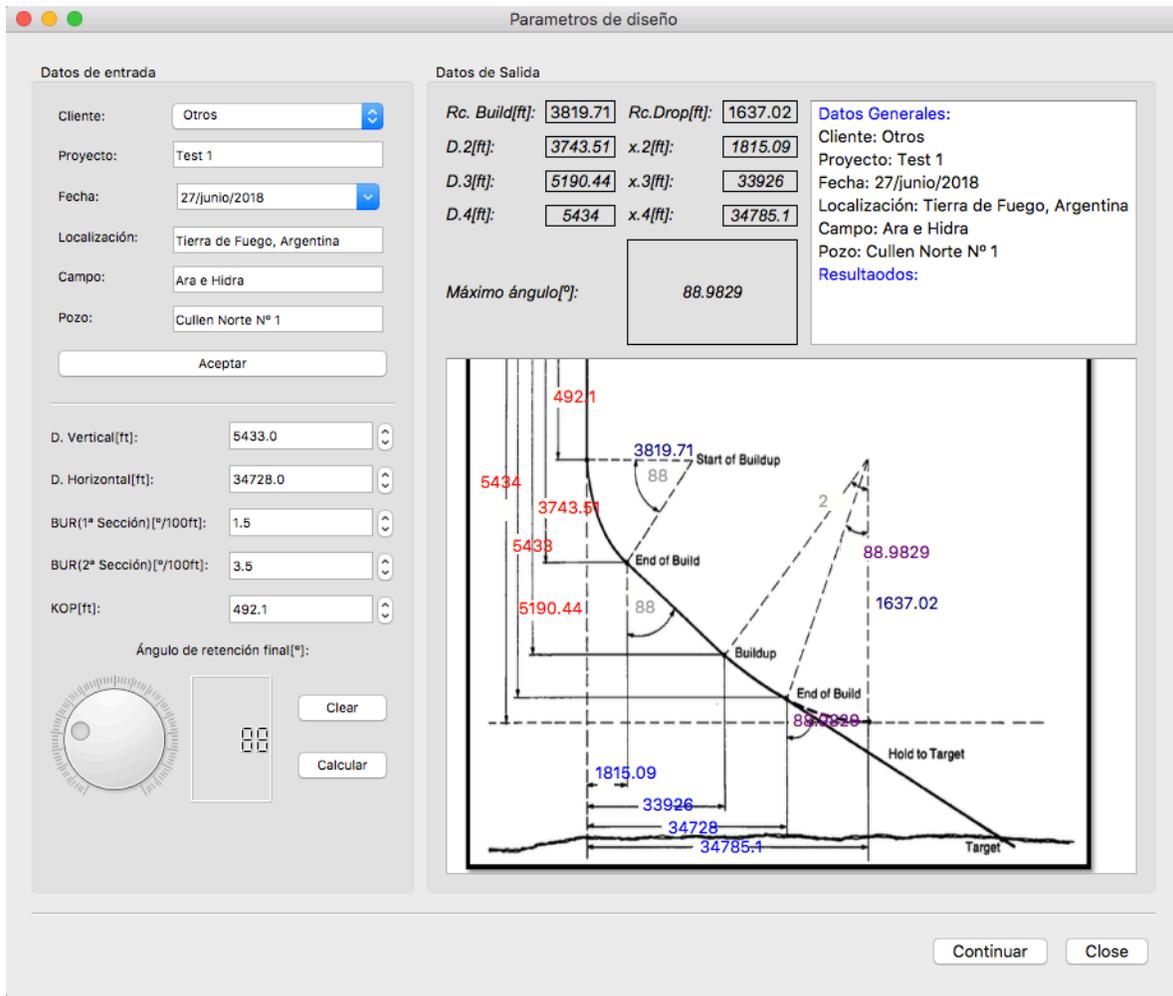


Figura 34, Visualización de parámetros para la planeación del Pozo Cullen Norte N° 1 mediante Banks Oil Well Design.

Tabla 7. Resultados obtenidos

Descripción	Valor [ft]
Radio curvatura sección de construcción angular (R <sub>c</sub> . Build)	3,819.71

Radio curvatura sección decremento angular ( $D_2$ )	3,743.51
Distancia hasta finalizar la sección de construcción ( $D_3$ )	5,190.44
Distancia hasta comenzar 2 <sup>a</sup> sección de construcción ( $D_4$ )	5,434.00
Radio curvatura sección de decremento angular ( $R_c$ . Drop)	1,637.00
Desplazamiento de la vertical – inicio 2 <sup>a</sup> sección de construcción ( $x_2$ )	1,815.09
Desplazamiento de la vertical – finalizar 2 <sup>a</sup> sección de construcción ( $x_3$ )	33,926.00
Desplazamiento horizontal hasta el objetivo ( $x_4$ )	34,785.40

Además, como información adicional para el diseño de la trayectoria en 3 dimensiones, en la siguiente tabla se muestran los valores de inclinación y Azimut para las diferentes estaciones (Surveys).

*Tabla 8. Información de inclinación, MD y azimut por cada survey para el pozo Cullen Norte N° 1*

Survey Point	MD[ft]	Angulo de Inclinación $I_n$ [°]	Azimut $A_n$ [°]
A	0	0	0
B	200	0	0
C (KOP)	492.12	3	5
C	1,000.62	6	5
D	1,509.12	12	5
E	2,017.62	15	7
F	2,526.12	18	7
G	3,034.62	21	5
H	3,543.12	42	5
I	4,051.24	56	6
J	4,559.74	64	7
K	5,068.24	72	10
L	5,577.43	82	15
SH	5,577.43	88	25

Posteriormente, estos valores se introducen a Banks Oil Well Design, el cual arroja los valores mostrados en la siguiente tabla:

*Tabla 9. Resultados obtenidos mediante BanksOil Well Design, pozo Cullen*

*Norte N° 1*

Survey (Estación)	X[ft]	Y[ft]	Z[ft]
1	0	0	0
2	0	0	0
3	48.13	392.02	3,000.07
4	67.27	547.87	3,485.12
5	63.99	731.43	3,961.51
6	139.24	1,591.51	4,161.86
7	238.93	2,273.29	4,298.98
8	341.71	2,783.07	4,487.28
9	581.17	3,295.99	4,606.51
10	1,051.93	29,885.40	4,606.41

Finalmente, la trayectoria del pozo en 3D puede ser visualizada de la siguiente manera.

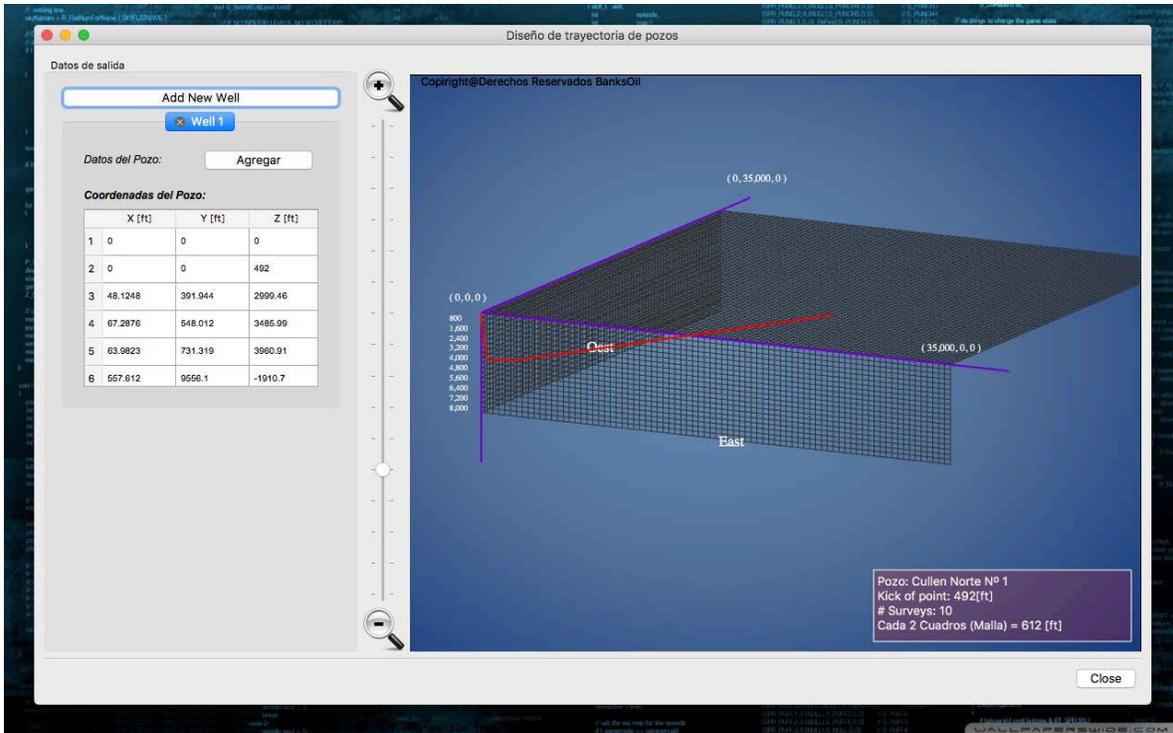
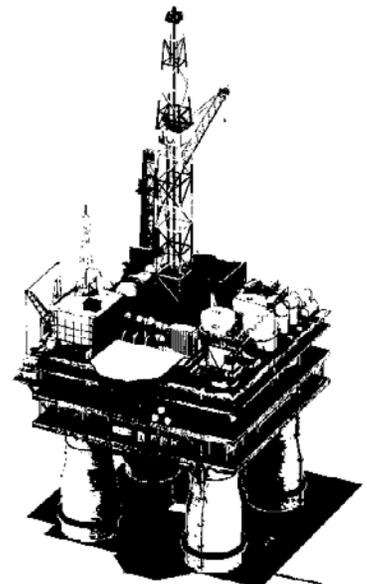


Figura 35, Visualización del Pozo Cullen Norte N° 1 mediante Banks Oil Well Design.

## REFERENCIAS

1. Mark Summerfield, Julio 210. Advanced Qt Programming.
2. Alan Ezust and Paul Ezust, 2012, An Introduction to Design Patterns in C++ with Qt<sup>TM</sup>, 2 nd Edition.
3. Johan Thelin, 2007. Foundations of Qt Development.
4. Linda I. Olivares Flores, DGSCA-UNAM, 2008. Manual de programación en Lenguaje C++.

# Capitulo 6.0



*Conclusiones y  
Recomendaciones.*

El tema de pozos de alcance extendido es muy amplio, por tal motivo, como ya se mencionó en capítulos anteriores, más de un factor deben tomarse en cuenta para el diseño de un pozo ERD. Sin embargo, la tesis en cuestión solo se enfoca en el diseño de la trayectoria que es uno de los primeros parámetros que dan pie al desarrollo de otros fundamentos como el Torque y arrastre, densidad equivalente de circulación (ECD), diseño del aparejo de fondo (BHA), etc. Actualmente en México dicha tecnología no se ha aplicado en su totalidad, sin embargo, escenarios complejos donde las reservas naturales restringen el acceso a las petroleras son una excelente oportunidad para la aplicación de un pozo ERD.

Por ejemplo, Zonas como la Selva Lacandona, dicha región ha sido restringida desde los años 70's por diferentes factores, ya sea por protección ambiental o meramente políticos. Sin embargo, con la reforma energética la inmersión de empresas extranjeras en el territorio nacional es eminente, mientras que las comunidades indígenas de la región se oponen a muchas de las actividades a realizar, por lo tanto, la perforación direccional y de alcance extendido se convierte en una alternativa.

BanksOil Well Design 1.0 es la versión inicial, posteriormente se trabajará para agregar mayores características, como la visualización de los puntos con mayor torque y arrastre durante la perforación, el diseño de un aparejo de fondo de pozo (BHA) para la óptima perforación de un pozo ERD y por último el comportamiento de la ECD para complementar el diseño de un pozo ERD.

Existen muchos framework para el desarrollo de aplicaciones de escritorio, sin embargo, Qt ofrece una programación rápida y de bajo costo, además mediante el uso de C++ permite un control absoluto sobre el código sin liar el código nativo. Por lo tanto, Qt aunado a librería Open GL es una herramienta muy poderosa para la simulación de los fenómenos presentes en un yacimiento, ya que todos procesos presentes en un yacimiento son simples aseveraciones, por lo tanto, estas herramientas permiten programar correlaciones establecidas de dichos fenómenos para visualizar a detalle su comportamiento y comprenderlos de manera adecuada.

Un software especializado para diseños de una trayectoria de cualquier tipo o de cualquier tipo de simulación, ya sea en el área de perforación o en el área de yacimientos, requiere de un equipo de trabajo completo que involucre

desde programadores, ingenieros petroleros, matemáticos y otros, lo cual conlleva tiempo y mucha dedicación. Por tal motivo, el proceso para desarrollar un software completo es una tarea exhaustiva y de mucho conocimiento en muchas áreas.