

21  
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PERFORACION DIRECCIONAL DE  
ALCANCE EXTENDIDO

**TESIS PROFESIONAL**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO PETROLERO**  
P R E S E N T A N :  
FERMIN HIDALGO MALDONADO  
MANUEL MAURO RODRIGUEZ DOMINGUEZ

ASESOR: M. EN I. JOSE MARTINEZ PEREZ



MEXICO, D. F.

1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**PAGINACION VARIA**

**COMPLETA LA INFORMACION**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCIÓN  
664-616

SR. FERMIN HIDALGO MALDONADO  
Presente

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

**PERFORACION DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

- I INTRODUCCION
- II TECNOLOGIA DE LA PERFORACION DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO
- III DISEÑO DE TUBERIAS DE PERFORACION PARA LA PERFORACION DIRECCIONAL DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO
- III SELECCION Y ANALISIS DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO PARA LA PERFORACION DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO
- IV CRITERIOS PARA DETERMINAR EL METODO DE PERFORACION Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL APAREJO DE FONDO PARA LA PERFORACION DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO
- V METODO DE CALCULO DE LA TRAYECTORIA Y HERRAMIENTAS PARA POZOS CON ALTO GRADO DE DESVIACION PARA LA PERFORACION DE ALCANCE EXTENDIDO
- VI CASOS HISTORICOS
- CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

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

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

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 17 de marzo de 1997  
EL DIRECTOR



ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLÍS

BACS-2011-25



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-014

SR. MANUEL RODRIGUEZ DOMINGUEZ  
Presente

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

**PERFORACION DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

- I **INTRODUCCION**
- II **TECNOLOGIA DE LA PERFORACION DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**
- III **DISEÑO DE TUBERIAS DE PERFORACION PARA LA PERFORACION DIRECCIONAL DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO**
- III **DIRECCIONAL DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO**
- III **SELECCION Y ANALISIS DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO PARA LA PERFORACION DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO**
- IV **CRITERIOS PARA DETERMINAR EL METODO DE PERFORACION Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL APAREJO DE FONDO PARA LA PERFORACION DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**
- V **METODO DE CALCULO DE LA TRAYECTORIA Y HERRAMIENTAS PARA POZOS CON ALTO GRADO DE DESVIACION PARA LA PERFORACION DE ALCANCE EXTENDIDO**
- VI **CASOS HISTORICOS**
- VI **CONCLUSIONES**
- VI **REFERENCIAS**

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

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

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 17 de marzo de 1997  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLÍS

JMCS=RLR=518

México, D.F. a 31 de Marzo de 1997.

Tema : Perforación Direccional de Alcance Extendido.

Alumnos : Fermín Hidalgo Maldonado.

8710304-3.

Manuel Mauro Rodríguez Domínguez.

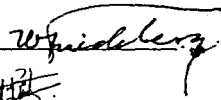
8925716-6.

Tesis autorizada por :

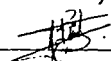
Presidente.

Ing. Ignacio Alonso Cárdenas 

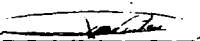
Vocal.

Ing. Walter Friedeberg Merzbach 

Secretario.

M en I. José Martínez Pérez 

1er. Suplente.

Ing. Antonio Morales Díaz de Vivar 

2do. Suplente.

Ing. Nestor Martínez Romero 

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

**HIDALGO MALDONADO FERMIN**

---

**AGRADECIMIENTOS:**

**A MIS PADRES : ELIA Y MARINO; QUE CON SU PERTINENTE ESFUERZO Y DEDICACIÓN AYUDARON EN LA CULMINACIÓN DE ÉSTA EMPRESA, Y SU APOYO MORAL PARA AYUDARME A SUPERAR LOS DIFERENTES TROPIEZOS QUE SE VAN PRESENTANDO A LO LARGO DEL CAMINO DE LA VIDA.**

**A MIS HERMANOS(AS) : ADELAIDA, ISIDRO, MARINO, RIGO, ELIA, Y CRUZ; GRACIAS POR SU AYUDA Y COMPRESIÓN PARA CONMIGO EN DIFERENTES ETAPAS DIFICILES.**

**A MIS CUÑADOS(AS) : HERIBERTO, CELSA Y AMANDA; QUE AMEN Y RESPETEN A MIS HERMANOS(AS) POR MUCHOS AÑOS.**

**A MIS SOBRINOS : JHONATHAN É IVAN; LES DESEO UNA LARGA Y FELIZ VIDA, Y ESPERO QUE LLEGUEN MÁS LEJOS QUE YO PROFESIONALMENTE.**

**A MIS AMIGOS(AS) : GRACIAS POR SU APOYO , COMPAÑERISMO Y TOLERANCIA, POR PASAR MOMENTOS DE OCIO MUY BIEN SUPER, POR PASAR MOMENTOS DE ESTUDIO BIEN SUPER.**

**A MI AMIGO : EDGAR RENE RANGEL GERMAN Y FAMILIA ( RAM ); GRACIAS POR SU APOYO, POR ESCUCHARME , POR SU AMISTAD. EL ES UN BUEN EJEMPLO A SEGUIR, LOS QUIERO Y ESTIMO MUCHO, Y LES DESEO LO MEJOR EN LA VIDA.**

**AGRADECIMIENTOS.**

---

**Sr. Manuel Mauro Rodríguez Domínguez.**

• **A mi Dios :**

Gracias Padre Todopoderoso por abrimme los caminos de la luz a mis ojos. Todo esto es solo tuyo.

• **A mi madre :**

**Yolanda Domínguez Quíroz.**

Que con su cariño, cuidados y esfuerzo hizo posible la realización de la empresa más grande y difícil de mi vida. Te quiero mucho.

• **A mis hermanos :**

**Verónica, Christian y Alejandro.**

A ustedes tres les quiero agradecer su paciencia y apoyo moral para conmigo. Espero que algún día también pueda yo verlos en el mismo lugar donde ahora me encuentro.

• **A mi Mamá Luz :**

A usted le debo la voluntad de mi espíritu y fortaleza de mi andar. Recuerde muy bien que a donde yo voy usted siempre estará conmigo, siempre.

También quiero agradecer de igual forma que a los anteriores a :

Mi tío el Sr. **Joaquín Cisneros Soriano**, a mi padre el Sr. **Manuel Rodríguez Martínez**, a mi adorable tía **Lucha**, a su esposo y a sus dos hijos : **Elsa y Carlos** mis primos más queridos, al **M en I. José Martínez Pérez** por su orientación y ayuda técnica en la elaboración de ésta tesis, a mis amores de juventud y de siempre, a mis discos que borraron para siempre el silencio de mi vida y por último a quien más colaboro para hacer posible éste sueño: **A MI.**

---



**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

**HIDALGO MALDONADO FERMIN**

---

**AGRADECIMIENTOS:**

**A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO POR PERMITIRME SER  
UNIVERSITARIO Y HACERME SENTIR SU LEMA.**

**A LA FACULTAD DE INGENIERÍA POR DARMER LA OPORTUNIDAD DE SER  
INGENIERO PETROLERO.**

**A LA GERENCIA DE ENLACE COMERCIAL POR SU APOYO PARA LA  
REALIZACIÓN DE ESTE ESCRITO.**

**A LOS QUE COLABORARON PARA LA REALIZACIÓN DE LA MISMA  
M.I. GÓMEZ CABRERA J.A  
M.I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ**

---

**" USTED ES PARA NOSOTROS LA PERSONA MÁS IMPORTANTE ESCUCHA  
DECIR EL NUEVO QUE LLEGA LLENO DE DESALIENTO, LLENO DE  
DECEPCIÓN, ACORRALADO POR LA VIDA."**

**LA MADRINA ROSA O.**

**" CADA QUIEN ES EL RESPONSABLE DE SU FORMACIÓN POR EL CAMINO DE  
LA VIDA "**

**C.M.S**

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

<b>TEMARIO.</b>	<b>PAG.</b>
-----------------	-------------

<b>TEMARIO</b>	<b>T.1.</b>
----------------	-------------

<b>RESUMEN.</b>	<b>A.1.</b>
-----------------	-------------

**CAPÍTULO I.  
TECNOLOGÍA DE LA PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE  
EXTENDIDO.**

1.1.INTRODUCCIÓN.	1.1.
1.2.DEFINICIÓN DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.	1.2.
1.3.APLICACIONES DE LA PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.	1.3.
1.4.PROBLEMAS DE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN DE ALCANCE EXTENDIDO.	1.9.
1.5.PROPÓSITO DE UN PROGRAMA PILOTO DE PERFORACIÓN DE ALCANCE EXTENDIDO.	1.22.

**CAPÍTULO II.  
DISEÑO DE TUBERÍAS DE PERFORACIÓN PARA LA PERFORACIÓN  
DIRECCIONAL DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO.**

2.1.INTRODUCCIÓN.	2.1.
2.2.APLICACIÓN DE PESO SOBRE LA BARRENA CON TUBERÍA DE PERFORACIÓN.	2.1.
2.3.CONCEPTOS REQUERIDOS EN EL DISEÑO DE SARTAS DE PERFORACIÓN.	2.13.
2.4.GUÍA Y CONSIDERACIONES EN LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN HORIZONTAL TERRESTRE, AL DISEÑO DE POZOS MARINOS DIRECCIONALES, HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO.	2.33.
2.5.MÁXIMA CARGA AXIAL COMPRESIVA DISPONIBLE EN TUBERÍAS EN POZOS HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO.	2.35.
2.6.RESUMEN DE LAS FÓRMULAS PARA LOS CÁLCULOS.	2.35.

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

PAG.

**CAPÍTULO III.**

**SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO PARA LA PERFORACIÓN DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO.**

3.1.INTRODUCCIÓN.	3.1.
3.2.CONSIDERACIONES EN LA SELECCIÓN DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO Y JUNTAS EN POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO.	3.1.
3.3.CONFIGURACIÓN PRIMARIA Y DE CONTINGENCIA DE CADA UNA DE LAS SECCIONES DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO PARA UN POZO DE ALCANCE EXTENDIDO.	3.2.
3.4.DISEÑO DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO PARA POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO.	3.5.
3.5.NOMENCLATURA.	3.25.

**CAPÍTULO IV.**

**CRITERIOS PARA DETERMINAR EL MÉTODO DE PERFORACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL APAREJO DE FONDO PARA LA TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

4.1.INTRODUCCIÓN.	4.1.
4.2.MÉTODO DE RADIO LARGO.	4.3.
4.3.MÉTODO DE RADIO MEDIO.	4.4.
4.4.MÉTODO DE RADIO CORTO.	4.7.
4.5.MÉTODO DE RADIO ULTRA-CORTO	4.11.
4.6.APAREJOS DE PERFORACIÓN.	4.13.
4.7.APAREJOS DE RADIO LARGO.	4.16.
4.8.APAREJO DE RADIO MEDIO.	4.19.
4.9.DISEÑO DE APAREJOS DE FONDO.	4.32.

**CAPÍTULO V.**

**MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA TRAYECTORIA Y HERRAMIENTAS PARA POZOS CON ALTO GRADO DE DESVIACIÓN PARA LA PERFORACIÓN DE ALCANCE EXTENDIDO.**

5.1.INTRODUCCIÓN.	5.1.
5.2.DETERMINACIÓN DE LA TRAYECTORIA.	5.1.
5.3.RADIO DE CURVATURA.	5.2.
5.4.MOTOR DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO ( P.D.M. ).	5.19.
5.5.SISTEMAS DE NAVEGACIÓN DE PERFORACIÓN.	5.21.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

**PAG.**

<b>5.6.SISTEMAS DE MEDICIÓN MIENTRAS SE PERFORA ( M.W.D. )</b>	<b>5.23.</b>
<b>5.7.HERRAMIENTA RECUPERABLE DE MEDICIÓN MIENTRAS SE PERFORA ( D.M.W.D. )</b>	<b>5.24.</b>
<b>5.8.TUBERÍAS DE PERFORACIÓN PARA SERVICIO COMPRESIVO.</b>	<b>5.27.</b>
<b>5.9.SISTEMA DE PERFORACIÓN DE RADIO CORTO.</b>	<b>5.29.</b>

**CAPÍTULO VI.  
CASOS HISTÓRICOS.**

<b>6.1.INTRODUCCIÓN.</b>	<b>6.1.</b>
<b>6.2.CASO HISTÓRICO DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL PARA UN POZO DE ALCANCE EXTENDIDO DE 78° EN EL GOLFO DE MÉXICO, EUGENE ISLAND 326 No. A - 6.</b>	<b>6.1.</b>
<b>6.3.CASO HISTÓRICO DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO EN EL GOLFO DE MÉXICO DESDE EL BLOQUE 371 EN EUGENE ISLAND.</b>	<b>6.10.</b>

**CONCLUSIONES.  
BIBLIOGRAFÍA.**

**C.1.  
B.1.**

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

### **RESUMEN.**

---

El presente trabajo de tesis esta formado por seis capítulos en los cuales se abordan los más importantes tópicos de lo que concierne a la Tecnología de Perforación Direccional de Alcance Extendido, una nueva e innovadora tecnología de perforación que permite alcanzar ángulos de desviación altos ( mayores de 60° ) en los agujeros de pozo y notables incrementos en el desplazamiento horizontal.

A continuación se describen someramente los temas que se abordan en cada uno de los capítulos de este trabajo haciendo una breve y concisa descripción de lo que en ellos se podrá encontrar cuando el lector interesado haga uso del presente material.

#### **Capítulo I. Tecnología de la Perforación Direccional de Alcance Extendido.**

En éste primer capítulo se presenta una definición teórica, las aplicaciones y los problemas de mayor relevancia que se encuentran en la aplicación de está tecnología en el campo petrolero. También se presenta a modo de información adicional de máxima actualidad el propósito de un programa piloto de perforación de alcance extendido real, en el cual una compañía petrolera expone sus motivos y programas a efectuarse en la perforación de 2 pozos sacrificables usando está moderna tecnología de perforar agujeros para pozos petroleros.

#### **Capítulo II. Diseño de Tuberías de Perforación para la Perforación Direccional de Pozos de Alcance Extendido.**

Aquí se expone de la manera más clara posible las cargas que intervienen directamente sobre los tubos que conforman un aparejo de perforación que será usado para perforar un pozo de Alcance Extendido. Se habla extensamente de como se logra controlar y aplicar el peso correcto sobre la barrena y de los problemas que conlleva esta operación de tan vital importancia dentro de las operaciones de perforación del pozo. Aunado a lo anterior se presenta un método de Diseño para Tuberías de Perforación a usarse en pozos de Alcance Extendido empleando para ello el criterio de carga máxima y presentando las expresiones matemáticas y consideraciones teóricas de rigor y de seguridad que permitan llevar a buen término un diseño al respecto. Por último, al final del capítulo se condensan las fórmulas de las que se hace mención a lo largo del texto y que se emplean para el correcto diseño de aparejos de perforación de Alcance Extendido.

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

### **Capítulo III.**

#### **Selección y Análisis de Tuberías de Revestimiento para la Perforación de Pozos de Alcance Extendido.**

En éste tercer capítulo se aborda el tema del análisis de los esfuerzos a los cuales se ve sometida una sarta telescopiada de Tuberías de Revestimiento dentro de un pozo de Alcance Extendido. Se describen y detallan las características de las diferentes secciones de T.R. que se necesitan para ademar un agujero de éste tipo, las ventajas que con ello se logran y el tipo de juntas que para unir la sarta son requeridas. Se presenta también, aunque someramente, un método de diseño para T.R. de producción, intermedias y superficiales - conductoras por el método de carga máxima, exponiendo cada una de las cargas y esfuerzos a considerar para el buen diseño de una sarta para un pozo de Alcance Extendido, explicándose ampliamente las ventajas y desventajas que conlleva dicho diseño y la posterior selección de Tubería de Revestimiento y juntas.

### **Capítulo IV.**

#### **Criterios para determinar el método de Perforación y Análisis del comportamiento del Aparejo de Fondo para la Perforación Direccional de Alcance Extendido.**

En éste cuarto capítulo se exponen los diferentes métodos de perforación que existen para perforar un pozo horizontal y de Alcance Extendido más comúnmente empleados en el campo petrolero por las compañías petroleras dedicadas a la perforación de pozos. Se presenta de igual forma la definición y características primordiales de los aparejos de fondo usados para la perforación de pozos de Alcance Extendido, así como los dos tipos de ellos ( Aparejos de Radio Largo y Medio ) de mayor uso y preferencia en el campo. Al final del capítulo se presenta una metodología para el diseño de dichos aparejos de fondo a modo de complemento para lo expuesto en éste capítulo.

### **Capítulo V.**

#### **Método de Cálculo de la Trayectoria y Herramientas para Pozos con Alto grado de Desviación para la Perforación de Alcance Extendido.**

Se presenta la manera de como seleccionar la trayectoria adecuada para un pozo de Alcance Extendido evocando con ello la definición de Radio de Curvatura y todos los demás conceptos teóricos matemáticos que se relacionan al respecto y que permiten, solo cuando se les comprende a fondo y detalladamente, determinar el ritmo de desviación y severidad que la trayectoria del pozo requiere a través de las diferentes etapas del mismo para llegar a su objetivo en su encuentro con la formación productora de hidrocarburos. En una segunda parte de éste capítulo se exponen los diferentes sistemas y herramientas que existen

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

para llevar la medición y el control de la trayectoria del pozo a detalle de manera que no se pierda ni por un momento el rumbo, dirección y sentido de a donde se dirige el aparato de fondo y barrena a través de las formaciones suprayacentes y paralelas al yacimiento.

### **Capítulo VI. Casos Históricos.**

En éste último capítulo se presentan a modo de ejemplos generales dos casos reales de Perforación de Alcance Extendido llevados a cabo, ambos, en el Golfo de México en su parte correspondiente a los Estados Unidos de Norteamérica y perforados en el campo Eugene Island. Los dos casos se exponen a completo detalle, hablando de las T.R.'s empleadas, el ángulo promedio y máximo de desviación alcanzado, los desplazamientos horizontales logrados, los fluidos de perforación que se usaron en cada una de las etapas de los pozos y otros demás puntos no menos interesantes que permiten dar una clara idea de los trabajos y operaciones tanto teóricas como de campo que se llevan a cabo durante la perforación de un Pozo de Alcance Extendido, tema de éste trabajo de Tesis para obtener el título de Ingeniero Petrolero.

Las **Conclusiones** que se han obtenido de desarrollar éste trabajo se presentan al final del mismo junto con la **Bibliografía** empleada y comentarios adicionales.

---

## **CAPITULO I.**

### **TECNOLOGIA DE LA PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

#### **1.1.INTRODUCCIÓN.**

En éste primer capítulo se dará una definición de la Tecnología de Perforación de Pozos con Alcance Extendido; se revisarán sus aplicaciones; se expondrán los problemas que su uso conlleva y las soluciones que al caso existen disponibles para erradicar o, por lo menos, minimizar los efectos indeseables que dichos problemas ocasionan en las operaciones de campo propiamente dichas.

La perforación de Alcance Extendido, cuyas siglas en inglés son **ERD** ( **Extend reach drilling** ), es una avanzada tecnología para perforar agujeros de pozos con altos ángulos de desviación y con altos incrementos en el desplazamiento horizontal. Algunos de estos agujeros de pozos ofrecen una gran variedad de aplicaciones con reducciones potenciales en los costos de producción, siendo este el elemento de mayor beneficio y peso. Entre otros, problemas de movimiento de tuberías, presión diferencial, limpieza del agujero, y de aplicación de peso sobre barrena pueden ser reducidos mediante el uso de ésta innovadora tecnología.

Un programa de perforación de alcance extendido evoca para su uso avanzados conceptos y tecnologías para lograr un incremento significativo en la capacidad de perforación direccional. El uso de lodos de perforación especiales, tubería de perforación de aluminio y rotación y circulación continua del vástago de perforación cuando la tubería está en el pozo son algunas de las técnicas usadas para reducir significativamente la resistencia al avance de la barrena a través de las formaciones rocosas suprayacentes al yacimiento.

El uso de herramientas excéntricas ( como juntas ) es una alternativa utilizada para reducir el riesgo de pegaduras por presión diferencial en las sargas de perforación y asimismo proporciona un considerable incremento en la eficiencia de la limpieza del agujero. Cuando ocurre una pegadura por presión diferencial, se utilizan lastrabarrenas hidráulicos que pueden ser usados para jalar la tubería dentro del agujero y producir peso sobre barrena.

El presente y continuo incremento de los precios de los productos petroleros es la mayor preocupación de la industria de los hidrocarburos. En un esfuerzo por combatir esta tendencia inflacionaria, las compañías petroleras, tanto las paraestatales como las privadas, están desarrollando sus mejores esfuerzos para lograr optimar los procedimientos de perforación de manera que las operaciones se realicen satisfactoriamente y hagan más efectivo su costo. Todas las fases del proceso de perforación están siendo sujetas fuertemente a variables económicas consiguiendo con ello el mejor desarrollo de nuevas técnicas. Ahora emerge la posibilidad de ahorros considerables mediante la extensión de las técnicas



## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

convencionales de perforación direccional existentes dentro de avanzadas tecnologías para la perforación de agujeros con altos ángulos de desviación y de Alcance Extendido.

### **1.2.DEFINICIÓN DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

La tecnología conocida como Perforación de Alcance Extendido, cuyas siglas al español son PAE, describe los procedimientos de perforación rotatoria necesarios para perforar, recorrer una cierta distancia horizontal y terminar agujeros de pozos con **significativos incrementos en el ángulo de desviación y/o incrementar considerablemente el desplazamiento horizontal** de los pozos donde dicha tecnología es aplicada en comparación de los ángulos de desviación y desplazamientos horizontales logrados con las técnicas y prácticas convencionales de perforación direccional.

Un pozo petrolero puede considerarse de Alcance Extendido cuando cumple con las siguientes 2 condiciones :

1. Un ángulo de desviación total con respecto a la vertical mayor de 60°.
2. Una profundidad media ( MD, medida desde la superficie hasta el fondo del pozo sobre su trayectoria ) igual o mayor que 2 veces la profundidad vertical verdadera.

La Figura 1 presenta un resumen gráfico que muestra, para 3 ejemplos de campo, los alcances en ángulo de desviación total como en desplazamiento horizontal neto logrados en pozos donde la Perforación de Alcance Extendido ha sido aplicada satisfactoriamente. Los agujeros de pozos identificados en la figura 1 están trazados sobre el plano con el desplazamiento horizontal medido desde el fondo del pozo y referenciados a la profundidad lograda por debajo de la correspondiente al inicio de la desviación mejor conocida como el KOP ( cuyas siglas al inglés lo definen como " Kick - off point " ).

Las líneas continuas, de 50° a 80°, representan una velocidad de avance de perforación de 5"/100 pies en un perfil recto o de corte transversal, y sirven como indicadores del ángulo de desviación aproximado que permite identificar los agujeros de pozos mostrados en la figura por puntos. La línea discontinua ofrece una estimación del alcance de la tecnología actual y de aplicación de la perforación direccional. Arbitrariamente, cualquier agujero situado a la derecha de la línea discontinua puede ser considerado como de Perforación de Alcance Extendido.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

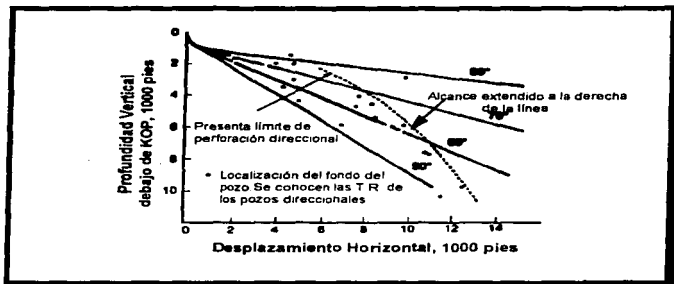


Figura 1. Resumen gráfico que muestra los límites entre la Perforación Direccional Convencional y la de Alcance Extendido.

### 1.3.APLICACIONES DE LA PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

La Perforación de Alcance Extendido y la Perforación direccional convencional comparten algunos objetivos en común y entre los cuales se incluyen los siguientes:

1. **La Perforación de Domos Salinos y Fallas:** La perforación vertical al aplicarse a domos salinos y a yacimientos afilados conlleva para los primeros el incremento inevitable de los costos de perforación por varias razones:

- Se desconoce el comportamiento de la sal a las presiones y temperaturas a las que se encuentra sujeta dentro del cuerpo del domo.
- Se requiere la aplicación de un programa detallado y preciso de los fluidos de perforación que se utilizarán al atravesar el domo salino con vistas de llegar a la formación productora que se encuentra en una de sus laterales.
- Se corre un gran riesgo al colapso de las tuberías de revestimiento empleadas para aislar la sal del pozo.

y las anteriores entre algunas de las muchas restricciones que para la perforación vertical existen. Ahora bien, para la perforación vertical de yacimientos afilados se corre el gran riesgo de fracturar y dañar irremediablemente el sello que por naturaleza tienen este tipo de entrapamientos.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Por los motivos antes señalados se ha adoptado la Perforación Direccional y de Alcance Extendido como la solución más viable para resolver dichos inconvenientes durante el proceso de perforación. Es conveniente señalar que la Perforación Direccional ocupa más del 95% de las aplicaciones mientras que la perforación de Alcance Extendido solo se limita a unos cuantos pozos en todo el orbe petrolero, se considera todavía como una técnica alternativa de perforación.

**2. Búsqueda Lateral :** Es práctica común en yacimientos con casquete de gas asociado hacer uso de la Perforación Direccional Convencional para no dañar en ninguna forma el empuje proporcionado por la expansión del gas acumulado en la cima del yacimiento.

Así entonces, evitar la perforación de pozos verticales en el área correspondiente al casquete de gas es una prioridad, razón por la cual las trayectorias de los pozos de desarrollo serán desviadas y entrarán a la formación productora lateralmente y directamente a la zona de aceite.

Es precisamente aquí donde la Perforación de Alcance Extendido puede desarrollarse a toda su capacidad permitiendo con ello perforar pozos en superficie a grandes distancias medidas sobre el terreno del área donde verticalmente está localizado el yacimiento. A diferencia de la Perforación Direccional Convencional, la de Alcance Extendido permite alejarse aún más de las locaciones que les correspondería a pozos desviados que intentarían desarrollar el yacimiento, ya que su factibilidad para lograr agujeros de pozos con altos ángulos de inclinación y grandes desplazamientos horizontales supera por amplio margen lo esperado con las técnicas convencionales.

**3. Perforación Múltiple de Pozos Exploratorios a partir de un solo agujero :** Desde hace algunos años en la etapa de exploración de las estructuras geológicas que pudieran almacenar hidrocarburos se llevan a cabo perforaciones de pozos exploratorios múltiples a partir de un sólo agujero de pozo.

Si se comienza un pozo exploratorio como vertical y a una cierta profundidad se desea la exploración de varias regiones del yacimiento con la perforación de múltiples pozos, la solución es entonces recurrir a la perforación de pozos desviados a partir del agujero de pozo de trayectoria vertical con lo cual se abaten considerablemente los costos de perforación en vez de perforar desde la superficie igual número de agujeros que pozos se desean.

Al igual que la Perforación Desviada Convencional la de Alcance Extendido permite llevar a cabo la perforación de múltiples pozos a partir de un solo agujero de pozo pero con algunas ventajas sobre la primera que son ciertamente convenientes. El poder lograr grandes desplazamientos horizontales en pequeños segmentos verticales proporciona una útil herramienta que permite sondear la formación productora por planos horizontales a diferentes profundidades que dan una mejor idea de las condiciones de flujo y de la roca que existen en el yacimiento.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

**4. Perforación Múltiple de Pozos a partir de una sola estructura :** En la perforación de pozos costa afuera desde una misma plataforma son perforados, usando las técnicas convencionales de perforación direccional y vertical, no un pozo por plataforma sino varias por cada una de ellas, es decir, apartir de una sola estructura se lleva a cabo una perforación múltiple de pozos petroleros. Como un pozo de Alcance Extendido es igual a uno direccional convencional antes de llegar a la profundidad de inicio de desviación ( KOP ), entonces no hay ningún problema para que al igual que los pozos direccionales convencionales

**5. Perforación de Pozos de alivio :** La Perforación Direccional y la de Alcance Extendido son dos tecnologías usadas para perforar pozos de alivio hacia un pozo previo el cual estaba siendo perforado a la profundidad de la formación productora cuando sufrió un reventón que provocó que dicho pozo se saliera de control y que ya estando en condiciones críticas no se le puede controlar de ninguna otra forma. La misión de un pozo de alivio es interceptar al pozo previo a una cierta profundidad, por arriba de la formación productora, de manera que se pueda canalizar la producción hacia el primero para controlar el segundo y taponarlo.

Desde luego, reviste mayor dificultad controlar un reventón mediante un pozo de alivio cuando el pozo produce gas y no aceite. Existe al respecto una amplia gama de casos históricos en los cuales mediante la perforación de Pozos Desviados Convencionales como de alivio se han logrado controlar reventones de proporciones asombrosas que han dejado múltiples pérdidas tanto materiales como humanas. La Perforación de Alcance Extendido promete dentro de este campo de aplicación ser muy útil en un futuro muy cercano debido a sus latentes ventajas y alcances.

**6. Múltiple explotación de arenas a partir de un solo agujero de pozo :** Existen acumulaciones de hidrocarburos en arenas suprayacentes unas de las otras que no necesariamente se encuentran alineadas, más bien se les encuentra dispersas a ciertas profundidades en una área específica. Para resolver este problema se ha hecho uso de la Perforación Direccional Convencional de manera que mediante un solo pozo se puedan comunicar algunos de los lentes arenosos en cuestión con el uso de terminaciones múltiples para que en todos ellos se logre una producción pero através de un solo agujero de pozo.

La Perforación de Alcance Extendido puede ser muy útil cuando los lentes arenosos se encuentran horizontalmente distanciados y donde un pozo direccional convencional no puede acceder debido a que los ángulos de inclinación involucrados rebasan el máximo permisible para dicha tecnología. Es aquí donde la Perforación de Alcance Extendido cobra importancia ya que los altos ángulos de inclinación logrados con ella si permiten comunicar através de un solo agujero de pozo varias formaciones arenosas simultáneamente, rebasando con ello las limitaciones que impone un simple pozo direccional.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Adicionalmente la Perforación de Alcance Extendido (PAE) tiene la habilidad de:

**7. Desarrollo de yacimientos costa afuera que de otro modo no serían económicamente explotables :** Hoy en día se sabe de la existencia de muchos yacimientos petroleros costa afuera gracias a los avances que en la tecnología disponible para la exploración se han desarrollado en las últimas dos décadas, y los cuales han permitido conocer con increíble precisión la localización de dichas acumulaciones económicamente explotables, de hidrocarburos pero también sabemos de igual forma que se encuentran lejos de nosotros en cuanto a la tecnología disponible para desarrollarlos. El obstáculo a vencer en esta ocasión para la industria petrolera mundial es la magnitud de los tirantes de agua marina bajo los cuales se encuentran esos yacimientos de hidrocarburos hasta ahora vírgenes de la mano del hombre. Tirantes de agua marina superiores a los 1,000 m. y localizados ya en el talud del suelo marino parecen ser una barrera que librar en la actualidad. En Brasil, Petrobras ha logrado ya desarrollar tecnología para poder perforar pozos en tirantes de agua mayores a los 1,000 m. de longitud y la ha llamado Perforación en Aguas Profundas; aun así su aplicación es todavía esporádica y su costo fuera de los límites tradicionales que la hacen ser sencillamente incosteable.

La Perforación de Alcance Extendido se vislumbra como una alternativa que pueda reducir los costos del proceso de perforación para hacerlos razonablemente equiparables con los presupuestos que para esta actividad costa afuera se manejan por los países petroleros. La PAE aplicada desde plataformas marinas en aguas someras permite llegar hasta las formaciones productoras que originalmente se encontraban fuera de alcance gracias a la considerable magnitud que en desplazamiento horizontal se logra con ella. Actualmente se prueba con ella experimentalmente en plataformas marinas del Mar del Norte para comprobar sus importantes ventajas y corroborar el método de diseño que para las T.R.'s y el aparejo de producción se lleva a cabo en la actualidad; en capítulos posteriores se ilustran ambos métodos de diseño.

**8. Explotación de yacimientos que actualmente están más allá de la tecnología hasta ahora alcanzada :** Debido a que la Perforación de Alcance Extendido es una tecnología de punta se ha especulado mucho con respecto a sus verdaderas aplicaciones para dar solución a problemas de campo que hasta ahora no han podido ser solucionados, sin embargo se espera mucho de ella en el futuro cercano.

Con los pozos perforados que se han llevado a cabo siguiendo lo marcado por esta innovadora tecnología se sabe ahora que una de las principales ventajas que otorga la PAE es el notable incremento en el área de drenaje disponible para estos pozos con altos ángulos de inclinación aunado ello a grandes desplazamientos horizontales que superan hasta por un 200% los logrados con la Perforación Direccional Convencional. La Perforación de Alcance Extendido constituye entonces una de las esperanzas con las que cuentan los ingenieros petroleros de

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

hoy para lograr en el futuro la explotación de yacimientos que actualmente están más allá del límite alcanzado con las tecnologías convencionales de perforación de pozos.

**9. Incrementar la producción a través de intervalos más " largos " en la formación productora debido al elevado ángulo de desviación del agujero :** El ángulo de desviación del agujero perforado con el uso de la Perforación de Alcance Extendido se mide a partir de la vertical, de abajo hacia arriba , acercándose cada vez más la trayectoria del pozo a la tendencia horizontal que se logra cuando dicho ángulo de desviación (  $\Phi$  ) toma el valor de 90°. Como la Perforación de Alcance Extendido permite obtener trayectorias de pozos con altos ángulos de inclinación ( mayores a 60° ) es entonces lógico suponer que a la profundidad de la formación productora se tenga una trayectoria de pozo bastante cercana al comportamiento horizontal.

Si lo anterior se acepta como cierto, y lo es, es posible que el agujero , cuando entre en contacto con la formación impregnada por hidrocarburos, recorra un buen trecho dentro de la misma antes de encontrarse con los límites físicos del yacimiento, deteniéndose con éste último acontecimiento el avance de la perforación del pozo. La gran magnitud que tiene el pozo dentro del yacimiento permite tener una amplia zona de disparos con el consecuente incremento de la producción de fluidos de la roca al pozo, lo cual se explica porque la capacidad de flujo de la formación productora ha aumentado en la misma proporción que lo ha hecho el espesor de la zona de disparos ( h ).

Este incremento de la producción de los pozos que han sido perforados con el uso de la Perforación de Alcance Extendido los hace más atractivos desde el punto de vista económico y se les considera siempre deseables en toda localción. El incremento de la producción esperado de pozos perforados con la PEA es la causa de mayor peso que justifica el uso de la misma, incrementando con ello los costos de perforación, dentro de un rango razonable, a cambio de altos volúmenes de producción de aceite cuando los pozos se hayan terminado y entren a la etapa de producción.

**10. Reducción del número de plataformas necesario para el desarrollo de yacimientos gigantes :** El número de pozos perforados por plataforma varía debido a la capacidad de manejo de la producción que se disponga en ella y a la localización de la misma que tenga dentro del yacimiento. Obviamente si se planea desarrollar un yacimiento gigante costa afuera perforando pozos de Alcance Extendido, el número de ellos necesario para drenar la mayor parte del yacimiento será visiblemente inferior al número de ellos necesarios si se perforaran usando los métodos convencionales , ello debido a que cada pozo de Alcance Extendido drenara una mayor área de la formación productora y consecuentemente serán necesarios menos pozos para producir un cierto volumen de aceite a superficie respecto al número de ellos por los métodos convencionales.

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Así pues, si el número de pozos de Alcance Extendido se reduce también lo hará el número de plataformas requerido para perforar dichos pozos, abatiéndose con ello los costos por desarrollo del yacimiento.

**11. Provee una alternativa para las terminaciones submarinas :** Al incrementarse el largo del tramo del pozo dentro de la formación productora se presta el mismo para desarrollar nuevas técnicas de terminación de pozos submarinos aplicando lo más innovador de la tecnología actual para encontrar nuevas alternativas de terminación de los pozos de Alcance Extendido que sean capaces de admitir el mayor volumen de fluidos con mínimas restricciones al flujo que garanticen por largo tiempo que la energía natural del yacimiento lleve los fluidos de producción hasta la batería de separación.

El arreglo de los intervalos disparados a lo largo del tramo que hay del pozo dentro del yacimiento es otro de los parámetros que bien pueden optimizarse para elevar la eficiencia de la terminación del pozo de Alcance Extendido a su máximo posible; también, la densidad de los disparos, el tipo de pistolas " jet " usadas, el ángulo "  $\theta$  " que existe entre los disparos y en sí el equipo usado para efectuar la terminación, tanto el superficial como el subsuperficial, de igual forma son susceptibles de mejoras y cambios que constituyan una metodología alterna a las terminaciones submarinas convencionales.

Por otra parte, la Figura 2 ilustra el gran incremento en el área de drenaje para 2 pozos perforados con la tecnología de Alcance Extendido en comparación con uno perforado con los métodos direccionales convencionales.

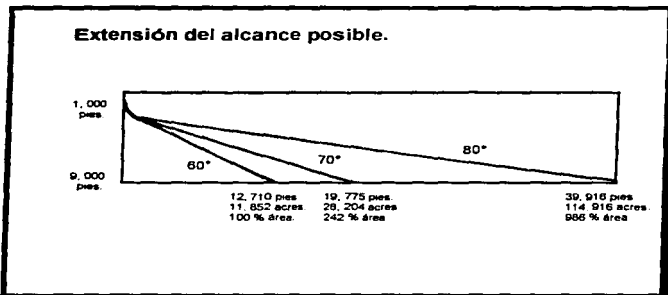
La línea recta de 60° de ángulo de desviación para la trayectoria de un pozo marca aproximadamente el límite que separa la magnitud de los ángulos logrados con la tecnología direccional convencional de perforación de pozos de los obtenidos con la aplicación de la Perforación de Alcance Extendido; desde luego que los ángulos segundos son mayores a los primeros.

Si se supone que la trayectoria del pozo de 60° de ángulo de desviación es una línea base de referencia con un alcance horizontal de 12,710 pies, un área drenada de 11,652 acres a 10,000 pies por debajo de la profundidad del punto de inicio de desviación ( KOP ), entonces para un incremento de tan solo 10° de desviación para la trayectoria de un segundo pozo ( a 70° ) el área drenada se incrementará a más del doble; mientras que para un incremento de 20° en la desviación del pozo ( a 80° ) el área drenada se verá entonces incrementada casi 10 veces con respecto al área de drenaje del pozo de referencia.

El segundo y el tercer pozo ilustrados en la Figura 2 como los de 70° y 80° de ángulo de desviación son pozos de Alcance Extendido, y nos muestran categóricamente el alcance que en área de drenaje y desplazamiento horizontal tienen para una misma profundidad por debajo del punto KOP en comparación con el mejor pozo que con la tecnología direccional convencional puede lograrse.

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Obviamente, hay un apreciable aumento en el desplazamiento horizontal para modestos incrementos en el ángulo de desviación de la trayectoria de un pozo de Alcance Extendido.



**Figura 2. Comparación de los alcances horizontales y ángulos logrados entre la Perforación Direccional Convencional y la de Alcance Extendido.**

#### **1.4. PROBLEMAS DE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN DE ALCANCE EXTENDIDO.**

Un significativo avance en el estado de cualquier arte es ciertamente plantear algunos obstáculos que resolver, y la Perforación de Alcance Extendido no es la excepción. La combinación de largas secciones de agujero y ángulos de inclinación más grandes a 60° causan problemas por efectos de gravedad, por fricción y por atascamiento de partículas las cuales requieren ser removidas. En general, categorizando los problemas de especial interés, estos pueden ser identificados como:

- Dificultades en el fondo del pozo durante el movimiento de la tubería de perforación, las T.R.'s y la línea de acero debidas al incremento de la fricción que en el avance de los cuerpos de dichos tubos tiene con las paredes del agujero.
- Se incrementa el riesgo de atrapamiento por presión diferencial de la T.P. y de las T.R.'s.



### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

- Se reduce la capacidad para limpiar el agujero efectivamente.
- Se reduce la capacidad de controlar el peso sobre barrena ( PSB ) y la dirección del avance de la barrena.

Estos problemas tienen que ser considerados en detalle y sus soluciones específicas son discutidas a continuación :

**-Resistencia al avance de la T.P. dentro de un agujero de PEA por las fuerzas de fricción axial y de torsión que impiden el movimiento de la sarta de perforación.**

Como la inclinación del pozo se incrementa, la componente del peso del cuerpo a lo largo del eje de la tubería de perforación, de las T.R.'s o de la línea de acero decrece mientras que la resistencia al avance por fricción se incrementa.

La Figura 3 muestra en diagrama de cuerpo libre el balance de fuerzas cuando una sección de tubería o una herramienta o una sonda de registros geofísicos o la línea de acero está dentro del agujero inclinado propio de las trayectorias desviadas y de Alcance Extendido; aquí se considera el caso del plano inclinado en un ángulo "  $\Phi$  " con respecto a la horizontal por el cual resbala un cuerpo de peso  $W$ . Las componentes dinámicas son excluidas del diagrama de cuerpo libre para simplificar el siguiente proceso matemático que de él se deriva.

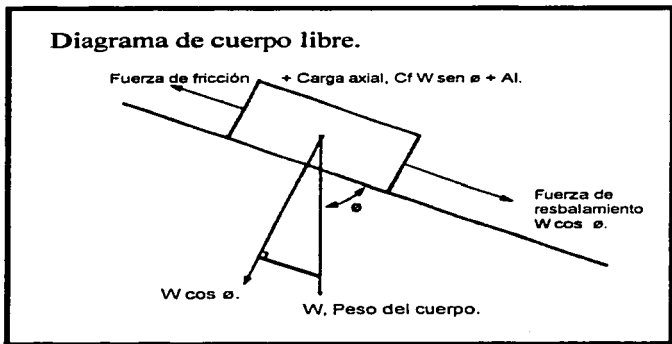
La fuerza descendente es debida a la acción de la gravedad sobre la masa del bloque de peso  $W$ . La componente normal del peso ( sobre el eje  $y$  ) a la superficie de la rampa está definido por  $W \text{ sen}\Phi$ . La resistencia al resbalamiento es el producto del coeficiente de fricción de la superficie de la rampa (  $C_f$  ) y de la fuerza normal a la misma, cuya representación matemática es  $C_f W \text{ sen}\Phi$ . La fuerza que tiende a causar el resbalamiento hacia abajo del bloque sobre la rampa es  $W \text{ cos}\Phi$ . La tendencia al resbalamiento hacia abajo del bloque existe si y solo si  $W \text{ cos}\Phi$  es mayor que  $C_f W \text{ sen}\Phi$ . La carga axial,  $AL$ , es el balance. De la Figura 3, una fuerza de balance a lo largo de la rampa sobre el bloque sería :

$$AL + C_f W \text{ sen}\Phi = W \text{ cos}\Phi \quad 1.$$

o también,

$$AL = W ( \text{ cos } \Phi - C_f \text{ sen}\Phi ) \quad 2$$

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO



**Fig. 3. Diagrama de Cuerpo Libre del bloque de peso  $W$  deslizando por el plano inclinado representando lo que sucede en el fondo de un pozo de Alcance Extendido.**

La tendencia al movimiento descendente sobre la rampa existe si y solo si  $AL$  es mayor que cero. La tabla 1 muestra algunos resultados numéricos para el porcentaje de la fuerza disponible para mover el bloque hacia abajo por la rampa cuando los valores de  $\Phi$  y de  $C_f$  son conocidos. Como un ejemplo, el movimiento axial descendente de la tubería que ocurre en un agujero con una inclinación de  $20^\circ$  y con un coeficiente de fricción de 0.4 ocasiona que solo el 80% del peso de la tubería esté disponible para empujar la sarta de perforación hacia el fondo del agujero. Sin embargo el viaje descendente de la tubería se detiene en un agujero de  $70^\circ$  de inclinación con el mismo coeficiente de fricción de 0.4, entonces la tubería tendrá que ser desplazada hacia abajo del agujero haciendo uso de una fuerza externa.

FUERZA DISPÓNIBLE PARA EL VIAJE DESCENDENTE

Inclinación de la rampa, grados  $\Phi$  Para el coeficiente de fricción, Cf.  
 Porcentaje de la fuerza disponible.

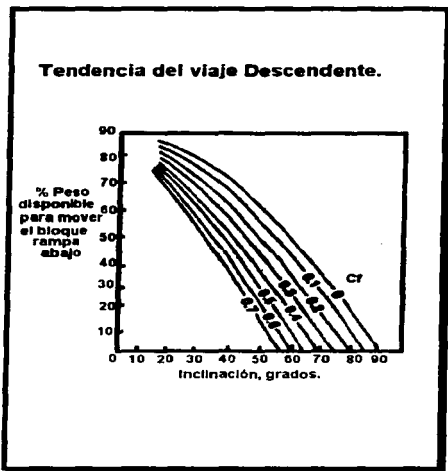
$\Phi$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	98	97	96	95	93	92	90	88	86
20	92	91	89	87	84	80	77	73	70
30	84	82	79	77	72	67	62	57	52
35	79	76	73	70	65	59	53	48	42
40	73	70	67	64	57	51	44	38	32
45	67	64	60	57	49	42	35	28	21
50	60	57	53	49	41	34	26	18	11
55	53	49	45	41	33	25	16	8	..
60	46	41	37	33	24	15	7	..	..
65	38	33	29	24	15	6	..	..	..
70	30	25	20	15	6	..	..	..	..
75	21	16	11	7	..	..	..	..	..
80	12	8	3	+	..	..	..	..	..
85	4	..	..	..	..	..	..	..	..

Porcentaje de la fuerza disponible =  $(\cos \phi - C_f \sin \phi)$ .

Tabla 1. Fuerza Disponible para el viaje descendente de la T.P. cuando son conocidos los valores de Cf y  $\Phi$ .

La información de la tabla 1 es desplegada gráficamente en la Fig. 4. La Figura 4 nos permite tener alguna duda de categórica importancia con respecto a que si la resistencia al avance por fricción puede ser reducido en agujeros perforados con la tecnología de Alcance Extendido con un alto ángulo de inclinación. A condición que el pandeo de la tubería pueda ser evitado, la reducción de la resistencia al avance incrementa la posibilidad de empujar la tubería dentro del agujero del pozo, que es precisamente lo que se desea. Sin embargo, se deben considerar para esta práctica tanto la resistencia al avance por torsión que impide la rotación de la tubería y la resistencia al avance axial a lo largo del agujero del pozo.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO



**Figura 4. Representación gráfica de la información contenida en la Tabla 1.**

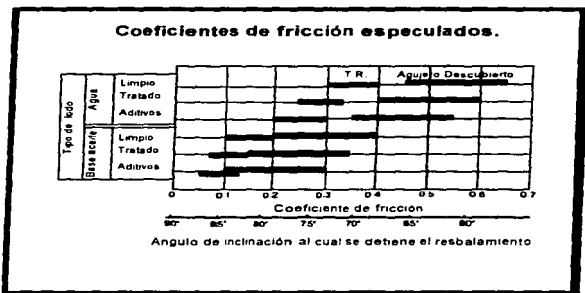
Un lodo de perforación especialmente formulado provee una significativa disminución en la resistencia al avance de la sarta de perforación por torsión y en la resistencia al avance axial porque reduce el coeficiente de fricción  $C_f$ .

La Figura 5 muestra algunos valores especulados para  $C_f$ , cuyos valores varían entre 0.1 y 0.3 para un lodo base aceite con aditivos.

Para un  $C_f = 0.2$ , la Figura 4 indica que gravitacionalmente en un agujero de pozo de Alcance Extendido con una inclinación de  $75^\circ$  sí se puede tener la suficiente fuerza axial para empujar la tubería de perforación al fondo del agujero. Además de usar un lodo de perforación especial base aceite para reducir la resistencia al avance por la disminución del coeficiente de fricción  $C_f$  la tecnología de Perforación de Alcance Extendido requiere de una buena capacidad para mantener siempre la rotación continua del aparejo de perforación así como

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

también una continua circulación del lodo cuando la T.P. está dentro del agujero del pozo, siendo esta circulación en todo momento eficiente dentro de la tubería de perforación y en el espacio anular disponible.



**Figura 5. Algunos valores de  $C_f$  para diferentes tipos de lodos de perforación ( limpios, tratados y con aditivos ) para diferentes ángulos de inclinación en agujeros de Alcance Extendido.**

Estos requisitos pueden reducir enormemente la resistencia al avance tanto por fricción como por fuerza axial pero también será necesario el uso de un aparejo especial o, en su defecto, de un poderoso eslabón giratorio puesto en el aparejo convencional de perforación. El incremento esperado en la habilidad para mover la tubería de perforación en agujeros de pozos de Alcance Extendido será más que una compensación para los costos de perforación a pesar de la necesidad de usar tanto equipo como aparejos especiales.

El mecanismo para reducir la resistencia al avance por fuerza axial esta basado en la premisa que la fuerza de fricción tiende a oponerse al movimiento de la T.P. y por lo tanto está localizada en una dirección opuesta a la del vector velocidad

La Figura 6 muestra las componentes de la velocidad de un punto sobre la superficie de la tubería de perforación la cual se está en movimiento descendente mientras rota.  $V_c$  es la componente de la velocidad debida a la rotación de la tubería,  $V_a$  es la componente de la velocidad debida al movimiento descendente de la tubería y  $V_r$  es la resultante total de la velocidad debida a  $V_c$  y a  $V_a$ . Puesto que la dirección de  $V_r$  es conocida, la dirección de la resistencia al avance por fricción también lo es a lo largo de la línea de acción de  $V_r$  pero en la dirección opuesta a dicho vector resultante.

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Debido a que las componentes de la resistencia al avance de la T.P., expresadas como vectores, por torsión y por fuerza axial de fricción son directamente proporcionales a sus respectivas velocidades de contraparte, la dirección de la resistencia resultante al avance de la T.P. puede ser cambiada. Así pues, cuando existe movimiento de la sarta de perforación dentro y fuera del agujero la resistencia al avance por fuerza axial puede ser reducida al incrementarse la velocidad de rotación de la tubería de perforación para conservar la componente de la resistencia al avance axial tan pequeña como sea posible. La experiencia con aparejos convencionales muestra que la rotación, la cual mueve la tubería hacia abajo, verdaderamente reduce la magnitud de la resistencia al avance axial.

La circulación de lodo mientras existe movimiento de la tubería de perforación permite que exista fluido en la interface tubería - pared del agujero manteniendo entonces a un mínimo el valor del coeficiente de fricción  $C_f$  y también reduce el acumulamiento de recortes de roca en el fondo del pozo.

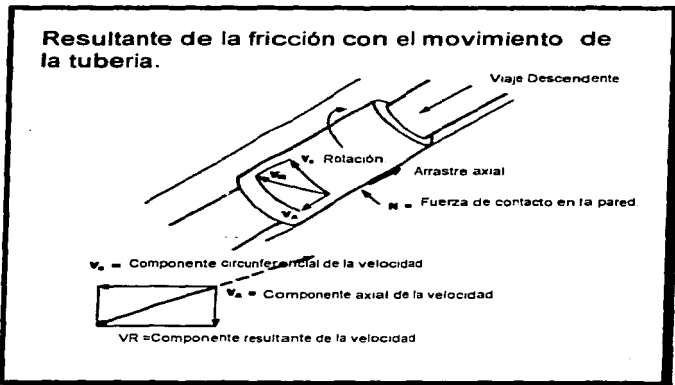


Figura 6. Componentes de la velocidad de un punto sobre la tubería de perforación que se mueve descendientemente hacia el fondo del agujero de pozo mientras rota.

En el balance de fuerzas para la carga axial AL, la resistencia al avance por la fuerza axial de fricción está dada por  $C_f W \sin\Phi$ . Una reducción en el peso de la

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

tubería W causaría una favorable reducción en la resistencia al avance axial pero produce una indeseable reducción en la componente del peso de la tubería que la empuja hacia el fondo del pozo. Sin embargo, éste cambio es ventajoso para la Tecnología de Perforación de Pozos de Alcance Extendido porque provoca una elevada disminución en la resistencia al avance por torsión y fricción. Una innovadora sarta de perforación de Aluminio usada como tubería de perforación con las juntas ( cople y caja ) de Acero hace menor el peso de la tubería, y consecuentemente disminuye la resistencia al avance axial y disminuye también la torsión sin sacrificar la integridad del cuerpo de la sarta de perforación. La tabla 2 muestra para sarts de perforación geoméricamente comparables las propiedades de los materiales en cuestión, aluminio y acero. En ella se muestra que son muy similares, con la excepción del peso unitario y el módulo de elasticidad volumétrico de ambos materiales.

**PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LAS TUBERIAS DE PERFORACIÓN.**

	Acero	Aluminio
Cuerpo del tubo D.E., pg.	5	5.15
Cuerpo del tubo D.I., pg.	4.28	4.10
Junta D.E., pg.	7	8
Peso/pie con junta, lb.	21.4	13.9
En el aire	21.4	13.9
En 10 lb/gal de lodo	18.1	9.2
En 12 lb/gal de lodo.	17.5	8.2
En 14 lb/gal de lodo	16.8	7.3
Resistencia a la tensión. 1000 lb	396	442
Resistencia a la tensión. 1000 lb.	41	43
Presion interna, 1000 psia.	13.0	11.4
Colapso. 1000 psia	8.1	9.5
Modulo de Elasticidad de Young. 10,000 psia.	30	10.6

**Tabla 2. Comparación de las propiedades del Acero y el Aluminio que se usan para la fabricación de sarts de perforación.**

Debido a que el aluminio tiene un módulo de elasticidad volumétrico más pequeño que el del acero la sarta de perforación de Aluminio experimentara una mayor elongación axial y una mayor torsión envolvente que la sarta de acero. Estos 2 cambios en los parámetros de perforación pueden no plantear dificultad alguna en el desenvolvimiento de acción de la sarta de aluminio. La notable reducción en el peso unitario del Aluminio en comparación del acero se puede observar en la Tabla 2 donde el libraje de la T.P. de aluminio es un 35% menor al del acero ( en

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

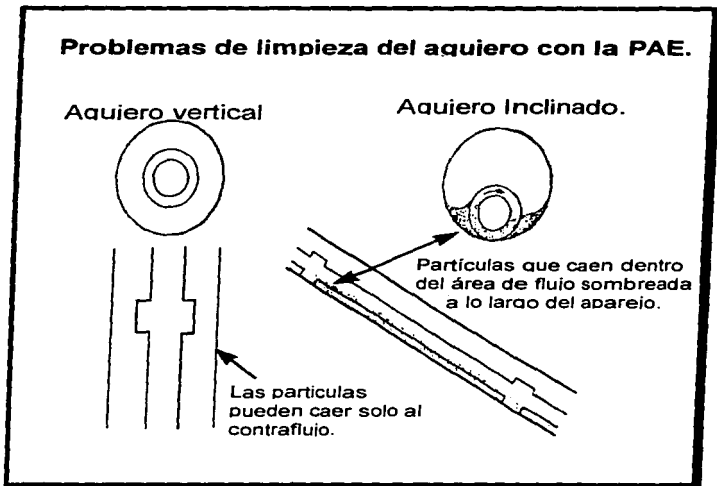
el aire ). Para operaciones normales de perforación con una densidad de todo de 12 lb/gal la reducción del peso es aproximadamente del 50%. Disminuyendo ambas resistencias al avance, ( axial y torsional ) debido a que el peso de la tubería de perforación se ha reducido a cerca de la mitad constituye el más importante logro que la Tecnología de Perforación de Alcance Extendido ha obtenido en favor de su aceptación como una alternativa más a los métodos convencionales de perforación. Este decremento en la resistencia al avance de la T.P. por fricción y torque es vital para la Tecnología de Perforación de Pozos de Alcance Extendido.

**-Limpieza del agujero y riesgo por pegaduras de la T.P. por presión diferencial :**

La limpieza del agujero llega a ser un problema en agujeros de Alcance Extendido porque los recortes de roca caen solo en la corta distancia que existe de un lado al otro en el diámetro del agujero para luego ser expulsados fuera de la corriente del todo y llegar al reposo en el lado bajo del agujero , usualmente dentro de un área a lo largo de la tubería llamada de " **flujo sombra** " .

La Figura 7 muestra el área de " flujo sombra " en la cual se atrapan las partículas de roca removidas de la formación por la acción de la barrena ocasionando problemas como la reducción de la eficiencia hidráulica y el aumento del riesgo de pegaduras por presión diferencial de la sarta de perforación. Las pegaduras llegan a ser un significativo riesgo para la Tecnología de PAE porque la tubería de perforación y la T.R. tienden a reposar y a quedarse inmóviles en el lado bajo del agujero en una región en la cual los recortes de la barrena son acumulados en grandes proporciones . La Figura 8 ilustra el mecanismo que da lugar a una pegadura por presión diferencial.



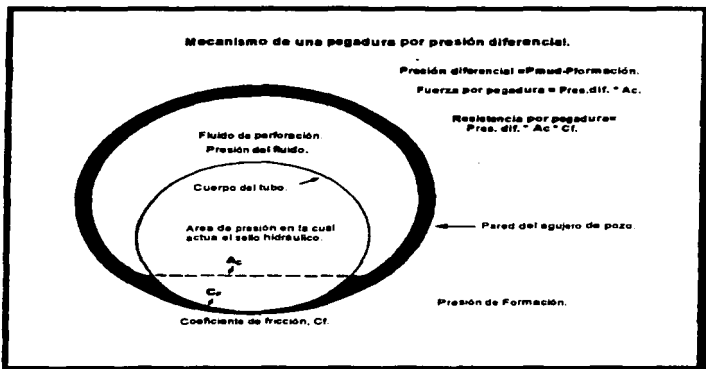


**Figura 7. Problemas en la limpieza del agujero usando la tecnología PAE. La figura muestra el área de " flujo-sombra " en la cual se acumulan los recortes de la barrena ocasionando problemas en la eficiencia hidráulica e incrementando el riesgo de pegadura de la tubería por presión diferencial.**

Una limpieza efectiva del agujero reduce el riesgo de pegaduras por presión diferencial y puede ser realizada mediante el uso de herramientas excéntricas. Esencialmente una herramienta excéntrica, una junta particularmente, tiene el diseño y geometría de una junta convencional con la excepción de una sección transversal excéntrica para ambos extremos de cada tubo, el piñón y la caja. La excentricidad causa un campo de acción que agita y expone los recortes asentados de la barrena cuando la sarta de perforación rota dentro del agujero

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

del pozo y por lo tanto esas partículas que se encuentran en el lado bajo del agujero mismo son más fácilmente levantadas por la corriente del fluido de perforación que las arrastra junto con él. Lo excéntrico de las juntas también actúa como un sello por cada rotación de la sarta ( Figura 9 ) que reduce el área bajo presión de la tubería de perforación como se muestra en la Figura 8.



**Figura 8. Mecanismo mediante el cual se produce una pegadura de T.P ó T.R por presión diferencial.**

El riesgo de una pegadura de T.P por presión diferencial puede ser eliminado cuando el peso de la tubería se monta sobre las juntas excéntricas y el cuerpo del tubo no toca las paredes del agujero del pozo. Puesto que poco se sabe acerca del uso de las juntas excéntricas en el diseño de un aparejo de perforación surgen preguntas respecto a las características operacionales de la sarta. Estudios teóricos de la dinámica de la sarta de perforación indican un aceptable rango de seguridad para las velocidades de rotación y para los niveles de tensión sobre la sarta que nunca deben ser rebasados porque dañan la integridad del cuerpo de la T.P. Es en estos estudios donde el diseño de la tubería de perforación que se empleará para un pozo de alcance extendido debe basar sus consideraciones de

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

diseño a fin de lograr el mejor posible, cuando no existen diseños previos de sartas empleando juntas excéntricas u otras herramientas no convencionales.

No hay problemas por anticipado en la interface de la junta excéntrica de acero y el cuerpo de la tubería de aluminio puesto que la sarta de aluminio con juntas de acero ha sido probada previamente por el fabricante a las condiciones de trabajo a las que será sujeta. El principio de una geometría excéntrica puede también ser usado con las tuberías y lastrabarrenas que se tuvieran que usar para perforar un pozo de alcance extendido.

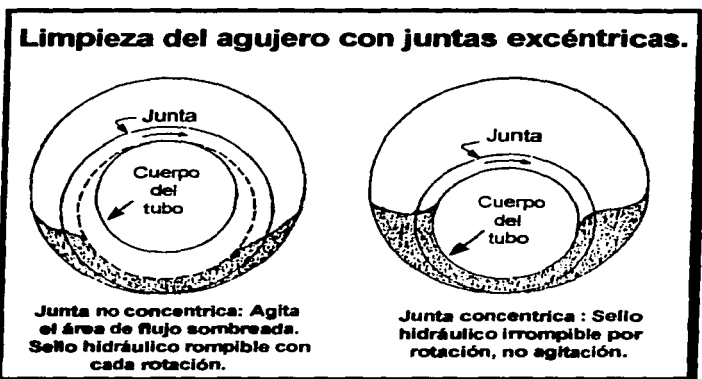


Figura 9. Limpieza del agujero con el uso de juntas excéntricas. Se ilustra lo que sucede en un agujero PAE cuando se usan juntas concéntricas y excéntricas para componer la sarta de perforación. Notar que las juntas excéntricas ocasionan un sello hidráulico rompible para cada rotación de la T.P. reduciendo con ello el riesgo de una pegadura por presión diferencial.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **-Peso sobre barrena:**

Colocar y controlar el peso sobre barrena se hace cada vez más difícil conforme la inclinación del agujero de Alcance Extendido se incrementa. Los signos usuales en la superficie para incrementar la carga en el gancho y torque que determinan la acción de la barrena son enormemente neutralizados por la gran resistencia al avance de la sarta de perforación y por la torsión rotacional en agujeros de pozos con altos ángulos de inclinación como los de PEA. De acuerdo con lo anterior se hace necesario en la aplicación de la Tecnología de Perforación de Alcance Extendido el empleo de una herramienta en el fondo del agujero la cual siendo anclada en las paredes del mismo proporciona el peso sobre barrena requerido para continuar perforando. Una herramienta semejante llamada " lastrabarrena hidráulico " fue diseñada, construida y probada hace poco más de 20 años, pero nunca ha sido empleada comercialmente en el campo.

El croquis de la Figura 10 muestra esquemáticamente el diseño y partes constituyentes del lastrabarrena hidráulico e identifica la sección de peso sobre barrena, la sección de reajuste automático y la sección de asimiento a la pared del agujero, las cuales componen la estructura de la lastrabarrena hidráulica. La unidad es puesta a trabajar por medio de la presión del fluido de perforación la cual activa las anclas de la herramienta, también llamadas " patas ", poniendo en contacto y en forma radial el lastrabarrena contra la pared del agujero del pozo. La presión del fluido activa un pistón hidráulico el cual desarrolla una fuerza axial hacia abajo que provee peso a la barrena. La longitud total del avance de la barrena es limitada por la carrera del pistón por lo tanto esa es una acción de reajuste que debe ocurrir al avanzar la barrena sobre la formación. La sección de reajuste automático sincroniza las acciones del pistón axialmente empujado y de las anclas en la pared del agujero proporcionando así un empuje continuo y confiable excepto por unos pocos segundos cuando el reajuste actual del mecanismo ocurre.

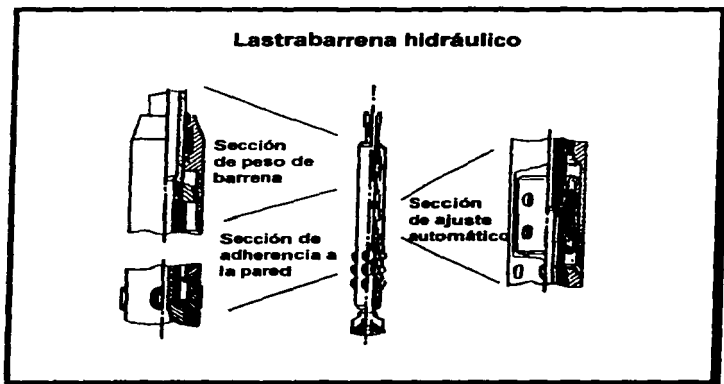


Figura 10. Diseño y partes constituyentes de la lastrabarrena hidráulica.

Esta herramienta puede usarse en la perforación de Pozos de Alcance Extendido para proporcionar el peso a la barrena requerido para continuar perforando en agujeros de pozos de alto ángulo de inclinación.

En algunos casos los lastrabarreras ó tuberías extrapesada usada en las secciones de ángulos de inclinación pequeños pueden ser usados para empujar la tubería de perforación y barrena al fondo del agujero en secciones de pozo con altos ángulos de inclinación. Los motores de fondo pueden ser usados en casos donde normalmente el peso sobre barrena no puede ser fácilmente obtenido.

#### 1.5.PROPÓSITO DE UN PROGRAMA PILOTO DE PERFORACIÓN DE ALCANCE EXTENDIDO.

Los planes de la compañía petrolera internacional Mobil contemplan la perforación de 2 pozos sacrificables ( es decir que su pérdida no sería considerada un desastre ) con altos ángulos de inclinación usando la tecnología de perforación de Pozos de Alcance Extendido.

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

El agujero de prueba No. 1 a 60° de inclinación proporcionará información para una base de datos que será usada para comparaciones con agujeros de bajos ángulos de inclinación existentes y agujeros con altos ángulos de inclinación a ser perforados con el uso de la Tecnología de PAE.

El agujero de prueba No. 2 será un agujero con una inclinación propuesta de 75°. La Figura 11 compara los 2 agujeros de pozo PAE en cuanto a sus respectivos perfiles.

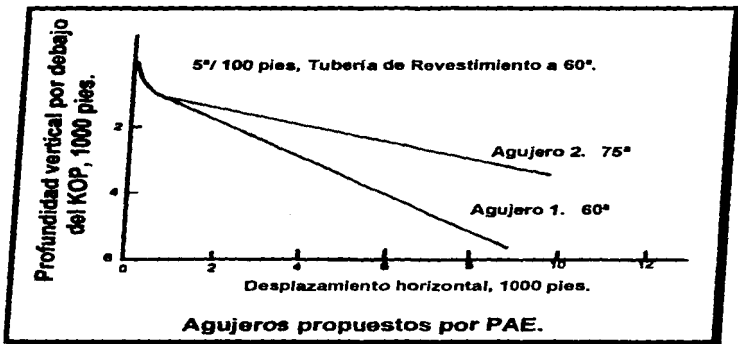


Figura 11. Muestra los perfiles de los agujeros de pozo 1 y 2 de Alcance Extendido que serán perforados por la compañía petrolera internacional Mobil.

El sitio de prueba tendrá lugar en la costa del Golfo de México en los Estados Unidos de Norteamérica, un lugar con suficiente alcance para permitir por lo menos un desplazamiento horizontal de 10,000 pies del agujero de pozo. Las formaciones perforadas por la sección inclinada serán entre los 2,000 a 8,000 pies de profundidad como rango en yacimientos de hidrocarburos con presiones in-situ consideradas como normales.

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

Una tubería de revestimiento superficial, será colocada entre 1,000 y 3,000 pies de profundidad, será asentada por ser necesaria. La tubería de revestimiento intermedia será asentada através de la porción ya construida del agujero de pozo.

En estos agujeros sacrificables las tuberías de revestimiento adicionales no están consideradas por la porción inclinada del agujero. Durante la perforación de los agujeros 1 y 2 varias combinaciones de lodos de perforación base agua ó aceite, tubería de perforación, viaje con y sin rotación de la sarta y viaje con y sin circulación de lodo de perforación serán usados para cuantificar todos los parámetros de perforación de pozos de alcance extendido.

Las resistencias al avance axial y torsional serán medidas desde el comienzo hasta el final de cada corrida de barrena y por lo menos cada 200 pies, con movimiento de la tubería de perforación tanto ascendente como descendente a velocidades uniformes seleccionadas, con y sin rotación y con y sin circulación de lodo. Una simulación matemática del comportamiento de la sarta de perforación dentro del agujero mediante un programa de cómputo será usado para ayudar al análisis de la información recabada.

La precisión del control direccional es una parte integral del concepto PAE, por eso, un detallado programa de estudios direccionales será indispensable.

Adicionalmente, estudios giroscópicos convencionales y magnético-direccionales, mediciones mientras se perfora ( MWD, cuyas siglas en inglés dicen Measurements-While-Drilling ) e información direccional será grabada para corridas de barrenas específicas y viajes fuera del agujero con circulación. Toma de registros geofísicos convencionales y especiales con línea de acero serán comparados con la toma de registros MWD.

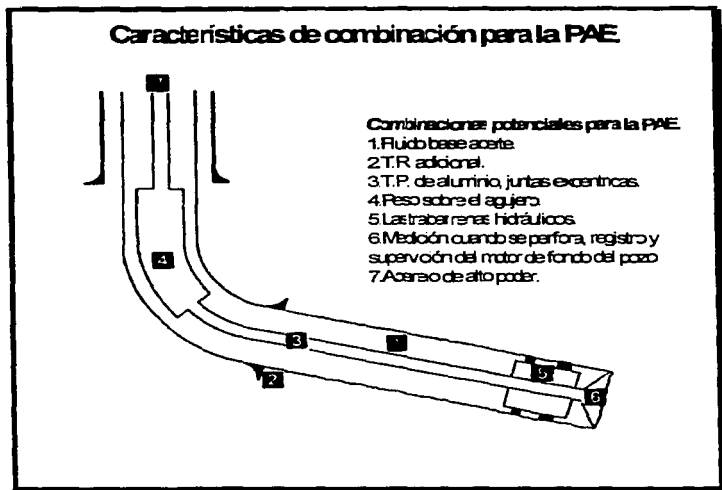
Información sobre la limpieza del agujero será tomada a intervalos de profundidad específicos para verificar por adelantado la capacidad de limpieza del agujero de la sarta de perforación con el uso de juntas excéntricas. El procedimiento será circular el agujero limpio, estabilizar las propiedades del lodo a una velocidad uniforme y entonces circular hacia afuera los recortes de la formación mientras que el tiempo y la cantidad de recortes se mide. La información de la limpieza del agujero será tomada con tubería de perforación con cuerpo de aluminio y juntas de acero tan a menudo como sea necesario para definir los efectos de las juntas de acero excéntricas.

Ambas pruebas para los agujeros 1 y 2 serán usadas con el mismo programa general de perforación pero el agujero 2 tendrá la mayor inclinación de los dos. Inicialmente el agujero 2 tiene que ser perforado hasta lograr un desplazamiento horizontal de aproximadamente 8,000 pies; una decisión puede ser continuar el siguiente tramo del agujero perforando al frente a una inclinación de 75° o incrementar la inclinación a 80° - 85° y perforar al frente hasta lograr un desplazamiento horizontal de 10,000 pies. Se intentará que el agujero 2 pueda

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

ser usado para perforar un pozo direccional de Alcance Extendido que alargue el desplazamiento horizontal normal hasta el récord de 12,584 pies de alcance.

Agujeros adicionales con altos ángulos de desviación y grandes desplazamientos horizontales serán anticipados con una próspera conclusión de los agujeros 1 y 2 de Mobil. Por último, la figura 12 ilustra las posibles y variadas combinaciones estratégicas para un programa de perforación de Alcance Extendido que existen disponibles en el mercado.



**Figura 12. Posibles combinaciones estratégicas para un programa de Perforación de Pozos de Alcance Extendido disponibles en el mercado.**



## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **CAPITULO II.**

## **DISEÑO DE TUBERIAS DE PERFORACIÓN PARA LA PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO.**

### **2.1.INTRODUCCIÓN.**

En éste capítulo se presentará un modelo general para el diseño de sartas de perforación en un pozo de Alcance Extendido. Se estimarán las cargas a las que estará sujeta la sarta de perforación dentro del agujero y se precisará la correcta selección de los componentes que puedan manejar esas cargas con seguridad. La selección final de la configuración de la sarta de perforación para un pozo de Alcance Extendido es influenciada grandemente por las cargas aplicadas y otros factores que serán comentados a lo largo de este segundo capítulo. El diseño final de la T.P. estará en función de todos esos factores.

Existen varios programas de cómputo disponibles para estimar las cargas por tensión y torsión para una variedad de operaciones de perforación en pozos de alcance extendido. Debido a que los datos de entrada cambian en cada sección del pozo el proceso debe ser repetido para cada sección del agujero.

Las cargas en la sarta de perforación varían ampliamente dependiendo de la operación que se está desarrollando; un resumen de cada sección del pozo puede ser muy útil. El ejemplo de resumen de cargas de la Tabla 2 muestra la salida de un programa de torque y arrastre en superficie en diferentes operaciones durante la sección de 16" en un pozo de alcance extendido en el Mar del Norte. Las cargas aplicadas son entonces comparadas a las capacidades de carga de la sarta de perforación ( cuerpo y juntas ); en este ejemplo, el rango de cargas aplicadas varía del 6 al 59% de la capacidad de resistencia de la T.P. seleccionada. De un vistazo a éste tipo de tablas, la magnitud de las cargas y las capacidades, los resúmenes de torque y arrastre enfocan la atención sobre los componentes más susceptibles de presentar falla. Más aún, los resúmenes permiten la comparación de análisis de componentes de la sarta de perforación basado en el porcentaje de capacidad utilizado y así seleccionar los que presentan menos probabilidad de fallar.

### **2.2.APLICACIÓN DE PESO SOBRE LA BARRENA CON TUBERÍA DE PERFORACIÓN.**

Cuando el pandeo en la sarta de perforación no es tolerable, como en la parte inferior de la sarta en la sección vertical o cerca de la vertical, los lastrabarrenas y tubería de perforación extrapesada son más tolerables al pandeo y rotación

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

simultánea que la tubería de perforación normal. Por lo tanto, el objetivo es diseñar y manejar sargas que eliminen el pandeo.

Las cargas compresivas conducen a la sarga de perforación al pandeo. De cualquier modo, es útil diferenciar la compresión mecánica debido al peso aplicado a la barrena, de la compresión hidráulica inducida por presión actuando sobre las áreas expuestas de la sarga de perforación. En un manejo libre de la sarga, los efectos compresivos por efectos de área-presión son compensados por otras fuerzas ( fuerzas de estabilidad ) y son normalmente despreciadas.

El pandeo en la tubería de perforación debido a la compresión mecánica en agujeros de verticales a inclinados moderadamente, es prevenido al guardar suficiente peso del aparejo de fondo para aplicar el peso necesario sobre la barrena. La regla en agujeros verticales o cercanos a la vertical es no aplicar compresión mecánica a la tubería de perforación normal ( por ejemplo, no aplicar más peso sobre la barrena, que el vector de fuerza en el fondo del agujero, del peso flotado del aparejo de fondo, tomando en cuenta el ángulo del agujero y los factores de diseño ).

Para un aparejo de fondo dado, conforme el ángulo del agujero se incrementa, el arrastre del aparejo de fondo se incrementa y el peso que el aparejo puede aplicar a la barrena decrece. En un pozo de Alcance Extendido, con alto ángulo de inclinación, un aparejo de fondo típico puede causar más daño al presentar arrastre torsional que beneficio al aplicar peso sobre barrena. Conforme el ángulo del agujero se incrementa, este se convierte en un recurso para reducir el arrastre del aparejo de fondo y aplicar peso a la barrena por compresión mecánica sobre la tubería de perforación normal. El alto ángulo ayuda a estabilizar la tubería de perforación y permite algo de compresión mecánica sin presentar pandeo hasta que la magnitud de la compresión mecánica no exceda la carga de pandeo crítica de la tubería (  $F_{CRIT}$  ). La carga de pandeo crítica en un agujero recto puede ser predicha por la siguiente fórmula:

$$F_{CRIT} = 2 \sqrt{[(ElwK_B \sin \theta) / r]} \quad ( 3 )$$

donde:

$F_{crit}$  = carga crítica de pandeo, lbf.

$E$  = módulo de elasticidad del acero de la T.P. ( aprox. 30,000 psi ).

$I$  = momento de inercia,  $pg^4$

$W$  = Peso de la sarga en el aire, lb/ pie.

$K_B$  = factor de flotación, adimensional.

$\theta$  = inclinación del agujero, grados.

$r$  = claro radial entre tubería y agujero.

La ecuación anterior ( Dawson-Pasley ), provee de un límite conveniente para la tubería de perforación de peso normal que puede ser usada en una sección recta del agujero para aplicar peso a la barrena. Solo es necesario determinar el monto

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

de compresión mecánica en el punto de interés, entonces se compara este valor con el de la ecuación para verificar si existe pandeo. Si el pandeo es predicho bajo las condiciones de perforación planeadas, se debe emplear un bajo peso sobre la barrena o tubería con mayor carga de pandeo crítica. La ecuación de Dawson-Pasley ha sido ampliamente aceptada en la industria y se cuenta con curvas que presentan una solución gráfica de manera rápida ( Figura 13 ).

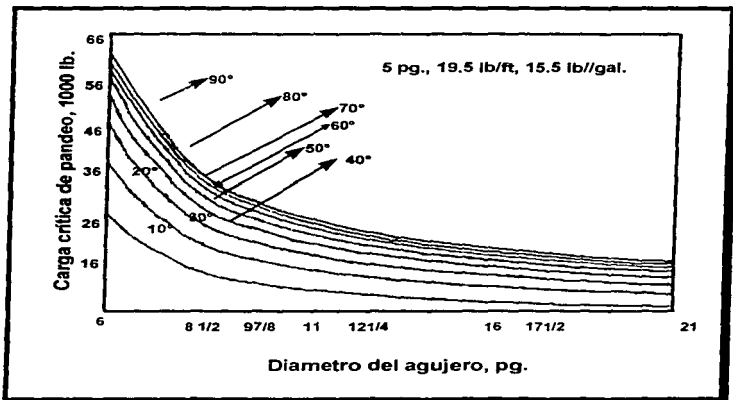


Figura 13. Solución gráfica a la ecuación de Dawson-Pasley para una T.P. de 5 pg. de diámetro y con un libraje de 19 lb/pie sumergida en un lodo de perforación con densidad de 15.5 lb/gal.

La carga de pandeo crítica en una sección curva del agujero, en una sección de incremento, siempre es mayor que en una sección recta, por lo tanto, si el peso sobre la barrena se incrementa en un pozo de alcance extendido con una sección de incremento constante hasta que la tubería presente pandeo, el pandeo ocurrirá primero en una sección recta del agujero arriba o abajo de la sección de incremento, no en la sección de incremento misma. Esto no ocurre en una sección de decremento de ángulo.

#### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Considerando el ejemplo del pozo mostrado en la Figura 14, y suponiendo que la sarta de perforación consiste solo de aparejo de fondo y tubería de perforación, con la limitación de mantener la sarta de perforación sin pandeo. Primero, se determina la compresión mecánica máxima de la tubería en cada sección recta del agujero. Despreciando la tensión por arrastre para una sarta que esta rotando y moviendo lentamente hacia abajo:

$$\text{Compresión} = \text{WOP} - \text{Peso flotado abajo} \quad (4)$$

donde WOB = Peso sobre barrena ( sus siglas al inglés, WOB, son por " Weight on bit " ).

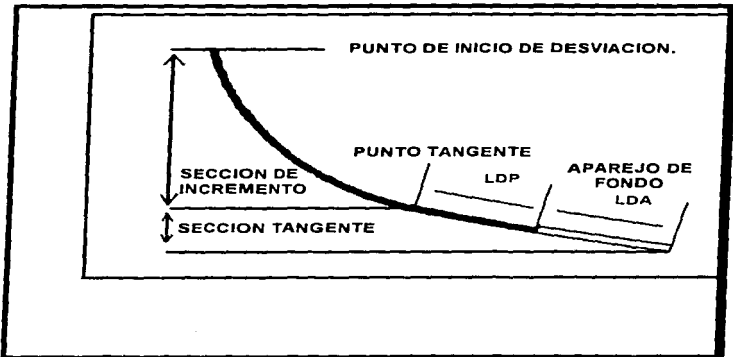


Figura 14. Trayectoria típica de un pozo de Alcance Extendido. En la figura se muestra la ubicación del Punto Tangente o de Pandeo que separa a la sarta de perforación en 2 secciones teóricas : La sección de Incremento y la Sección Tangente que matemáticamente dan pie a la teoría que nos permite asegurar que la T.P. se verá libre de pandeo.

Entonces se compara la compresión en la tubería con su carga de pandeo crítica para determinar si esta ocurriendo pandeo. Alternadamente, sustituyendo la carga crítica de pandeo por compresión en la ecuación 4, el peso sobre barrena puede ser limitado para que la tubería no presente pandeo:

$$\text{WOP} < = \text{Fcrit} + \text{peso flotado abajo} \quad (5)$$

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **-CÁLCULO DEL PESO FLOTADO ABAJO DEL PUNTO DE INTERÉS.**

Para la sección recta abajo del punto tangente o de pandeo, si el ángulo de tangencia es menor a 90°, la compresión mecánica más alta en la tubería de perforación será en la junta del fondo, en este caso en la cima del aparejo de perforación. El pandeo en este punto es prevenido, manteniendo el peso sobre barrena abajo de la carga de pandeo crítica más el peso flotado del aparejo de perforación abajo de la junta del fondo de la tubería de perforación:

$$\mathbf{WOP} \leq \mathbf{F_{crit} + K_a \cos \theta_T ( W_{DA} * L_{DA} )} \quad ( 6 )$$

donde:

$L_{DA}$  = Longitud del aparejo de fondo, pies.

$W_{DA}$  = Peso en el aire del aparejo de fondo, lb/pies.

$\theta_T$  = inclinación del agujero en una sección tangente, grados.

$F_{CRIT}$  = Carga crítica de pandeo, lbf.

Si la sección tangente es horizontal, el tercer término en la ecuación 6 es cero. La compresión mecánica en la sección tangente debería ser igual teóricamente, en toda su longitud al WOB. En este caso, el pandeo se debería predecir en la sección tangente en su totalidad si el peso sobre la barrena excediera la carga crítica de pandeo. De cualquier modo, es improbable que todo el arrastre por tensión pudiera ser despreciado con parte de la tubería pandeada, así el pandeo puede presentarse abajo del punto de tangencia donde la carga compresiva pudiera ser mayor.

Para calcular el peso flotado abajo del punto de inicio de desviación, se debe adicionar el peso de la tubería en la sección de incremento al peso abajo del punto de tangencia. El peso flotado de la tubería en la sección de incremento puede ser calculado por:

$$\mathbf{Peso_{(BS)} = K_B * W_{OP} [ 5, 729.6 ( \sin \theta_T * \sin \alpha ) ] / BR} \quad ( 7 )$$

donde:

Peso ( BS ) = peso total flotado de la tubería, en una sección de incremento, lbf.

$W_{DP}$  = peso de la tubería en el aire, lb/pie.

$\alpha$  = inclinación de una sección arriba del punto de inicio de desviación, grados.

BR = ritmo de incremento, °/100 pies.

Si la sección tangente ( la que se encuentra por debajo al punto tangente ) no es horizontal, la sarta de perforación abajo del punto de tangencia también

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

contribuye al peso. Para evaluar el peso "colgado" abajo del punto de tangencia, se calcula en el modo tradicional.

$$\text{Peso}_{(TB)} = K_B \cos \theta_T [ (W_{DP} \cdot L_{DP}) + (W_{DA} \cdot L_{DA}) ] \quad (8)$$

, donde:

Peso<sub>(TB)</sub> = peso flotado total de la tubería en una sección tangente, lbf.

L<sub>DP</sub> = longitud de la sección de tubería de perforación, pies.

Para prevenir el pandeo en la sección recta arriba del punto tangente o de pandeo, el peso sobre barrena no debe exceder la suma de las cargas de pandeo críticas más el peso total flotado abajo ( Ec.9 ):

$$\text{WOB} \leq F_{\text{CRIT}} + K_B [ [ 5,729.6 \cdot W_{DP} ( \sin \theta_T - \sin \alpha ) / BR ] + \upsilon ] \quad (9)$$

$$\text{con } \upsilon = \cos \theta_T [ (W_{DP} \cdot L_{DP}) + (W_{DA} \cdot L_{DA}) ]$$

Para el caso más común donde el agujero es vertical arriba del punto de inicio de desvío, la ecuación 7 se simplifica como sigue:

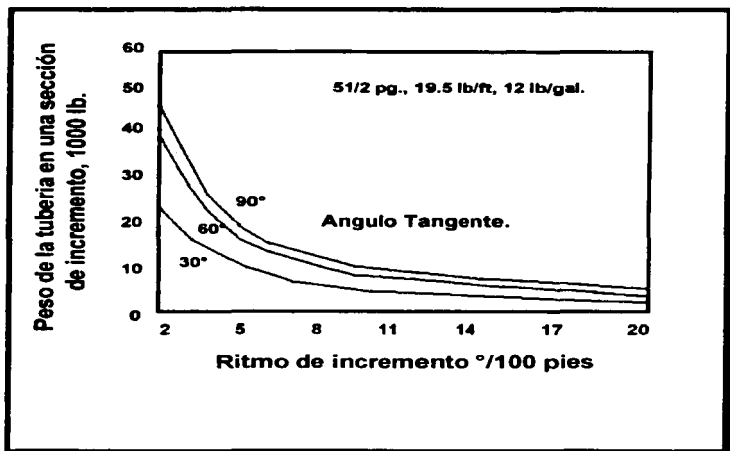
$$\text{Peso}_{(BA)} = K_B \cdot W_{DP} [ 5,729.6 \sin \theta_T / BR ] \quad (10)$$

Y debido a que la carga de pandeo crítica dada por la ecuación 3 y por las prácticas comunes, es cero en un agujero vertical, la ecuación 9 se simplifica a:

$$\text{WOB} \leq K_B [ [ 5,729.6 \cdot W_{DP} \sin \theta_T / BR ] + \upsilon ] \quad (11)$$

Como en la ecuación 3, la ecuación 10 tiene su representación gráfica ( Figura 15 ). La solución gráfica es conveniente para estimar el peso de la tubería en la sección de incremento y provee de un valor apropiado para incluirse en la ecuación 11.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**



**Figura 15. Solución gráfica para la estimación del peso de la tubería en la Sección de Incremento. La gráfica es para una T.P. de 5 1/2 pulgadas de diámetro y con un libraje de 19.5 lb/pie sumergida en un lodo de perforación cuya densidad es de 12 lb/gal.**

En resumen, con un arrastre por tensión despreciable en el modo de rotación, el límite de peso sobre barrena para prevenir el pandeo en cualquier punto en una sarta dentro de una sección de incremento, es el peso sobre barrena que resultaría en exceder la carga crítica de pandeo en la sección recta abajo del punto de tangencia ( Ec.6 ), o la carga crítica de pandeo en la sección recta arriba del punto de inicio de desvío. La ecuación 9 se simplifica en la ecuación 11. Se debe usar el mínimo de esos valores para maximizar el peso sobre barrena y asegurarse de todas las respuestas por los factores de diseño normalmente usados para diseñar un aparejo de perforación vertical tradicional.

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

#### **- VARIACIONES EN LA DENSIDAD DEL LODO DE PERFORACIÓN EN EL CUAL ESTA SUMERGIDA LA SARTA DE PERFORACIÓN.**

Usando curvas basadas en las ecuaciones 3 ó 7 ( para diferentes diámetros y librajes de la T.P. y sumergidas en lodos de diferentes densidades, como la que se ilustra en la Figura 15 y que se encuentran a disposición en el mercado petrolero ), puede ser deseable compensar si el actual peso del lodo difiere substancialmente del peso del lodo para el cual se construyeron dichas curvas, esto puede ser hecho con las siguientes dos ecuaciones:

Para la ecuación 3:

$$F_{\text{CRIT-ADJ}} = F_{\text{CRIT}} \sqrt{ ( K_B / 0.765 ) } \quad ( 12 )$$

,donde:

$F_{\text{CRIT-ADJ}}$  = carga crítica de pandeo ajustada para variaciones en el peso del lodo, lb.

Para la ecuación 10 :

$$\text{Peso}_{(\text{BS-ADJ})} = \text{Peso}_{(\text{BS})} [ K_B / 0.817 ] \quad ( 13 )$$

donde:

$\text{Peso}_{(\text{BS-ADJ})}$  = Peso total flotado de tubería en una sección de incremento ajustado por variaciones de peso en el lodo, lb.

Los factores 0.765 y 0.817 son los factores de flotación a los cuales fueron construidas las curvas respectivas.

#### **- FATIGA POR PANDEO INDUCIDO.**

En un agujero con alto ángulo de inclinación con uno o más lastrabarrenas arriba del estabilizador provoca que la conexión en el estabilizador sea vulnerable a la fatiga porque el lastrabarrena inmediatamente arriba se patea abruptamente. Esto ocasiona un alto esfuerzo en la conexión de la cima del estabilizador y acorta su vida. El problema será peor conforme la relación diámetro-cuerpo se incrementa. debido a que el lastrabarrena arriba tiene mayor riesgo de pandeo. Las fallas por fatiga en las conexiones del aparejo de fondo han sido reportadas y corregidas corriendo una herramienta especial que reduce lo abrupto del pandeo.

#### **- LIMPIEZA DEL AGUJERO.**

La limpieza del agujero será un elemento importante en la perforación de pozos de Alcance Extendido con alta inclinación y gran desplazamiento. Como la tubería de perforación es rotada, los recortes son agitados dentro del flujo y circulados fuera del agujero. Para mejorar la limpieza del agujero se emplea la rotación de la sarta mientras se perfora.



## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Hay algunas veces donde la sarta de perforación no rota porque se esta usando un motor de fondo, en estos casos la correcta limpieza del agujero se ve afectada ocasionando algunos problemas de perforación entre los cuales se incluye el incremento del riesgo de una pegadura por presión diferencial o un atascamiento de la sarta a las paredes de la parte baja del agujero, lo cual puede resultar sumamente peligroso. Es por lo anterior que siempre será recomendable en todo caso la continua rotación de la sarta de perforación a manera de minimizar los riesgos de una pegadura por presión diferencial y de optimar al máximo la limpieza del agujero.

### **- EFECTO DE LA PRESION DE BOMBEO Y DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN EN LA LIMPIEZA DEL AGUJERO.**

Estudios de laboratorio han indicado que el flujo turbulento es benéfico para la limpieza del agujero. De cualquier modo, en un pozo de Alcance Extendido de gran longitud, la capacidad de presión de bombeo puede limitar la capacidad de alcanzar el flujo turbulento. Si se desea el flujo turbulento, el incremento del diámetro de la tubería no solo incrementará la velocidad anular para un gasto dado sino también permitirá mayores gastos para una presión superficial dada. La tabla 3 muestra un ejemplo de los beneficios del empleo de una combinación de 5,6 5/8" de tubería de perforación comparado con el empleo de únicamente tubería de perforación de 5". El gasto y presión de bombeo para este ejemplo están basados en alcanzar flujo turbulento alrededor de la tubería en la sección de 12 1/2' de un pozo de Alcance Extendido de 20,000 pies. La densidad del lodo es de 12 lb/gal. La sarta esta compuesta de 10,000 pies de tubería de 5" y 10,000 pies de tubería de 6 5/8". Aparejo de fondo y barrena PDC, sin motor de fondo. Como se muestra en la Tabla 3, el empleo de tubería de perforación de 6 5/8" reducirá significativamente la presión de bombeo asociado con flujo turbulento.

Por ejemplo, para tener un gasto de 940 gpm, con flujo turbulento alrededor de la tubería de 5" se necesitan casi 2,000 psi de presión de bombeo. Si se agregara un motor de fondo a la sarta, la presión de bombeo requerida es de 6,000 psi con el objeto de alcanzar flujo turbulento.

Debido a que la mayoría de las bombas y de los sistemas de circulación no pueden manejar esta presión, se han desarrollado otros medios para la limpieza de los pozos de Alcance Extendido, casi todos ellos encaminados a lograr una cierta rotación de la sarta de perforación dentro del agujero con la intención de provocar un movimiento ciclónico en la corriente del fluido de perforación del espacio anular que arrastre consigo eficazmente los recortes de roca generados por la barrena.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

OPERACIÓN	CAPACIDAD DE CARGA		CARGAS APLICADAS			PORCENTAJE DE			
	SIN TORSIÓN	CON TORSIÓN	MUT. KR-B	TENSIÓN MIB	TORSIÓN KR-B	CAP. TENSION	JUNTA MUT	CEDENCIA MIN	$\xi$
	TUBERÍA K15		LIM TORSIÓN TJ						
<b>SACANDO</b>									
CON	760		40.9	196	24.2	19	59	36	27
ROTACION									
SIN	760	760	40.9	258		25			34
ROTACION									
<b>BAJANDO</b>									
CON	760	750	40.9	103	19.5	10	48	29	14
ROTACION									
SIN	760	760	40.9	61		6			8
ROTACION									
<b>PERFORAN DO</b>									
CON	760	740	40.9	116	22.3	11	55	33	16
ROTACION									
SIN	760	760	40.9	61		6			8
ROTACION									
<b>ROTANDO</b>	760	742	40.9	147	21.4	14	52	31	20
SIN									
<b>TOCAR FONDO</b>									

donde  $\xi$  de la última columna significa :  $\xi$  = Capacidad para combarse del tubo en cuestión.

Suposiciones : Prof. media 12,000 pies. Torque bna. 2000 lb-pie. 120RPM

Peso del lodo 13.5 lb/gal. Torque BHA 3000 lb-pie FR 0.17 TR

PSB 20000 lb. Arrastre BHA 30000 lb. 0,2 ag. desc.

TP 6 5/8", 27.7 lb / pie, s-135.

**TABLA 2. RESUMEN DE CARGAS EN UN POZO DE ALCANCE EXTENDIDO EN EL MAR DEL NORTE.**

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

**PRESIÓN DE CIRCULACIÓN, PSI.**

PV/YP	GPM	5 pg.	5'6 5/8
3/6	530	1781	1120
7/10	780	3814	2459
11/14	940	5612	3638

**TABLA 3.**

**- EFECTO DE LA VELOCIDAD ANULAR Y DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN EN LA LIMPIEZA DEL AGUJERO.**

La velocidad anular es un factor clave en la limpieza del agujero. Por lo tanto, siempre es deseable encontrar caminos para incrementar la velocidad anular. La velocidad anular en todo el pozo depende directamente del área anular entre el agujero y la tubería de perforación. La Tabla 4 muestra la velocidad anular para diferentes diámetros de tubería y agujeros. Estas velocidades están basadas en la suposición que 1,100 gpm pueden ser bombeados en un agujero de 17 1/2" ó 16" y 900 gpm en un agujero de 12 1/4". Como lo ilustra la Tabla 4, ir de un agujero de 17 1/2" con tubería de perforación de 5" a un agujero de 16" con tubería de perforación de 6 5/8" incrementa la velocidad anular de 96 pies/min. a 117 pies/min, o sea un 23% más.

Diametro. Agujero, pg.	TP, pg.	GPM	Vel.anul. pie/min.
17 1/2	5	1100	96
16	6 5/8	1100	117
12 1/4	5	900	176
12 1/4	6 5/8	900	208

**TABLA 4.**

Otro beneficio de un agujero de 16", si el problema es la limpieza, es que se genera un 16% menos de recortes en volumen.

**-DESGASTE DE LA TUBERÍA Y REPASO.**

El desgaste de la tubería es afectado por el tiempo de rotación, ritmo de incremento de ángulo y la tensión de la sarta abajo de la sección de incremento o de cambio de ángulo a uno mayor. A mayor tiempo de rotación, y mayor ritmo de

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Incremento aunados a una cada vez mayor tensión causan un desgaste mayor. Si el pozo tiene un ritmo de incremento relativamente bajo (1 a 3° / 100 pies) y un ángulo tal que la tensión sea mínima, el desgaste no será un problema potencial. De cualquier forma, bajos ritmos de incremento y reducida tensión en la sarta de perforación pueden ser obsoletos por la práctica de reparar el agujero para mantener la limpieza del mismo.

El reparar maximiza la tensión y fuerzas en la pared del agujero a través de la sección de incremento al mismo tiempo que la sarta esta siendo rotada. La Tabla 5 compara la tensión superficial calculada mientras se perfora con la tensión mientras se repasa en un agujero de 12 1/4" a 21,200 pies de profundidad medida. En este ejemplo, el punto de inicio de desviación esta a 1,000 pies y el pozo tiene un ritmo de incremento de 2° / 100 pies a un ángulo de 75° con una profundidad de 5,300 pies. La tensión calculada en ambos casos fue calculada usando un programa para PC comercial el cual esta basado en un modelo de torque y arrastre. La tensión es suficiente para causar un problema por desgaste dependiendo del tiempo que se este repasando, la abrasividad del lodo y el tipo de bandas en las juntas. Por lo anterior es que es necesario considerar protectores de hule para las tuberías y bandas no abrasivas en las juntas de la tubería dentro del agujero ademado.

<b>Operación</b>	<b>Tensión, Kib.</b>	<b>Porcentaje de Incremento</b>
<b>Perforando con rotación</b>	<b>116</b>	
<b>Sacando con rotación (reparar)</b>	<b>231</b>	<b>100</b>

TABLA 5.

Las trayectorias de pozos de Alcance Extendido imponen mayores cargas de torsión y menores cargas de tensión en la sarta de perforación que en el caso de pozos verticales con la misma profundidad; la tensión por arrastre es despreciable mientras se está en modo rotatorio. El limite para compresión mecánica para prevenir el pandeo en un sarta con un ritmo de incremento constante es la compresión a la cual se exceda primero la carga critica de pandeo en una sección recta arriba o abajo de la sección de incremento.

Como una ayuda en la limpieza del agujero, se debe garantizar el máximo flujo de fluido y velocidad anular. El uso de tubería de perforación de 6 5/8" donde sea posible ayudará a la presión de bombeo. La limpieza del agujero será mejor cuando la sarta es rotada.

La práctica de reparar incrementará la tensión aplicada a la sarta de perforación. El tiempo al reparar y el efecto de incremento de la carga de tensión

### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

incrementada durante el repaso deberán ser considerados al predecir el desgaste de la tubería de revestimiento.

#### **2.3. CONCEPTOS REQUERIDOS EN EL DISEÑO DE SARTAS DE PERFORACIÓN.**

Los grandes intervalos horizontales y de ángulos de incremento tienden a producir altos torques y cargas de arrastre en la sarta de perforación. En un buen diseño de sarta se deben controlar los incrementos de las cargas axiales y de torque.

Cuando se diseña una sarta para pozos de Alcance Extendido debe tomarse en cuenta lo siguiente :

Los altos ritmos de incremento y las largas secciones horizontales producen torques que pueden exceder rápidamente los límites de operación de la tubería.

Son necesarias tuberías más pesadas en la sección superior del agujero vertical que venzan los efectos axiales de fricción cuando se viaja en el agujero, además de dar el adecuado peso a la barrena mientras se perfora.

El diseño de la sarta para vencer los problemas anteriores requiere del adecuado cálculo de las cargas de tensión, compresión y torsión en cualquier punto a lo largo de la sarta. Esto se logra con:

- Colocar los componentes tubulares en una sarta de tal manera que no estén sujetos a cargas que excedan sus limitaciones de diseño dentro de cada sección.
- Colocar los componentes adecuados en la parte compresiva de la sarta que transmitan las cargas axiales ( peso sobre la barrena ) sin pandeo.
- La selección pertinente de un equipo con suficiente capacidad para rotar o levantar la sarta.

En pozos verticales los lastrabarras se emplean cerca del fondo de la sarta de perforación para dar peso a la barrena y para asegurar que la tubería de arriba de los mismos permanezca en tensión. La tubería extrapesada que se emplea en la sarta de perforación, da peso adicional y además aísla a la tubería de cargas compresivas.

En pozos horizontales y de Alcance Extendido, al colocar los lastrabarras cerca de la barrena no aumenta el peso pero si incrementa el torque, arrastre y las posibilidades de una pegadura por presión diferencial. Por esta razón el único lastrabarrena que se debe colocar en esta sección es el antimagnético para aislar los instrumentos de medición de las interferencias magnéticas. El principal componente para el peso a la barrena se tiene que colocar cerca o en la sección vertical de la sarta. Como resultado se tiene que la tubería que se encuentra por debajo de esta sección estará sujeto a cargas de compresión. Esta configuración se conoce como " sarta invertida".

### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

La tubería pesada se coloca desde el punto de inicio de la desviación hasta la sección horizontal. Esta tubería se emplea para eliminar el pandeo, ya que se ha comprobado que la tubería de perforación no es apropiada para manejar cargas axiales a bajos ángulos.

La consideración más importante en la selección de los componentes del aparejo para la sección horizontal es que se pueda transmitir con seguridad el peso sobre la barrena de la porción superior del conjunto a través de la sección de incremento de ángulo hasta la sección horizontal, mientras se disminuye el peso de la sarta y el efecto de levantar grandes cargas.

En secciones horizontales cortas, la tubería pesada es la mejor elección porque esta diseñada para trabajar en compresión y es capaz de transmitir grandes cargas axiales sin pandeo. La perforación de la sección horizontal puede verse afectada por el aumento de la carga que se tiene que levantar al emplear la mayor cantidad de tubería pesada, razón por la cual se recomienda el uso de tubería de perforación estándar en determinadas secciones como una medida para aminorar la carga a levantar.

Conforme se avanza en la sección horizontal, el torque y el arrastre de la sarta se incrementan en forma significativa y la disminución de la tensión es proporcional, presentándose problemas en la transmisión de peso a la barrena. Estas irregularidades en la transmisión de peso pueden causar que el motor de desplazamiento positivo produzca altos torques instantáneos no esperados en la salida que afectan a la barrena y así causar una prematura falla en la barrena o en el motor.

#### **- FACTORES QUE AFECTAN LOS LÍMITES DE TORQUE Y FRICCIÓN EN UN POZO DE ALCANCE EXTENDIDO.**

- LONGITUD DEL AGUJERO HORIZONTAL.
- DISEÑO DE LA SARTA DE PERFORACIÓN:
  - \* Tubería extrapesada.
  - \* Tubería de perforación en agujero horizontal.
  - \* Carga requerida sobre la barrena.
- COEFICIENTE DE FRICCIÓN
  - \* Tipo de lodo.
- CAPACIDAD DEL APAREJO
  - \* Torque.
  - \* Carga axial.
- TÉCNICA DE PERFORACIÓN HORIZONTAL
  - \* Rotación desde la superficie.
  - \* Deslizando ( con motor de fondo ).

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

### **- TORQUE Y ARRASTRE.**

Los límites mecánicos para un agujero horizontal están relacionados con los límites de torque y arrastre de la sarta y el equipo. Para alcanzar la longitud máxima posible, se requiere de disminuir las fuerzas de torque y arrastre. Debido a que el pandeo y las fuerzas de gravedad gobiernan el efecto de torque y arrastre en el agujero horizontal, el óptimo diseño requiere de la selección de los componentes más ligeros en la sarta de perforación que no permitan el pandeo durante las operaciones de perforación.

Después de que se ha diseñado el óptimo perfil de curvatura, el problema cambia de un control direccional a uno de torque y arrastre. El diseño del pozo requiere del entendimiento de las consecuencias del torque y arrastre para las alternativas en el diseño del pozo.

El análisis de torque y arrastre debe incluir la predicción mientras se viaja. Todo esto es importante para conocer los esfuerzos en los componentes de la sarta debido a la curvatura del agujero y de estas cargas.

Actualmente hay sofisticados modelos de cómputo para estimar el torque y arrastre en un pozo de Alcance Extendido. Cuando la trayectoria del pozo no es compleja y asumiendo que:

- La trayectoria del pozo puede representarse por un arco.
- El tamaño y peso de la sarta es el mismo en el ángulo de construcción.
- El agujero es aproximado a la horizontal.
- La tubería en la sección horizontal no esta pandeada.

El torque y el arrastre pueden aproximarse a las siguientes relaciones:

1. El torque y arrastre se puede calcular por:

$$T = ( F_f \cdot OD_j \cdot F_c ) / 24 \quad ( 14 )$$

donde :

T = Torque ( lb/pie).

F<sub>f</sub> = Factor de fricción ( adimensional ).

OD<sub>j</sub> = Diámetro exterior de la junta ( pg ).

F<sub>c</sub> = Fuerza lateral de contacto ( lb/pie).

Para el valor del factor de fricción se considera que:

- Si se tiene tubería de perforación en una TR, entonces se toma el factor de fricción igual a 0.31.
- Si se tiene tubería de perforación en agujero descubierto, debe tomarse en cuenta el tipo de lodo:

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

\* Cuando se tenga lodo base agua el factor de fricción varía de 0.3 a 0.35.

\* En cambio, si se tiene lodo base aceite el factor de fricción es igual a 0.25.

La fuerza lateral de contacto (  $F_c$  ) y la fuerza axial (  $F_A$  ) para una sección recta se obtiene de ( Figura 16 ) :

$$F_c = W_m \cdot \text{sen}\theta \quad ( 15 )$$

$$F_A = W_m \cdot \text{cos}\theta \quad ( 16 )$$

, donde:

$W_m$  = Peso de tubería en el lodo ( lb/pie ).

$\theta$  = Ángulo de inclinación ( grados ).

$F_A$  = Fuerza axial ( lb/ft ).

$F_c$  = Fuerza lateral de contacto ( lb/ft ).



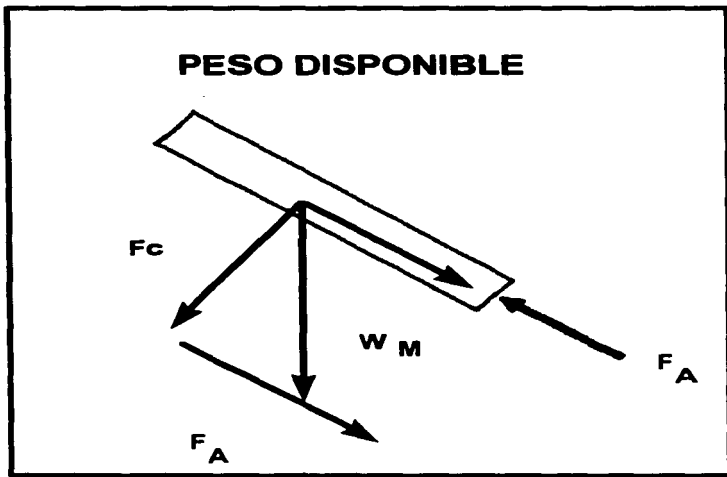


FIGURA 16. FUERZAS LATERAL DE CONTACTO Y AXIAL.

La fuerza lateral de contacto para pozos inclinados ( Figura 17 ) se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_c = [ [ ( F_a B_v / 5730 ) - W_m \text{sen} \theta ]^2 + ( F_a B_L / 5730 )^2 ]^{1/2} \quad ( 17 )$$

donde :

$F_c$  = Fuerza lateral de contacto ( lb/pie).

$F_a$  = Fuerza axial ( lb ).

$B_v$  = Ritmo de incremento ( ° / 100 pies).

$B_L$  = Curvatura lateral del pozo ( ° / 100 pies ).

$B_L = ( B_T^2 - B_v^2 )^{1/2}$ .

$B_T$  = Curvatura total de la pata de perro ( ° / 100 pies ).

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

$W_w$  = Peso de la tubería en el lodo ( lb/ pie ).  
 $\theta$  = Ángulo de inclinación ( grados ).

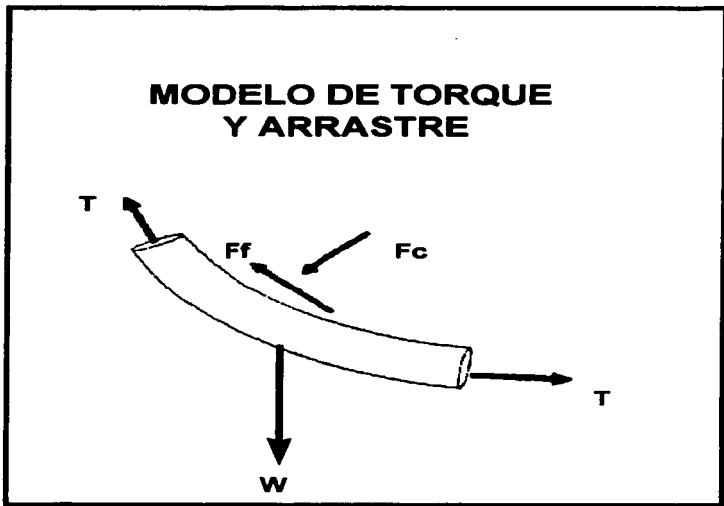


FIGURA 17. FUERZA LATERAL DE CONTACTO PARA POZOS INCLINADOS.

La fuerza crítica de pandeo se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{CP} = 550 \left[ \left( W_A \cdot (65.5 - M_w) \cdot \text{sen} \theta \right) / (D_H - D_{TJ}) \right] \quad (18)$$

donde :

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

$F_{CP}$  = Fuerza crítica de pandeo ( lb ).

$I$  = Momento de inercia de la tubería (  $pg^4$  ).

$$I = ( A_s / 16 ) * ( OD^2 + ID^2 ).$$

$A_s$  = Área transversal de la tubería (  $pg^2$  ).

$OD$  = Diámetro externo de la tubería (  $pg$  ).

$ID$  = Diámetro interior de la tubería (  $pg$  ).

$W_A$  = Peso de la tubería en el aire (  $lb/pipe$  ).

$W_m$  = Densidad del lodo (  $lb/gal$  ).

$D_H$  = Diámetro del agujero (  $pg$  ).

$D_{TJ}$  = Diámetro de la junta (  $pg$  ).

$\theta$  = Ángulo del agujero ( grados ).

Sustituyendo la ecuación de fuerza lateral de contacto para una sección recta, se obtiene que el torque para una sección recta es:

$$T = [ ( OD_J * W_m * L * F_s \text{sen} \theta ) / 24 ] \quad ( 19 )$$

Asumiendo que  $F_f = 0.33$ , el torque de la tubería en el agujero horizontal es:

$$T_h = [ ( OD_J * W_m * L ) / 72 ] \quad ( 20 )$$

El torque cuando se esta rotando la tubería a  $90^\circ$ , depende de la magnitud de las fuerzas axiales aplicadas al final de la curva. Cuando se perfora en agujero horizontal con rotación desde la superficie, la fuerza axial al final de la curva es igual al peso sobre la barrena.

- Para  $WOB < 0.33 * W_m * R$  :

$$T_b = [ ( OD_J * W_m * R ) / 72 ] \quad ( 21 )$$

- Para  $WOB > 0.33 * W_m * R$  :

$$T_b = [ ( OD_J * W_m * R ) / 72 ] + [ ( OD_J * WOB ) / 46 ] \quad ( 22 )$$

El torque total rotando es :

$$T = T_h + T_b.$$

El torque para una sección inclinada recta sin pandeo es :

$$T_J = [ ( OD_J * W_m * L * F_r \text{sen} \theta ) / 24 ] \quad ( 23 )$$

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

la cual debe agregarse al torque total, si esta sección existiera.

El arrastre, cuando se esta viajando o mientras se guía con un motor de fondo, puede calcularse con la siguiente aproximación para la tubería en agujero horizontal :

$$D_h = 0.33 * W_m * L \quad ( 24 )$$

El arrastre de la tubería en la sección de construcción es una función de la fuerza axial en la tubería en el final de la curva. Esta fuerza es igual al peso sobre la barrena más el arrastre de la tubería en la horizontal. Si se espera que el BHA tenga arrastre debido a los estabilizadores, esta fuerza debe incluirse en la fuerza al final de la curva, por lo cual la ecuación queda como sigue:

$$F_a = D_h + WOB + BHA.$$

El arrastre de la tubería en la curva de construcción depende de la magnitud de la fuerza axial al final de la curva.

- Para:

$$F_a < 0.25 * W_m * R$$

entonces:

$$D_b = 0.4 * W_m * R \quad ( 25 )$$

- Para:

$$F_a > 0.25 * W_m * R$$

entonces:

$$D_b = ( 0.25 * W_m * R ) + ( 0.69 * F_a ) \quad ( 26 )$$

El arrastre total se expresará con la siguiente ecuación:

$$D = D_h + D_b.$$

El arrastre para una sección inclinada recta sin pandeo es:

$$D_i = W_m * L * F_{sen\theta} \quad ( 27 )$$

la cual debe agregarse a la ecuación del arrastre total ( si esta sección existe ).

Los cálculos del arrastre cuando la tubería es sacada son similares.

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

La tensión por arrastre en el intervalo de construcción es una función de las cargas por tensión de la tubería en el final de la curva. Esta fuerza es igual a la tensión debida al arrastre por las tuberías en el intervalo horizontal más las cargas no gravitatorias de fricción, como las debidas a los estabilizadores. El arrastre en la curva es calculado como sigue:

$$F_o = D_h + BMA \quad (28)$$

• Para :

$$F_o < 0.85 \cdot W_m \cdot R$$

se tiene :

$$D_h = 0.33 \cdot W_m \cdot R \quad (29)$$

• Para :

$$F_o > 0.85 \cdot W_m \cdot R$$

se tiene :

$$D_h = (0.69 \cdot F_{ca}) - (0.25 \cdot W_m \cdot R) \quad (30)$$

donde :

T = Torque ( lbf-pie ).

T<sub>h</sub> = Torque friccional en una sección horizontal ( lbf-pie ).

T<sub>90</sub> = Torque friccional en una sección de incremento de 90° ( lbf-pie ).

OD<sub>j</sub> = Diámetro de las juntas o lastrabarras ( pg ).

L = Longitud de la tubería ( pies ).

F<sub>f</sub> = Factor de fricción ( adim ).

θ = Ángulo de inclinación ( grados ).

W<sub>m</sub> = Peso de la tubería en el lodo ( lb/pie ).

R = Radio de curvatura ( pies ).

WOB = Peso sobre la barrena ( lb ).

D = Arrastre friccional en una sección inclinada ( lb ).

D<sub>h</sub> = Arrastre friccional en una sección horizontal ( lb ).

D<sub>90</sub> = Arrastre friccional en una sección de incremento de 90° ( lb ).

F<sub>ca</sub> = Carga axial compresiva en EOC ( lb ).

F<sub>o</sub> = Carga axial de tensión en EOC ( lb ).

Con la siguiente relación se puede calcular el torque a partir del número de vueltas de la tubería de perforación cuando se libera :

$$\theta = ( T \cdot L ) / ( J_p \cdot G ) \quad (31)$$

donde :

θ = Ángulo de torsión ( radianes ).

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

T = Momento de torsión ( lbf ).

L = Longitud ( pg ).

J<sub>p</sub> = Momento polar de inercia ( pg<sup>4</sup> ).

G = Módulo de rigidez ( 11.5 x 10<sup>6</sup> psi, para el acero ).

Donde la relación de vueltas vs. Torque es :

$$N = ( T \cdot L ) / ( 10^6 \cdot J ) \quad ( 32 )$$

donde :

N = Número de vueltas en la tubería de perforación.

J = Momento de inercia ( pg<sup>4</sup> ).

Estas relaciones se pueden emplear para estimar la magnitud del torque y el arrastre en la mayoría de los diseños de pozos horizontales y de Alcance Extendido. Cuando esta evaluación se une con el análisis de las fuerzas de pandeo críticas, se puede evaluar el efecto de torque y arrastre por el cambio de componentes de la sarta horizontal. Al reducir el peso de la tubería en la parte horizontal se puede disminuir el torque y el arrastre compresivo tanto como se pueda aligerar la tubería sin tener pandeo, para esto, la máxima curvatura para evitar el contacto con la tubería es:

$$B = ( 137, 520 \cdot R ) / [ J \cdot L [ \tan ( 57.3 L / 4J ) - ( L / 4J ) ] ] \quad ( 33 )$$

y para la tubería extrapesada :

$$B_{nw} = [ 370 \cdot ( OD_1 \cdot OD_p ) ] / [ J \cdot \tan ( 2665 / J ) - ( 46.5 / J ) ] \quad ( 34 )$$

donde :

B = Máxima curvatura requerida ( ° / 100 pies ).

B<sub>nw</sub> = Máxima curvatura para evitar el contacto con la tubería extrapesada ( ° / 100 pies ).

R = Espacio radial de la junta al cuerpo de la tubería ( pg ).

J = ( E · I / F )<sup>1/2</sup> ( pg ).

L = Longitud de la junta ( pg ).

E = Módulo de young ( 30 x 10<sup>6</sup> para el acero ) ( psi ).

I = Momento de inercia ( pg<sup>4</sup> ).

F = Carga axial compresiva en la tubería ( lb ).

La máxima curvatura vs. carga compresiva axial en la tubería de perforación es:

$$B_{ap} = [ 185 \cdot ( OD_1 \cdot OD_p ) ] / [ J \cdot \tan ( 5330 / J ) - ( 93 / J ) ] \quad ( 35 )$$

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

donde :

$B_{20}$  = Máxima curvatura del agujero sin contacto con la tubería rango 2 ( ° / 30m ).

$OD_j$  = Diámetro exterior de la junta ( pg ).

$OD_p$  = Diámetro exterior de la tubería ( pg ).

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### 1. EJEMPLO DE TORQUE Y ARRASTRE.

#### DATOS :

Longitud horizontal: 2000 pies.

Radio: 800 pies.

Torque sin tocar fondo del pozo.

Torque W / 30000 \* WOB.

Torque W / 1500 pies.

- Calcular el torque en una longitud horizontal de 2000 pies.

$$Th = ( OD * W_m * L ) / 72$$

$$OD = 5pg.$$

$$W_m = 49.3 ( 55.5 / 65.5 ) - 41.77 * 10$$

$$Th = ( 6.5 * 41.77 * 2000 ) / 72 = 7, 542 \text{ lb-pie.}$$

- Calcular el torque en el intervalo de incremento sin tocar el fondo.

$$0.33 * W_m * R = 0.33 * 41.77 * 800 = 11,027 \text{ lb.}$$

$$WOB = 0. \text{ Entonces } WOB < 11,027 \text{ lb.}$$

$$Tb = ( OD * W_m * R ) / 72$$

$$Tb = ( 6.5 * 41.77 * 800 ) / 72 = 3016 \text{ lb-pie.}$$

- Calcular el torque sin tocar el fondo

$$T = Th + Tb$$

$$T = 7542 + 3016 = 10559 \text{ ft-lb}$$

- Calcular el torque con 30000 lb.

$$WOB = 30,000 \text{ lb.}$$

$$WOB > 0.33 * W_m * R$$

$$Tb = ( OD * W_m * R ) / 72 + ( OD / 46 ) * ( WOB - 0.33 * W_m * R )$$

$$Tb = 3016 + ( 6.5 / 46 ) * ( 30000 - 11027 )$$

$$Tb = 5697 \text{ ft-lb}$$

,entonces :

$$T = Th + Tb$$

$$T = 7542 + 5697 = 13,239 \text{ lb.}$$

- Calcular el torque en el tramo horizontal con una tubería de perforación con 1500 ft de longitud, 19.5 lb/ft y 5 pg de diámetro.

$$Th = ( OD * W_m * L ) / 72$$

$$OD = 6,375 \text{ pg.}$$

$$W_m = 20.99 * ( 55.5 / 65.5 ) = 17.79 \text{ lb/pie.}$$

$$Th = ( 6.375 * 17.79 * 1500 ) / 72 = 2362 \text{ lb-pie.}$$

Para 500 ft . de tubería Extrapesada de 5 pg. de diámetro :



PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

$$T_h = (6.5 \cdot 4.77 \cdot 500) / 72 = 1885 \text{ lb-pie.}$$

- Calcular el torque horizontal total.

$$T_h = 2362 + 1885 = 4248 \text{ lb-pie.}$$

- Calcular el torque sin tocar el fondo del pozo.

$$T = T_h + T_b$$

$$T = 4248 + 5697 = 9945 \text{ lb-pie.}$$

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **2.EJEMPLO.**

#### **POZO AGUA FRIA 817-H. ( PEMEX ).**

##### **DATOS:**

Tubería de Perforación ( T.P. ) :

OD = 3.5 pg.

ID = 2.992 pg.

$W_A = 9.20$  lb/pie.

Lastrabarreras :

NC-35.

OD = 4.750 pg.

ID = 4.082 pg.

Tubería de revestimiento ( T.R. ) :

N-80 ; 33.7 lb/pie.

OD = 7.625 pg.

ID = 6.765 pg.

Densidad del lodo:  $M_w = 1.28$  gr/cc = 10.685 lb/gal.

Ritmo de incremento: 7.1° / 100 pies.

R = 807.04 pies.

KOP = 1228 m. = 4027.84 pies.

EOC = 1566.6 m. = 5138.45 pies.

Longitud Total = 2571.5 m. = 8434.52 pies.

Longitud Horizontal = 1004.9 m = 3296.07 ft

$D_H = 6.765$  pg.

$D_{TJ} = 4.750$  pg.

##### **- DESARROLLO.**

$A_s = 0.7854 * (3.5^2 - 2.992^2) = 2.5902$  pg<sup>2</sup>

$I = (2.5902 / 16) * (3.5^3 - 2.992^3) = 3.4323$  pg<sup>4</sup>

$W_M = 9.20 * (54.815 / 65.5) = 7.7$  lb/pie.

$D_H - D_{TJ} = 6.765 - 4.750 = 2.015$  pg.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE ESTENDIDO**

**Paso No. 1**

$$F = 957 \left( \frac{3.4323 \times 9.20 \times (65.5 - 10.685)}{2.015} \right)^{1/2}$$

$$F = 28048.56 \text{ lbs.}$$

**Paso No. 2**

$$F_{EOC} = 0.59 \times 28048.56 + 0.39 \times 7.7 \times 807.04$$

$$F_{EOC} = 18972.19 \text{ lbs.}$$

**Paso No. 3**

$$F_c = 550 \left( \frac{3.4323 \times 9.20 \times (65.5 - 10.685)}{2.015} \right)^{1/2}$$

$$F_c = 16119.86 \text{ lbs.}$$

Cálculo de la máxima longitud de tubería pandeada:

$$L = \frac{60 \times 106 \times 3.4323 \times (18972.19 - 16119.86)}{2.015 \times 18972.19 \times 16119.86}$$

$$L = 953.196 \text{ pies.}$$

Se observa que la longitud pandeada es menor que la longitud del tramo horizontal (953.196 ft < 3296.072 ft), por lo que la fuerza en el final de la longitud pandeada será la fuerza crítica de pandeo.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **3. EJEMPLO DE PANDEO CRÍTICO.**

Calcular el pandeo crítico para el lastrabarrena, la tubería extrapesada y la tubería de perforación.

Para el lastrabarrena :

DATOS:

$$OD = 6.25 \text{ pg}$$

$$ID = 2.813 \text{ pg.}$$

$$A_0 = 24.46 \text{ Pg}^2.$$

$$I = 83.16 \text{ lb/pie}^4.$$

$$W_A = 71.83 \text{ lb/pie.}$$

$$M_W = 9 \text{ lb/gal.}$$

$$\theta = 1.25^\circ.$$

$$D_H = 8.75 \text{ pg.}$$

$$D_{TJ} = 6.25 \text{ pg.}$$

$$F_{CP} = 550 \left[ \left[ I \cdot W_A \cdot (65.5 - M_W) \cdot \sin\theta \right] / (D_H - D_{TJ}) \right]^{0.5}$$

$$F_{CP} = 550 \left[ \left[ 71.83 \cdot 83.16 \cdot (65.5 - 9) \cdot \sin 1.25 \right] / (8.75 - 6.25) \right]^{0.5}$$

$$F_{CP} = 29850 \text{ lbs.}$$

Para tubería extrapesada :

DATOS :

$$OD = 5 \text{ pg.}$$

$$ID = 3 \text{ pg.}$$

$$A_0 = 0.7854 \cdot (5^2 - 3^2) = 12.59 \text{ pg}^2.$$

$$I = 12.59 \cdot (5^2 + 3^2) / 16 = 26.7 \text{ pg}^4.$$

$$W_A = 49.3 \text{ lb/pie.}$$

$$M_W = 10 \text{ lb/gal.}$$

$$\theta = 30^\circ.$$

$$D_A = 8.5 \text{ pg.}$$

$$D_{TJ} = 6.5 \text{ pg.}$$

$$F_{CP} = 550 \cdot \left[ \left[ 26.7 \cdot 49.3 \cdot 55.5 \cdot \sin 30 \right] / (8.5 - 6.5) \right]^{0.5} = 74300 \text{ lb.}$$

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

Para la tubería de perforación:

DATOS :

$$l = 14.27 \text{ pg}^4.$$

$$W_A = 20.99 \text{ lb/pie.}$$

$$M_W = 10.0 \text{ lb/gal.}$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$D_A = 8.5 \text{ pg.}$$

$$D_{TJ} = 6.375 \text{ pg.}$$

$$F_{CP} = 550 * [ [ 14.27 * 20.99 * 55.5 * \text{sen}30^\circ ] / ( 8.5 - 6.375 ) ]^{0.5} = 34400\text{lb.}$$

### **- FATIGA.**

Para optimizar la perforación en los pozos con curvatura que exceden los 20°/30 metros se deben entender los esfuerzos adicionales que impactan en el funcionamiento de los aparatos, así como su fatiga.

En la perforación de pozos horizontales y de Alcance Extendido los cuatro factores que aumentan la fatiga son:

1. Las cargas de tensión de la tubería en las patas de perro.
2. La severidad de la pata de perro.
3. La rotación en la pata de perro.
4. Las propiedades mecánicas de las tuberías.

### **- ESTRATEGIA DE DISEÑO DE LA SARTA DE PERFORACIÓN.**

Consideraciones de diseño.

- Profundidad de inicio de desvío.
- Profundidad final de desvío.
- Sin rotación en el fondo.
- Girar con la máxima carga en la barrena.
- Necesidad en la conducción.
- Carga en la barrena.
- Tirón de la barrena.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

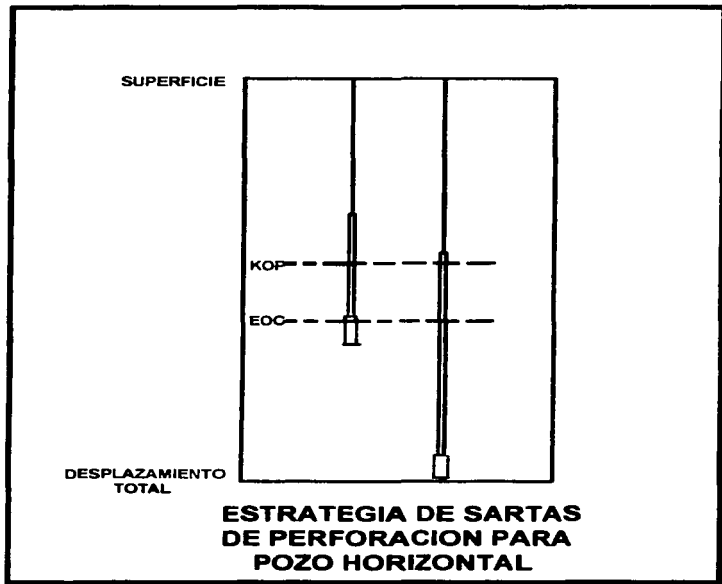
### **- MODO DE ROTACIÓN.**

- Para evitar el pandeo.
- \* En secciones horizontales.
- \* En secciones verticales.
- Para evitar el contacto entre el cuerpo de la tubería y las paredes del agujero del agujero en el intervalo en construcción.
- Para no exceder los límites a la resistencia a la fatiga.

### **- MODO DE CONDUCCIÓN ( O DESLIZAMIENTO ).**

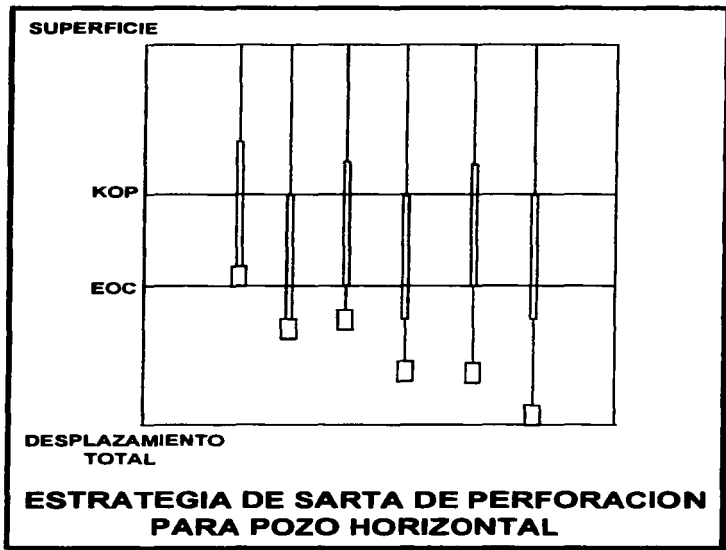
- No exceder la carga de pandeo en el tramo horizontal.
- No exceder los límites axiales de pandeo en la tubería vertical.
- No exceder límite del esfuerzo del cuerpo de la tubería.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**



**FIGURA 18. ESTRATEGIA DE SARTA DE PERFORACIÓN PARA POZOS HORIZONTALES.**

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**



**FIGURA 19. ESTRATEGIA DE SARTA DE PERFORACIÓN PARA POZOS HORIZONTALES.**



## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

### **2.4.GUÍA Y CONSIDERACIONES EN LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA DE PERFORACIÓN HORIZONTAL TERRESTRE, AL DISEÑO DE POZOS MARINOS DIRECCIONALES, HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO.**

#### **I. DISEÑO DE LA CURVA DE INCREMENTO.**

1. El ritmo de incremento superior es controlado por la misma estrategia utilizada para la perforación direccional convencional. Algún posible cambio en el ritmo de incremento superior, puede ser una reducción a manera de limitar la fuerza de contacto de las juntas en la curva, la cual es causada por el arrastre adicional en el segundo incremento y en la horizontal.
2. El incrementar el desplazamiento del EOC, reducirá la longitud horizontal máxima posible.
3. La dirección óptima de un pozo horizontal y de Alcance Extendido está definida por:
  - A. La dirección de la mínima permeabilidad horizontal. ( Esto orientará el agujero del pozo, perpendicular a la máxima permeabilidad horizontal ).
  - B. La dirección del mínimo esfuerzo horizontal. ( Esta dirección debe incrementar la estabilidad del agujero del pozo horizontal y producir fracturas hidráulicamente inducidas que son perpendiculares al pozo horizontal ).
  - C. Las direcciones mexicanas arriba, son normalmente, idénticas en yacimientos naturalmente fracturados.
4. El diseño de curva de incremento compleja, tiene la capacidad tanto de girar el pozo hacia la dirección óptima, como de obtener control de la profundidad vertical. Un diseño óptimo debe considerar lo siguiente:
  - A. Determinar el giro total requerido desde la dirección del incremento superior y la tangente, hasta la dirección del pozo horizontal deseada.
  - B. Seleccionar un giro mínimo aceptable de la dirección. ( Un error de 15° a 20° tendrá un efecto mínimo sobre la productividad y la estabilidad ).
  - C. Seleccionar el requerimiento de diseño de altura vertical a partir de la consideración de la tolerancia del objetivo, de la exactitud de la altura de marcas arriba del objetivo y de la experiencia con los ángulos de incremento de los motores en el área. ( La capacidad de dar del 5% al 10% de la altura parece razonable ).
  - D. Determinar el ángulo de la cara de la herramienta requerido para obtener el mínimo giro aceptable.
  - E. Determinar el ángulo adicional de la cara de la herramienta requerido para incrementar el TVD ( cuyas siglas al inglés significan " Total Vertical Deep ", o al español, Profundidad Vertical Total ) del segundo incremento en ( D )

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

mediante el porcentaje seleccionado ( C ). Esto definirá el diseño del ritmo de incremento vertical.

5. El mejor método para determinar el ritmo de incremento verdadero de un motor de incremento de ángulo, es correr el motor en el pozo y utilizar el ritmo de incremento observado, para predecir el desarrollo en el incremento final. Ya que no se puede utilizar un motor de alta curvatura en el primer incremento de pozos horizontales, direccionales y de Alcance Extendido , el primer pozo horizontal en el área debe ser diseñado con una segunda tangente en el intervalo de incremento y giro más bajo, para ajustar el rango máximo posible de desarrollo ( por ejemplo, -10% a +15%).

Los pozos futuros que utilicen el mismo motor, los mismos lastrarbarrenas antimagnéticas o el mismo MWD arriba del motor, y el mismo tipo de barrena, pueden ser perforados sin la tangente inferior. Se deberá colocar una tangente inferior en el centro del segundo incremento. Las variaciones en el EOC debido a variaciones en el ritmo de incremento, pueden ser minimizadas por medio de la selección del ángulo de la tangente como una función del ritmo de incremento observado en el campo.

### **II. TORQUE Y ARRASTRE.**

1. La predicción del Torque, el arrastre y el diseño de sartas de perforación, se vuelve de gran importancia conforme el desplazamiento total del pozo se incrementa.
2. Los simuladores de Torque y Arrastre son esenciales para el diseño de pozos horizontales y de Alcance Extendido siempre que el ángulo de torsión sea excesivo ( mayor que el  $\arctan(1 / Ff)$  , el desplazamiento total excede 10, 000 pies. ) o el torque evaluado es mayor que 2/3 de la resistencia al torque de la tubería de perforación.

### **III. PROGRAMA DE TR'S Y TAMAÑO DEL AGUJERO.**

1. La mejor guía para seleccionar la profundidad de asentamiento para pozos horizontales y de Alcance Extendido es colocar tuberías a la misma TVD como si fueran utilizadas en un pozo direccional similar.
2. La curva de incremento superior deberá ser cubierta antes de perforar la horizontal, debido a la gran fuerza lateral de contacto que puede ser ocasionada en la sección de incremento superior por las cargas de jalón en la horizontal.
3. No es necesario colocar TR's alrededor de la sección de incremento inferior al considerar el torque y el arrastre.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **2.5. MÁXIMA CARGA AXIAL COMPRESIVA DISPONIBLE EN TUBERÍAS EN POZOS HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO.**

Pasos para calcular las máximas cargas disponibles en las tuberías :

1. Calcular la máxima carga axial de pandeo en la tubería en el KOP.
2. Calcular la carga axial sobrante en el EOC.
3. Calcular la carga crítica de pandeo y determinar si la tubería está pandeada en el tramo horizontal.
  - Si la tubería está pandeada, calcular la máxima longitud de la tubería pandeada en el intervalo horizontal.
  - Si la tubería horizontal está completamente pandeada, calcular la máxima fuerza disponible en la longitud del agujero horizontal.
  - Si la sección horizontal es mayor que la longitud pandeada, la fuerza en el final de la longitud pandeada será la fuerza crítica de pandeo.
  - Si la sección horizontal no está pandeada ó si la sección horizontal es mayor que la máxima longitud pandeada, calcular el arrastre para la tubería en la sección horizontal ( no pandeada ).

### **2. 6. RESUMEN DE FORMULAS PARA LOS CÁLCULOS.**

Máxima carga axial de pandeo para tuberías de acero en el agujero horizontal.  
Ver Figura 20.

$$I = A_B (OD^2 - ID^2) / 16$$

$$A_B = 0.7854 * ( OD^2 - ID^2 )$$

$$F = 957 * [ ( I * W_A * ( 65.5 - M_w ) ) / ( D_H - D_{TJ} ) ]^{1/2}$$

Carga axial disminuida en EOC.

$$F_{EOC} = 0.59 * F + 0.39 * W_m * R$$

Fuerza crítica de pandeo.

$$F_C = 550 * [ ( I * W_A * ( 65.5 - M_w ) * \sin \theta ) / ( D_H - D_{TJ} ) ]^{1/2}$$

Arrastre friccional de la tubería pandeada.

$$D_{BUCK} = [ F_c * F_A^2 * ( D_H - D_{TJ} ) * 12 ] / [ 8 * E * I ].$$

$$D_{BUCK} = [ F_A^2 * ( D_H - D_{TJ} ) ] / [ 60 * 10^6 * I ].$$

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

Máxima longitud de tubería pandeada en la sección horizontal.

$$L_p = [ 60 \cdot 10^5 \cdot I \cdot (F_{\text{Eoc}} - F_c) ] / [ (D_H - D_{TJ}) \cdot F_{\text{Eoc}} \cdot F_c ]$$

Fuerza axial al final de la tubería pandeada en el agujero horizontal.

$$F = [ ( 1 / F_{\text{Eoc}} ) + [ L_H \cdot ( D_H - D_{TJ} ) ] / [ 60 \cdot 10^5 \cdot I ] ]^{-1}$$

Tubería en secciones rectas del agujero inclinado.

$$D = W_M \cdot L \cdot F \cdot \text{sen}\theta$$

$$D_{\text{M}} = W_M \cdot ( L/3 )$$

- TUBERÍA EN EL INTERVALO DE CONSTRUCCIÓN A 90°.

Para  $F_A < ( 0.25 \cdot W_M \cdot R )$

$$D_B = 0.4 \cdot W_M \cdot R$$

Para  $F_A > ( 0.25 \cdot W_M \cdot R )$

$$D_B = ( 0.25 \cdot W_M \cdot R ) + ( 0.69 \cdot F_A ).$$

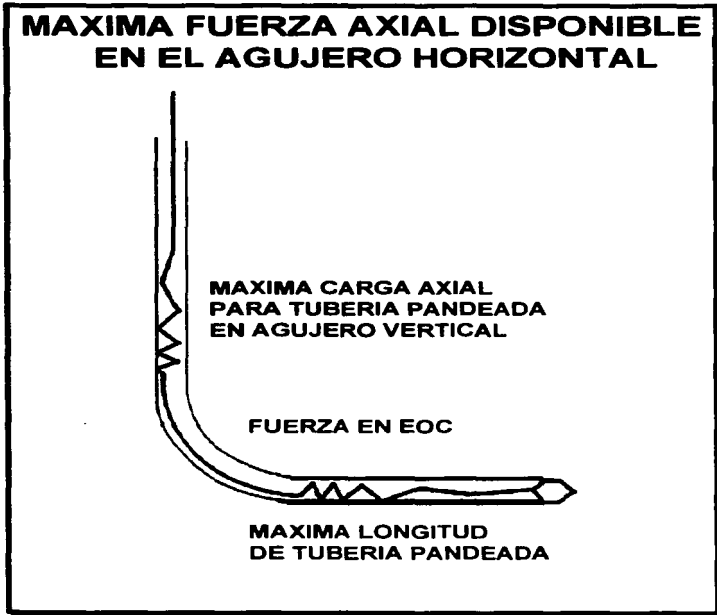


FIGURA 20. MÁXIMA FUERZA O CARGA AXIAL.

### **CAPITULO III.**

## **SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO PARA LA PERFORACIÓN DE POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO.**

### **3.1.INTRODUCCIÓN.**

En éste tercer capítulo se ha reservado el estudio de la Selección de las Tuberías de Revestimiento, juntas y consideraciones para la cementación de T.R. para un Pozo Direccional de Alcance Extendido. El procedimiento de Diseño para las Tuberías de Revestimiento Intermedias y de Producción es también incluido pero meramente como un esbozo, es decir, se presentan las bases del método por Carga Máxima así como importantes consideraciones que deben satisfacer las tuberías seleccionadas en el diseño que varían de acuerdo con la sección ( ya sea la vertical, la de incremento o la tangente ) de trabajo de la tubería ( las condiciones de flexión, pandeo, máxima presión Interna, máxima presión al Colapso y tensión que prevalezcan durante las operaciones más comunes de campo ( estado neutral, sacando y metiendo T.R. así como cuando se cementa ). En la suposición que el método de Carga Máxima es conocido y aplicado correctamente para Pozos Verticales se basa el ejemplo gráfico que se incluye en éste capítulo donde a partir de las gráficas de trayectoria, diseño por presión Interna, diseño por presión al Colapso, cargas axiales y diseño por presión al Colapso modificado se seleccionan el número de tramos y grados de tuberías a emplearse para recubrir el agujero del pozo **Agua Fria 801 - H** diseñado y perforado por **PEMEX** en el año de 1990.

El ranurado de T.R.'s y la evaluación del factor de seguridad en las juntas son también temas que se abordan con suficiente precisión y desde el punto de vista práctico en éste capítulo.

### **3.2.CONSIDERACIONES EN LA SELECCIÓN DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO Y JUNTAS EN POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO.**

Existen varios tipos de configuraciones geométricas primarias y de contingencia, sin embargo, varias de las siguientes características son comunes :

- La configuración debe permitir llevar a cabo el diseño de la terminación del pozo.
- El diseño debe contener al menos una sarta de revestimiento de contingencia.
- El agujero en la sección de producción debe ser lo suficientemente grande para permitir el empleo de herramientas para la desviación del pozo ( MWD, Measured While Drilling, cuyas siglas al español significan " Medición mientras se perfora " ), línea de acero o la toma de registros geofísicos.
- El diseño debe permitir realizar trabajos de cementación de excelente calidad.

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Para la junta son deseables las siguientes características :

- Si la Tubería de Revestimiento va a ser rotada mientras se cementa o se le va a pasar a través de severas patas de perro , entonces se debe asegurar que la T.R. que pasará a través de la sección de incremento tenga un perfil que evite la desconexión de los tubos, lo cual se logrará con el uso de las juntas de especificaciones y características tales que soporten los esfuerzos a los cuales se verán sometidas dentro del agujero de pozo.
- Las juntas de la T.R. deben ser lo suficientemente resistentes al torque para permitir la rotación durante la cementación en caso de ser necesario.

### **3.3.CONFIGURACIÓN PRIMARIA Y DE CONTINGENCIA DE CADA UNA DE LAS SECCIONES DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO PARA UN POZO DE ALCANCE EXTENDIDO.**

El orden de la configuración primaria y de contingencia para un pozo de Alcance Extendido que se expondrá a continuación es inverso, es decir, se detallarán las diferentes secciones de T.R. típicas para el pozo desde la profundidad total hasta la superficie, o lo que es igual, primero se explicarán las características de la T.R. de Producción y al final las de la T.R. Superficial y Conductora.

#### **1. T.R. DE PRODUCCIÓN.**

En el caso de la configuración de contingencia, se asienta un liner de 7 5/8 pg. y se perfora un agujero de 6 1/4 pg. hasta la profundidad total. Asumiendo que es usado un liner de 7 5/8 pg. se planea una T.R. de Producción de 5 1/4 pg. en contraposición con una sarta de 7 pg. eliminando la necesidad de comprar T.R. de 7 pg. y 5 pg. También, se corre una T.R. de producción como liner en lugar de una sarta hasta superficie, lo cual reduce la presión de surgencia.

Una rosca apropiada para la T.R. de Producción debería ser tipo " cuña " con sello metal-metal para facilitar el sello, este tiene un perfil con doble ahusamiento que resiste las cargas de pandeo severas, también permite el uso de toda el área de roscado como una superficie de soporte a las cargas, lo cual incrementa significativamente su resistencia a la torsión, permite la rotación a grandes profundidades y a altas inclinaciones.

#### **2. T.R. INTERMEDIA # 2.**

La T.R. intermedia # 2 de una configuración primaria es un liner de 9 5/8 pg. en contraste a una sarta hasta la superficie lo que ayuda a minimizar la surgencia cuando se viaja al fondo del pozo y la densidad equivalente de circulación al cementar; si el pozo tiene un punto de asentamiento de la T.R. de 9 5/8 pg.

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

profundo, los aspectos prácticos de manejo a altas inclinaciones llega a ser problemático.

La configuración de contingencia asume que esta T.R. no llega al fondo y se corre un liner de 7 5/8 pg. con junta integral. Dependiendo de las condiciones del agujero se puede correr una T.R. de 7 5/8 pg. en un agujero de 8 1/2 pg. en una sección sin escariar, de cualquier manera, este es un claro radial apretado que puede resultar en presión de surgencia excesiva mientras se cementa.

Si la T.R. de Producción de 5 1/2 pg. presenta fugas, la T.R. de 9 5/8 pg. se convierte en un receptáculo de presión. Por lo tanto, las juntas de esta sarta deben tener requerimientos de sello similares a los de la T.R. de 5 1/2 pg. Es deseable un perfil de " gancho " en la rosca con resistencia al torque, debido a que esta también atravesará la sección de incremento y se puede trabajar en una pata de perro. Debido a que la T.R. de contingencia arriba es un liner de 11 3/4 pg. cualquier parte de la T.R. de 9 5/8 pg. que pase a través del liner debe tener junta lisa o integral. Lo que conduce a la selección de una rosca con sello metal-metal.

### **3. T.R. INTERMEDIA # 1.**

La T.R. intermedia # 1 normalmente es colocada a través de la sección de incremento y posiblemente en parte de la sección tangente. La T.R. primaria y de contingencia es de 13 3/8 pg. Una alternativa es una combinación de 13 3/8 pg. y 13 5/8 pg. con la segunda a través de la sección de incremento para proveer de mayor tolerancia al desgaste.

La configuración de contingencia asume que la T.R. de 13 3/8 pg. no llega al fondo y tendría que correrse un liner de 11 3/4 pg. En este caso, el liner debe tener junta integral para permitir el paso a través de la T.R. de 13 3/8 pg.

Si se prevén problemas para introducir la T.R. es preferible una conexión con hombro resistente al torque y si se prevé que la T.R. puede ser jalada, la junta debe tener suficiente resistencia a la tensión.

Si se usa una junta roscada con cople, se debe tener un claro radial con diámetro exterior en la caja que asegure el paso a través del liner de contingencia de 16 pg.

### **4. T.R. SUPERFICIAL Y CONDUCTORA.**

La T.R. Superficial debe ser asentada en un agujero con un mínimo de tortuosidad, de otro modo, el desgaste y el torque pueden llegar a ser excesivos mientras se perforan las secciones subsecuentes del pozo.

Si la T.R. Superficial llega a la sección de incremento, su conexión necesitará resistencia al pandeo y a la tensión en caso de requerirse. Los requerimientos de la junta descritos anteriormente, podría llevar al uso de roscas no API, en un pozo de Alcance Extendido estas roscas no son ideales por su configuración ya que incrementan el riesgo de desconexión.



## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

### **- CORRIDA DE LAS T.R. A ALTAS INCLINACIONES.**

Conforme se incrementa la inclinación del agujero, es disponible menos peso en superficie, subsecuentemente se tiene que aplicar una fuerza superficial externa para introducir las Tuberías de Revestimiento, existen programas como el basado en el modelo de **Johansick** para este cálculo. Los métodos para incrementar el peso incluyen :

- Uso de Lastrabarrenas en la sarta de trabajo.
- Uso de un lodo de perforación con un bajo coeficiente de fricción ( Cf ).
- Reducción del coeficiente de fricción llenando el área de la zapata con un fluido ligero.

### **- DESGASTE DE LA T.R.**

En la Perforación de Alcance Extendido se usan 3 métodos para evitar el desgaste de las T.R.'s :

- Uso de protectores de Tubería de Perforación.
- Uso de herramientas sin bandas de metal duro a través de la sección de incremento.
- Utilización de un espesor de pared mayor, lo que permite un desgaste antes de rebasar el criterio de diseño.

### **- CONSIDERACIONES DE CEMENTACIÓN.**

Los cambios en la cementación de un pozo de Alcance Extendido son similares a los de un pozo horizontal pero en una escala mayor, los esfuerzos del agujero pueden causar que un pozo de Alcance Extendido tenga un estrecho rango de peso de operación con respecto a la fractura y colapso.

Si mientras se corre la T.R., la surgencia o la densidad equivalente de circulación son altas se incrementa la posibilidad de una pérdida de circulación, las pérdidas pueden ser evitadas con especial atención al lodo de perforación, bache de desplazamiento y propiedades de la lechada de cemento.

Las propiedades reológicas relativamente altas de un lodo de perforación ( punto de cedencia, viscosidad y esfuerzo gel ) resultan en un pobre desplazamiento y alta densidad de circulación mientras se cementa.

Típicamente una corrida de T.R. en un pozo de Alcance Extendido toma más de 24 horas, durante este periodo, el lodo en el agujero se espesa, lo cual resulta en presión de surgencia alta y la posibilidad de una pérdida de circulación mientras se corre la T.R., por lo anterior, el lodo es normalmente adelgazado antes de la corrida. Una vez que la sección ha sido perforada, el lodo debe ser parcialmente adelgazado justo antes de la cementación, lo cual también ayuda a minimizar la

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

densidad equivalente de circulación. Un bache viscosificado reduce el asentamiento de barita pero incrementa la densidad equivalente de circulación, lo cual puede conducir a una pérdida de circulación.

Una solución es usar un bache de baja densidad y baja viscosidad; un pozo de Alcance Extendido perforado con un lodo con densidad significativamente arriba de la presión de poro puede presentar condiciones que permitan un bache de baja viscosidad para ser usado sin sacrificar la estabilidad del agujero o el control del pozo. Si la inestabilidad es dependiente del tiempo, el corto periodo en que el pozo puede ser expuesto a baja presión hidrostática no importará. Por lo tanto, maximizar el volumen del bache mientras se mantiene una presión hidrostática en la cabeza significativamente arriba de la presión de poro puede ser hecho fácilmente.

Un bache de baja densidad y viscosidad en una sección a alto ángulo de inclinación puede no reducir la presión hidrostática substancialmente. Por lo tanto, la oportunidad de inestabilidad del agujero es mínima. Con el bache en la sección vertical, la presión en la cabeza es reducida pero el peso del cemento compensará parcialmente esta pérdida.

En aplicaciones a alto ángulo, la estabilidad de una lechada de cemento llega a ser crítica, si la lechada se separa en el fondo del agujero, se pueden formar canales de agua en el lado alto del agujero. La industria ha desarrollado pruebas estáticas y dinámicas bajo condiciones de fondo para ayudar a evitar esta canalización. Una influencia importante en la formación de canales es el volumen de agua libre de la lechada. En ángulos altos son deseables pruebas estáticas que resulten en menos de 1 % de agua libre.

### **- TÉCNICAS DE CEMENTACIÓN.**

Los pozos de Alcance Extendido generalmente involucran la cementación de grandes secciones de tubería, en algunos casos hasta superficie, si esos trabajos son hechos en una etapa, las lechadas de cemento pueden no llevar cantidades importantes de retardadores, los cuales podrían incrementar su inestabilidad. Adicionalmente los trabajos en una etapa implican grandes volúmenes de desplazante. Esto es importante si las pérdidas son posibles y el lodo usado es caro.

### **3.4. DISEÑO DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO PARA POZOS DE ALCANCE EXTENDIDO.**

Esencialmente el procedimiento de diseño de un pozo de Alcance Extendido, como algunas otras características de este tipo de pozos, es el mismo que se usa para el diseño de un pozo Horizontal. El diseño de tuberías de revestimiento para pozos Horizontales y de Alcance Extendido requiere consideraciones estructurales adicionales a las convencionales para pozos Verticales. En este subtema se establece el procedimiento de diseño para pozos Horizontales

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

tomando en cuenta las cargas axiales originadas por fricción y flexión y por el Método de Carga Máxima.

### **- DISEÑO DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO INTERMEDIA POR EL CRITERIO DE CARGA MÁXIMA.**

Es el criterio más ampliamente usado para el diseño de tuberías de Revestimiento. El presente diseño se basa en este concepto. En este procedimiento se toman en cuenta las condiciones más severas a las que se va a estar sujeta la T.R. a ser diseñada.

#### **• DISEÑO POR PRESIÓN INTERIOR O INTERNA.**

La máxima carga por Presión Interna ocurre cuando es considerado un posible brote en el interior de la tubería conteniendo lodo y gas. La tubería de Revestimiento debe ser capaz de resistir :

1. Presiones de surgencia de lodo y gas.
2. Presiones de inyección en el fondo de la sarta.
3. Máxima presión de superficie en la cima de la sarta.

#### **• DISEÑO POR PRESIÓN DE COLAPSO.**

La máxima carga por Colapso esta dada por el peso del lodo y cemento en el exterior de la tubería. La línea del comportamiento de los fluidos " menos " la línea de apoyo afectada por el factor de seguridad dará como resultado la línea de diseño a la presión de Colapso.

### **- DISEÑO DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO DE PRODUCCIÓN EMPLEANDO EL CRITERIO DE CARGA MÁXIMA.**

Las características del método de carga máxima cuando es aplicado a la Tubería de Revestimiento difieren ligeramente de los estándares de otros tipos de tuberías, pero se conserva la filosofía de considerar el peor caso que pudiera presentarse.

#### **• DISEÑO POR PRESIÓN INTERIOR O INTERNA.**

La Tubería de Revestimiento puede ser expuesta a las presiones del fondo del pozo ( BHP, Bottom-Hole Pressure ) en el caso de una fuga en la tubería de producción. El peor caso ocurre cuando una pequeña fuga en la tubería de producción permite la entrada de gas en el fluido empacador y emigra hacia la superficie. De cualquier forma, la máxima presión de estallamiento puede ocurrir con una BHP en la superficie actuando sobre la presión hidrostática del fluido empacador. El respaldo es proporcionado por los fluidos nativos de la formación.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

La densidad del fluido empacador necesita cierta atención. La presión en el fondo del pozo, en conjunción con la presión hidrostática del fluido empacador, pueden crear una gran carga de estallamiento en la parte inferior de la tubería de revestimiento. Por esta razón es usada una baja densidad del fluido empacador. Si se usa una densidad de 9.0 lb/gal del fluido empacador, esto cancela el 9.0 lb/gal de respaldo. La resultante es una línea vertical igual a la presión del fondo del pozo.

El factor de diseño al estallamiento para tubería de producción esta establecido como 1.0. En el caso de esperar un uso considerable, por cuestiones de reparaciones puede tomarse un factor de 1.05 - 1.1. La resultante llega a ser la línea de diseño.

### • DISEÑO POR PRESIÓN DE COLAPSO.

La línea de carga de colapso es calculada con el lodo en que es introducida la tubería y cemento en el espacio anular. No se considera respaldo cuando se usa bombeo neumático. Si no se considera lo anterior el respaldo del colapso es una columna parcial de fluido empacador. La línea de diseño es calculada con una factor de diseño de 1.0.

### • DISEÑO POR CARGA AXIAL.

Se realiza un diagrama de las cargas axiales que actúan en la tubería de revestimiento. Se considera el efecto biaxial de tensión en presión de colapso, lo cual permitirá el adecuado proceso de selección de tubería, adicionalmente se selecciona la junta adecuada.

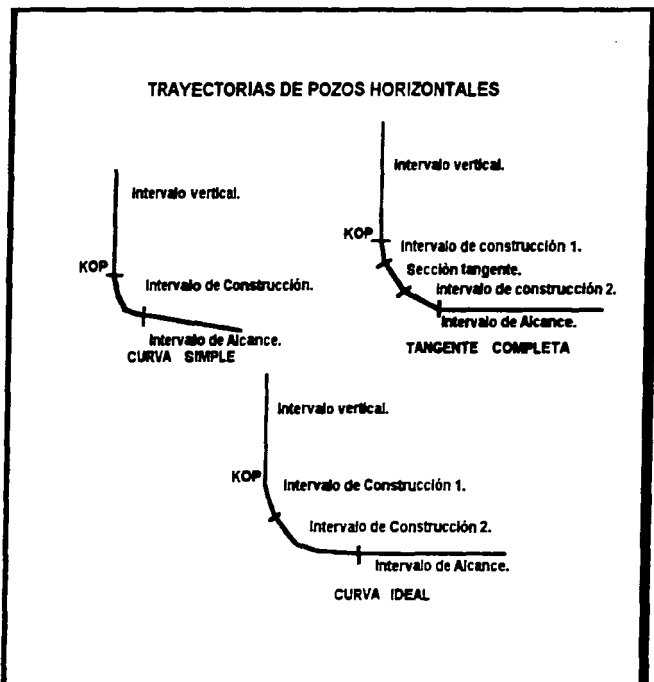
### - CARGAS ADICIONALES A CONSIDERAR PARA EL CASO DE POZOS HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO.

En un pozo horizontal o de Alcance Extendido debido a su geometría se producen diferentes cargas axiales al meter, sacar o en estado neutral de la tubería de revestimiento, por lo que es necesario considerarlas por separado.

Para poder estimar convenientemente las cargas axiales y de torque más fácilmente, la trayectoria se divide en intervalos.

Como se muestra en la Figura 21, las diferentes secciones se pueden dividir en intervalos de construcción, intervalos de alcance o tangentes e intervalos verticales.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**



**FIGURA 21. TRAYECTORIAS DE POZOS HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO MÁS COMÚNMENTE EMPLEADAS EN EL MUNDO.**

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

#### **- CARGAS Y MAGNITUD RELATIVA APLICADAS A TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO.**

Las cargas en orden de importancia con respecto a su magnitud relativa para Pozos Verticales y para Pozos Horizontales y de Alcance Extendido son las siguientes :

##### Pozos Verticales.

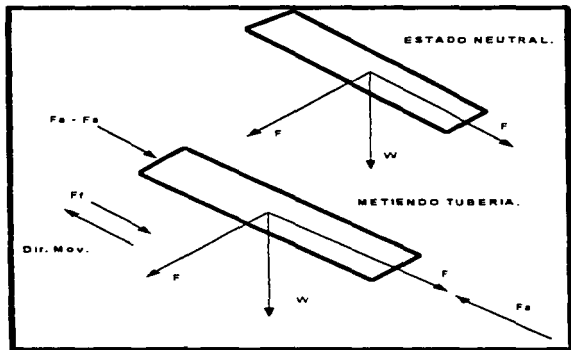
- 1) Presión interior.
- 2) Presión de colapso.
- 3) Tensión ( peso ).
- 4) Flexión.

##### Pozos Horizontales y de Alcance Extendido.

- 1) Flexión.
- 2) Tensión ( peso, fricción ).
- 3) Presión de colapso.
- 4) Presión interior.

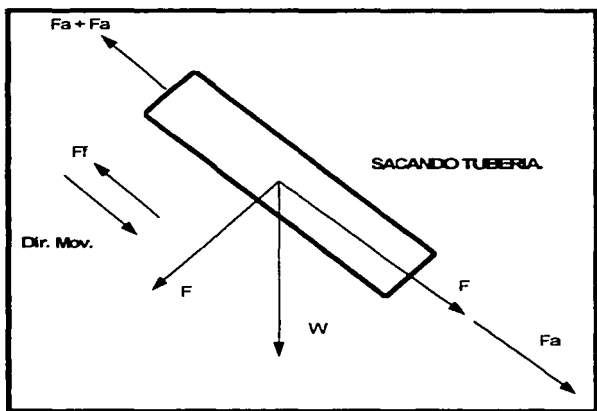
#### **- INTERVALO DE ALCANCE O SECCIÓN TANGENTE.**

Como se ilustra en las Figuras 22 y 23 las fuerzas que actúan en un segmento de tubería dentro de éste intervalo son :



**FIGURA 22. FUERZAS QUE ACTÚAN EN UN SEGMENTO DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EN ESTADO NEUTRAL Y METIENDO TUBERÍA AL AGUJERO DE POZO DE ALCANCE EXTENDIDO.**

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**



**FIGURA 23. FUERZAS QUE ACTÚAN EN UN SEGMENTO DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO AL SACAR TUBERÍA EN UN AGUJERO DE POZO DE ALCANCE EXTENDIDO.**

Peso de la sarta :

- Componente axial.
- Componente radial.

En este intervalo el incremento de tensión es estimado mediante ( la nomenclatura correspondiente a las ecuaciones siguientes se presenta conjuntamente al final de éste tercer capítulo ) :

$$dF / dL = ( W ) ( BF ) \cos \theta \pm ( F_f ) ( W ) ( BF ) \sin \theta \quad ( 36 )$$

Finalmente :

$$F = L \{ ( W ) ( BF ) \cos \theta \pm ( F_f ) ( W ) ( BF ) \sin \theta \} \quad ( 37 )$$

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

En este intervalo el ritmo de incremento de torque con respecto a la longitud es constante, en la parte superior se estima mediante la siguiente expresión :

$$M = \{ (F_f) (W) (BF) \text{ sen } \theta (L) (OD) \} / 24 \quad (38)$$

- INTERVALO DE CONSTRUCCIÓN O DE DESARROLLO DE ÁNGULO.

En la Figuras 24 y 25 se muestra un diagrama de cuerpo libre de un segmento de tubo sujeto a las cargas impuestas dentro de éste intervalo.

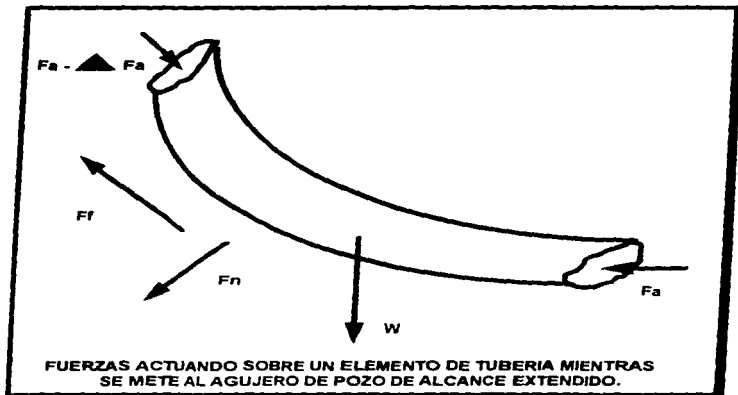


FIGURA 24. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE EN UN SEGMENTO DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO MIENTRAS SE METERE A UN AGUJERO DE POZO DE ALCANCE EXTENDIDO.



PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

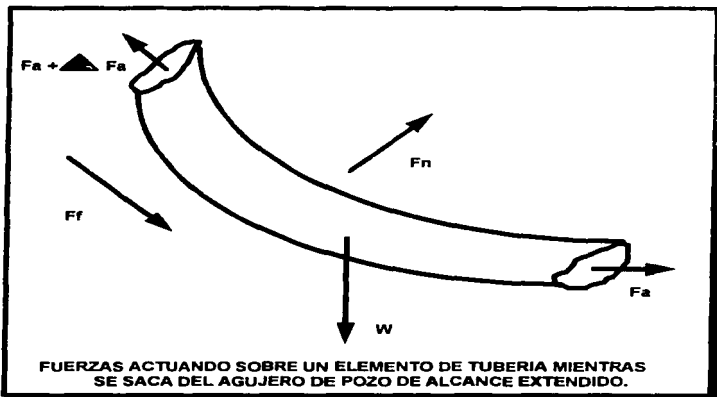


FIGURA 25. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE EN UN SEGMENTO DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO MIENTRAS SE SACA EN UN AGUJERO DE POZO DE ALCANCE EXTENDIDO.

En este intervalo la fuerza normal (  $F_n$  ) es estimada por :

$$F_n / L = \{ [ ( F_a ) ( B_L ) ] / 5730 \}^2 + U \}^{1/2} \quad (39)$$

, donde :

$$U = \{ [ ( F_a ) ( B_v ) ] / 5730 \} - W ( B_F ) \text{ sen } \theta \}^2$$

La fuerza de tensión como :

$$F_a = L ( W ( B_F ) \text{ cos } \theta \pm ( F_f ) ( F_n ) ) \quad (40)$$

El torque es estimado como :

$$dM / dL = \{ ( F_f ) ( F_n ) ( OD ) \} / 24 \quad (41)$$

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

El esfuerzo de tensión generado en este intervalo en el cuerpo de la tubería es determinado por :

$$S_b = \pm ( 244 ) ( OD ) ( B_v ) \quad ( 42 )$$

Convertido a su correspondiente en carga axial :

$$F_b = ( S_b ) ( A_p ) \quad ( 43 )$$

La carga axial en el tramo vertical es :

$$F_a = ( KOP ) ( W ) ( BF ) \quad ( 44 )$$

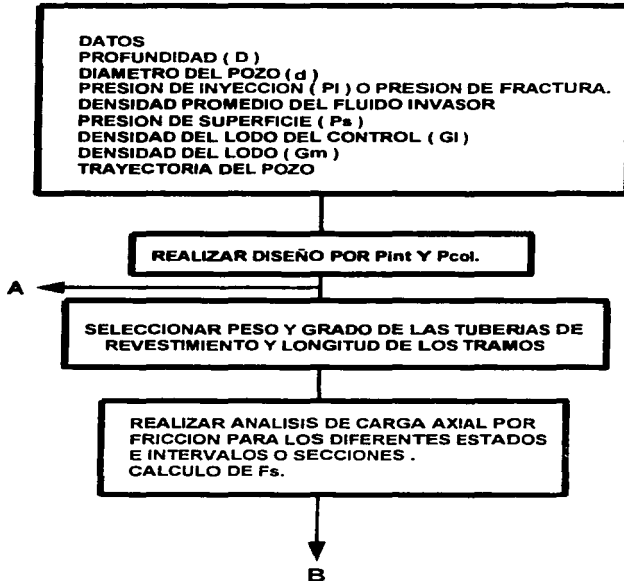
Finalmente la carga axial total es :

$$F_{a_{tot}} = \Sigma F_{a_{secciones\ rectas}} + \Sigma F_{a_{secciones\ de\ incremento}} + \Sigma F_{a_{seccion\ vertical}} \quad ( 45 )$$

#### **- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO PARA POZOS HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO.**

El procedimiento se basa en el criterio de carga máxima tomando en cuenta las condiciones antes mencionadas, ya sea tubería de revestimiento Intermedia o de Producción y el cual se ilustra en forma de Diagrama de Flujo ( Ver Figuras 26 y 27 ). Del mismo modo se presenta un ejemplo con la trayectoria del pozo Horizontal Agua Fría 801 - H de PEMEX. Ver Figuras 28 a 33.

**PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE T.R. PARA POZOS HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO.**



**FIGURA 28. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DE TUBERÍAS DE ALCANCE EXTENDIDO POR EL MÉTODO DE CARGA MÁXIMA PARTE I.**

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

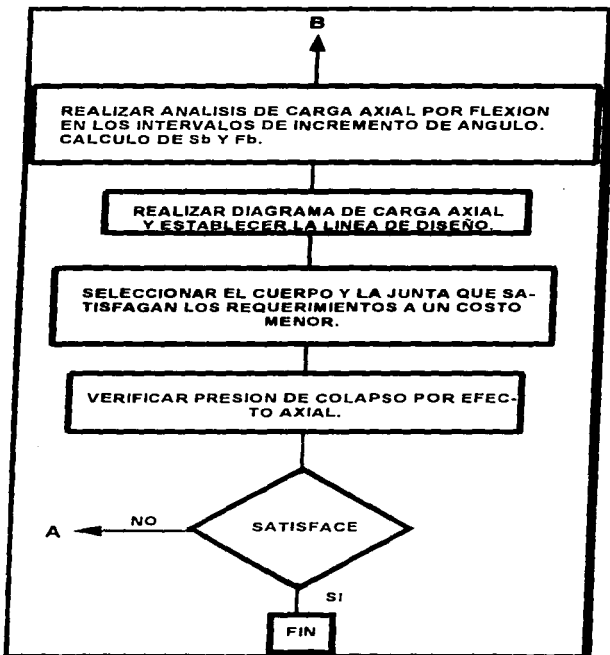
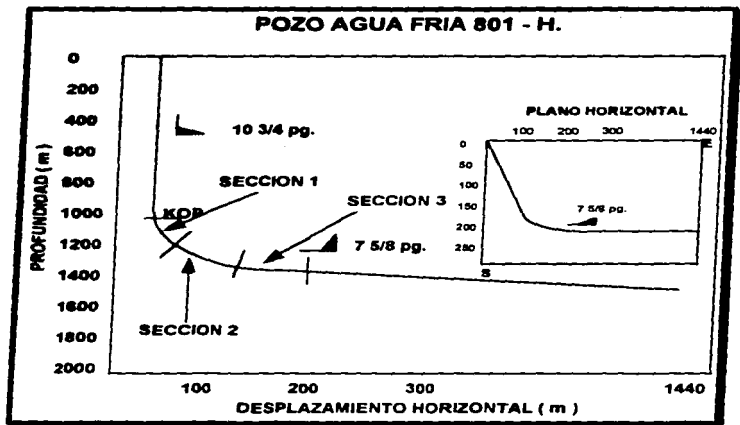


FIGURA 27. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO PARA POZOS HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO POR EL MÉTODO DE CARGA MÁXIMA. PARTE II.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**



**FIGURA 28. TRAYECTORIA DEL POZO HORIZONTAL AGUA FRIA 801 - H  
DISEÑADO Y PERFORADO POR PEMEX EN EL AÑO DE 1990.**

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

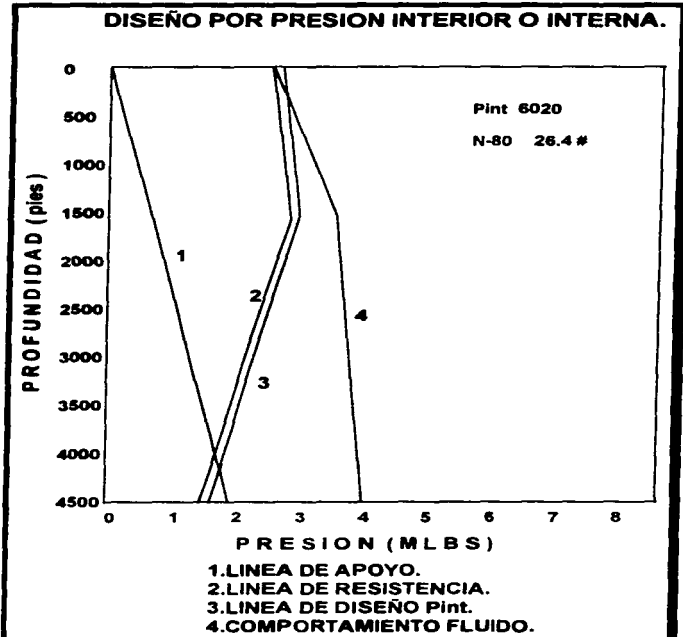
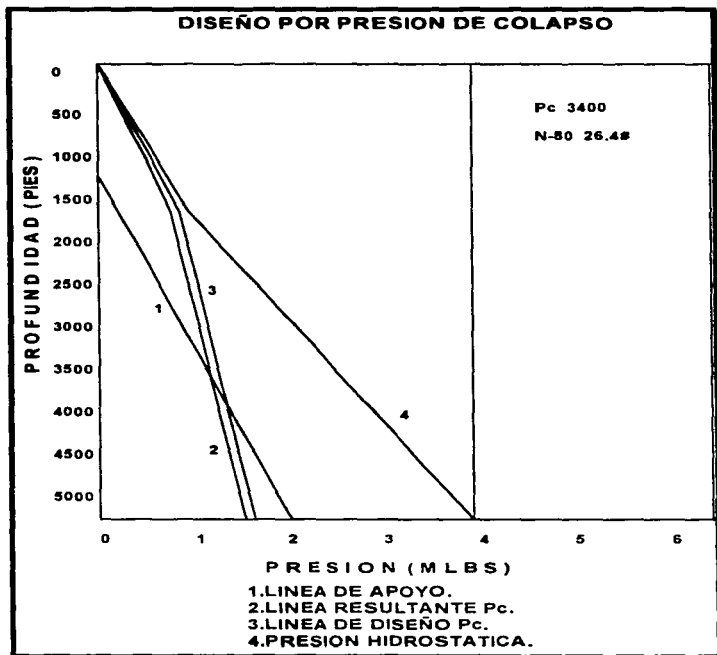


FIGURA 29. GRÁFICA DEL DISEÑO POR PRESIÓN INTERIOR PARA EL POZO HORIZONTAL AGUA FRÍA 801 - H DISEÑADO Y PERFORADO POR PEMEX EN EL AÑO DE 1990.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**



**FIGURA 30. GRAFICA DEL DISEÑO POR PRESION AL COLAPSO PARA EL POZO HORIZONTAL AGUA FRÍA 801 - H DISEÑADO Y PERFORADO POR PEMEX EN EL AÑO DE 1990.**

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

En la Figura 29 se observa respectivamente el diseño por presión interna como tubería Intermedia y de Producción debido a que la tubería de 7 5/8 pg. estaría sujeta a ambas condiciones, es decir se consideró un respaldo durante la evaluación como tubería de Producción, no se prevé el empleo de bombeo neumático.

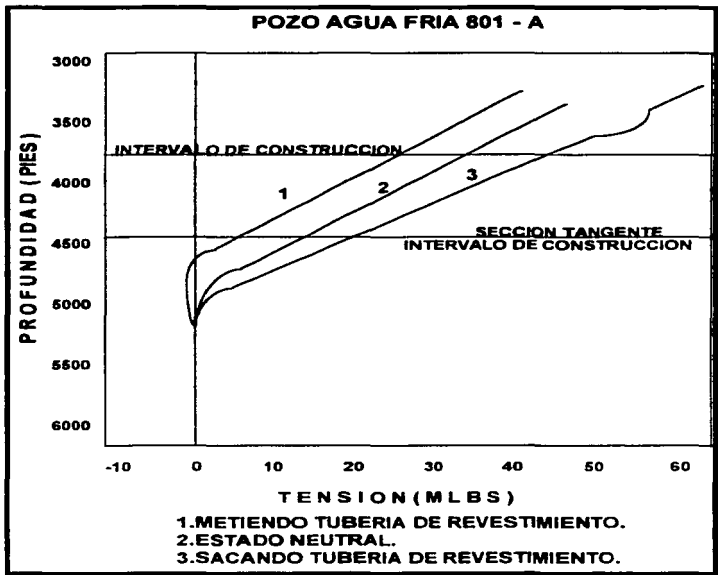


FIGURA 31. GRAFICA DEL DISEÑO POR CARGA AXIAL PARA EL POZO HORIZONTAL AGUA FRIA 801 - H DISEÑADO Y PERFORADO POR PEMEX EN EL AÑO DE 1990.



PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALGANCE EXTENDIDO

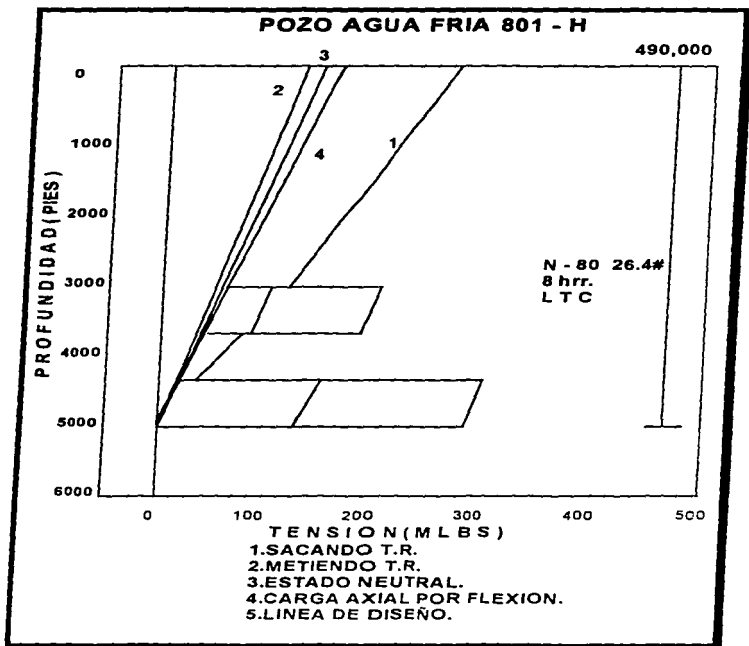


FIGURA 32. GRAFICA DEL DISEÑO POR CARGAS AXIALES PARA EL POZO HORIZONTAL AGUA FRIA 801 - H DISEÑADO Y PERFORADO POR PEMEX EN EL AÑO DE 1990.

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

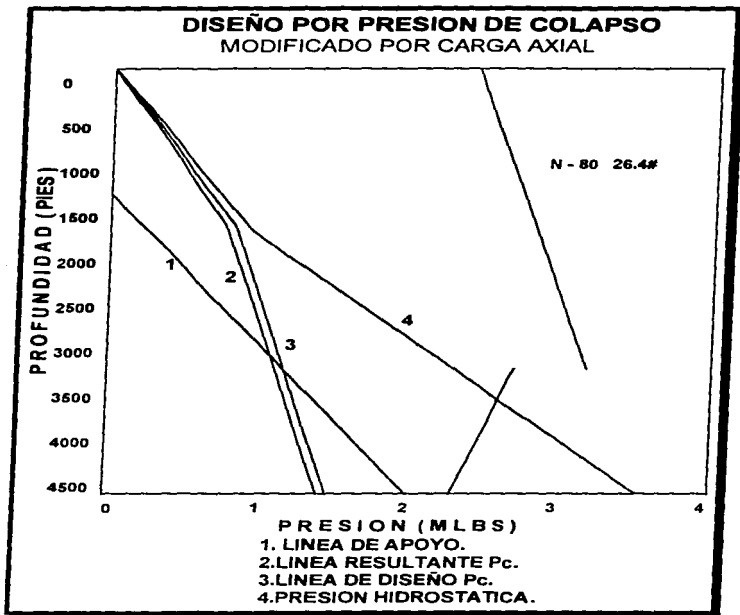


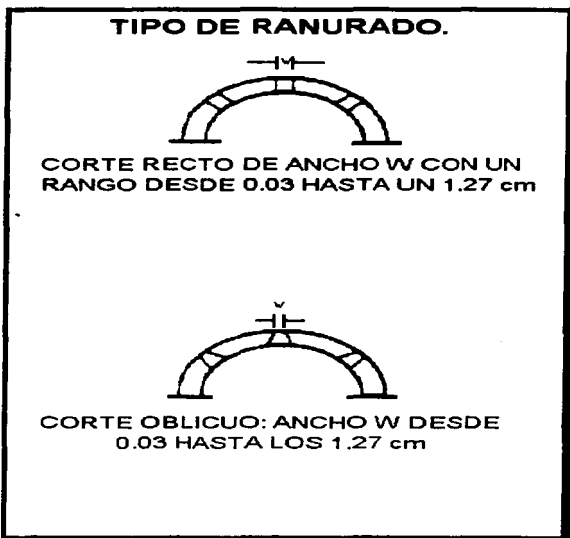
FIGURA 33. GRÁFICA DEL DISEÑO POR PRESIÓN AL COLAPSO MODIFICADO ( MODIFICADO POR CARGA AXIAL ) PARA EL POZO HORIZONTAL AGUA FRÍA 801 - H DISEÑADO Y PERFORADO POR PEMEX EN EL AÑO DE 1990.

### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

El seguimiento del procedimiento descrito permitirá la adecuada selección de la tubería de revestimiento así como la junta, al tomar en cuenta las cargas axiales por fricción y flexión que se presentan en éste tipo de pozos debido a su geometría. Es importante notar la magnitud del esfuerzo por flexión en el intervalo de construcción ( Figuras 31 y 32 ) así como la reducción de la resistencia al colapso debido a la carga axial ( Figura 33 ).

#### **- EMPLEO DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO RANURADAS.**

Cuando el tipo de terminación requiere del uso de tuberías de revestimiento cortas ranuradas, es importante que la tubería lleve ranuras tipo puente, ya que esto asegura una sección uniforme de extremo a extremo, sin distorsiones causadas por soldaduras intermedias, variaciones en su diámetro o en el espesor de pared. Al realizar la ranuración del tubo se deberá de afectar al mínimo para tratar de conservar su resistencia a la tensión. Las ranuras pueden ser rectas ( normales a la pared del tubo ) u oblicuas ( mayor abertura en la pared interior del tubo ) y la ubicación puede ser alternada, afilada o agrupada ( Figura 34 ).



**FIGURA 34. TIPO DE RANURADO EN TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO PARA POZOS HORIZONTALES Y DE ALCANCE EXTENDIDO.**

Para la cantidad óptima de ranuras con las que puede contar un tubo, se tiene una serie de fórmulas para obtener el número de ranuras por metro de tubo.

Para obtener el número de ranuras por metro de tubo se tiene la siguiente fórmula:

$$NR = N \cdot F$$

( 46 )

### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

Para el número de ranuras individuales en el caso de tubos con ranuras agrupadas se tiene :

$$S = NG \cdot NR \quad (47)$$

Para obtener el área de infiltración por metro de tubo ya sea para ranuras aisladas o agrupadas se utiliza la siguiente fórmula :

$$a = l \cdot W \cdot NR \quad (48)$$

$$a = l \cdot W \cdot S \quad (49)$$

Para la distancia entre centros de ranuras o entre centros de grupos de ranuras en el sentido circunferencial se tiene que :

$$C = ( \pi D_e ) / F \quad (50)$$

donde :

**NR** = número de ranuras por metro.

**F** = número de filas de ranuras alrededor del tubo.

**N** = número de ranuras en una sola fila por metro de tubo.

**S** = número de ranuras por metro de tubo, en el caso de tubos con ranuras agrupadas.

**NG** = número de ranuras que forman un grupo.

**a** = área de infiltración por metro de tubo en  $cm^2$ .

**W** = ancho de las ranuras en cm.

**l** = longitud de las ranuras en cm.

**C** = distancia entre centros de ranuras o centros de grupos en el sentido circunferencial del tubo en cm.

**De** = diámetro exterior del tubo en cm.

El valor de C es la distancia entre centros de ranuras para el caso de que éstas estén alineadas. Si se requiere obtener la distancia entre ranuras alternadas ésta será igual a 2C. La longitud recomendada de las ranuras es de 5.08 cm. y la distancia entre centros de ranuras en el sentido longitudinal del tubo es de 15.24 cm.

#### **- EVALUACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN LAS JUNTAS.**

A continuación se presenta un ejemplo para evaluar de manera práctica los factores de seguridad en las juntas que unen los diferentes tramos de una sarta de tubería de revestimiento para pozos de Alcance Extendido, siendo FS el factor de seguridad a emplearse en el diseño de las juntas y Ft la fuerza máxima posible

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

a ser aplicada en la junta con un factor del tanto por ciento ( % ) como valor de confianza en el material de su construcción.

#### • **JUNTAS DE LA T.R. DE 7 5/8 pg.**

Para la tubería N - 80 de 26.4 lb/pie :

Se utilizó una junta " Triple Sello " , la cual tiene una resistencia de 538,000 lbf.

Considerando el 75% de la resistencia de la junta, se tiene :

$$Ft = ( 580000 ) ( 0.75 ) = 403500 \text{ lbf.}$$

\*En superficie se tiene una tensión de 119096.9 lbf, entonces, el factor de seguridad que debe tener la junta es de :

$$FS = ( 403500 ) / ( 119096.9 ) = 3.38$$

\*En la 1a sección curva tiene una tensión máxima de 108476.5 lbf por lo tanto su factor de seguridad es :

$$FS = ( 403500 ) / ( 108476.5 ) = 3.71$$

\*En la 2a. sección de incremento, tiene una tensión máxima de 177811.7 lbf; entonces su factor de seguridad es :

$$FS = ( 403500 ) / ( 177811.7 ) = 2.27.$$

#### **3.5.NOMENCLATURA.**

Aquí se presenta la nomenclatura para todas las ecuaciones de éste capítulo exceptuando aquellas para las cuales su correspondiente nomenclatura es mostrada directamente en el texto.

Fa = Fuerza axial ( lb ).

Ff = Fuerza de fricción ( lb ).

W = Peso unitario de tubería ( lb / pie ).

BF = Factor de flotación ( adm. ).

F1 = Componente de W en el eje axial de la tubería ( lb / pie ).

F2 = Componente de W en el eje radial de la tubería ( lb / pie ).

F<sub>n</sub> = Fuerza normal o de contacto ( lb ).

dF = diferencial de fuerza axial ( lb ).

dL = diferencial de longitud ( pies ).

θ = Ángulo de inclinación de la tubería.

Ff = Factor de fricción adimensional.

L = Longitud de tubería ( pies ).

KOP = Punto de inicio de la desviación ( pies ).

OD = Diámetro exterior de la T.R. ( pg. ).

Bv = Ritmo de incremento de ángulo vertical ( grados / 100 pies ).

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

BI = Curvatura lateral (grados / 100 pies).

Sb = Esfuerzo de flexión. ( lb / pg<sup>2</sup> ).

Ap = Área de la sección transversal de la tubería ( pg<sup>2</sup> ).

## **CAPÍTULO IV.**

### **CRITERIOS PARA DETERMINAR EL MÉTODO DE PERFORACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL APAREJO DE FONDO PARA LA PERFORACIÓN DE ALCANCE EXTENDIDO.**

#### **4.1.INTRODUCCIÓN.**

La perforación de alcance extendido se ha desarrollado dentro de una forma práctica de costo-eficiencia y en este capítulo se señalarán las bases de comparación para determinar cuando puede emplearse esta técnica en función de los sistemas que actualmente están disponibles y se hablará también de los aparejos de fondo para cada uno de los métodos anteriores.

Desde años atrás se ha logrado un avance en la perforación a través de la investigación a escala mundial. Al inicio de los años 80's, algunos grupos estuvieron experimentando con este concepto. Así los primeros esfuerzos se concentraron en dos métodos para cambiar las paredes del agujero de un plano vertical a uno horizontal. En Rusia se tuvo éxito al emplear el método para perforar curvaturas que ahora conocemos como RADIO LARGO, mientras que al mismo tiempo en América se desarrolló el método de RADIO DE CURVATURA CORTA.

La investigación en los últimos años ha permitido crear una técnica para llenar la diferencia que existía entre estos métodos. Esta técnica fue la base para sistemas de perforación de RADIO MEDIO. Actualmente los sistemas disponibles son :

- **RADIO LARGO**
- **RADIO CORTO**
- **RADIO MEDIO**
- **RADIO ULTRA-CORTO**

Más adelante se describen las bases para la selección del método idóneo que se deberá llevar a cabo dependiendo de las condiciones prevaletientes. Para la selección del aparejo se deben de tomar muchos factores que intervienen cuando se determina el óptimo perfil. Dichos factores que deben de tenerse en cuenta son :

- Aplicación en el yacimiento ( extensión horizontal requerida ).
- Localización, espesor y echado de la formación.
- Azimut de la trayectoria.
- Diseño del pozo y planeación de las tuberías de revestimiento.
- Modelos de torque, arrastre y trayectoria.



### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

- Selección y diseño de los aparejos de fondo.
- Mediciones direccionales.
- Fluidos de perforación.
- Registros eléctricos.
- Selección de la terminación y cementación.
- Disparos y estimulaciones.

Basados en esta información se debe tomar la decisión del sistema que mejor se adopte a las condiciones que se tienen. La mayoría dependen del tipo de terminación la cual es función del yacimiento y de las zonas que se requieran aislar a lo largo de la trayectoria, además el costo es otro factor importante en la selección del método de terminación.

El mejor sistema de perforación horizontal es aquel que permita llegar al objetivo al menor costo total, lo cual generalmente significa llegar al objetivo con un agujero uniforme en el menor tiempo posible. En pozos horizontales se determina en función del costo por pie perforado en la sección vertical y de curvatura más, el costo por barril o pie cúbico producido en la zona de interés.

Como ya se mencionó, de acuerdo con la longitud de la trayectoria para alcanzar la horizontalidad de la perforación se cuentan con los métodos de :

- RADIO CORTO
- RADIO MEDIO
- RADIO LARGO

Desde un punto de vista práctico por lo que respecta a la perforación y al diseño del aparejo de fondo, la diferencia más importante entre la perforación de un radio largo y del radio medio es la habilidad o inhabilidad para rotar el aparejo y la sarta sin exceder los límites de resistencia de los componentes. Este factor tienen un gran impacto en casi todos los aspectos del diseño: del aparejo de fondo ( BHA ), del perfil y de otros parámetros tales como las propiedades de los lodos y el programa hidráulico.

Teniendo en cuenta el diseño y la operación, se considera que los pozos de radio largo son aquellos donde la rotación de la sarta es factible en toda la perforación.

En los pozos de radio medio en determinadas etapas no es posible rotar el aparejo de fondo( en índices de construcción mayores de  $20^{\circ}$  / 100 pies ).

Para la planeación de un pozo de radio largo, medio y corto se deben de determinar los siguientes aspectos:

- El punto de inicio de la desviación KOP basado en el ángulo de construcción.
- El ángulo y longitud de la tangente basado en el ritmo de construcción mínimo y máximo.
- La óptima profundidad del objetivo ( yacimiento ).
- La longitud, dirección e inclinación de la sección horizontal.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

En todos los casos el diseño final de la curva de construcción debe procurar:

- Evitar las formaciones problemáticas.
- Minimizar el desplazamiento.
- Disminuir la longitud de la curva de construcción.
- Proporcionar un intervalo de ajuste para el manejo de otras curvas que no sea la ideal.
- Llegar al objetivo dentro de los límites de tolerancia.
- Proporcionar una curva que permita la longitud horizontal planeada.
- Proporcionar un agujero que permita el empleo de todas las herramientas y equipo de producción.

Los tipos de curvas y los factores que intervienen en la determinación del perfil de cada uno de los métodos de perforación se mencionarán más adelante.

### **4.2.MÉTODO DE RADIO LARGO.**

En general, los radios largos pueden ser definidos como un agujero con al menos una sección en la cual la inclinación del pozo se incrementa de 1 a 6° / 100 pies.

El método de radio largo ofrece limitados usos para su desarrollo, ya que a pesar de que numerosos agujeros de radio largo han sido perforados con el propósito de investigar y determinar la extensión del yacimiento, esta técnica es más empleada cuando se requiere alcanzar objetivos alejados de la localización superficial, tales como plataformas de perforación o costa afuera, localizaciones remotas y/o abruptas, así como inaccesibles o yacimientos ubicados bajo ciudades, además donde se tengan problemas con conificaciones de agua, bajas permeabilidades y desarrollos de gas entre otros.

Estos pozos son perforados con equipo de perforación y aparejos de fondo convencionales, además tiene la flexibilidad de perforar con amplios rangos de tamaños de agujeros y de herramientas.

Los métodos para perforar radios largos son más flexibles que los otros sistemas, debido a que se requiere poca preparación del pozo. Por el contrario la perforación con radios medios y cortos debe desarrollarse después de que el pozo vertical es llevado a cabo.

En la técnica de radio largo el punto de separación o de inicio de la desviación ( KOP ) se encuentra cerca de la superficie para permitir que el objetivo sea alcanzado a la profundidad correcta y como la longitud de la sección de construcción es grande, se incrementa la cantidad de formación ha perforar y por lo tanto se requieren varios tamaños de agujeros y TR's que deben resistir los esfuerzos debido a la curvatura antes de que el pozo alcance la horizontal. Tiene la ventaja de propiciar leves patas de perro, además como, la separación del punto de inicio de la desviación ( KOP ) al objetivo es grande, puede reducirse la longitud de sección horizontal a perforarse, debido al torque y arrastre de la tubería. Se ha sugerido que al 50% de la reducción en el peso de la sarta lateral

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

sin reducción en los esfuerzos axiales o torsionales, resultaría en igual o mayor porcentaje de la longitud horizontal. Aunque con esta técnica se obtienen las mayores longitudes horizontales.

El control de la dirección en pozos de radio largo se puede llevar a cabo por medio de herramientas de medición magnéticas o giroscópicas y de medición mientras se perfora ( MWD ). Las herramientas de orientación giroscópicas generalmente se limitan a la obtención de datos de la sección horizontal del pozo. Otra de las ventajas de este método es que se pueden llevar a cabo terminaciones con grandes extensiones de tuberías cortas , con empacador, con tuberías cortas preempacadas, entubada y cementada, en agujero abierto y terminaciones selectivas. También se pueden registrar fácilmente en agujero abierto usando la técnica de transportación con tubería de perforación y los registros de producción que utilizan tubería flexible equipada con cable conductor. Con este método se puede emplear todas las técnicas de producción artificial. Una de las grandes desventajas de este sistema, es que debido a la gran longitud de la sección de curvatura ( desde el punto de inicio de la desviación al objetivo ) se tienen que atravesar gran cantidad de formación sin aislarla esto puede ocasionar problemas en formaciones inestables o problemáticas.

### **4.3.MÉTODO DE RADIO MEDIO.**

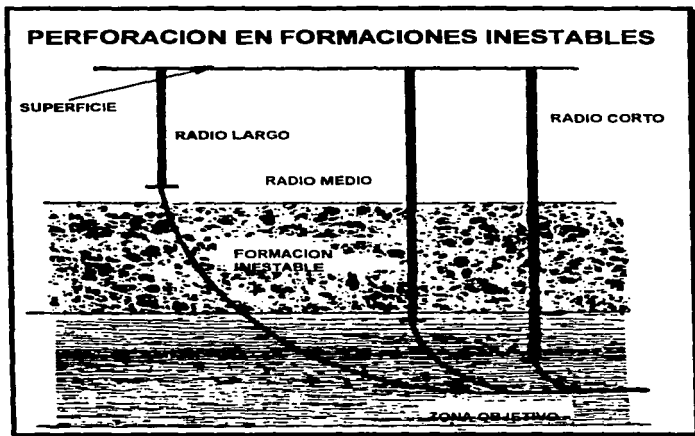
La perforación de radio medio se lleva a cabo conforme la tubería lo permita, dadas las limitaciones impuestas por esfuerzos combinados de pandeo y torsión en la sarta de perforación. Esto equivale a una máxima de pala de perro de 20° / 100 pies cuando se perfora con rotaria, y arriba de 30° / 100 pies de un modo orientado. La tolerancia de las herramientas en las tuberías de revestimiento también afectan estos límites. Ambas secciones, de curvatura y horizontal son generalmente perforadas con herramientas modificadas, las cuales están configuradas para emplearse con aparejos de campo estándar, creando un paquete que puede ser empleado en equipos convencionales con modificaciones mínimas, por ejemplo, una unión giratoria.

La naturaleza del yacimiento tiene gran efecto sobre este método, pero mucho menos que con el de radio largo. Los sistemas de radio medio pueden ser más económicos cuando se emplean en yacimientos fracturados ( aunque las pérdidas de circulación pueden complicar las operaciones de perforación ), en problemas de conificación de agua y gas, en yacimientos fracturados verticalmente, de baja permeabilidad, en yacimientos con poca energía y en formaciones de poco espesor.

Las formaciones inestables o problemáticas ocasionan impredecibles variaciones en el índice de curvatura y en la veracidad del objetivo, esta situación es uno de los factores que más influyen en determinar cual técnica debe de emplearse. La amplia profundidad vertical que se necesita para alcanzar el yacimiento en los pozos de radio medio es una de las más fuertes ventajas del sistema. Con este método, muchas zonas problemáticas pueden ser perforadas en la sección

### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

vertical y ser revestidas antes de perforar la zona crítica de curvatura consiguiendo así la horizontal del pozo. La longitud más corta del agujero curvo puede salvar tiempo, problemas potenciales, esto también incrementa la profundidad total alcanzada antes de que los altos costos de la sección curva del agujero sean gastados. Como se puede observar en la Figura 35, se observa el punto de inicio de desvío para cada método hablado, así como sus inclinaciones con respecto a la vertical y el alcance a la zona de objetivo. Cada uno de estos métodos están en función de las formaciones inestables que pudiera atravesar la trayectoria que sigue la barrena.



**FIGURA 35. MUESTRA LOS MÉTODOS Y LOS ALCANCES QUE EXISTEN PARA CADA SISTEMA COMO SE PUEDE OBSERVAR; LA PROFUNDIDAD DESDE LA SUPERFICIE HASTA EL KOP Y EL ÁNGULO DE INCLINACIÓN PARA CADA RADIO.**

El perfil de un pozo de radio medio indica que se requiere menos longitud a perforar y mucho menos desplazamiento horizontal para alcanzar el objetivo, además de tener menos agujero descubierto en comparación con los pozos de

#### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

radio largo. Una curva típica de radio medio requiere menos de 500 pies de separación, mientras que una curva de radio largo requiere alrededor de 1,400 pies. Debido a la corta longitud de construcción se reduce el torque y arrastre, además son más consistentes sus ritmos de construcción, aunque se tienen patas de perro más severas que los de radio largo. Además como el punto de inicio de la desviación ( KOP ) esta más cerca del objetivo, en la mayoría de los casos reducirá la inexactitud en la profundidad del objetivo. Para asegurar se incluye una sección de ajuste en el plan del pozo de radio medio, referida como una tangente, que generalmente se coloca de 45 a 75° de inclinación después de que 70 a 85 % de la profundidad del objetivo se ha alcanzado. Esto facilita cualquier cambio en la profundidad planeada del objetivo debido a la formación, yacimiento o cualquier otro factor.

Los agujeros de radio medio pueden ser perforados en pozos nuevos o existentes, en pozos nuevos, el procedimiento es similar a los pozos de radio largo. en pozos existentes, se requiere de varias etapas de preparación y caen en dos grandes categorías .

- a) Una TR colocada arriba de donde se planea el punto de inicio de la desviación, con terminación en agujero descubierto.
- b) En pozos con TR en el punto de inicio de la desviación.

Las mediciones para determinar la trayectoria del pozo se pueden llevar a cabo con las mismas técnicas que para radio largo. Otras de las ventajas de este método es que se pueden llevar a cabo las mismas terminaciones que las de radio largo y también pueden ser registrado.

Así mismo, se dispone de la herramienta para una gran variedad de tamaños de agujeros lograndose así la instalación de la mayoría de los sistemas de producción artificial.

Mientras que estos altos costos son inaceptables para un pozo de radio largo, el corto tiempo requerido para completar el mismo proyecto usando tecnología de radio medio compensan los altos costos del sistema.

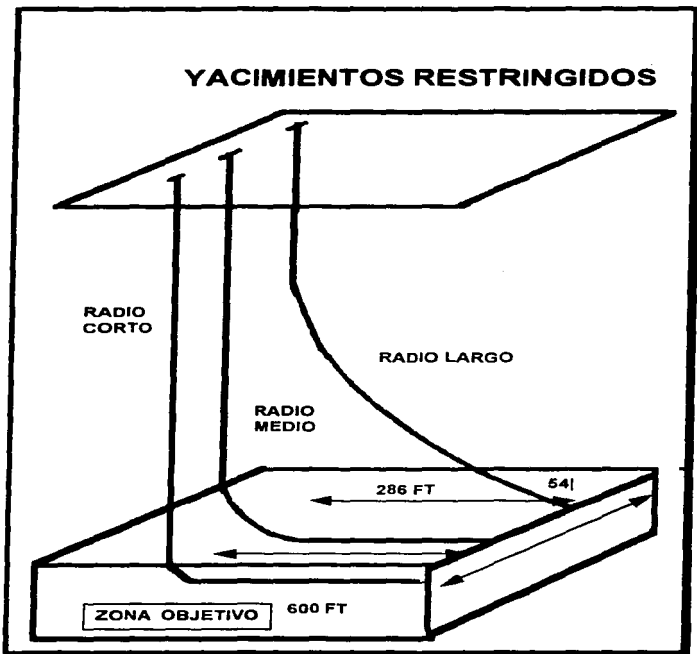
En general los sistemas de radio medio ofrecen numerosas ventajas sobre la perforación de radios largos con ningún o pequeños costos adicionales, en la Combinando de aparejos, el incremento de costo de un sistema de perforación de radio medio podría ser minimizado, ya que a diferencia de los pozos de radio largo que requieren de una o dos herramientas especiales, con el de radio medio se requiere de más de cinco en un proyecto simple.

Las desventajas de la perforación de radio medio son relativamente pocas, una de estas desventajas son: altos ritmos de inclinación, los momentos de pandeo a través de las juntas de las herramientas, los esfuerzos en el cuerpo del tubo, la fuerza lateral de la barrena que es causada por la gran curvatura en agujeros ocasionando grandes diámetros y posibles desviaciones de la barrena y otra desventaja que se tiene con este método es la limitación de la sección horizontal.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

### **4.4.MÉTODO DE RADIO CORTO.**

La perforación horizontal de radio corto ha sido practicada tanto como la perforación de radio largo. Por definición, abarca un amplio rango de índices de construcción fuera de los otros sistemas, empleando herramientas articuladas o flexibles para perforar patas de perro del rango de 60 a 120° / 100 pies. Esta técnica es empleada en yacimientos de tamaño limitado, ya que el pozo puede ser cambiado a horizontal y terminarse con menos desplazamiento del requerido por 45° de un pozo de radio largo. También se aplica para yacimientos con baja permeabilidad, naturalmente fracturados y para formaciones irregulares. Ver Figura 36, en esta se observa las trayectorias que sigue cada curva radio corto, radio largo y radio medio, en la cual se ve que cada método llega con diferente ángulo de inclinación, el punto KOP es diferente para cada método, y la profundidad vertical depende de cada método.



**FIGURA 36. EN UN PLANO TRIDIMENSIONAL SE VERA ASÍ LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CADA UNO DE LOS RADIOS, SE OBSERVA CIERTO KOP PARA CADA CURVA, DIFERENTE ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LLEGADA PARA CADA TRAYECTORIA.**

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

Los pozos de radio corto pueden ser perforados en agujeros nuevos o existentes, las herramientas de menor tamaño para radio corto trabajan en agujeros entubados de 5 1/2", mientras que las más grandes trabajan en TR's de 7" o mayores.

Además con esta técnica se tiene la ventaja de que se pueden perforar varias secciones horizontales en un mismo pozo, cambiando la orientación de la herramienta.

El poco desplazamiento y la limitada profundidad requerida para pozos de radio corto lo hacen más apropiado en formaciones con cimas problemáticas causadas por la litología o yacimiento. Así, en un pozo de radio corto la zona de problemas puede ser entubada antes de que el agujero crítico se inicie a perforar. En los yacimientos de gas, el acercamiento de radio corto reduce el riesgo de proyectar el casquete de fondo, ya que se puede perforar verticalmente a través del casquete de gas, y cementar una TR antes de perforar la zona objetivo.

Como regla de dedo, a mayor curvatura del agujero mayor control y predicción del radio tiene que llevarse. Pero tiene la ventaja de que se requiere menos mediciones para alcanzar la horizontal.

El sistema usado para perforar la mayoría de los recientes pozos de radio corto emplean herramientas de deflexión controlada con ángulos de construcción predecibles, de disparos simples, de disparos múltiples y orientación giroscópica en el punto de inicio de la desviación.

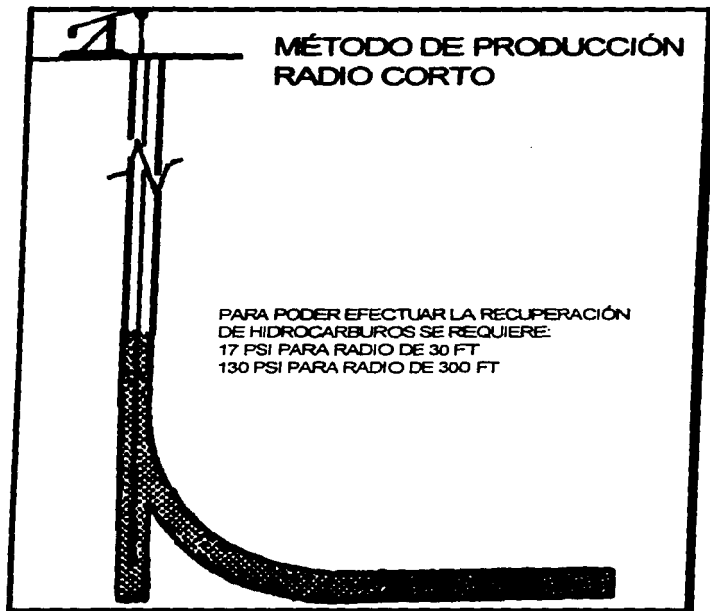
La limitada profundidad vertical ( TV ) requerida para la curva de radio corto permite que equipos de bombeo sean colocados en la parte inferior de un agujero vertical cercano a la zona de producción, sin pandeo o deterioro de las varillas de bombeo. Esta técnica se emplea en yacimientos con presiones tan bajas como 18 psi las cuales pueden llevar los fluidos producidos arriba del punto de inicio de la desviación en agujeros de radio corto, contrapuesto a las 130 psi de energía requeridos en yacimientos con radio medio como se observa en la Figura 37.

La perforación de radio corto tiene algunas desventajas, las herramientas son menos vigorosas que las de otros sistemas, y no están completamente estandarizadas por el API. El manejo de estas herramientas puede ser lenta y difícil con equipos de perforación. Pero en contra parte, con esta técnica se pueden emplear equipos de terminación.

Comúnmente, las herramientas de radio corto son operadas con la aplicación de torque desde la superficie lo cual limita el torque total y caballaje disponible en la cara de la barrena. Con esta tecnología el tamaño del agujero es la mayor limitación del sistema.



PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.



**FIGURA 37. LA PROFUNDIDAD VERTICAL ES IMPORTANTE PARA INSTALAR ADECUADAMENTE LOS SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN, AQUI SE OBSERVA LA ENERGÍA NECESARIA PARA PODER LLEVAR LOS FLUIDOS A LA SUPERFICIE.**

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

### **4.5.MÉTODO DE RADIO ULTRA-CORTO.**

El método más nuevo de perforación horizontal es el sistema de radio ultra-corto, este método utiliza fluido a alta presión para perforar la sección horizontal y con un radio que puede cambiarse de pulgadas a pies.

En términos limitados, puede ser definido como un sistema que virtualmente no tiene sección de curvatura terminando con su sección horizontal. Este sistema emplea equipo especializado y la preparación del pozo que se requiere depende de la configuración ( agujero abierto ó entubado ).

Este sistema se emplea para formaciones suaves con fácil penetración tales como arenas, y es factible para proyectos de soluciones minerales y limpieza de acuíferos. La estabilidad e integridad del agujero son las principales preocupaciones de éste método. El tamaño del agujero varía de 2 a 6 pulgadas que es función de la formación, de los equipos de inyección empleados, y del fluido bombeado mientras que la longitud horizontal se limita a unas decenas de metros.

Este sistema usa herramientas y procedimientos no comunes en los otros métodos de perforación ya que el caballaje hidráulico suministra la energía para perforar en vez de caballos de fuerza en la cara de la barrena.

Con lo anterior se puede tener un criterio para la determinar el método de perforación a emplear; en la siguiente tabla se da una síntesis de lo anteriormente expuesto.

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

**-CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA DETERMINAR EL METODO DE PERFORACIÓN.**

	LARGO	MEDIO	CORTO
<b>APLICACIONES.</b>			
CONIFICACIÓN DE AGUA.	X	X	-
YAC. NAT. FRACTURADOS.	-	X	X
BAJA PERMEABILIDAD.	X	X	X
CONIFICACIÓN DE GAS.	-	X	X
YAC. BAJA ENERGIA.	-	X	X
FORMACIONES IRREGULARES.	-	X	X
LARGAS EXTENSIONES.	X	X	-
DESARROLLO DE GAS.	X	X	-
<b>TECNICAS DE PERFORACIÓN.</b>			
CONVENCIONAL.	X	X	-
DIRIGIDO.	X	X	X
<b>TAMAÑOS DE AGUJEROS ( PG ).</b>			
MINIMO.	5 7/8	4 1/2	4 1/2
MAXIMO.	26	12 1/4	6
<b>RITMO DE CONSTRUCCIÓN (°/100' , °/1'/100').</b>			
MINIMO.	1	8	1
MAXIMO.	6	30	3.5
<b>EQUIPO DE PERFORACIÓN.</b>			
CONVENCIONAL.	X	X	-
MODIFICADO.	-	X	X
<b>TIPO DE MEDICIONES.</b>			
DISPAROS SIMPLES.	X	X	X
DISPAROS MULTIPLES.	X	X	X
HERRAMIENTAS GUIAS.	X	X	-
HERRAMIENTAS GUIAS FLEXIBLES.	-	-	X
MWD.	-	-	X
ORIENTACIÓN GIROSCOPICA.	X	X	X
<b>TIPOS DE TERMINACION.</b>			
AGUJERO ABIERTO.	X	X	X
T.R CORTA RANURADA.	X	X	X
T.R CORTA CON EMPAQUE.	X	X	X
T.R. CORTA PRE-EMPACADA.	X	X	-
CEDAZO.	X	X	-
ENTUBADA Y CEMENTADA.	X	X	-
<b>EQUIPO DE PRODUCCIÓN ARTIFICIAL.</b>			
TODOS.	X	-	-

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

### **4.6. APAREJOS DE PERFORACIÓN.**

El diseño de los aparatos de fondo tiene como finalidad guiar a la barrena a la horizontal y mantener el ángulo por cientos de metros.

En las extensas zonas horizontales, el ángulo de construcción tienden a producir altos torques y cargas de arrastre en la sarta. En un buen diseño de sarta se deben controlar los incrementos de las cargas axiales y torsionales, así como los problemas inherentes al diseño de los aparatos de fondo ( BHA ).

Cuando se diseña una sarta para pozos horizontales debe de tenerse en cuenta:

1. Que los altos ritmos de construcción y las largas secciones horizontales producen cargas torsionales que pueden exceder rápidamente los límites de operación de la tubería.
2. La necesidad para transmitir cargas axiales a la barrena en la sección horizontal, que generalmente está sujeta a la tubería pesada y en algunos casos a la tubería para cargas compresivas.
3. La necesidad de tuberías más pesadas en la sección superior del agujero ( vertical ), que venza los efectos axiales de fricción cuando se viaja en el agujero, además de dar el adecuado peso a la barrena mientras se perfora.

El diseño de la sarta para vencer estos problemas requiere, del adecuado cálculo de las cargas de tensión, compresión y torsión en cualquier punto a lo largo de la misma, con esto se logra :

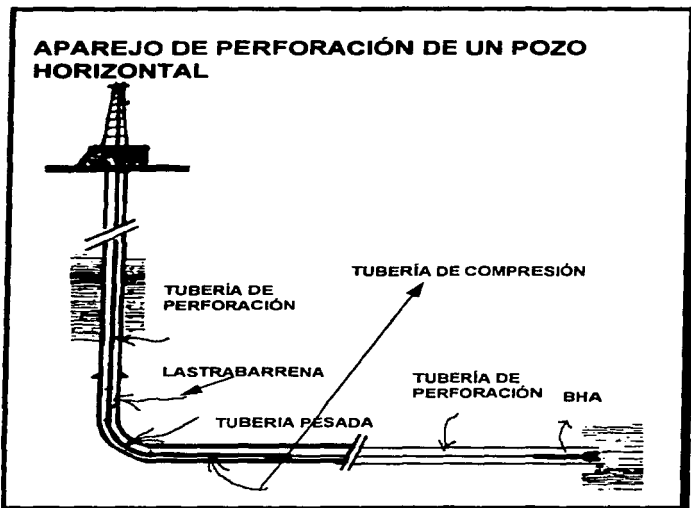
- Colocar los componentes tubulares en una sarta de tal manera que no estén sujetos a cargas que excedan sus limitaciones de diseño dentro de cada sección.
- Colocar los componentes adecuados en la parte compresiva de la sarta que transmitan apropiadamente las cargas axiales ( peso sobre la barrena ) sin pandeo.
- La selección pertinente de un equipo con suficiente capacidad para rotar ó levantar la sarta.

En pozos verticales los lastrarbarrenas se emplean cerca del fondo de una sarta de perforación convencional para dar peso a la barrena ( WOB ) y para asegurar que la tubería de arriba de los mismos permanezca en tensión. La tubería extrapesada que se emplea en la sarta de perforación, da peso adicional y además aísla a la tubería de cargas compresivas.

En pozos horizontales, el colocar los lastrarbarrenas cerca de la barrena no aumenta el peso, pero si incrementan el torque, arrastre y las posibilidades de un atrapamiento . Por esta razón el único lastrarbarrena que se debe colocar en esta sección, es el antimagnético para aislar los instrumentos de medición de las interferencias magnéticas. El principal componente para el peso sobre barrena ( WOB ) se tiene que colocar cerca o en la sección vertical en la sarta. Como resultado se tiene que la tubería que se encuentra por debajo de esta sección estará sujeta a cargas de compresión a esta configuración se le conoce como " sarta invertida ".

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

La tubería extrapesada ( TPHW, cuyas siglas al inglés significan " T.P. Heavy Height " ) se coloca desde el punto de inicio de la desviación hasta la sección horizontal, esta tubería se emplea en esta área para eliminar el pandeo, ya que se ha comprobado que la tubería de perforación no es apropiada para manejar cargas axiales en bajos ángulos ( Ver Figura 38 ).



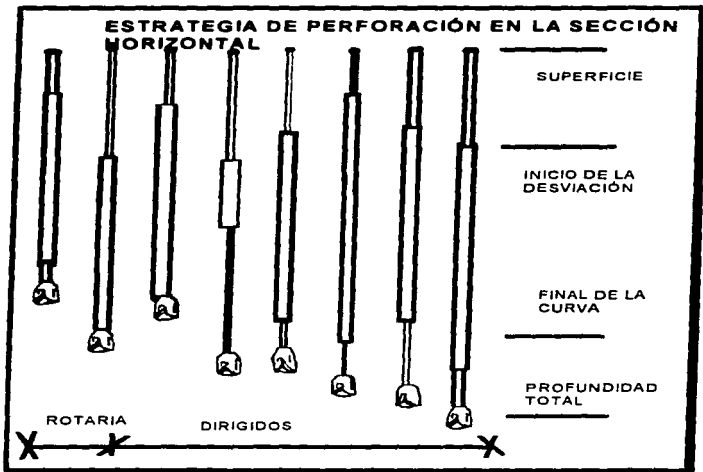
**FIGURA 38. EN ESTA FIGURA SE OBSERVA LAS DIFERENTES SECCIONES LA VERTICAL, LA HORIZONTAL Y LA DE DESVIACIÓN. EN LA CUAL SE PUEDE APRECIAR TAMBIÉN EL TIPO DE HERRAMIENTA RECOMENDABLE PARA CADA SECCIÓN.**

La consideración más importante en la selección de los componentes del aparato para la sección horizontal es que se pueda transmitir con seguridad el peso sobre

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

la barrena ( WOB ) de la porción superior del conjunto a través de la sección de construcción hasta la sección horizontal, mientras se disminuye el peso de la sarta y el efecto de levantar grandes cargas.

En secciones horizontales cortas, la tubería pesada es la mejor elección porque esta diseñada para trabajar en compresión y es capaz de transmitir grandes cargas axiales sin pandeo. La perforación de la selección horizontal puede verse afectada por el aumento de la carga que se tiene que levantar al emplear mayor cantidad de tubería pesada, razón por la cual se recomienda el uso de tubería de perforación estándar en determinadas secciones como una medida para aminorar la carga a levantar ( Ver Figura 39 ).



**FIGURA 39. EN SECCIONES HORIZONTALES LA TUBERÍA CORTA ES LA MEJOR OPCIÓN PORQUE ESTÁ DISEÑADA PARA TRABAJAR EN COMPRESIÓN. ESTO CON LA FINALIDAD DE AMINORAR LA CARGA A LEVANTAR.**

#### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

Conforme se avanza en la sección horizontal, el arrastre de la sarta se incrementan en forma significativa y disminuye la tensión proporcionalmente presentandose problemas en la transmisión de peso a la barrena.

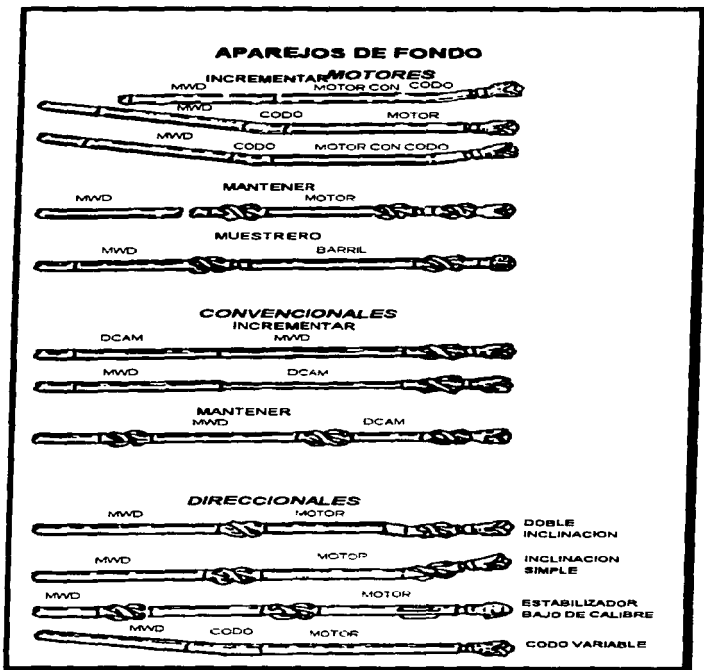
Estas irregularidades en la transmisión de peso pueden causar que el motor de desplazamiento positivo ( PDM, cuyas siglas al inglés significan " Positive Displacement Motor " ) produzca altos torques instantáneos no esperados en la salida que afectan a la barrena y así causar una prematura falla en la barrena o en el motor ( PDM ).

#### **4.7. APAREJOS DE RADIO LARGO.**

La meta de la mayoría de los pozos horizontales es perforar una sección lateral de una manera económica, la cual requiere del diseño de la sección de construcción que llegue al objetivo sin cambios del aparejo de fondo ( BHA ), de un equipo que pueda manejar las cargas de arrastre y torque que provienen de la sarta en el agujero horizontal.

Los pozos de radio largo pueden ser perforados con aparejos convencionales ó con motores direccionables y esta sección de construcción puede ser perforado por varios métodos. El pozo puede desviarse empleando un motor de fondo, el cual puede usarse en toda la sección, o con un aparejo convencional. Si este último se emplea, el motor solo se usará en ciertos intervalos para guiar el pozo o compensar la dirección esperada ( Ver Figura 40 ).

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALGANCE EXTENDIDO.**



**FIGURA 40. AQUI SE MUESTRAN LOS DIFERENTES APAREJOS DE FONDO DISPONIBLES CON LOS QUE SE CUENTAN PARA EL RITMO DE INCLINACION EN LA SECCION DE DESVIO.**



#### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

Cuando se emplean los aparejos de fondo para radio largo, el costo y la eficiencia del motor deben ser comparados con el aparejo convencional, debido a que el paquete de barrena pueden ser compensados con el incremento del ritmo de perforación.

Conforme la curvatura del radio largo se acerca al objetivo y la inclinación final se alcanza, los aparejos para construir deben ser reemplazados por un motor o por un aparejo para mantener el ángulo. De nuevo, el costo y beneficio de ambos sistemas deberán ser comparados antes de que se tome la decisión final. Al menos de que la sección horizontal caiga en una formación que cause una tendencia de desviación, el motor guía deberá emplearse.

Cualquier decremento que ocurriera en el índice de construcción, causado por la extensión del agujero o por desfavorable y/o inesperados cambios en las condiciones de perforación ( echados de las formaciones ), el operador tiene un margen para la seguridad de la construcción por si mismo de 33 % dentro del aparejo de fondo. Un inesperado decremento en el índice de construcción puede compensarse con la disminución del tiempo de rotación, recíprocamente, si el aparejo incrementa el índice de construcción más de lo esperado, éste se puede disminuir incrementando el tiempo de rotación.

En la sección horizontal, los aparejos de fondo deberán ser configurados para minimizar el arrastre y peso mientras se suministren amplios esfuerzos que permitan tratar con seguridad cualquier problema en el pozo. Si se emplea tubería de perforación en la sección horizontal, deberá ponerse atención a las cargas axiales y de pandeo. El pandeo no solo incrementa el arrastre y el torque, sino también, desgasta la tubería rápidamente si hay contacto con las paredes del pozo. El grado de éxito económico de un pozo en la sección horizontal es directamente proporcional al aumento de tiempo que se puede permanecer en la zona objetivo. Los motores direccionables de desplazamiento positivo ( PDM ) hacen este control más accesible.

En ocasiones, la planeación del pozo en la zona horizontal requiere de una gran flexibilidad y adaptabilidad del aparejo de fondo. por ejemplo :

- Cuando un pozo intersecta varias zonas de interés, esto es, cuando el ensamble requiere de incrementar o de disminuir el ángulo para re-entrar a una zona después de un a falla.
- Cuando se tiene que seguir a través de una zona de echados erráticos.
- Cuando es importante tener la habilidad para adaptarse a inesperados cambios en la litología .

En cada uno de esos tres casos, el grado de flexibilidad y adaptabilidad que suministren los aparejos es crítico.

En esta sección horizontal, los aparejos de fondo deberán ser configurados para minimizar el arrastre y peso mientras se suministren amplios esfuerzos que permitan tratar con seguridad cualquier problema en el pozo. Si se emplea tubería de perforación en la sección horizontal, deberá ponerse atención a las cargas

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

axiales y de pandeo. El pandeo no solo incrementa el arrastre y el torque, sino también, la desgasta rápidamente si hay contacto con las paredes del pozo.

El control de la dirección en pozos de radio largo se puede llevar a cabo por varios métodos. Las herramientas orientadoras o una de medición mientras se perfora ( MWD ) ofrecen altas eficiencia en la orientación del motor. En bajos ángulos, las mediciones con disparos simples pueden ofrecer resultados aceptables; sin embargo, cuando la longitud de la curva y el arrastre de la tubería se incrementa la validez de este método disminuye.

En secciones de agujero curvo u horizontal que se perfora con rotaria, las herramientas de disparo simple es una buena alternativa.

La tecnología convencional limita el uso de herramientas giroscópicas, magnéticas que se usan en agujeros horizontales para la medición y orientación de la cara de la herramienta. Estas herramientas solo se emplean cerca de la zapata o en agujeros entubados, debido a las largas longitudes de desplazamiento de los pozos de radio largo, el método de medición mientras se perfora ofrece la mayor eficiencia en todos los proyectos.

Si este tipo de pozos requiere de métodos de producción artificial, varillas de succión, otras herramientas de terminación que pueden ser colocadas en la porción de alto ángulo del agujero. Inversamente, colocando el equipo de bombeo neumático en la sección de ángulo bajo podría comprometer la producción si la presión de formación es limitada para mover el fluido producido hasta el equipo de bombeo.

### **4.8. APAREJOS DE RADIO MEDIO.**

La perforación de pozos de radio medio se puede llevar a cabo tanto en pozos nuevos como en pozo ya existentes ( re-entradas ), en pozos nuevos, se requiere que el pozo sea profundizado al punto de inicio de la desviación ( KOP ), pero si ya se revasó la profundidad programada del punto de inicio, entonces se debe colocar un tapón de cemento para reducir la profundidad del pozo al punto de inicio de la desviación. Este tapón de desvío debe tener la resistencia para no lavarse o dañarse, de lo contrario la re-entrada en la desviación puede ser difícil o imposible.

En pozos revestidos, el punto de la desviación requiere que una sección ó una ventana sea cortada en la tubería de revestimiento. El método de ventana requiere del uso de cuchara desviadora, que ayuda a re-entrar durante la perforación, porque si se corta una sección de tubería de revestimiento se tendrá más libertad direccional. Después de que la sección ha sido cortada, un tapón se colocará para efectuar la desviación. Este tapón es colocado de 10 a 15 pies abajo del punto de inicio de la desviación y debe tener la misma integridad que en el caso de agujero abierto.

Existen ventajas al desviar un pozo existente con respecto a la perforación de uno nuevo, y son :

- Al desviar un pozo ya existente se reducen los costos con respecto a uno nuevo.

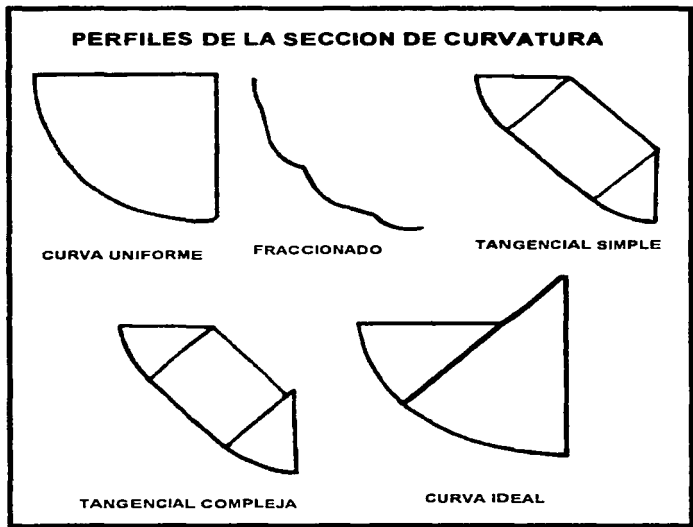
#### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

- En objetivos de poco espesor donde es crítico el control de la desviación, se tiene un conocimiento exacto de la zona de interés, disminuyendo los riesgos geológicos en pozos desviados.
- Con pozos desviados se pueden incrementar los ritmos de producción y explotación del pozo.

Cuando se diseñan aparejos para aplicarse en pozos de radio medio debe ponerse mucho énfasis para alcanzar predecibles y uniformes ritmos de construcción, debido a que estos aparejos no tienen el margen de seguridad que tienen los aparejos direccionables de radio largo.

Desafortunadamente, la incertidumbre y la variación en el funcionamiento de la mayoría de los motores para construir los ángulos exceden la tolerancia permitida del objetivo horizontal. Por esto, es necesario diseñar intervalos de ajuste en la curva para compensar las incertidumbres.

La construcción de la curvatura puede tomar varias rutas, los perfiles pueden variar de una simple curvatura uniforme desde el punto de inicio de la desviación ( KOP ) a la profundidad total perforada ( TD ), a muchas curvas cortas seguidas por secciones rectas cortas. Entre estas se encuentra un método en el que primero se perfora una sección larga de construcción, seguida por una sección tangente y se finaliza con otra sección curva, o bien se perfora una sección de construcción, seguida por otra con mayor índice de construcción ver Figura 41.



**FIGURA 41. LA CONSTRUCCIÓN DE LA CURVATURA PUEDE TOMAR VARIAS RUTAS, LOS PERFILES PUEDEN VARIAR DE UNA SIMPLE CURVATURA UNIFORME DESDE EL PUNTO DE INICIO DE LA DESVIACIÓN A LA PROFUNDIDAD TOTAL PERFORADA.**

Cada uno de estos métodos ofrece ciertas ventajas que a continuación se mencionan:

**-CURVATURA UNIFORME.**

Este método es el más simple para iniciar un ángulo y para realizar la curva se mantiene el ángulo hasta que la inclinación final se alcanza. Si la variación en el

### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

funcionamiento del motor de construcción da un error en la profundidad vertical al final de la curva que sea menor de la tolerancia permitida del objetivo horizontal, entonces este diseño de la curva es el óptimo. Aunque este tipo de curvas requiere de grandes longitudes para llegar al objetivo y además de suficiente longitud para alcanzar los índices de construcción programados en el punto de inicio de la desviación ( KOP ). Los riesgos de este método se reducen después de que varios pozos han sido perforados en una área dada.

### **-ORIENTACIÓN FRACCIONADA.**

Este método es el más complejo, emplea un aparejo con motor para perforar radios más agudos que los planeados en la trayectoria. Después de que el ritmo de construcción se establece, alguna fracción de cada junta es rotada, creando una tendencia de construcción negativa del aparejo. La longitud perforada con el método rotatorio se basa en cambiar el actual ritmo de construcción dentro del ritmo diseñado en una longitud dada, el incremento del ángulo iguala la trayectoria del pozo. La trayectoria actual comprende las alteraciones del ángulo de inclinación y las secciones rectas del agujero. Como en el método de curvatura uniforme, el aparejo para incrementar es corrido en el agujero y se perfora hasta el término de la construcción, excepto en cambios de barrenas. Este método es el menos recomendable, porque puede ocasionar problemas de atrapamiento de la tubería por los continuos cambios de inclinación.

### **-CURVA CON TANGENTE.**

Este diseño es el más viejo y el que más se emplea. Se llama construcción de la curva con tangente simple cuando se divide la construcción de la curvatura en dos segmentos que son separados por una línea tangente de ajuste. Aquí se asume que los dos segmentos de curva tienen el mismo ritmo de construcción. Este concepto viene de la observación de que el motor para construir el ángulo tiene consistencia en su funcionamiento en una área dada. Este funcionamiento puede variar con diferentes objetivos ó en otras áreas. Con este diseño se puede determinar la probable longitud del segundo ángulo de construcción y la longitud de la sección tangente requerida. Si el ritmo de construcción excede al planeado, la longitud de la tangente es ajustada para que el segundo ángulo alcance el objetivo.

La selección de la longitud de la sección tangente es muy importante debido a que pocos aparejos para perforar esta sección la perforan con ángulos constantes. Afortunadamente, no es necesario perforar una sección tangente con ángulo constante para tener un buen juicio del ángulo final en la barrena. La mínima longitud recomendada es función de la distancia a la que se encuentra el MWD, para realizar la predicción de la ubicación de la barrena.

La selección final en la curva de tangente simple, es la elección del ángulo de la sección tangente. Una de las más comunes es a 45°, con la cual, el final de la curva cae a la misma posición de la curvatura de la porción del ángulo de

#### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

construcción del agujero. Si se incrementa el ángulo de la tangente disminuye la elevación y la magnitud de error potencial en el segundo ángulo. La altura del segundo ángulo disminuye tan rápido como se incrementa el ángulo arriba de los 45°. Por ejemplo la elevación de un segundo ángulo a 8° / 100 pies disminuye de 209 pies para una tangente a 45°, a 96 pies con una tangente a 60°. Colocando la tangente a ángulos mayores de 45°, incrementa la longitud del agujero y el desplazamiento al final de la curva. Por esta razón los ángulos de la tangente mayores de 60° son inaceptables. Otra consideración en la elección de la posición de la sección tangente, es que proporciona la habilidad para intersectar marcas estructurales en la sección tangente que permiten ajustar el punto de inicio de la segunda curva basados en la posición de la columna estratigráfica.

Se conoce como construcción de la curva con tangente compleja cuando se diseña el primer intervalo de construcción para establecer el funcionamiento del motor seleccionado, como para el de la tangente simple. Sin embargo, en lugar de emplear la misma curvatura para el segundo intervalo, se emplea un diseño con menor ritmo de construcción que el primero. Uno de los conceptos de esta técnica, es que un menor ritmo de construcción para el segundo intervalo se puede obtener usando el mismo motor para construir el ángulo, con la orientación de la cara de la herramienta hacia la derecha ó a la izquierda de la vertical, cambiando el azimut en el segundo intervalo. El pozo puede diseñarse para colocar todos los ángulos en una dirección. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones es mejor cambiar la dirección de la mitad de la curva ya sea a la derecha o a la izquierda y la otra mitad en el sentido contrario.

La desventaja de este diseño es que la longitud, elevación y desplazamiento de la segunda curva se incrementan. La ventaja es que la elevación de la segunda curva puede ajustarse tanto para arriba, como hacia abajo.

Este diseño tiene gran aplicación en objetivos estructurales, estos métodos son de gran precisión en el ajuste de la profundidad vertical ( TVD ) y se han empleado con dos secciones tangente para afinar objetivos de dos pies en yacimientos a 10,000 pies de profundidad.

Por el tipo de construcción ( Curvatura inicial, sección tangente, y curvatura final ) este método incluye dos viajes que no son necesarios en las otras técnicas. Si estos viajes son planeados en conjunto con los cambios de barrena, entonces no se requerirán de tiempos adicionales.

En áreas donde la geología es impredecible, la sección tangente es necesaria, sin embargo, cuando se planea un extenso programa de perforación en un campo con formaciones conocidas, se puede ganar eliminando la sección tangente. La inclusión de esta sección no sólo requiere de la adición de dos viajes de barrenas más sino también , produce esfuerzos innecesarios en el motor y en otros componentes del aparejo en la sección final como los del inicio de la curvatura.

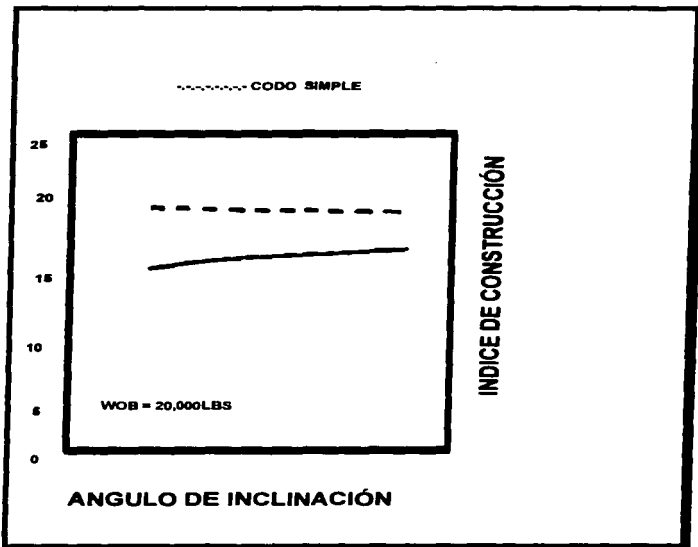
## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

### **-CURVA IDEAL.**

La construcción de esta curva, es aquella que no tiene sección tangente, esta puede ser perforada con un motor a menos que se limite por la vida de la barrena. Obviamente este puede tener el menor costo. Con este también se pueden obtener menores rangos de funcionamiento que los ajustados por la cara de la herramienta mientras se perfora el segundo ángulo. Aunque se puede prescindir de la construcción de la curva ideal para el primer pozo, ésta debe considerarse para el segundo ó tercer pozo en una zona.

La inhabilidad para rotar sin exceder los límites de aguante de la sarta tienen gran impacto en los programas de hidráulica y lodos. Una de las ideas erróneas más comunes acerca de la configuración del doble codo, es que el codo superior ( bend sub ) es empleado para obtener mayores ritmos de inclinación, lo cual normalmente no es cierto. La figura 42 compara un aparejo con un codo con otro semejante que tiene un codo superior de  $11^\circ / 2$ , notándose que aproximadamente el 82% del ritmo de construcción lo provee el codo inferior y solo 18 % el superior.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**



**FIGURA 42. COMPARA UN APAREJO CON UN CODO CON OTRO SEMEJANTE QUE TIENE UN CODO SUPERIOR DE 11° / 2, NOTÁNDOSE QUE APROXIMADAMENTE EL 82% DEL RITMO DE CONSTRUCCIÓN LO PROVEE EL CODO INFERIOR Y SOLO 18 % EL SUPERIOR.**

Este resultado es típico de todos los aparejos dobles, ya que los diámetros pequeños y la mayor flexibilidad de los motores en aparejos simples son capaces de construir altos ritmos de construcción. Pero los aparejos con doble codo se emplean con los siguientes propósitos :



### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

- Ayudan a orientar la parte superior del motor contra el lado bajo del agujero en el inicio de la desviación, incrementando la fuerza lateral de la barrena.
- Disminuyen sensiblemente el peso del aparejo, quizás por la flexibilidad del motor que no está empaquetado entre los dos puntos de estabilización ( codo superior e inferior ).
- Reducen la sensibilidad del aparejo al aumento del diámetro del agujero.

En la Figura 43 se puede ver el cambio del ritmo de construcción en función del aumento del diámetro del agujero para tres aparejos.

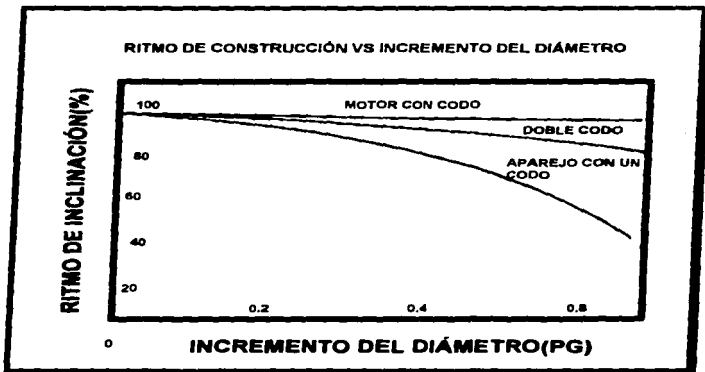


FIGURA 43. EN ESTA FIGURA SE PUEDE VER EL CAMBIO DEL RITMO DE CONSTRUCCIÓN EN FUNCIÓN DEL AUMENTO DEL DIÁMETRO DEL AGUJERO PARA TRES APAREJOS.

El desplazamiento de la barrena ( offset ) producido por la combinación del codo y el motor ayuda a mantener constante la fuerza lateral de la barrena cuando el incremento en el agujero ocurre, teniéndose como resultado una mayor uniformidad en los ritmos de construcción conforme los diámetros se incrementan. La fuerza lateral proporcionada por la barrena con una aparejo de un codo cambia rápidamente con el incremento y como resultado se tienen una menor consistencia en los ritmos de construcción. La combinación de los codos del motor y el superior ( bed housing y bend sub ) proveen un aparejo que no solo es

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

menos susceptible al incremento del agujero ( efecto del codo superior ), sino también puede alcanzar los ritmos de construcción de radio medio ( efecto del codo del motor ó housing ).

**En la parte 1V.9 se presentan algunos aparjos que se ocupan en la perforación de pozos horizontales y los cálculos necesarios.**

Los aparjos que se utilizan en la perforación de pozos horizontales, tienen la habilidad de dirigir el pozo direccional y predecir con exactitud la trayectoria del aparato de fondo, esto trae consigo la minimización en los costos.

En la perforación de este tipo de pozos se han presentado gran cantidad de problemas de pegaduras mientras se construye el ángulo, los cuales disminuyen el ritmo de penetración y en ocasiones causan la pérdida del pozo.

Estos problemas pueden ser causados por arcillas no consolidadas, pegaduras diferenciales y por el empleo de estabilizadores convencionales que centran y controlan eficientemente la sarta cuando se rota, estos rápidamente se desgastan cuando se deslizan y los puntos de contacto con grandes cargas e interferencias con la pared del pozo pueden producir pegaduras y transmisión de diferentes pesos a la barrena, que se manifiesta en la reducción de los ritmos de penetración. Por esta razón deben eliminarse los estabilizadores convencionales.

Hay problemas más agudos, que se deben a la tendencia de construcción del aparato en conjunto con las frecuentes correcciones de la cara de la herramienta dando como resultado trayectorias tortuosas que por sí mismo causan problemas de atrapamiento. Problemas de pegaduras se presentan si la reacción natural del torque del motor lo re-orienta a la derecha ó izquierda de la cara de la herramienta propuesta. Este puede desviarse a la izquierda si se aplica peso a la barrena y muestra un repentino cambio en cualquier dirección si a la sarta se le elimina la torsión. Los perforadores direccionales pueden realizar ajustes en la superficie para re-orientar la cara a la posición deseada y corregir la desviación.

Los anillos concéntricos describen la localización de la barrena en el plano horizontal de la desviación y posterior a cada corrección hecha a la cara de la herramienta. Generalmente estos anillos se encuentran en la perforación. El daño de un aparato convencional estabilizado aparece cuando se ve la forma del agujero en los primeros pies( aproximadamente en 12.5 pies ).

Los estabilizadores cercanos al calibre pueden reducir el cambio en una trayectoria uniforme. Además pueden ocurrir atrapamientos en los primeros 8 pies, y es más severo en formaciones duras donde los derrumbes por la hidráulica no se llevan a cabo. Empleando juntas de bajo calibre, pueden reducir en forma eficiente y significativa los problemas de pegaduras. Además un vici a 15 a 30 ° en la junta ayuda eficazmente.

La única forma de eliminar el problema es mantener el frente de la cara de la herramienta constante en el inicio de la desviación. La reacción del torque del motor en el punto de desviación tiende a desaparecer conforme el motor establece la curvatura del agujero. Como el aparato con motor se relaja, la fuerza lateral de la barrena se reduce notablemente y el frente de la cara de la barrena es mucho más difícil de mantener. Este efecto se nota en unos 40 pies. Si el

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

motor no conserva el azimut planeado en los primeros 40 pies a 60 pies ( con el interés de mantener el frente constante ), una corrección puede llevarse a cabo. Un cambio suave en la trayectoria no tiene efectos negativos cercanos como una serie de cambios rápidos en la cara de la herramienta en una longitud relativamente corta.

Cuando se inicia la desviación en un pozo de radio medio, es aconsejable tener una supervisión manteniendo un registro del frente de la cara de la herramienta, así como del ritmo de penetración por lo menos en los primeros 30 a 40 pies y rimar debajo de cada junta durante el curso, lo que ayuda a eliminar los problemas de atrapamiento.

Como se menciono anteriormente, los ritmos de construcción no es la única determinante de la configuración del aparejo ( sencillo o doble codo ). Se ha demostrado que en algunas formaciones la perforabilidad perpendicular a los planos de estratificación es mayor que la paralela. El efecto neto de estas formaciones anisotrópicas ( tendencia del agujero curvo ) desde un punto de vista de la predicción de la trayectoria es que el ritmo de construcción es influenciado por el relativo ángulo entre la inclinación del agujero y el echado de la formación. Con moderados agujeros curvos este efecto puede agregar o sustraer varios grados en la construcción, y puede tener un efecto continuo si la inclinación del pozo se cambia frecuentemente a través de una formación con un echado constante o esta desviación puede tener un efecto más instantáneo si los planos estratigráficos o de formación cambian súbitamente. Cuando estos se unen a factores como la ampliación del agujero pueden tenerse serias repercusiones en la desviación del agujero y desplazamiento de la barrena.

Dos grandes tipos de sistemas de motores son empleados para incrementar el ángulo en pozos de radio medio. Uno puede ser rotado en la sección de construcción, el otro no. Mientras que los motores rotables hacen relativamente fácil la corrección de la trayectoria del pozo, estos son menos predecibles en términos del índice de construcción. Estos motores pueden ocuparse en más de una porción del agujero curvo, lo cual permite variaciones en el ritmo de construcción teórico aún en un perfil sin importancia.

El motor no rotable es posicionalmente estable, esto es, pueden perforar solo una curvatura en condiciones no forzadas. Sin embargo su posición estable permite que las curvas sean perforadas de una manera predecible.

La sección horizontal es perforada de la misma manera que los pozos de radio largo. Debido a que los pozos de radio medio son más eficientes en zonas delgadas, los motores direccionales ofrecen gran control en un gran rango de trayectorias. Estos motores, con ángulos de 2 a 6° / 100 pies son rotados para la mayoría de las profundidades perforadas, pero perforaran direccionalmente cuando la cara de ellos se orienta.

El control de la dirección y desviación en un pozo de radio medio es más crítico que para los de radio largo. Con ritmos de construcción mayores que los de radio largo, mediciones y datos de la dirección de la cara de la herramienta deben ser controlados y revisados con mayor frecuencia y las herramientas de disparo simple y direccionales se hacen menos eficientes. Por lo tanto una herramienta de

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.**

medición mientras se perfora ( MWD ) debe emplearse para la mayoría de los trabajos .

Algunos tamaños de agujeros e índices de construcción requieren herramientas direccionales, mientras que proyectos de re-entrada pueden requerir del uso de métodos giroscópicos o de otros no magnéticos para el punto de inicio. Después de que hay menos interferencia magnéticas un MWD debe emplearse.

Debido al tamaño y a la relativa rigidez del MWD, debe tenerse cuidado con la relación de esfuerzos así como con el pandeo del paquete electrónico, el cual puede afectar la realización de pulsos. Los parámetros de perforación pueden ser manipulados para controlar la inclinación de la sección horizontal sin requerir de un posicionador de la cara de la herramienta. Con esto puede ser factible eliminar el MWD y usar herramientas de disparo simple para controlar la dirección y la inclinación, después de que varios pozos han sido perforados en una área, y así ajustar el ángulo requerido. Si el posicionador de la cara de la herramienta se requiere, una herramienta direccionadora y equipo de línea facilitará la corrección. El costo de estas herramientas es menor que el del MWD y estas no se requerirán de tiempo completo.

En objetivos delgados, es aconsejable conservar un MWD en el aparejo de fondo para que muchas correcciones puedan hacerse inmediatamente. Además, el uso de algún tipo de registro enfocado como parte del paquete MWD puede ayudar al operador a continuar la trayectoria en el plano estratigráfico cuando las inclinaciones u ondulaciones locales no sean iguales a las inclinaciones regionales esperadas. Aun cuando el paquete de servicios de radio medio es difícil de estimar en un pozo típico, se ha calculado que el costo con todos los servicios combinados varía entre 7,000 y 10,000 dólares, más equipo, todo y supervisión del pozo. Esto significa un costo total del equipo desde el punto de inicio de la desviación ( KOP ) a la profundidad total ( TD ) del rango de 12,000 a 20,000 dólares por día.

### **-RADIO CORTO.**

Con esta técnica se tiene la ventaja de que se pueden perforar varias secciones horizontales desde un mismo pozo. La preparación para agujeros de radio corto es mínima para agujeros abiertos, pero puede ser muy complicado en agujeros entubados. En agujeros abiertos, el pozo debe ser registrado y calibrado para seleccionar el objetivo y el aparejo de cuchara desviadora que se requiera. El tamaño y la configuración de la cuchara desviadora requiere agujeros rectos, sin espirales desde la zapata hasta 20 pies abajo del punto de inicio de desvío y puede realizarse en pequeñas secciones uniformes que pueden estar fuera de calibre menos que 1/8 pulgadas con longitudes de 10 pies, mientras que las salientes y los derrumbes causan complicaciones al aparejo.

En agujeros entubados, la tubería de revestimiento es seccionada para crear un agujero falso en el punto de desviación. La sección máxima puede ser de 25 a 35 pies de longitud o una sección parcial de 10 a 13 pies, dependiendo de las condiciones de la TR y del agujero. Los pozos dañados o pozos viejos

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

generalmente requieren de secciones completas, mientras que pozos nuevos en formaciones con mínima estimulación pueden ser terminadas usando secciones parciales. En secciones completas se requiere ampliar, colocar tapones de cemento y re-perforar la sección del intervalo, mientras la sección parcial es cortada y el agujero es usado como tal.

Después de que el pozo es preparado y configurado el aparejo, la cuchara desviadora se corre, se orienta y se coloca. La cuchara desviadora fuerza a la construcción del ángulo o curvatura de perforación para iniciar la desviación en la dirección del objetivo, el conjunto direccional de la cuchara desviadora debe ser preparado para anticipar las tendencias direccionales y de camino en la sección del ángulo de construcción, porque ya no se puede guiar después de que la desviación es hecha.

Un agujero piloto es perforado abajo de la cara de la cuchara con una aparejo flexible para preparar el agujero para la perforación de la curva guía, y como no es direccionable, se tiene que fijar la dirección inicial del agujero piloto. El ensamble para perforar la curva es corrido en el agujero y asentado en la base del agujero piloto. Entonces la perforación controlada y guiada se inicia y se continúa hasta un cambio de la barrena o hasta que se requieran hacer mediciones. Más tarde la guía de curvatura se saca del agujero. El aparejo de medición se lleva atrás para obtener datos de medición magnética que son usados para localizar el fondo del agujero y proyectar la cantidad de curva necesaria para terminar la sección de construcción, las inclinaciones con las herramientas de diámetros grandes.

Después de que la barrena se cambia, el aparejo para incrementar el ángulo se mete en el agujero perforado y se continúa perforando hasta terminar la curva proyectada.

En este punto, si se asume que la curvatura es correcta el aparejo para perforar la sección horizontal se corre en el agujero. Si la inclinación es crítica o dudosa deben de llevarse a cabo mediciones adicionales.

En la sección horizontal de radio corto, es necesario perforar y medir por etapas. Para llevar a cabo mediciones, las herramientas de disparos simples pueden mandarse al final de la sección por bombeo, en cambio otras herramientas requieren de viajes adicionales. La longitud de la sección horizontal a perforar en un viaje es determinado por las limitaciones del proyecto y resultados de mediciones previas.

Cuando la perforación y las mediciones se han completado, el aparejo de la cuchara desviadora se recupera abandonando la sección horizontal, y la vertical quedará abierta para la producción. Las comparaciones económicas entre el sistema de radio corto y los otros métodos no son posibles de encontrar por varias razones:

- La longitud lateral posible con el sistema rotario de radio corto son solo del 10 al 30 % de longitud de uno de radio medio o largo.

#### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO.

- Por la reducción del punto de inicio de la desviación (KOP), el factor de costo para pozos de radio corto comparado con los de radio medio y largo resulta ser 10 veces mayor que el factor de costo crítico de los otros sistemas.
- El costo diario del proyecto desde el punto de inicio de la desviación ( KOP ) a la profundidad total ( TD ) tiende a ser menor que con los sistemas de radio medio y aún puede igualar los costos diarios en curvaturas de radio largo.

Sin embargo la reducción en la longitud del agujero no tiene un efecto similar en los ritmos de recuperación, esto subraya la necesidad de tener un completo entendimiento de los aspectos de perforación y producción de un proyecto a fin de asegurar la eficiencia de costos.

#### **-RADIOS ULTRA-CORTOS.**

Si la técnica de radio Ultra-corto se lleva a cabo en agujeros entubados, el pozo debe ser seccionado, mientras que en agujeros abiertos se requiere hacer una preparación mínima. Cuando se trabaja en una sección que ha sido cortada o en un agujero abierto, la sección debe ampliarse en ambos para dar cabida a la inserción parcial y expansión del control y mecanismos guías que inclinarán y dirigirán la tubería usada para perforar a chorro la sección horizontal. La sección horizontal es perforada con fluidos a presión( 10,000 psi ) empleando un equipo especial con boquillas que se llevan en un viaje. Esta técnica no se describe a detalle ya que su aplicación es poco propicia para operaciones encaminados a la explotación de hidrocarburos.

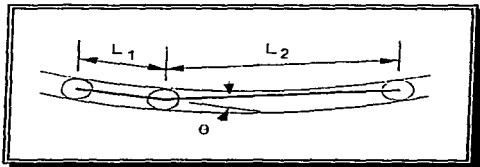
## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### 4.9. DISEÑO DE APAREJOS DE FONDO.

#### -MOTORES DE FONDO.

Para un adecuado desarrollo del aparejo de fondo es importante elegir la combinación motor de fondo-sustituto curvo de acuerdo con el ritmo de incremento programado. Para lo cual es necesario conocer la geometría del motor: con las ecuaciones siguientes es posible conocer el ritmo de incremento aproximado que proporcionara este aparejo, es importante señalar que este no será exacto debido a la multiplicidad de factores que afectan el desarrollo de la perforación.

#### -TRES PUNTOS DE CURVATURA.



$$B_r = \frac{\theta * 200}{L_1 + L_2} \quad ( 51 )$$

. donde :

$B_r$  = Incremento de construcción. ( grados / 100 pies ).

$\theta$  = Angulo de curvatura. ( grados ).

$L_1$  = Distancia del 1er. punto al 2do. punto ( pies ).

$L_2$  = Distancia del 2do. punto al 3er. punto ( pies ).

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

**-GEOMETRÍA PARA MOTORES DE FONDO MULTICURVOS Y ESTABILIZADORES DE DIÁMETRO REDUCIDO.**

$$\theta = B' - B_1 + B_2 \quad ( 52 )$$

$$H = \frac{57.3 * S_1}{24} \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) \quad ( 53 )$$

$$B_2 = \frac{57.3 * S_2}{24} \left( \frac{1}{L_2} \right) \quad ( 54 )$$

. donde :

$\theta$  = Angulo efectivo del motor. ( grados ).

$B_1$  = Angulo de ajuste para el primer estabilizador. ( grados ).

$B_2$  = Angulo de ajuste para el segundo estabilizador. ( grados ).

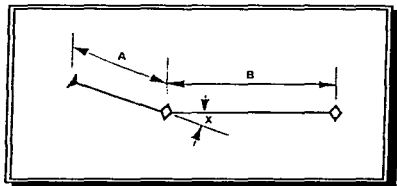
$S_1$  = Claro radial del primer estabilizador. ( pg ).

$S_2$  = Claro radial del segundo estabilizador ( pg ).



PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

**-GEOMETRÍA DEL MOTOR TIPO 1.**



$$B' = X$$

. donde

B' = Angulo equivalente en el primer estabilizador. ( grados ).

X = Angulo del sustituto curvo del motor. ( grados ).

A = Distancia de la barrena al centro del sustituto curvo ( pies ).

B = Distancia del centro del primer estabilizador al segundo estabilizador

( pies ).

$$L_1 = A$$

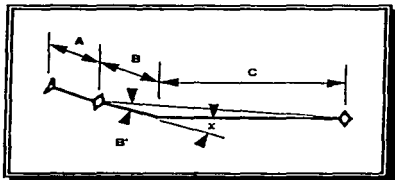
$$L_2 = B$$

( pies ).

( pies ).

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

**-GEOMETRÍA DEL MOTOR TIPO 2.**



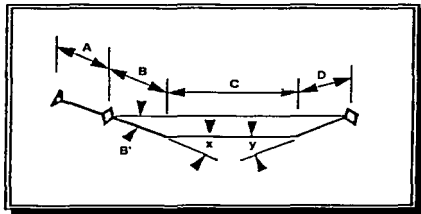
$$H' = X \left( \frac{C'}{B + C'} \right) \quad ( 55 )$$

, donde :

- B' = Angulo equivalente en el primer estabilizador ( grados ).
- X = Angulo del sustituto curvo del motor ( grados ).
- Y = Angulo del sustituto curvo ( grados ).
- A = Distancia de la barrena al primer estabilizador ( pies )
- B = Distancia del primer estabilizador al centro del sustituto curvo del motor. ( pies ).
- C = Distancia del sustituto curvo al segundo estabilizador ( pies ).
- $L_1 = A$  ( pies ).
- $L_2 = B - C$  ( pies ).

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

**-GEOMETRÍA DEL MOTOR TIPO 3.**



$$B' = (X + Y) \left( \frac{D}{C + D} \right) \left( \frac{C + D}{B + C + D} \right) \quad (56)$$

donde :

- B' = Angulo equivalente en el primer estabilizador ( grados ).
- X = Angulo del sustituto curvo del motor ( grados ).
- Y = Angulo del sustituto curvo ( grados ).
- A = Distancia de la barrena al primer estabilizador ( pies ).
- B = Distancia del primer estabilizador al centro del sustituto curvo del motor ( pies ).
- C = Distancia entre los centros del sustituto curvo del motor y el sustituto curvo ( pies ).

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

D = Distancia del centro del sustituto curvo al segundo estabilizador  
( pies ).

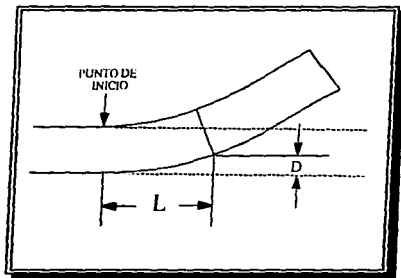
$$L_1 = A$$

( pies )

$$L_2 = B + C + D$$

( pies ).

### **-DESPLAZAMIENTO DE LA DESVIACIÓN DEL AGUJERO.**



$$D = \frac{B_r \cdot L^2}{955} \quad ( 57 )$$

$$L = 30.9 \sqrt{\frac{D}{B_r}} \quad ( 58 )$$

, donde:

D = Desplazamiento lateral del agujero.

( pg ).

L = Longitud de desviación del agujero.

( pies )

B<sub>r</sub> = Ritmo de incremento de la desviación.

( ° / 100 pies ).

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

**-EJEMPLO 1.**

Para el pozo Agua Fria 817-H

**-DATOS.**

Motor de 6 3/4" y barrena de 9 1/2"

Angulo del bent housing = 1°

Distancia de la barrena al primer estabilizador = 2.8 pies

Distancia del primer estabilizador al bent housing = 5.5 pies.

Distancia del bent housing al segundo estabilizador = 16.15 pies.

Estabilizadores de 9 3/8" y 9 1/4".

**-DESARROLLO.**

Se tiene un motor del tipo 2.

Cálculo de los claros radiales.

$$S_1 = 9.5 - 9.375 = 0.125$$

$$S_2 = 9.5 - 9.25 = 0.25$$

Cálculo del ángulo efectivo del motor.

$$B' = A \left( \frac{C'}{B + C'} \right)$$

$$B' = \left( \frac{16.15}{5.5 + 16.15} \right) = 0.746^\circ$$

$$B = \frac{57.3 * 0.125 \left( \frac{1}{2.8} + \frac{1}{21.65} \right)}{24} = 0.120^\circ$$

$$B_2 = \frac{57.3 * 0.25 \left( \frac{1}{21.65} \right)}{24} = 0.028^\circ$$

$$q = B' - B_1 + B_2 = 0.746 - 0.120 + 0.028 = 0.654^\circ$$

Cálculo del ritmo de incremento.

$$B_r = \frac{\theta * 200}{L_1 + L_2} = \frac{0.654 * 200}{2.8 + 21.65} \quad B_r = 5.35^\circ / 100 \text{pies.}$$

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

**-EJEMPLO 2.**

Pozo Agua Fría 817-H.

**-DATOS.**

Motor de 4 3/4" y barrena de 6 1/8"

Angulo del bent housing = 1°

Distancia de la barrena al primer estabilizador = 2.1 pies

Distancia del primer estabilizador al bent housing = 3.6 pies.

Distancia del bent housing al segundo estabilizador = 15.675 pies.

Estabilizadores de 6" y 5 3/4".

**-DESARROLLO.**

Se tiene un motor del tipo 2.

Cálculo de los claros radiales.

$$S_1 = 6.125 - 6 = 0.125$$

$$S_2 = 6.125 - 5.750 = 0.375$$

Cálculo del ángulo efectivo del motor.

$$H' = \frac{S_1}{H - C}$$

$$H' = \left( \frac{0.125}{3.6 - 15.675} \right)$$

$$H' = 0.813^\circ$$

$$H_1 = \frac{57.3 * 0.125}{24} \left[ \frac{1}{2.1} + \frac{1}{19.275} \right]$$

$$H_1 = 0.158^\circ$$

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

$$B_2 = \frac{57.3 \cdot 0.375}{2.4} \left[ \frac{1}{19.275} \right]$$

$$B_2 = 0.046^\circ$$

$$q = B' - B_1 + B_2 = 0.610 - 0.158 + 0.046 = 0.701^\circ$$

Cálculo del ritmo de incremento.

$$B_1 = \frac{\theta \cdot 200}{L_1 - L_2} = \frac{0.654 \cdot 200}{2.1 + 19.275}$$

$$B_1 = 6.659^\circ / 100 \text{ pies}$$

## **CAPÍTULO V.**

# **MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA TRAYECTORIA Y HERRAMIENTAS PARA POZOS CON ALTO GRADO DE DESVIACIÓN PARA LA PERFORACIÓN DE ALCANCE EXTENDIDO.**

### **5.1. INTRODUCCIÓN.**

Los incrementos en la profundidad, los altos costos de perforación, el control de la trayectoria en una formación determinada, el uso de herramientas para el control del pozo con alto ángulo de desviación, la exactitud de la localización del yacimiento, han obligado a dar mayor importancia al uso de la herramienta dirigible para altos incrementos en la desviación y de la trayectoria del pozo. En este capítulo se presentan los métodos de cálculo para la planeación de la trayectoria, la localización tridimensional desde que inicia hasta que termina y se presentan algunas de las herramientas que en la actualidad se han desarrollado con la finalidad de obtener mayores beneficios. Así como el diseño de aparejos de fondo.

### **5.2. DETERMINACIÓN DE LA TRAYECTORIA.**

Existen varios métodos para calcular la localización del pozo en tres dimensiones a partir de estaciones de medición. Entre estos métodos están, método tangencial, método de ángulo promedio y el método de mínima curvatura.

#### **-MÉTODO TANGENCIAL.**

Este método, es un método muy inexacto, está basado en la suposición de que el agujero mantiene la misma dirección y orientación de una estación a otra. Es decir mantiene el mismo ángulo de inclinación desde el punto de inicio de la desviación hasta llegar al punto donde empieza la horizontal, es muy inexacto ya que durante su viaje habrá problemas, como son: acarreo de sólidos, presión diferencial, torque y arrastre, zonas anormales, pandeo crítico de la tubería de perforación, todo esto ocasiona que se desvíe el curso de la trayectoria de nuestro pozo.



## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALGANCE EXTENDIDO

### **-MÉTODO DE ÁNGULO PROMEDIO.**

Esta técnica esta basada en la suposición de que el agujero es paralelo a un simple promedio aritmético entre los ángulos de dirección y orientación. Es decir desde el inicio del punto de desviación, nuestra herramienta insertada en nuestro aparato de fondo nos manda una señal ó un pulso que se registra en la superficie esta señal se interpreta y se conoce nuestra dirección, orientación y rumbo, y en la superficie se corrige la trayectoria obteniendo el promedio aritmético de la inclinación y la dirección, para cada intervalo perforado se hace lo anteriormente hablado.

### **-MÉTODO DE MÍNIMA CURVATURA.**

Este método toma los espacios vectoriales definidos por la medición de la dirección e inclinación y los iguala a la curva de un pozo con el uso de un factor de radio, el cual se define por la curvatura de la sección del pozo ( pata de perro ). Es decir se habla de un espacio tridimensional en donde nuestra cota es nuestra desviación/profundidad, y nuestra abscisa ó ordenada pueda ser nuestra dirección o inclinación y las ecuaciones que resulten de la interpretación de este fenómeno físico se igualan a la curva de un espacio imaginario que ha sido interpretado por especialistas en el área de perforación en el cual se toma un radio de trayectoria, ó en otras palabras la desviación final desde el inicio de la desviación en el punto ( KOP ) hasta el punto final donde se empieza la horizontal.

Este método, como el radio de curvatura, es uno de los métodos más confiables para la determinación de la posición de la trayectoria de un pozo.

Existen otros métodos como el tangencial balanceado, tangencial trapezoidal, Mercury, etc., Los cuales no se mencionan debido a que son combinaciones de los anteriores y su empleo tiene limitaciones.

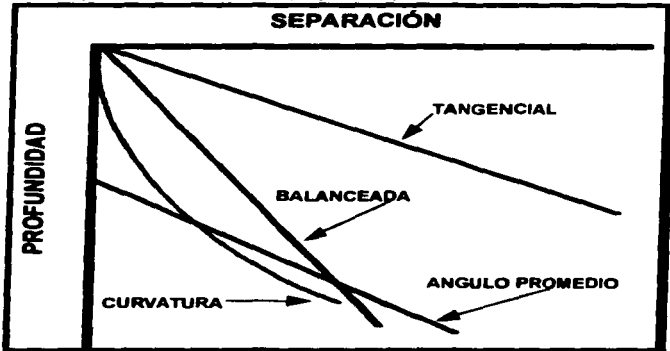
El método que se empleará en está tesis es el de **radio de curvatura**

### **5.3.RADIO DE CURVATURA.**

El cual usa un conjunto de mediciones de ángulos llevadas a cabo en la parte superior e inferior de la longitud de curso para generar así un espacio curvo que representa la trayectoria del pozo que tiene la forma de un arco de esfera que pasa a través de los ángulos medidos. Este método es uno de los más exactos para determinar la posición de un pozo dado, ya que asume que el agujero es una curva igual a la descrita por un segmento de esfera o círculo. La suposición de que el agujero es una curva entre dos mediciones, hace a este método menos sensitivo a colocaciones y distanciamientos entre puntos de medición como en los otros métodos, pero, al igual que los demás a grandes distancias entre los

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

puntos de medición, decrece su exactitud y particularmente si una severa pata de perro esta presente en el intervalo ( Figura 44 ).



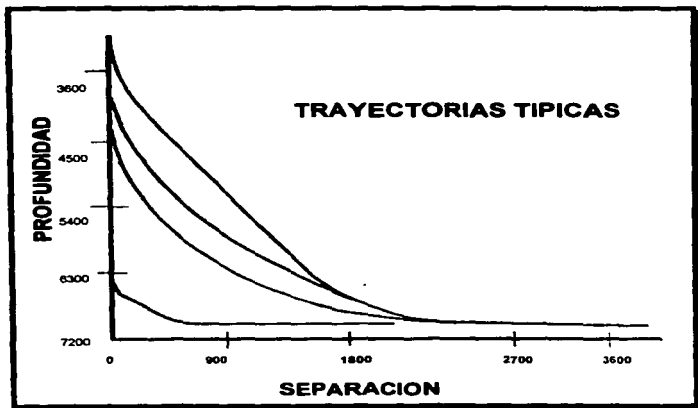
**FIGURA 44. MUESTRA LAS TRAYECTORIAS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS , ANTES MENCIONADOS EN EL TEXTO EN UNA GRÁFICA DE SEPARACIÓN vs PROFUNDIDAD.**

La solución general supone que todas las curvas entre dos puntos son constantes y las únicas restricciones son la curvatura e inclinación máxima. Para este trabajo se considerarán cuatro casos de trayectorias:

1. Cambio de inclinación con azimut constante.
2. Cambio de inclinación y azimut.
3. Inclinación y azimut constantes.
4. Inclinación constante con cambio de azimut.

Las ecuaciones para calcular la trayectoria base se pueden modificar considerando la tendencia de desviación de la barrena, estas ecuaciones se desarrollaron para calcular los puntos críticos a lo largo de la trayectoria del pozo en coordenadas cartesianas y en términos de los parámetros de medición direccional.

El diseño final involucra éstos segmentos que pueden emplearse por separado o en combinación y estos segmentos se muestran en la Figura 45.



**FIGURA 45. EN ESTA GRÁFICA DE SEPARACIÓN vs PROFUNDIDAD SE REPRESENTAN LAS TRAYECTORIAS TÍPICAS DE LOS MÉTODOS MENCIONADOS; MÉTODO TANGENCIAL, MÉTODO DE ÁNGULO PROMEDIO, Y EL RADIO DE CURVATURA.**

En el primer caso para el cambio de inclinación con azimut constante se considera que:  $\phi_2 \neq \phi_1$  y  $\theta_2 = \theta_1$ , que representa una línea de curvatura constante en un plano vertical, esta se forma de la curva que resulta de la intersección de un cilindro horizontal con el plano vertical y su proyección en el plano XY es una línea recta.

$$X_2 - X_1 = \left[ \frac{(L_2 - L_1)(\cos\phi_1 - \cos\phi_2) \sin\theta_2}{(\phi_2 - \phi_1)} \right] \quad (59)$$

$$Y_2 - Y_1 = \left[ \frac{(L_2 - L_1)(\cos\phi_1 - \cos\phi_2)(\cos\theta_2)}{(\phi_2 - \phi_1)} \right] \quad (60)$$

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

$$Z_2 - Z_1 = \frac{(L_2 - L_1)}{\phi_2 - \phi_1} (SEN\phi_2 - SEN\phi_1) \quad (61)$$

Para el segundo caso para el cambio de inclinación y azimut donde :  $\phi_2 \neq \phi_1$  y  $\theta_2 \neq \theta_1$  ,  $|\pi \leq (\theta_2 - \theta_1) \leq \pi$  que representa una curvatura constante en el azimut e inclinación, que se forma al irse doblando para tener la forma de un cilindro en un plano vertical que contiene una línea de curvatura constante.

También se describe como un plano no vertical que contiene una línea curvatura constante, para este caso se tiene:

$$X_2 - X_1 = \left[ \frac{(L_2 - L_1)(\cos\phi_1 - \cos\phi_2)(\text{SEN}\theta_2 - \text{SEN}\theta_1)}{(\theta_2 - \theta_1)(\phi_2 - \phi_1)} \right] \quad (62)$$

$$Y_2 - Y_1 = \left[ \frac{(L_2 - L_1)(\cos\phi_1 - \cos\phi_2)(\text{SEN}\theta_2 - \text{SEN}\theta_1)}{(\theta_2 - \theta_1)(\phi_2 - \phi_1)} \right] \quad (63)$$

$$Z_2 - Z_1 = \frac{(L_2 - L_1)}{\phi_2 - \phi_1} (SEN\phi_2 - SEN\phi_1) \quad (64)$$

En el tercer caso para una inclinación y azimut cuando:  $\theta_2 = \theta_1$  Y  $\phi_2 \neq \phi_1$ , se presenta una línea recta en el espacio.

$$X_2 - X_1 = (L_2 - L_1)SEN\phi_2 * SEN\theta_2 \quad (65)$$

$$Y_2 - Y_1 = (L_2 - L_1)SEN\phi_1 * COS\theta_2 \quad (66)$$

En el último caso para inclinación constante con cambio de azimut donde :  $\theta_2 \neq \theta_1$  para  $|\pi \leq (\theta_2 - \theta_1) \leq \pi$  y  $\phi_2 = \phi_1$ , se representa el cambio de azimut a inclinación constante, o el caso de una hélice. Este se conforma de la trayectoria de una línea recta en un plano cuando este se dobla a la forma de cilindro vertical ( Figura 46 ).

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

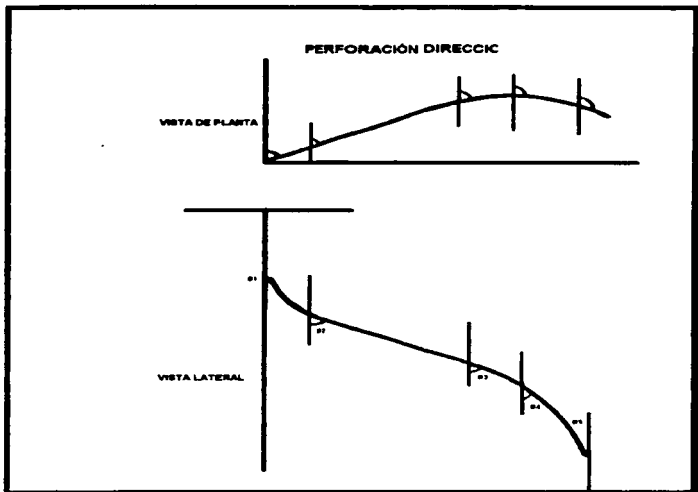


FIGURA 46. SEMUESTRAN DOS VISTAS, LA DE PLANTA Y LATERAL QUE REPRESENTA EL CAMBIO DE AZIMUT Ó INCLINACIÓN CONSTANTE, ESTO ORIGINA UNA TRAYECTORIA DE UNA LÍNEA RECTA EN UN PLANO CUANDO ESTE SE DOBLA A LA FORMA DE CILINDRO VERTICAL.

$$X_2 - X_1 = \left[ \frac{(L_2 - L_1) \cos \theta_1 - \cos \theta_2}{(\theta_2 - \theta_1)} \right] \text{SEN } \phi_2 \quad (67)$$

$$Y_2 - Y_1 = \left[ \frac{(L_2 - L_1) \text{SEN } \theta_1 - \text{SEN } \theta_2}{(\theta_2 - \theta_1)} \right] \text{SEN } \phi_2 \quad (68)$$

$$Z_2 - Z_1 = (L_2 - L_1) \text{COS } \phi_2 \quad (69)$$

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Si se considera un simple cambio en el plano, tres trayectorias del radio de curvatura de un punto A hasta otro B se pueden describir por las ecuaciones del radio de curvatura y relaciones geométricas simples. La trayectoria 1, tendría un segmento inclinado con radio de curvatura  $r_1$ , la trayectoria 2, está compuesta por dos segmentos curvos, uno inicial y otro final, con un segmento recto entre los dos anteriores ( curva con tangente ). El tercero y más sencillo está constituido por una sección de curvatura mínima ( curvatura uniforme ). En la Figura 47 se observan las tres trayectorias anteriores.

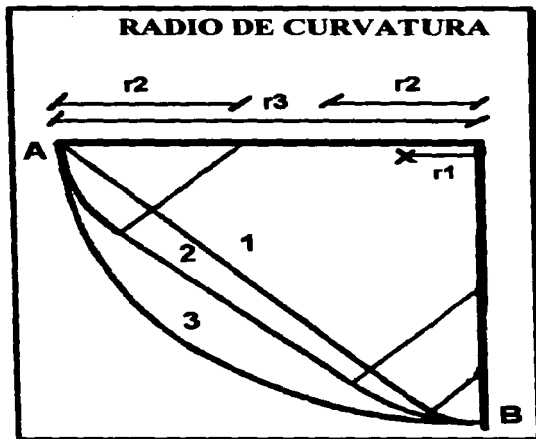


FIGURA 47. SE PRESENTA EN UN PLANO EL RADIO DE CURVATURA PARA TRES TRAYECTORIAS: 1)TRAYECTORIA DE UN SEGMENTO INCLINADO CON  $R_1$ , 2)TRAYECTORIAS DE SEGMENTOS INCLINADOS Y UN SEGMENTO RECTO Y 3)TRAYECTORIA, UNA SECCIÓN DE CURVATURA MÍNIMA.

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

La trayectoria de radio de curvatura orientadas en un plano horizontal pueden expresarse como una relación trigonométrica simple, la dirección inicial es cero y la longitud de la trayectoria es la suma de los segmentos curvos S y la del segmento recto L<sub>D</sub> por esta razón el cambio en la dirección de θ<sub>1</sub> a θ<sub>2</sub> puede expresarse como:

$$\theta_2 - \theta_1 = \Delta\theta = \pi - \tan^{-1}(L_D / r) - \tan^{-1}(L_N / L_C) \quad (70)$$

Y como la longitud de S es el producto de Δθ \* r, la longitud de la trayectoria es:

$$L = L_D + (r_1 * \Delta\theta) + (r_2 * \Delta\theta) \quad (71)$$

$$L = L_D + (r_1(\pi - \tan^{-1}(L_D / r_1) - \tan^{-1}(L_N / L_C)))_1 + (r_2(\pi - \tan^{-1}(L_D / r_2) - \tan^{-1}(L_N / L_C))) \quad (72)$$

donde:

$$L_D = (L_N^2 + L_C^2 - r^2)^{1/2}, L_C = |(X_2 - X_1)| - r \quad (73)$$

En el caso de una curvatura mínima, cuando L<sub>D</sub> = 0, el radio de curvatura puede expresarse con las ecuaciones anteriores como sigue:

$$0 = L_N^2 + L_C^2 - r_{\min}^2 \quad , y$$

$$0 = (Y_2 - Y_1)^2 + (X_2 - X_1)^2 - 2r_{\min}(X_2 - X_1) + r_{\min}^2 - r^2_{\min}$$

Lo que se reduce a:

$$r_{\min} = \frac{(X_2 - X_1)^2 + (X_2 - X_1)^2}{2(X_2 - X_1)} \quad (74)$$

Este procedimiento puede aplicarse para cualquier cambio en diferentes planos ( horizontal, vertical ó inclinado ) , lo que se recomienda es trasladar las coordenadas al origen para alinear la curva en el plano XY.

Con lo que respecta a la curvatura en el proceso de perforación direccional, uno de los principales problemas es la " pata de perro " que viene siendo la máxima curvatura del pozo. Se han desarrollado expresiones para la curvatura en función del cambio de inclinación y dirección. La curvatura en términos de Δθ y Δφ con curvatura constante entre dos puntos es:

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

$$a = \left[ \left[ \frac{\theta_2 - \theta_1}{\Delta L} \right]^2 \text{SENF}^2 \left[ \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right] + \left[ \frac{\phi_2 - \phi_1}{\Delta L} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (75)$$

Si la curva está en el plano vertical, ( $\Delta\theta = 0$ ):

$$a = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\Delta L} \quad (76)$$

Si la curva está en el plano horizontal, ( $\phi_1 = \phi_2 = 1/2\pi = 90^\circ$ ):

$$a = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\Delta L} \quad (77)$$

Una diferencia positiva en el ángulo de inclinación implica un incremento, y una negativa, una disminución en el ángulo o caída. Con lo que respecta al azimut, un incremento denota vuelta a la derecha, y una negativa, implica cambio a la izquierda ( $\Delta\theta < \pi$ ).

La curvatura se relaciona con la severidad de pata de perro con la siguiente expresión:

$$a = \frac{\pi T}{18000} \quad (78)$$

Como la curvatura esta en un plano vertical o inclinado, el radio se puede definir como:

$$r = \frac{1}{a} = \frac{18000}{\pi T} \quad (79)$$

Cuando se tiene un cambio en la dirección del azimut a inclinación constante implica una tendencia helicoidal no contenida en el plano, esta curvatura puede obtenerse de la ecuación:

$$a = \left( \frac{\phi_2 - \phi_1}{L_2 - L_1} \right) \text{SENF} \phi \quad (80)$$

Inversamente, teniendo el radio de curvatura, esta puede resolverse por:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta L} = \frac{a}{\text{SENF} \phi} = \frac{\pi T}{18000 \text{SENF} \phi} \quad (81)$$



### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Esta ecuación se puede emplear con las ecuaciones 67, 68 y 69 para localizar cualquier punto de la hélice en función de la profundidad perforada  $\Delta L$ . La proyección de la hélice en el plano XY es un segmento de círculo cuya longitud es:

$$\Delta S = \Delta L \cdot \text{SEN} \phi \quad (82)$$

Y el radio de curvatura:

$$r_w = \frac{18000 \text{SEN}^2 \phi}{\pi \cdot J} \quad (83)$$

Para cambios simultáneos de azimut e inclinación, la localización inicial y la de objetivo no están orientados para dar una trayectoria simple como las anteriores. Sin embargo, puede emplearse una matriz de 3\*3 para transformar de 3 a 2 dimensiones, como se explica a continuación:

Considerando que la trayectoria de un radio de curvatura inicia en  $x_1, y_1, z_1$  con ángulos iniciales  $\phi_1$  y  $\theta_1$ , y localizándose el objetivo en  $x_2, y_2, z_2$ . Los cálculos de la trayectoria del pozo se simplifican si el punto inicial se traslada al origen (0,0,0). En suma, una rotación puede ser hecha de tal forma que la trayectoria se encuentre en el plano horizontal ( $z=0$ ) y el azimut inicial este en el norte ( $\theta_1=0$ ).

Estas pueden realizarse empleando la siguiente matriz.

$$M = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (84)$$

donde:

$$\begin{aligned} b_1 &= \text{sen} \theta_1 \cdot \text{sen} \phi_1 \\ b_2 &= \text{cos} \theta_1 \cdot \text{sen} \phi_1 \\ b_3 &= \text{cos} \phi_1 \\ c_1 &= |b_2(x_2 - x_1) - b_1(y_2 - y_1)| / c_1 \\ c_2 &= |b_2(x_2 - x_1) - b_1(z_2 - z_1)| / c_1 \\ c_3 &= |b_1(y_2 - y_1) - b_2(x_2 - x_1)| / c_1 \end{aligned}$$

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

, donde :

$$c = [ |b_2(x_2-x_1) - b_3(y_2-y_1)|^2 + |b_3(x_2-x_1) - b_1(y_2-y_1)|^2 + |b_1(x_2-x_1) - b_2(y_2-y_1)|^2 ]^{1/2}$$

, y :

$$a_1 = (b_2c_1 - b_3c_2)/a$$

$$a_2 = (c_1b_2 - c_2b_1)/a$$

$$a_3 = (b_1c_2 - b_2c_1)/a$$

, donde :

$$a = [(b_2c_1 - b_3c_2)^2 + (c_1b_2 - c_2b_1)^2 + (b_1c_2 - b_2c_1)^2]^{1/2}$$

Transformando a coordenadas son  $x_1' = y_1' = z_1' = 0$ , con  $\theta_1 = 0$  y

$$X_2' = (X_2 - X_1)a_1 + (Y_2 - Y_1) + (Z_2 - Z_1)a_3 \quad (85)$$

$$Y_2' = (X_2 - X_1)b_1 + (Y_2 + Y_1)b_2 + (Z_2 - Z_1)b_3 \quad (86)$$

$$Z_2' = 0 \quad (87)$$

Estas coordenadas definen una trayectoria en el plano horizontal, la solución es equivalente a las dadas por :

$$L = L_D + r(\pi - \tan^{-1}(L_D / r) - \tan^{-1}(L_D / L_Y)) \quad (88)$$

, donde :

$$L_D = (L_Y + L_X - r_2)^{1/2}$$

$$L_Y = y_2'$$

$$L_X = |x_2'| \cdot r$$

La condición mínima de curvatura es :

$$r = \frac{(y_2')^2 + (x_2')^2}{2x_2'} \quad (89)$$

Los puntos a lo largo de una trayectoria bidimensional pueden transformarse a un sistema tridimensional, obteniendo la inversa de la matriz ( $M^{-1}$ ). Después de calculada la trayectoria, un proceso de ensayo y error puede emplearse para determinar la óptima compensación del ángulo hacia la izquierda para compensar el camino de mano derecha que normalmente ocurre en la

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

perforación de un pozo direccional. Los parámetros claves para determinar la conducción están dados por los ritmos de desviación que pueden ocurrir en los segmentos de construcción y rectos de la trayectoria.

Estas desviaciones dependen de factores tales como: tipo de formación, buzamiento de las capas, tipo de barrena, ritmos de perforación, etc. Los valores específicos de la desviación deben ser obtenidos de pozos perforados en el área. Para calcular la óptima conducción, la desviación se impone en base a la trayectoria y se calcula para varios ángulos seleccionando la que se encuentre más aproximada a la localización del objetivo.

Para un ángulo guía en particular  $\theta_L$ , el azimut inicial es :

$$\theta_1' = \theta_1 - \theta_L \quad (90)$$

Para cualquier punto en la trayectoria base, el azimut se modifica para considerar la desviación como sigue:

$$\theta_1' = \theta_1 - \theta_L + \sum \frac{\Delta L}{1000} D \quad (91)$$

en donde el último término es la desviación acumulada, la desviación acumulada con la longitud perforada dependen de si se construye el ángulo, se perfora recto o se disminuye el ángulo. Los valores típicos de la desviación son:

**D<sub>1</sub> = 0.2°/100 pies ( 0.64° / 100m. )** durante la construcción del ángulo.

**D<sub>2</sub> = 0.05°/100 pies ( 0.164° / 100m. )** durante la sección recta, y

**D<sub>3</sub> = 0.1°/100pies ( 0.328° / 100m )** durante la disminución del ángulo.

Los verdaderos valores que se deben emplear en estos cálculos son los obtenidos de la experiencias de perforación en cada área. Una vez que se ha determinado el azimut a lo largo de la trayectoria base, las ecuaciones 62, 63, 64, 67, 68 y 69 se usan para calcular la trayectoria para cada valor de  $\theta_L$ .

El punto final calculado para la trayectoria se usa para calcular la separación de la localización del objetivo empleando la siguiente ecuación:

$$\Delta L = ((X_{OBJ} - X)^2 + (Y_{OBJ} - Y)^2 + (Z_{OBJ} - Z)^2)^{1/2}$$

El valor óptimo es el que disminuye al  $\Delta L$ , de la ecuación anterior.

### **- COMPORTAMIENTO DE LA TRAYECTORIA.**

Para determinar el comportamiento del pozo con la variación de alguno de los parámetros durante la perforación se pueden llevar a cabo once diferentes posibilidades de cálculo de la trayectoria (Ver Tabla 7) con los siguientes datos:

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

$\phi_1$  = Inclinación inicial ( grados ).

$\phi_2$  = Inclinación final ( grados ).

$\Delta\theta$  = Cambio de azimut ( grados ).

T = Severidad de la pata de perro ( grados ).

H = Orientación de la cara de la barrena ( grados ).

Las posibilidades de cálculo se muestran en la siguiente tabla.

**TABLA 7: QUE MUESTRA LOS PARÁMETROS CONOCIDOS Y  
DESCONOCIDOS QUE PUEDEN DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DEL  
POZO Y LLEVAR A CABO ONCE POSIBILIDADES DE CÁLCULO DE LA  
TRAYECTORIA.**

VARIABLE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\phi_1$	C	C	C	C	C	D	D	C	C	D	D
$\phi_2$	D	C	C	D	D	C	C	C	D	D	C
$\Delta\theta$	D	C	D	C	D	C	D	D	C	C	C
T	C	D	C	C	C	C	D	D	C	C	D
H	D	D	D	D	C	D	C	C	C	C	C

donde :

C = variable conocida.

D = variable desconocida.

Y a partir de cualquier caso que se presente, se pueden llevar a cabo los cálculos por medio de:

**-CASO 1.**

Donde  $\phi_1$  y T son conocidas, entonces calculamos:

La orientación de la cara de la herramienta :

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

$$H = \text{ARCCOS}\left(\frac{-\text{TANT}}{\text{TAN}\phi_1}\right) \quad (92)$$

El cambio de azimut :

$$\Delta\theta = \text{ARCTAN}\left(\frac{\text{TANT} \cdot \text{SENH}}{\text{SEN}\phi_1 + (\text{COS}\phi_1 \cdot \text{TANT} \cdot \text{COSH})}\right) \quad (93)$$

La inclinación final :

$$\phi_2 = \text{ARCCOS}((\text{COS}\phi_1 \cdot \text{COST}) - (\text{SEN}\phi_1 \cdot \text{SENT} \cdot \text{COSH}))$$

**-CASO 2.**

Si  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  y  $\Delta\theta$  son conocidas, la severidad de la pata de perro se calcula como :

$$T = \text{ARCCOS}((\text{COS}\phi_1 \cdot \text{COS}\phi_2) + (\text{SEN}\phi_1 \cdot \text{SEN}\phi_2 \cdot \text{COS}\Delta\theta)).$$

La orientación de la cara de la herramienta esta dada por:

$$H = \text{ARCCOS}\left(\frac{(\text{COS}\phi_1 \cdot \text{COST}) - \text{COS}\phi_2}{\text{SENB} \cdot \text{SEN}\phi_2}\right) \quad (94)$$

**-CASO 3.**

Si  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  y **B** son conocidas:

La orientación de la cara de la herramienta :

$$H = \text{ARCCOS}\left(\frac{(\text{COS}\phi_1 \cdot \text{COST}) - \text{COS}\phi_2}{\text{SENB} \cdot \text{SEN}\phi_2}\right) \quad (95)$$

El cambio de azimut :

$$\Delta\theta = \text{ARCTAN}\left(\frac{\text{TANT} \cdot \text{SENH}}{\text{SEN}\phi_1 + (\text{COS}\phi_1 \cdot \text{TANT} \cdot \text{COSH})}\right) \quad (96)$$

**-CASO 4.**

Si  $\phi_1$ ,  $\Delta\theta$  y **T** son conocidos:

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

La inclinación final :

$$\phi_2 = \pm \text{ARCSEN} \left( \frac{\text{COST}}{\text{COS}\phi_1^2 + (\text{COSA}\theta^2 * \text{SEN}\phi^2)^{0.5}} \right) - \text{ARCTAN} \left( \frac{1}{\text{TAN}\phi_1 * \text{COSA}\theta} \right) \quad (97)$$

La orientación de la cara de la herramienta :

$$H = \text{ARCCOS} \left( \frac{(\text{COS}\phi_1 * \text{COST}) - \text{COS}\phi_2}{\text{SENB} * \text{SEN}\phi_2} \right) \quad (98)$$

#### **-CASO 5.**

Si  $\phi_1$ ,  $T$  y  $H$  son conocidos :

La inclinación final :

$$\phi_2 = \text{ARCCOS} \left( (\text{COS}\phi_1 * \text{COST}) - (\text{SEN}\phi_1 * \text{SENT} * \text{COSH}) \right) \quad (99)$$

El cambio de azimut :

$$\Delta\theta = \text{ARCTAN} \left( \frac{\text{TANT} * \text{SENH}}{\text{SEN}\phi_1 + (\text{COS}\phi_1 * \text{TANT} * \text{COSH})} \right) \quad (100)$$

#### **-CASO 6.**

Si  $\phi_2$ ,  $\Delta\theta$  y  $T$  son conocidos :

La inclinación inicial :

$$\phi_1 = \pm \text{ARCSEN} \left( \frac{\text{COST}}{\text{COS}\theta_2^2 + (\text{COSA}\theta^2 * \text{SEN}\phi_2^2)^{0.5}} \right) - \text{ARCTAN} \left( \frac{1}{\text{TAN}\phi_2 * \text{COSA}\theta} \right) \quad (101)$$

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

La orientación de la cara de la herramienta :

$$H = \text{ARCCOS}\left(\frac{\text{COS}\phi_1 \cdot \text{COST} - \text{COS}\phi_2}{\text{SENT} \cdot \text{SEN}\phi_1}\right) \quad (102)$$

**-CASO 7.**

Si  $\phi_2$ , **H** y **T** son conocidos:

La inclinación inicial :

$$\phi_2 = \pm \text{ARCSEN}\left(\frac{\text{COS}\phi_2}{\text{COST}^2 + (\text{COSH}^2 \cdot \text{SENT}^2)^{0.5}}\right) + \text{ARCSEN}\left(\frac{\text{COST}}{\text{SENT} \cdot \text{COSH}}\right) \quad (103)$$

El cambio de azimut :

$$\Delta\theta = \text{ARCTAN}\left(\frac{\text{TANT} \cdot \text{SENH}}{\text{SEN}\phi_1 + (\text{COS}\phi_1 \cdot \text{TANT} \cdot \text{COSH})}\right) \quad (104)$$

**-CASO 8.**

Si  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  y **H** son conocidas,

El cambio de azimut :

$$\Delta\theta = \text{ARCTAN}\left(\frac{\text{TANT} \cdot \text{SENH}}{\text{SEN}\phi_1 + (\text{COS}\phi_1 \cdot \text{TANT} \cdot \text{COSH})}\right) \quad (105)$$

La severidad de la pata de perro :

$$\phi_1 = \pm \text{ARCSEN}\left(\frac{\text{COS}\phi_2}{\text{COST}^2 + (\text{COSH}^2 \cdot \text{SEN}\phi_1^2)^{0.5}}\right) + \left(\text{ARCTAN}\left(\frac{1}{\text{TAN}\phi_1 \cdot \text{COSH}}\right)\right) \quad (106)$$

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

**-CASO 9.**

Si  $\phi_1$ ,  $\Delta\theta$  y  $H$  son conocidas,

La severidad de la pata de perro :

$$B = \text{ARCTAN}\left(\frac{\text{TAN}\Delta\theta \cdot \text{SEN}\theta_1}{\text{SENH} - (\text{COS}\phi_1 \cdot \text{TAN}\Delta\theta \cdot \text{COSH})}\right) \quad (107)$$

La inclinación final :

$$\phi_2 = \text{ARCCOS}((\text{COS}\phi_1 \cdot \text{COST}) - (\text{SEN}\phi_1 \cdot \text{SENT} \cdot \text{COSH})) \quad (108)$$

**-CASO 10.**

Si  $T$ ,  $\Delta\theta$  y  $H$  son conocidas :

La inclinación inicial :

$$\Delta\theta = \text{ARCSEN}\left(\frac{\text{TANT} \cdot \text{SENH}}{((\text{TAN}\Delta\theta^2 \cdot \text{TANT}^2) + \text{TAN}\Delta\theta)^{0.5}}\right) - \text{ARCTAN}(\text{TANTCOSH}) \quad (109)$$

La inclinación final :

$$\phi_2 = \text{ARCCOS}((\text{COS}\phi_1 \cdot \text{COST}) - (\text{SEN}\phi_1 \cdot \text{SENT} \cdot \text{COS H})) \quad (110)$$

**-CASO 11.**

Si  $\phi_2$ ,  $\Delta\theta$  y  $H$  son conocidas :

$$T = \left(\frac{\text{SEN}\Delta\theta \cdot \text{SEN}\theta_2}{\text{SENH}}\right) \quad (111)$$

La inclinación inicial :

$$\Delta\theta = \text{ARCSEN}\left(\frac{\text{TANT} \cdot \text{SENH}}{((\text{TAN}\Delta\theta^2 \cdot \text{TANT}^2) + \text{TAN}\Delta\theta)^{0.5}}\right) - \text{ARCTAN}(\text{TANTCOSH}) \quad (112)$$



## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

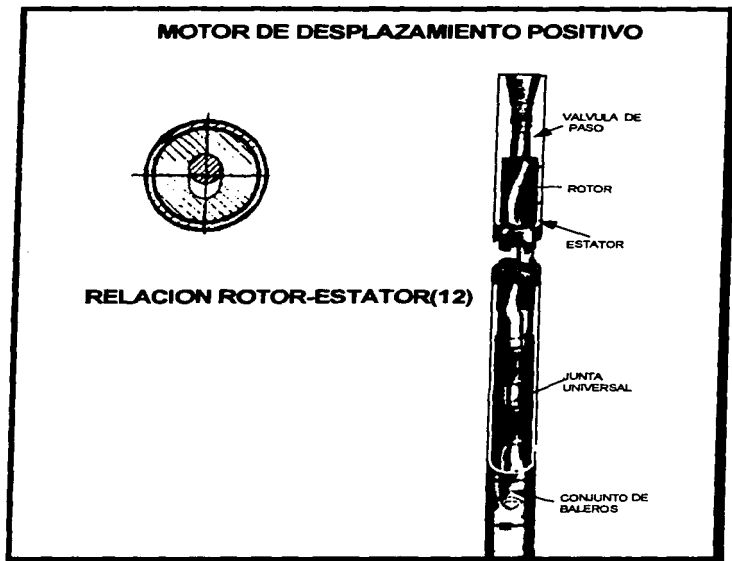
Con estos cálculos se puede definir el comportamiento de la trayectoria, cuando se quieran realizar algunas variaciones.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **5.4. MOTOR DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO ( PDM ).**

El más importante avance en el control de la trayectoria es el empleo de los motores, estos fueron desarrollados en 1966, se empezaron a emplear como herramienta direccional y en la perforación de agujeros rectos. El motor de desplazamiento positivo ( PDM, cuyas siglas al inglés significan " Positive Displacement Motor " ) está constituido por una válvula de descarga que se emplea para desviar el fluido mientras este fluye dentro y fuera del agujero. Cuando se inicia la circulación, la fuerza del fluido mueve hacia abajo un pistón y cierra la válvula, dirigiendo el fluido a través del estator. Por la excentricidad del rotor en el estator, el fluido que circula imparte un torque al rotor, causando que este gire fluyendo de cámara a cámara. La rotación es transmitida a la barrena por una junta universal a la cual esta conectada.

El PDM más común es el llamado de medio lóbulo, debido a que el rotor tiene un lóbulo y el estator tiene dos lóbulos o dientes. La excesiva caída de presión a través de cada etapa del motor acelera el desgaste del estator, este problema se reduce con el empleo de un motor multi-lóbulo, el cual reduce la velocidad rotacional y las caídas de presión en cada etapa. Ver Figura 48 .



**FIGURA 48. SE OBSERVA UN MOTOR DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO (P.D.M) , ASÍ COMO LAS DIFERENTES SECCIONES QUE INTEGRAN ESTÁ HERRAMIENTA.**

Como se mencionó anteriormente, la perforación de radio medio con grandes diámetros fue posible con los motores de desplazamiento positivo ( PDM ).

El direccionamiento del motor esta cercano a la barrena y como resultado se tienen muchos menores cambios en los índices de construcción.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### 5.5. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN DE PERFORACIÓN.

Este sistema es diseñado para perforar pozos rectos y direccionales con barrenas tricónicas o policristalinas ( PDC ). Si se emplean motores de fondo para cada etapa o intervalo del agujero, el sistema de navegación proporciona mayor caballaje y torque a la barrena, lo que incrementa los ritmos de penetración. En este sistema se tienen menos correcciones en el curso, se perforan pozos más uniformes y por lo tanto con menos problemas.

El sistema de navegación está constituido por la barrena, el motor de fondo direccional y la herramienta de medición mientras se perfora ( MWD ). Ver Figura 49 .

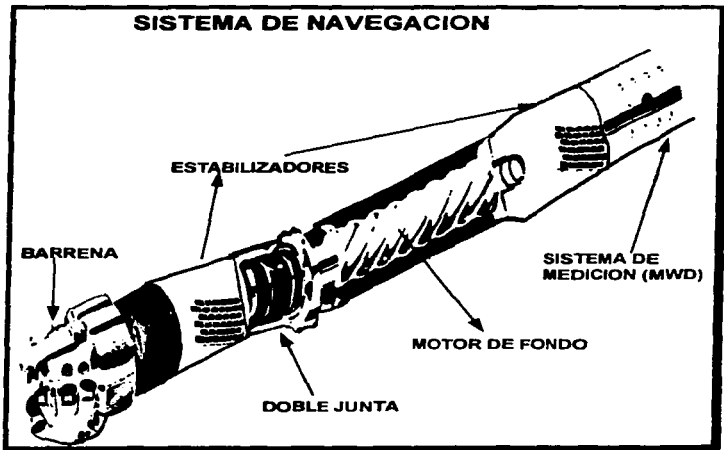


FIGURA 49. EL SISTEMA DE NAVEGACIÓN ESTÁ CONSTITUIDO POR LA BARRENA, EL MOTOR DE FONDO DIRECCIONAL Y LA HERRAMIENTA DE MEDICIÓN MIENTRAS SE PERFORA (MWD).

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

La clave del sistema, es el aparejo de navegación entre la barrena y el motor que desfasa ligeramente el eje de la barrena comparado con el eje de la sarta de perforación.

El aparejo de navegación es una doble junta, la primera junta tiene una dirección y la segunda es opuesta a la primera, las cuales son imperceptibles e inclinan ligeramente el eje de la barrena. Dependiendo del motor y del ritmo de construcción deseado, el ángulo total de la barrena varía de 0.13° a 8°.

El diseño del sistema permite ser orientado para el inicio de la desviación y llevar a cabo correcciones mientras se perfora. También permite perforar intervalos de agujeros rectos rotando la sarta mientras el motor continúa funcionando. Sin la necesidad de efectuar viajes adicionales.

Debido a que el sistema de navegación puede estar más tiempo en el fondo que un aparejo convencional, las barrenas deben ser seleccionadas para funcionar a través de los diferentes intervalos que se tengan que atravesar. También la barrena debe ser capaz de perforar tanto en agujeros rectos como en intervalos desviados.

El siguiente componente son estabilizadores integrales, los cuales están a pleno calibre y se encuentran en la manga del motor, directamente arriba de la barrena y otro que se encuentra arriba del motor.

Estos estabilizadores tienen tres funciones :

1. La primera sirve como puntos de tangencia que define la curvatura constante a lo largo de la cual el aparejo perforará de un modo orientado. El ritmo de construcción puede ser controlado por la variación en la colocación del estabilizador superior.
2. La segunda, el estabilizador cercano a la barrena reduce las vibraciones y deflexiones en la barrena.
3. La tercera, los estabilizadores agregan rigidez al aparejo, así este puede mantener su inclinación y dirección mientras se perfora un intervalo de agujero recto.

El siguiente componente del sistema, es un motor de desplazamiento positivo el cual se selecciona dependiendo de la capacidad hidráulica del equipo, tipo de barrena y de las características de la formación. Generalmente el motor de desplazamiento positivo ( PDM ) con baja velocidad y alto torque opera con barrenas tricónicas o con barrenas con cortadores gigantes. Los motores de velocidades media y torque medio trabajan con barrenas compactas de diamantes estándares o naturales en lodos base aceite.

El control de la dirección se lleva a cabo con una herramienta de medición mientras se perfora ( MVD ), el cual se coloca arriba del motor direccionable proporcionando mediciones oportunas de la dirección durante las operaciones de perforación; esto permite corregir el curso rápidamente y ayuda a perforar el pozo conforme la dirección planeada.

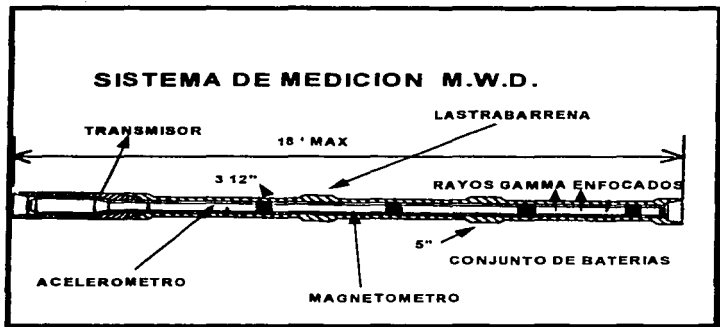
## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALGANCE EXTENDIDO

El sistema de navegación reduce el tiempo de perforación en un 30 a 40% comparado con los métodos de perforación convencional aunado con la experiencia que se tenga en el área.

### 5.6. SISTEMA DE MEDICIÓN MIENTRAS SE PERFORA ( M.W.D ).

El sistema direccional de medición puede emplearse con la perforación convencional o con motores de fondo como un componente integral de la sarta en el sistema de navegación. Este sistema mide la trayectoria y registra la dirección de la cara de la herramienta mientras se perfora. Se puede emplear sin problemas con casi todos los lodos de perforación ( con aditivos y agentes de pérdidas de circulación ) y además con herramientas de 2" de diámetro interior.

Este sistema se encuentra disponible en diámetros de 6 3/4", 7 3/4", 8", 9" y 9 1/2" de diámetro exterior para igualar las necesidades de la sarta. El sistema consta de dos componentes básicos: un lastrararena antimagnético de 18 pies en el que se albergan los sensores, el emisor de pulsos y un conjunto de baterías . Ver Figura 50 .



**FIGURA 60. EL SISTEMA CONSTA DE DOS COMPONENTES BÁSICOS: UN LASTRABARRENA ANTIMAGNÉTICO DE 18 PIES EN EL QUE SE ALBERGAN LOS SENSORES, EL EMISOR DE PULSOS Y UN CONJUNTO DE BATERÍAS.**

Los lastrararenas reducen los impactos y vibraciones causados por las sarts, con la ventaja de que pueden ser separados o reemplazados individualmente sin la necesidad de desarmar toda la herramienta. El sensor esta constituido por un

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

acelerómetro y un magnetómetro triaxiales para obtener, medidas exactas de la inclinación, dirección del agujero y orientación de la cara de la herramienta, así como de la temperatura del fondo del agujero.

Esta herramienta transmite la información desde el fondo del agujero a la superficie por medio de pulsos negativos o positivos. La transmisión de impulsos se lleva a cabo por la acción de una válvula que trabaja con la presión diferencial que se requiere para que opere el sistema ( 750 - 1000 psi ).

Cuando la válvula se abre permite el paso del fluido de la herramienta al espacio anular, creando una pequeña caída de presión ( pulsos negativos ) en la superficie, estos pulsos son detectados y codificados.

El sistema es activado por un conjunto de baterías las cuales tienen una duración de aproximadamente 100 hrs.

La segunda unidad, es una registradora superficial de las señales.

En la superficie, la secuencia de mediciones inicia operando un detector de presión para registrarla, la cual se instala en el tubo de alimentación ( Stand pipe ) a la línea de flujo o las presas. La secuencia de los pulsos determina el modo de operación de los instrumentos del motor de fondo e inicio de las mediciones.

La señal de los impulsos del motor de fondo son recibidos en la superficie por un traductor de presión, el cual transmite la correspondiente señal eléctrica de la dirección e inclinación del agujero y de la cara de la herramienta a la unidad lectora localizada en la superficie.

A esta herramienta se pueden agregar sondas de rayos-gamma y otras dependiendo de las necesidades que se tengan en el pozo.

### **5.7.HERRAMIENTA RECUPERABLE DE MEDICIÓN MIENTRAS SE PERFORA ( D.M.W.D ).**

Esta es una herramienta de medición MWD recuperable con equipo de línea con la cual se puede ahorrar tiempo, tiene grandes aplicaciones y beneficios dentro de los cuales se encuentran:

- La herramienta es completamente recuperable lo cual disminuye los riesgos de pérdida en el pozo.
- La herramienta tiene un solo tamaño que opera en todos los diámetros de lastrabarrena, para mantener la flexibilidad y simplicidad de su uso.
- La herramienta tiene muy bajo peso lo cual permite su fácil transportación.
- Se elimina la adición de instrumentos en la sarta.

Esta herramienta se emplea principalmente para llevar a cabo mediciones cortas sin la necesidad de efectuar viajes adicionales para instalar el MWD.

Existen tres métodos de instalación de la herramienta dentro de la sarta que son:

#### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

- Colocándola en la superficie en el interior de la sarta.
- Con equipo de línea.
- Caída libre a través de la sarta desde la superficie hasta un lastrabarrena antimagnético que se coloca previamente arriba del aparejo de perforación.

Otras de las ventajas que se tiene con esta herramienta es que no se requiere centrarla en el lastrabarrena, además, se puede dividir en cuatro fracciones, que la hacen más práctica y es ubicada en un plato receptor previamente colocado abajo del lastrabarrena antimagnético. Además tiene una temperatura límite de operación de 257°F ( 125°C) . La Figura 51 y la Tabla 8 dan las características de esta herramienta.



## SISTEMA DE MEDICION M.W.D MODULAR

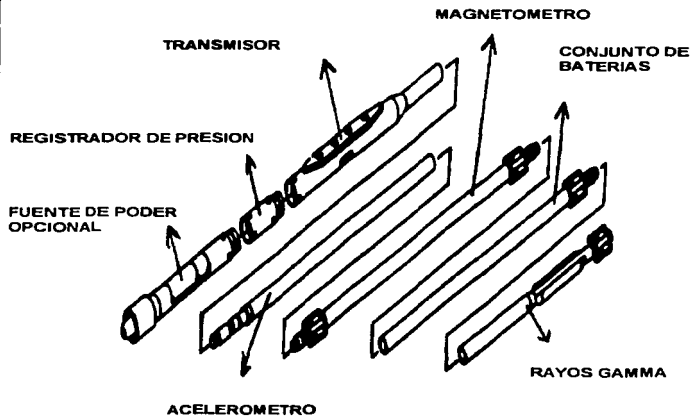


FIGURA 51. AQUÍ SE OBSERVA LAS PARTES QUE INTEGRAN LA HERRAMIENTA DE MEDICIÓN RECUPERABLE CON EQUIPO DE LÍNEA.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

**TABLA 8. SE PRESENTAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA HERRAMIENTA RECUPERABLE DE MEDICIÓN.**

<b>TAMAÑO DE LOS LASTRABARRERAS</b>	<b>3 4/3" - 9 1/2"</b>
<b>LONGITUD</b>	<b>23 PIES MÍNIMO</b>
<b>FUENTE DE PODER</b>	<b>BATERÍA (150 HR.)</b>
<b>TEMPERATURA</b>	<b>125 °C</b>
<b>PRESIÓN MÁXIMA</b>	<b>20,000 PSI</b>
<b>ROTARIA</b>	<b>NO RESTRINGIDO</b>
<b>TIPO DE SENSOR</b>	<b>MAGNETOMETRO TRIAXIAL</b>
<b>AZIMUT</b>	<b>0° A 360°</b>
<b>INCLINACIÓN</b>	<b>0° A 180°</b>

**5.8. TUBERÍA DE PERFORACIÓN PARA SERVICIO COMPRESIVO.**

Esta tubería se emplea en la perforación de pozos de radio medio cuando los ángulos exceden de 15° / 100 pies y se usa desde el punto de inicio de la desviación hasta el fondo del agujero. Consiste en una tubería de perforación S-135 con nodos de desgaste espaciados entre las juntas. Esta tubería se puede rotar en la curva y ser corregida en compresión sin sufrir fallas por fatiga ni pandeo, también agita los recortes auxiliando en la limpieza del pozo. Cuando los

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

ángulos de construcción son menores de  $15^\circ/100$  pies, en lugar de esta tubería especial, se puede emplear tubería pesada de perforación.

Dos tamaños de tubería se encuentran disponibles ( $3\ 1/2"$  y  $2\ 7/8"$ ) cada uno con diámetro de  $5"$  en las juntas ( $3\ 1/2"$  IF) y en los nodos. La tubería  $3\ 1/2"$ ,  $13.3$  lb/pie es la más fuerte y rígida de las dos y tiene dos nodos a intervalos de  $10$  pies entre las juntas. La tubería a  $2\ 7/8"$ ,  $10.4$  lb/pie, tiene tres nodos a intervalos de  $7.5$  pies entre sus juntas. Ver Figura 52.

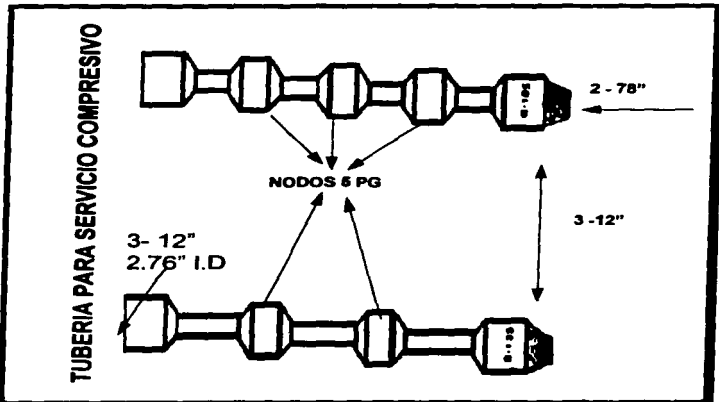


FIGURA 52. DOS TIPOS DE TUBERÍA PARA SERVICIO COMPRESIVO QUE SE UTILIZAN PRINCIPALMENTE PARA ÁNGULOS MAYORES DE  $15^\circ/100$  PIES.

Existen las barrenas antimagnéticas para sistemas de radios medios los cuales son maquinados a las dimensiones de la tubería para compresión.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **5.9. SISTEMA DE PERFORACIÓN DE RADIO CORTO.**

Este sistema desvía pozos de la vertical a la horizontal a un promedio de 1.5 a 3.0° / pie, con un radio de 20 pies a 30 pies y con una longitud perforada de 30 pies a 60 pies. El sistema de perforación de radio corto es totalmente compatible con equipos de perforación estándar y no requiere de fluidos o de barrenas especiales. La rotación de la barrena es dada por un equipo de superficie, que generalmente es un "swivel" de poder, y las consideraciones de perforación están determinadas por las características de la formación y la zona productora. Este sistema está comprendido de cuatro elementos principales que son:

#### **• GUÍA DE ORIENTACIÓN Y CONJUNTO DE EMPAQUES.**

Este elemento del sistema es básicamente un empacador con cuña desviadora, que colocado a una profundidad determinada permite la perforación curva para llegar al objetivo a  $\pm 90^\circ$  de profundidad. La cuña cuando esta orientada permite el control de la dirección y esta difiere de una cuña desviadora estándar en que la cara de la herramienta ha sido incrementada para facilitar un mayor índice de construcción. El empacador del conjunto, es un empacador estándar para pozo abierto de tipo inflable. Estos dos elementos se encuentran en una sola pieza y se pueden orientar e inflar en un solo viaje.

#### **• CONJUNTO GANADOR DE ÁNGULO.**

Este elemento es el corazón del sistema, el cual desvía el pozo de la vertical a la horizontal. Este elemento consiste de dos partes :

1. La columna flexible, que une la columna rotaria vertical con la guía curva de perforación, y la guía de perforación como tal.
2. La guía curva de perforación comprende una camisa exterior no rotatoria con una curva de radio predeterminada; un vástago interno que imparte la rotación desde la columna vertical a la barrena, paquete de rodamientos en la parte inferior y superior del conjunto que conecta la camisa externa no rotativa y el vástago interno. La guía curva solo se emplea para separar el pozo de la vertical a la horizontal, cuando se alcanzan los  $90^\circ$ , la guía se saca y se continua con un conjunto para mantener el ángulo.

#### **• CONJUNTO PARA MANTENER EL ÁNGULO.**

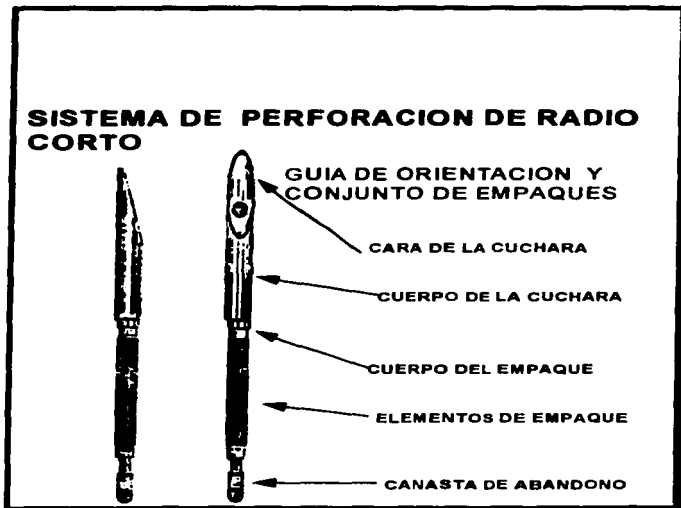
Este sistema consiste de articulaciones de tubo flexible y de un mandril de perforación estabilizado que puede ser rígido o semirígido.

El mandril de perforación se localiza arriba de la barrena y emplea dos estabilizadores con diámetros que varían para mantener, perder o incrementar el ángulo según se requiera.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### • TUBERÍA ARTICULADA FLEXIBLE ( WIGGLIES ).

Esta tubería se emplea en conjuntos para incrementar o mantener el ángulo y se utiliza para unir la columna vertical rotaria con el conjunto de fondo. Cada tubo tiene una longitud de aproximadamente 20 pies de largo con uniones universales interconectadas a cada pie . Esta tubería tiene una camisa flexible para permitir la circulación del lodo hacia la barrena . Ver Figura 53 .



**FIGURA 53. SE OBSERVA EL SISTEMA DE PERFORACIÓN DE RADIO CORTO SE USA PARA DESVIAR POZOS DE LA VERTICAL A LA HORIZONTAL.**

Las herramientas que se mencionaron anteriormente, son algunas de las que más se están empleando en la actualidad debido a la reducción de costos e

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

**incremento en la eficiencia en las operaciones de perforación y cuya aplicación es cada vez más generalizada.**

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **CAPÍTULO VI.**

### **CASOS HISTÓRICOS.**

#### **6.1. INTRODUCCIÓN.**

En esta sección se incluirán los análisis de diversas fuentes que registran los trabajos desarrollados en el campo Eugene Island, en el Golfo de México, por las compañías Nerco Oil y Forrest Oil Co. A continuación se resume la literatura consultada referente a las operaciones desarrolladas en los pozos de Alcance Extendido y su aportación a la Ingeniería de la perforación.

#### **6.2. CASO HISTÓRICO DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL PARA UN POZO DE ALCANCE EXTENDIDO DE 78° EN EL GOLFO DE MÉXICO, EUGENE ISLAND 326 No.A-6.**

#### **-RESUMEN.**

Este artículo describe la perforación y terminación del pozo OCS-G-5518 No A-6, de la Corporación Forest Oil en el bloque 326 del campo Eugene Island. El pozo fue perforado como un pozo de Alcance Extendido con un ángulo de 78° de inclinación desde una plataforma de producción en el bloque 325 del campo Eugene Island. El propósito era establecer producción de una arena somera localizada a una profundidad vertical verdadera de 2,300 pies ( 701 m. ) y un desplazamiento de 7,000 pies ( 2,134 m. ) desde la plataforma existente. El Caso se enfoca al aspecto de ingeniería del plan del pozo y los problemas operacionales que fueron encontrados.

Los resultados finales indicaron que un pozo de Alcance Extendido somero con una relación de profundidad medida contra profundidad vertical verdadera de 3.1:1 podría ser perforado y terminado en el Golfo de México. Las técnicas usadas de lecciones aprendidas pueden ser aplicadas para cualquier área con modificaciones particulares para cierta área. Las plataformas existentes pueden ser usadas para reducir costos y para evitar arrendamientos.

La colocación de nuevas plataformas puede tomarse en consideración en la perforación de pozos de Alcance Extendido, esto como ya se ha mencionado minimiza los costos producción.

La perforación de pozos direccionales de Alcance Extendido es una tecnología altamente potencial ya que se logra con esto la explotación de yacimientos inaccesibles, entre las principales ventajas se tiene la minoración de los costos, la disminución de plataformas y el fuerte aumento de la producción.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **-INTRODUCCIÓN.**

La Corporación Forest Oil ( FOC ) perforó un pozo exploratorio, el OCS-G-5517 No. 3, en el bloque 325 del campo Eugene Island en Noviembre de 1987. El pozo fue perforado a 6,100 pies ( 1859 m. ) de profundidad medida, y varios pozos adicionales fueron perforados usando un equipo de perforación semisumergible sobre 255 pies ( 78 m. ) de agua.

Otro pozo descubridor, el OCS-G-5518 No. 2, fue perforado en el bloque 326 del campo Eugene Island en Marzo de 1988 a 4939 pies de profundidad medida/profundidad vertical verdadera ( 1505 m ). Este pozo encontró una arena productiva a 2,300 pies ( 701 m. ). Se colocó una plataforma sobre el bloque 325 y las operaciones de terminación y extensión a superficie fueron comenzadas. Llegó a ser necesario establecer producción desde el bloque 326 y "Mantenerlo en Producción" de una manera económica. Se consideraron varias opciones:

1. Colocar un mínimo de estructuras mar adentro sobre el pozo descubridor existente en el bloque 326, instalando solo equipo para pruebas , y mandar la producción a una plataforma existente en el bloque 325 para ser procesada.
2. Diseñar una terminación submarina fluyendo a las plataformas existentes en el bloque 325 para procesar la producción.
3. Perforar y terminar un pozo de Alcance Extendido desde la plataforma existente en el bloque 325.

El análisis de costos mostró que las opciones 2 y 3 costarían aproximadamente lo mismo y que la opción 1 costaría dos veces lo que los otros dos. Por causa del costo y los frecuentes problemas mecánicos asociados con la opción 2, fue elegida la opción 3. El plan direccional básico fue el siguiente:

- Perforar a un ritmo de incremento del ángulo de 6"/100 pies desde la superficie a un ángulo máximo de 77°19' a 1,389 pies de profundidad medida ( 423 m. ) / 1000 pies de profundidad vertical verdadera ( 305 m. ).
- Sostener el ángulo de 77° 19' a una profundidad total medida de 7,169 ( 2,185 m. )/1000 pies de profundidad vertical verdadera ( 701 m. ).

Este plan resultó en una relación 3.1:1 entre profundidad medida / profundidad vertical verdadera.

### **-PLATAFORMA DE PRODUCCIÓN EN EL BLOQUE 325 EN EL CAMPO EUGENE ISLAND.**

La planeación de este pozo de Alcance Extendido fue haciéndose concurrentemente con el diseño y construcción de la plataforma de producción en el bloque 325 del campo Eugene Island. Fue innecesario e impráctico comenzar



## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

la desviación debajo de la mesa rotatoria, pero fue necesario construir una sección curva dentro de la plataforma a 6"/100 pies con tubería conductora de 26" x 3/4" grado B, con un conductor de zapata direccional.

La zapata direccional era de 26" x 1" x 8" de longitud con una excentricidad de 1/4". La sección curva fue de 231 pies ( 70 m. ) de longitud con una sección recta en la cima de 46 pies ( 14 m. ) para una longitud total de 277 pies ( 84 m. ). La sección se extendió desde el plano inferior (+) 15 pies ( +4.6 m. ) hasta el nivel (-) 256 pies ( -78 m. ) o directo a la línea de lodo. El punto de inicio de la desviación actual estaba a 144.5 pies ( 44 m. ) o 223.5 pies ( 68 m. ) por debajo de la línea de lodo.

En el análisis final, la construcción de la curva se trabajó bien pero la zapata direccional falló en mantener el ritmo de incremento del ángulo ( 6"/100 pies ) en las formaciones no consolidadas.

### **-PERFORACIÓN DIRECCIONAL.**

No se encontraron problemas significativos en el aspecto direccional del pozo. Cuando el ángulo comenzó a caer, la caída fue corregida primero por un motor dirigible y luego por la colocación de un estabilizador. Una corrección ocurrió al llevar al agujero a su máximo ángulo de 87° el cual no fue necesario o deseable pero aparentemente no dañó nada. Desde aquel punto, se permitió que el ángulo del agujero cayera lentamente desde que el pozo había cruzado del bloque 325 al 326 antes de penetrar la arena objetivo.

### **-PROGRAMA DE TR'S.**

El programa original de TR's estaba basado sobre lo que puede ser considerado un programa normal en la Costa del Golfo, excepto por la TR intermedia de 9 5/8", a ser colocada justo sobre la arena productora. Originalmente fue planeado perforar un agujero de 12 1/4" a la profundidad total y colocar la TR de 9 5/8" en la cima de la arena productora. Después de perforar y limpiar el agujero a la profundidad total, se planeó un liner de 7" como TR de explotación en el agujero de 12 1/4"; se creía que si el liner podía ser rotado con centralización estacionaria se lograría un mejor trabajo de cementación primaria comparado con la cementación de 9 5/8" en el fondo.

El programa planeado de TR's tuvo que ser cambiado. La TR de 20" tuvo que ser trabajada por medio de una tubería conductora desde los 494 pies ( 150 m. ) hasta 572 pies ( 174 m. ) o justo sobre la zapata direccional a 582 pies ( 177 m. ). La TR de 20" acabó a 604 pies ( 212 m. ). La falla para ser introducida podía ser atribuida a cualquiera o a cualquier combinación de tres cosas. 1) La rigidez de la TR de 20" en combinación con la baja relación de compactación de las formaciones someras; 2) Un derrumbe en la zapata conductora de 26"; 3) el diámetro interior de 2 1/4" de la tubería conductora de 26" con la longitud de 24 pies por 8" de la zapata direccional podría haber hecho rígida la TR de 20" o restringido su capacidad para pasar.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **-APAREJO DE PERFORACIÓN, TORQUE, ARRASTRE Y CÁLCULOS DE PANDEO CRÍTICO.**

Torque, arrastre y pandeo crítico, tres cálculos que fueron corridos asumiendo que el aparejo de perforación estaba a la profundidad de la TR conductora y a profundidad total desde ahí pudieron ser los casos críticos. Los coeficientes de fricción usados fueron de 0.25 dentro de la TR y de 0.30 en agujero descubierto. Esos factores son comúnmente usados en la industria para cálculos de tubería de perforación torque y arrastre. Las tres corridas mostraron que el pandeo crítico, torque y pesos al sacar tubería no sería problema pero que el viaje debajo de la TR conductora no sería realizada sin la adición de peso a la parte superior de la sarta.

Por esta razón, se hicieron planes para usar "sustitutos de potencia". El uso de este método continuaría y aceleraría los viajes en el agujero. Habría sido preferible haber tenido un top drive en el equipo pero una plataforma de 1,000 HP no viene equipada normalmente con top drives. Fue usado un "sustituto de potencia" pero su uso no fue satisfactorio desde el punto de vista económico. El espacio restringido en el piso de trabajo y en la torre del equipo hicieron su uso lento y torpe.

En cada viaje, los pesos al jalar y empujar fueron registrados en cada parada. Estos datos en la TR de 13 3/8" y el agujero de 12 1/4" con tubería de perforación de 4 1/2" y una sarta de fondo de 7 3/4" produjeron un factor de fricción de 0.3 en la TR y de 0.37 en agujero descubierto.

### **-APAREJOS DE FONDO.**

Esencialmente fueron usados cuatro tipos de aparejos de fondo. El primer aparejo de fondo consistía de un aparejo de construcción de ángulo que alcanzara el ritmo de incremento de 6"/100 pies. Fue usado un motor con un sustituto curvo y una herramienta dirigible con. Este aparejo fue usado para perforar el agujero de la TR conductora a 1,429 pies ( 436 m. ) de profundidad medida contra los 1129 pies ( 344 m. ) de profundidad vertical verdadera donde fueron logrados los máximos ángulos de agujero planeados de 78° sin ningún problema.

Después de introducir la TR conductora con equipo flotante y aparejo liso, el aparejo No. 2 fue corrido para seguir perforando manteniendo constante el ángulo del agujero. Este aparejo de fondo fue usados a 2985 pies ( 910 m. ) de profundidad medida debido a que el ángulo del agujero estaba comenzando a caer. Entonces fue corrido el aparejo de fondo No. 3 con un motor dirigible que permitiría correcciones en ángulo y dirección si fuera necesario. A una profundidad de 4411 pies ( 1344 m. ) de profundidad medida, el aparejo de fondo No. 3 fue entonces modificado con un "aparejo de chorro" para incrementar el ángulo. Este aparejo de fondo fue usado a 4711 pies ( 1436 m. ) después de alcanzar el ángulo mas alto en el agujero de 87°.

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

El aparejo de fondo No. 4 fue entonces corrido y la perforación fue continua hasta la TR superficial (la TR de 9 5/8" se convirtió en TR superficial) asentándose a una profundidad de 6350 pies ( 1935 m. ) de profundidad medida por los 2007 pies ( 612 m. ) de profundidad vertical verdadera. Después de la perforación con un aparejo liso, el aparejo de fondo No. 4 fue usado para perforar hasta llegar a la profundidad total, 6966 pies (2123 m.) de profundidad medida por los 2176 pies ( 663 m. ) de profundidad vertical verdadera.

### **-APAREJOS DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN.**

Debido a la somera profundidad del punto de inicio de la desviación y al rápido alcance del ángulo de 78°, hubo poco peso vertical para empujar las sargas al fondo y proporcionar peso a la barrena. Por esta causa, la tubería de perforación extrapesada y los lastrabarrenas tuvieron que ser corridos inmediatamente debajo de la mesa rotatoria.

### **-CÁLCULOS DE TR'S PARA TORQUE Y ARRASTRE.**

Los cálculos para torque y arrastre fueron además hechos para las sargas de 20", 13 3/8" y 9 5/8", y para el liner de explotación de 7". Los siguientes factores de fricción fueron usados en la evaluación inicial de cada sarga de TR para ver si podía ser corrida con métodos convencionales.

Las gráficas de riesgo de arrastre en las sargas de TR's de 20" y 13 3/8" mostraron que podían ser corridas a sus respectivas profundidades verdaderas sin ningún problema.

Las gráficas de riesgo de arrastre mostraron que la TR de 9 5/8" y el liner de 7" no llegarían al fondo ya que existiría una condición de peso negativo. Una condición de peso negativo existe cuando las fuerzas de arrastre encontradas o generadas al correrse los elementos tubulares excedan la fuerza axial ( el componente vertical de peso ) disponible para empujar elementos tubulares en el agujero. Por esto, llegó a ser necesario el uso de un " Equipo de Flotación Selectiva ".

Un equipo de flotación selectiva es un empacador de TR interna o un equipo de tapón de TR es cual es colocado o localizado en la TR a una profundidad determinada basada en cálculos de torque y arrastre. El propósito del equipo de flotación selectiva es aislar una burbuja de aire en el fondo de la TR. Esta burbuja de aire da flotación para aquella parte de la TR cercana a la horizontal del agujero y reduce las fuerzas de arrastre ahí presentes. La sarga de TR es comida en seco hasta la instalación del equipo de flotación selectivo. Desde este punto, la TR es llenada con lodo conforme se está corriendo, dando peso adicional o empujando en la vertical o en la parte mas cercana a la vertical del agujero.

Una vez que la TR alcanza la profundidad total , el equipo de flotación selectiva es liberado. El equipo de flotación selectiva que es usado en un pozo sujeto requiere que se corra tubería de perforación dentro de la TR para liberar en equipo y recuperarlo. Cuando la tubería de perforación sujeta el equipo, éste se colapsa, y el lodo de perforación y la burbuja de aire intercambian posiciones sin

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

ninguna diferencia notable en la superficie. Entonces se jala el equipo fuera de la TR. La TR es llenada con lodo, comienza la circulación y es seguido por un procedimiento de cementación normal.

Los cálculos de torque y arrastre fueron hechos con el equipo de flotación selectiva instalado usando el peso equivalente de la sección de TR flotada con burbuja de aire. Este peso es determinado por la siguiente fórmula:

$$CWBA = \frac{[(CW)(BF) - (CI)]}{BF} \quad (113)$$

donde:

CWBA = Peso de la TR flotada por aire.

CW = Peso de la TR ( lb/pie ).

BF = Factor de flotación ( % ).

CV = Volumen Interno de TR ( pie<sup>3</sup>/pie ).

El sello de la TR de 9 5/8", de 47 lb/pie, N-80, fue corrido con lodo de 10.0 lb/gal ( 78.4 lb/pie<sup>3</sup> ) y tenía el siguiente CWBA:

$$CWBA = \frac{[(47)(847) - (4110)(748)]}{0847} = 9.06 \text{ lb/pie}$$

Se notó que en las sargas mas largas de TR , el peso de la "sarta flotada con aire", puede ser un número negativo, esto crea un arrastre sobre la parte superior o cubierta del agujero lo cual puede ser tan perjudicial al correr la TR como arrastrarla en el fondo del agujero.

La gráfica de riesgo de arrastre usando el mas alto factor de fricción mostró que la TR podía correrse a una profundidad justo bajo los 3000 pies ( 914 m. ) de profundidad medida, pero tendría entonces que ser rotada para alcanzar los 4500 pies ( 1372 m. ) donde el equipo de flotación selectiva sería instalado. La rotación continuaria hasta aproximadamente 5000 pies ( 1524 m. ) donde el peso del lodo de la TR llena empujaría la TR de 9 5/8" hasta la profundidad total. La TR de 9 5/8" fue corrida en el agujero sin rotación todo el recorrido hasta los 4350 pies ( 1326 m. ) de profundidad medida donde se detuvo. En este intervalo, el indicador de peso se mostró algunas veces solo 500 lbs de peso positivo. El equipo de flotación selectiva fue instalado y la hasta la profundidad total generalmente siguiendo la curva prevista por un factor de fricción de 0.40.

La gráfica de riesgo de arrastre de la TR de 7" usando el mas alto factor de fricción mostró que podía ser corrida seca hasta los 4500 pies ( 1372 m. ) donde el equipo de flotación selectiva sería instalado. La TR continuaria en el agujero hasta la zapata de la TR de 9 5/8" a 6350 pies ( 1935 m. ). La TR tendría entonces que ser rotada para alcanzar la profundidad total medida de 6966 pies ( 2123 m. ).

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

La TR de 7" siguió la curva de factor de fricción de 0.30 dentro de la TR de 9 5/8", pero no se detuvo en el agujero abierto. La TR fue corrida hasta 20 pies encima del fondo, el equipo de flotación selectiva fue recuperado y la TR fue llenada con lodo. La TR fue corrida entonces hasta 6966 pies ( 2123 m. ) y reciprocada dos veces.

Los cálculos usando los pesos subiendo y bajando desde la reciprocación de la TR de 9 5/8" y de 7" resultaron en factores de fricción negativos.

### **-CENTRALIZACIÓN DE LA TR.**

Mientras se trabajaba en el procedimiento de corrida de la TR, fue considerado el uso de centradores. Se sabía que un centrador convencional curvo con un diámetro exterior mayor que el tamaño de la barrena, crearía un componente adicional de arrastre lo cual sería un problema para que la TR alcanzara el fondo. Fue considerado entonces el uso de un centrador de diámetro reducido tipo arco o un centrador de TR sólido fue considerado entonces. Se decidió correr un centrador sólido de TR de 12 " en cada junta ( para permitir rotación ) en el agujero abierto a menos que se note arrastre adicional durante la operación de corrida.

La corrida de la TR de 9 5/8" procedió como se planeo las primeras 25 juntas, pero los centradores fueron contribuyendo al arrastre. Las siguientes 13 juntas fueron corridas con un centrador sólido de TR a cada junta. A una profundidad medida de 1,350 pies ( 411 m. ) la TR de 9 5/8" en el agujero mientras seguía dentro de la TR de 13 3/8" a 1,416 pies ( 432 m. ).

Se jaló la TR de 9 5/8" afuera del agujero y se removieron los centradores en todo excepto dos juntas al fondo. La TR fue corrida nuevamente usando bandas excéntricas a cada junta. Tales bandas fueron además corridas en la TR de 7".

### **-PROGRAMA DE LODOS DE PERFORACIÓN.**

Éste se dividió en dos partes, la parte correspondiente a la construcción del ángulo del agujero hasta la colocación de la TR conductora a 1399 pies ( 426 m. ) de profundidad medida con 1032 pies ( 314 m. ) de profundidad vertical verdadera, que fue perforada con lodo base salmuera estándar. Después de colocar la TR conductora el lodo fue cambiado a un sistema polimérico base salmuera llamado " Polislide ". Éste sistema se diseñó para maximizar la limpieza del agujero ( prevenir estratificación de recortes ) y reducir el torque y arrastre. Este sistema esta basado en químicos de poliacrilamida adicionado con otros reactivos reductores de fricción. Los recortes fueron acarreados del agujero manteniendo un alto punto de cedencia y propiedades inversas de flujo (  $PC > VP$  ). Los baches de alta viscosidad fueron circulados como se requeria y antes de correr la TR. Además el agujero fue barrida ocasionalmente con un bache creado solo por un polímero líquido, directamente abajo de la tubería de perforación. Se creyó que serían necesarios menos viajes

### PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

de limpieza debido al sistema de lodo usado y que su lubricidad ayudó además a que las sartas de 9 5/8" y 7" alcanzaran el fondo sin rotación.

Los gastos de circulación usados se compararon con aquéllos que habrían sido usados en un agujero recto usando el equipo de perforación normal.

El equipo contaba con dos bombas Gardener-Denver PZ-9.

La pérdida de agua API fue bajada gradualmente a 7 ml a los 1,588 pies ( 484 m. ) de profundidad medida, después de perforar afuera de la TR conductora de 13 3/8". Al avanzar la perforación del agujero de la TR superficial, la pérdida de agua fue disminuyendo de 5.5 ml a 3850 pies ( 1173 m. ); a 3.0 ml. a 4000 pies ( 1219 m. ) y a 2.0 a 6000 pies ( 1828 m. ) de profundidad medida. La pérdida de agua API fue mantenida en 2.0 ml. mientras se perforó hasta la profundidad total.

A pesar de que su efecto en formación gumbo somera pudo ser negativo, la introducción de cáscaras de nuez de 5lb/bl y la introducción de cuentas de vidrio adicionado a el lodo en el agujero antes de correr la TR en un intento por reducir los factores de fricción, pero se estos ciertamente no incrementaron los factores de fricción.

#### **-TERMINACIÓN.**

Este pozo de Alcance Extendido se terminó exitosamente como un pozo simple por medio de disparos de 6835 a 6866 pies ( 2084 a 2092 m. ) de profundidad medida con 2129 a 2140 pies ( 648 a 652 m. ) de profundidad vertical verdadera, en seis días de equipo sin ningún problema.

La terminación procedió normalmente siguiendo el mismo procedimiento que habría sido realizado en un pozo somero recto, excepto por los siguiente :

- Debido a la posibilidad de que la formación no consolidada se derrumbara sobre el agujero y atorara las pistolas TCP, los disparos fueron diseñados en los 180° del lado bajo de la TR usando una unión giratoria en la pistola para la orientación al lado bajo. Los disparos se efectuaron en un defasamiento de 45°
- El empaque de grava consistió de un cedazo preempacado para asegurar la colocación eficiente de la grava y eliminar cualquier falla debida a huecos.

A pesar de que el propósito de la terminación no era mejorar el gasto de producción por medio de una longitud perforada mas grande, esto fue un beneficio adicional. El gasto de producción inicial era de 5.5 MMPCD desde un espesor de arena de 15 pies ( 4.6 m. ).

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **-OBSERVACIONES.**

- Los cálculos de torque, arrastre y pandeo crítico son esenciales para planear la operación de perforación, diseño de TR's y procedimientos de corridas.
- La opción de un sistema de lodos el cual limpiará y lubricará efectivamente el agujero es crítica en el éxito de un pozo de alcance extendido.
- El uso de un " equipo de flotación selectiva " asistió las corridas de las sargas mas largas de TR a sus respectivas profundidades totales.
- Es requerido el uso de tubería extrapesada en la parte vertical o cercana a la vertical arriba de la sarga de perforación en un pozo de alcance extendido. Es recomendable contar con la posibilidad de rotar y circular la sarga de perforación.
- Las lecciones aprendidas pueden ser aplicadas en cualquier área con un ambiente de perforación similar para perforar un pozo de alcance extendido con relación de 3,3:1 de profundidad medida contra profundidad vertical verdadera. Un pozo de alcance extendido, puede reducir costos, incrementar la utilidad de las plataformas y ser un factor en la colocación de las nuevas plataformas.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **6.3.CASO HISTÓRICO DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO EN EL GOLFO DE MÉXICO DESDE EL BLOQUE 371 EN EUGENE ISLAND.**

#### **-RESUMEN.**

Recientemente, Nerco Oil and Gas Inc., perforó y terminó su primer pozo de largo alcance y alto ángulo en el Golfo de México desde el Bloque 371, en Eugene Island.

El campo está localizado a 85 millas aproximadamente, costa fuera en Louisiana, en la zona productora del Pleistoceno. La plataforma está localizada sobre un tirante de agua de 420 pies y comúnmente produce gas. El pozo B-11 fue perforado a una profundidad medida de 8958 pies y a una profundidad vertical submarina de 3000 pies. El desplazamiento horizontal fue de 7358 pies y la relación entre el desplazamiento horizontal y la profundidad vertical fue de 2.45. El ángulo máximo alcanzado fue de 90.75°.

#### **-INTRODUCCIÓN.**

Con el fin de desarrollar reservas adicionales del bloque adyacente, se perforó un pozo de largo alcance desde la plataforma existente en el bloque 371. Aunque han sido perforados varios pozos con grandes desplazamientos horizontales desde la plataforma, incluyendo dos pozos perforados a través de conductores curvos, ninguno ha tenido una relación tan alta entre el desplazamiento horizontal y la profundidad vertical ( HD / VD ) como el B-11, en el que se alcanzó un desplazamiento horizontal de 1.5 millas y una profundidad vertical de 0.5 millas. El ángulo máximo fue de 90.75 ° con un promedio de 68 °. El pozo fue planeado originalmente utilizando los conceptos de " peso negativo " y de " análisis de riesgo de arrastre " basados en el trabajo hecho por Unocal.

#### **-OBJETIVOS.**

En un esfuerzo para desarrollar reservas adicionales, fue diseñado un pozo de largo alcance y alto ángulo para alcanzar dos zonas separadas. La primera zona fue una arena somera productora de gas, en un bloque cercano, a una profundidad submarina de 2280 pies con un desplazamiento horizontal de 2500 pies.

La segunda zona fue localizada en el bloque adyacente a una profundidad submarina de 2861 pies con un desplazamiento horizontal de 5898 pies.

El plan era construir un ángulo de 77° para alcanzar el primer objetivo, luego incrementarlo a 82.5 ° para alcanzar el segundo. El ángulo del agujero debería disminuir gradualmente en la sección inferior del agujero a 66.5 ° hasta la profundidad total, mientras se encontrara todavía en la zona.



## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

### **-GEOLOGÍA.**

Toda la estructura en el área del bloque 371 está controlada fuertemente por un domo salino subyacente a la esquina sudeste del bloque 371 y a la esquina noreste del bloque 385. Una larga falla con dirección norte-sur y buzamiento hacia el este, cruza el bloque a través del domo. Varias fallas radiales se extienden hacia afuera del domo en el flanco norte.

Al incrementar la desviación del agujero a 82.5 ° después de alcanzar el primer objetivo, se debería alcanzar el segundo, y con este ángulo y el echado aparente de la arena objetivo más profunda, se podría mantener dentro de la arena objetivo por varios cientos de pies.

### **-PLANEACIÓN DIRECCIONAL DEL POZO B-11.**

#### **-AGUJERO CONDUCTOR.**

Se asentó una tubería conductora de 24"x .75" a 742 pies con 195 pies de penetración debajo de la línea de flotación. La tubería fue equipada con una zapata desviadora para darle al pozo una desviación cuando se perforara la sección de 17 ½". Antes de las operaciones de viaje, la tubería fue orientada con un acimut de 76 °, que eran 30 ° a la izquierda de la dirección propuesta de 106 °, para permitir un correcto giro a mano derecha durante las operaciones de viaje.

#### **-AGUJERO SUPERFICIAL DE 17 ½".**

El plan para desviar abajo de la zapata de la tubería conductora era el utilizar un sistema dirigible y construir el ángulo con ritmo de incremento de 5 °/100 pies hasta un ángulo máximo de 77 °. La T.R. superficial debería asentarse a 2052 pies de profundidad medida y 1676 pies de profundidad vertical verdadera, después de que el máximo ángulo haya sido alcanzado. El aparejo de fondo incluía una barrena de 17 ½", motor dirigible, MWD y HWDP.

#### **-AGUJERO DE 12 ½".**

Esta sección del agujero fue diseñada para mantener 77 ° al primer objetivo, a 4119 pies de profundidad medida y 2408 pies de profundidad vertical verdadera, después construir gradualmente el ángulo con un ritmo de 2.5 °/100 pies al segundo objetivo, localizado a 7413 pies de profundidad medida y 2989 pies de profundidad vertical verdadera. Una vez que el segundo objetivo hubiera sido alcanzado, debería disminuir a un ritmo de 1.5 °/100 pies hasta la profundidad total. En pozos previos en esta área, los cuales tenían presiones de fondo muy altas, la práctica común era asentar una T.R. intermedia de 9 5/8" y después perforar un agujero de 8 ½" a la profundidad total y correr un liner de 7". Sin embargo, basados en la experiencia de otros operadores en el Golfo, se pensó

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANÇE EXTENDIDO

que existía una buena oportunidad de llevar la T.R. de 9 5/8" hasta el fondo y así eliminar la corrida del liner. Pero esto no fue posible y se tuvo que asentar la T.R. intermedia de 9 5/8" debido a las condiciones extremas del agujero.

### **-PLANEACIÓN DE LOS APAREJOS DE FONDO.**

Se tomaron en cuenta los siguientes aspectos en la selección de los aparejos de fondo:

- Probar aparejos basándose en la experiencia en el área.
  - El uso extensivo de motores dirigibles y sistemas MWD.
- Viajes cortos por cada 500 pies de profundidad perforada.

### **-ESTIMACIÓN DEL TORQUE Y ARRASTRE.**

El plan original del pozo B-11 era correr la T.R. de 9 5/8" hasta la profundidad total. Los cálculos de arrastre mostraron que esta tubería excedía su ángulo crítico de arrastre cerca de los 6000 pies y por esto no podría ser deslizada al fondo por su propio peso. El ángulo crítico de arrastre es el ángulo del pozo al cual un elemento de la sarta, con ningunas otras fuerzas, más que la de gravedad y la de arrastre, dejará de deslizarse hacia el fondo del pozo. El ángulo crítico es alcanzado cuando la fuerza axial de un elemento de tubería se iguala al arrastre creado por su fuerza normal.

También se hicieron cálculos de arrastre y torque para el liner de 7" por si se daba el caso de tener que asentar antes la de 9 5/8". Como se tenía que alcanzar la profundidad total ( TD ) con la barrena de 12 ¼", se planeó instalar un dispositivo flotador a aproximadamente 4000 pies de la zapata de la T.R. de 9 5/8" y flotar la tubería hasta la profundidad total. Este proceso ha sido utilizado por otros operadores con algo de éxito. Pero esto no fue posible debido a las severas condiciones del agujero causadas por perforar una sección de sal que no se tenía contemplada. El peso del lodo tuvo que ser incrementado, por lo que se tomó la decisión de asentar la T.R. de 9 5/8" a 3901 pies. Los cálculos de torque y arrastre hechos para el liner de 7" mostraron que probablemente no sería necesario instalarle un dispositivo flotador. Las indicaciones decían que probablemente se detendría a cerca de 500 pies del fondo. Se tuvo que equipar el liner con coples para altos valores de torque y el liner se pudo rotar hasta el fondo.

### **-GRÁFICAS DE RIESGO DE ARRASTRE.**

Cuando se planeó el pozo se hicieron cálculos del riesgo de arrastre para las tuberías de 9 5/8" y de 7", en el que se incluyen varias series de gráficas de riesgo de arrastre. Estas son gráficas de carga en el gancho al meter o sacar tubería contra profundidad medida, para varios factores de fricción o "arrastre". Estos factores de "arrastre" son la suma de todos los factores que tienden a causar arrastre. Estos incluyen factores de fricción, de "ojo de llave", de

### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

pegaduras por presión diferencial, de asentamiento de recortes, etc. Estos factores son calculados a intervalos de 100 pies al meter o sacar tubería y representan la severidad del arrastre en el agujero en el instante que los datos son medidos. Debido a que las condiciones del agujero cambian continuamente, los factores de fricción o de arrastre también lo hacen.

Las gráficas fueron construidas suponiendo un factor de fricción para la T.R. y varios factores para agujero descubierto. La línea vertical es el peso en el bloque representando tensión nula. Se utilizaron dos diferentes pesos del lodo. Las gráficas obtenidas se mantienen en el equipo y pueden ser usadas para identificar problemas potenciales y cambiar el plan del pozo, minimizar o eliminar el problema. También pueden ser usadas durante la perforación para identificar y corregir las condiciones de deterioro del agujero.

#### **-PERFORACIÓN DEL AGUJERO DE 17 1/2".**

El plan original fue diseñado para construir el ángulo a un ritmo de 5 °/100 pies a partir de la parte inferior del tubo conductor, localizada a 740 pies para alcanzar un ángulo de 73 ° a 2400 pies de profundidad medida y después continuar incrementando el ángulo a 77 ° para llegar al primer objetivo.

Durante los primeros 1452 pies, el ritmo de incremento promedió 4.7 °/100 pies, pero después fue perforado un intervalo suave y no consolidado y el ángulo decreció de 43.8 °, a 1452 pies, a 39.6 °, a 1917 pies causando que el pozo estuviera 25 ° atrás que lo planeado para el punto de asentamiento de la T.R. de 13 3/8". Esto requirió entonces que el agujero debajo de la zapata de 13 3/8" fuera perforado con un ritmo de incremento y un ángulo mucho mayores que los planeados originalmente para alcanzar el primer objetivo.

Un procedimiento alternativo pudo haber sido taponar el pozo en ese momento y reperfilar el pozo en un intento por mantener el ritmo de incremento planeado para alcanzar el ángulo requerido. Una recomendación para pozos futuros fue que si la trayectoria real del pozo se desviaba mucho de la planeada, el pozo debería ser taponado y reperfilaro con un sistema de motor de fondo de 12 1/2" con un sustituto curvo, para posteriormente ampliarse a 17 1/2".

#### **-CORRIDA DE LA T.R. DE 13 3/8".**

La tubería fue corrida hasta la profundidad de asentamiento sin problemas, aunque a 400 pies existían patas de perro, entre los 6 y 8 °. La tubería fue reciprocada en casi toda la operación de cementación.

#### **-PERFORACIÓN DEL AGUJERO DE 12 1/4".**

Se utilizó un sistema dirigible para perforar abajo de la T.R. de 13 3/8". Debido a que el pozo se encontraba abajo de la trayectoria planeada, el plan fue construir el ángulo gradualmente a 2.5 °/100 pies hasta 90 ° para alcanzar el primer objetivo y después disminuir el ángulo para alcanzar el segundo objetivo. El

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

ángulo de 90 ° se alcanzó a 3181 pies y por los 3900 pies el ángulo se disminuyó a 82 °.

A 2840 pies se encontró la sección de sal y las condiciones del agujero se deterioraron eventualmente a un punto tal que el peso del lodo tuvo que ser aumentado a 14 lb/gal con el fin de controlar esta sección. Adicionalmente se hizo más difícil hacer el agujero sin rotar la sarta. El peso del lodo tuvo que ser incrementado hasta cerca del valor obtenido de la prueba en la zapata y se tomó la decisión de asentar la T.R. de 9 5/8" más arriba.

### **-CORRIDA DE LA T.R. DE 9 5/8".**

Se hizo una gráfica de riesgo de arrastre para la tubería, asumiendo un factor de fricción para la sección entubada de 0.33 y para el caso de agujero descubierto uno de 0.60. Cerca de los 1000 pies, el peso de la sarta comenzó a desviarse de la curva planeada pero continuó con la misma tendencia general hasta cerca de 3500 pies de profundidad medida, donde el peso de la sarta comenzó a incrementarse. Una razón posible para esto es que cuando la tubería es corrida en el agujero, los recortes asentados son empujados hacia delante de la tubería y después son depositados en las cavidades causadas por derrumbes o fuera de la sección circular del pozo.

La tubería fue corrida sin problemas en la sección horizontal del agujero, pero ocurrió una pegadura a 46 pies del fondo. Los intentos por liberarla fueron infructuosos y la tubería tuvo que ser cementada en ese lugar, a 3910 pies, sin poder rotarse o reciprocarse.

### **-PERFORACIÓN DEL AGUJERO DE 8 ½".**

El peso del lodo se disminuyó de 14.0 a 10.5 lb/gal y se utilizó un sistema dirigible de 8 ½" para perforar hasta la profundidad de asentamiento del liner, localizado a 8963 pies. Fue posible el deslizarse sin problemas la mayor parte del tiempo hasta la profundidad total verdadera. La variación del ángulo se ubicó entre los 74 y 86 ° y el ritmo de perforación entre 42 y 62 pies / hora.

### **-TOMA DE REGISTROS.**

Debido a que la tubería de perforación tenía que ser rotada en varios puntos del agujero, la sarta utilizada para transportar las herramientas de registros al fondo, tuvo que ser diseñada cuidadosamente para compensar por cualquier rotación. Cálculos previos mostraron que la T.P. de 19.5 lb/pie no podría ser deslizada hasta el fondo. El procedimiento general utilizado fue encontrar donde se detendría la tubería, sacar 500 pies y agregar tubería extrapesada arriba de esta. El análisis del arrastre indicó que se necesitarían 2000 pies de tubería extrapesada arriba de la T.P. de 19.5 lb/pie.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

Fue utilizado un aparejo " liso " en una corrida de acondicionamiento hasta la profundidad total. Después de que el agujero fue acondicionado, se obtuvieron datos de arrastre medidos a diferentes profundidades y el factor de fricción calculado más alto fue utilizado para predecir las cargas al bajar la tubería. Los registros se deslizaron fácilmente dentro del agujero sin problemas y se detuvieron a 5 pies del fondo.

### **-CORRIDA DEL LINER DE 7".**

Los análisis preliminares de riesgo de arrastre mostraron que el liner no podría ser deslizado hasta el fondo ( 8963 pies ) y que se necesitarían cerca de 23,000 lbs-pie de torque para rotar el liner al fondo, asumiendo un factor de fricción para agujero descubierto de 0.60.

Debido a los altos valores de torque requeridos, el liner fue equipado con conexiones para alto torque, que fueron adecuadas para 50,000 lbs-pie. También se utilizaron bandas flotadoras rígidas y con mínima excentricidad para centrar.

El liner se detuvo a 8025 pies, es decir, a 938 pies del fondo. Se inició la circulación con un gasto de 3 gal/min y la tubería fue rotada a 40 rpm. Tan pronto como se rompió la fricción, el liner comenzó a deslizarse y continuó hasta el fondo sin mayores problemas. La carga en el gancho se mantuvo constante en 50,000 lbs. Al inicio se utilizaron presiones y gastos de circulación altos, pero los altos gastos actuaron en contra de la corrida de la tubería en el agujero. El liner fue rotado y trabajado durante las operaciones de cementación.

### **-FLUIDOS DE PERFORACIÓN.**

Un sistema natural de lodo gelatinoso fue utilizado para perforar el agujero superficial antes de cambiar a un lodo de perforación polimérico abajo de la zapata de 13 3/8" a 2400 pies. El peso máximo de lodo en este intervalo fue de 9 lb/gal.

Una vez que se obtuvo la prueba de la zapata, el lodo iniciador fue desplazado con el sistema " Sansoil ". Este es, básicamente, un sistema de lodo de tipo polimérico combinado con aditivos lubricantes. También invierte las propiedades reológicas del lodo (YP > PV). El control de sólidos fue mantenido utilizando temblorinas Brandt de malla 10-40 en la plataforma y de ahí en forma de cascada pasando por una malla 40 ( temblorinas primarias ), y limpiadores Triton Flowline de malla 175 en el barco de asistencia. Fueron utilizados desarenadores y limpiadores de lodo durante la perforación.

A los 2840 pies una lutita deleznable comenzó a ser un problema y eventualmente se tuvo que incrementar el peso del lodo a 14.0 lb/gal a los 3238 pies para controlar el agujero. En este punto, el ángulo del agujero era de 68 °. Adicionalmente, los cloruros tuvieron que ser incrementados a 85,000 ppm. como resultado de perforar a través de la sección de sal. El sistema de lodo fue convertido a un sistema saturado de sal y el pozo fue perforado hasta 3956 pies

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

de esta manera; debido a las malas condiciones del agujero, se decidió asentar la T.R. de 9 5/8" antes.

Debido a los problemas del agujero, al cambio por un sistema saturado de sal y a que se mantuvieron los pesos del lodo altos, el 52.4% del costo total de los fluidos fueron gastados durante este intervalo. De este total, las principales categorías fueron aditivos densificantes ( 24% ), sacos de sal para saturar al sistema ( 17% ), lubricantes ( 14% ), y controladores de filtrado ( 13% ).

Antes de perforar abajo de la zapata, el lodo de 14.0 lb/gal fue desplazado con un sistema de 10.5 lb/gal y el agujero fue perforado hasta el profundidad de asentamiento del liner de 7" sin mayores problemas. Los ángulos del agujero se mantuvieron entre 80 y 85 ° y fueron bombeados periódicamente baches lavadores viscosos, para asegurar la buena limpieza del agujero. Adicionalmente, fueron realizados viajes cortos cada 500 pies. Para ayudar a reducir la fricción, se adicionaron al sistema de lodo, baches lubricantes antes de correr el liner de 7".

El costo del lodo para este intervalo representó el 32.5% del costo total de los fluidos. De este porcentaje, las principales categorías de aditivos utilizados fueron lubricantes ( 46% ), debido a la adición de baches lubricantes, aditivos densificantes ( 15% ), inhibidores ( 14% ), y controladores de filtrado ( 12% ).

### **-DISEÑO DEL EQUIPO.**

El equipo utilizado para perforar fue una plataforma semisumergible con asistencia. El equipo fue esencialmente una plataforma equipada con un top drive Vargo TDS-3 con todas las bombas asociadas y un equipo de control de sólidos ubicado en el barco de servicio. Un pasillo removible fue construido para trasladarse de la plataforma al barco. El uso del top drive ha sido muy importante en la perforación de pozos de largo alcance. El tiempo de conexiones fue minimizado y la capacidad de reparar fue muy importante. Igual de importante fue el contar con la capacidad de rotar la T.R. o el liner una vez que estas tuberías dejaran de deslizarse.

### **-PRÁCTICAS DE PERFORACIÓN.**

Se repasó frecuentemente durante la perforación de la sección de alcance del pozo B-11. Esta técnica consistió en circular y rotar mientras se sacaba la tubería y fue facilitada por la unidad del top drive del equipo. El pozo se repasó cada 500 pies de agujero perforado. El hacer esto ayudó a barrer y agitar los recortes y así hacerlos fluir fuera del agujero, dejándolo limpio para la corrida de la T.R. También ayudó a remover lútlitas deleznables o hinchadas y minimizó el tiempo que pudieran reaccionar con el fluido de perforación.

### **-CONTROL DIRECCIONAL.**

Se emplearon varias veces sistemas dirigibles de perforación durante la perforación del B-11. El sistema dirigible fue virtualmente utilizado en todo el

## **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

agujero desde el conductor de 24" hasta la profundidad total. Este sistema consistió en motores de fondo con caja curva, estabilizadores, lastrabarrenas y sistema MWD. Los sistemas dirigibles pueden ser orientados y utilizados con el motor de fondo para incrementar o disminuir el ángulo o hacer ajustes direccionales; o pueden ser rotados con la sarta de perforación completa con el top drive en las secciones rectas del agujero.

### **-BARRENAS DE PERFORACIÓN.**

No se hicieron cambios especiales en el programa de barrenas utilizado en otros pozos perforados en el área. Básicamente, se utilizaron barrenas de dientes maquinados. No se utilizaron barrenas de carburo de tungsteno o de diamantes (PDC).

### **-TERMINACIÓN.**

La terminación del B-11 requirió 24 días para llevarse a cabo, 7 días más que las terminaciones anteriores. Los problemas asociados con la terminación fueron los siguientes:

- Durante los disparos hechos para una prueba de formación DST, los orificios fueron perforados en el "lado bajo", con 500 psi en condiciones bajo balance. Las pistolas fueron posicionadas en el lado bajo, utilizando una "unión giratoria", asumiendo que posicionaría automáticamente a las pistolas para disparar en la parte baja. La arena se introdujo, se pegaron las pistolas y tuvieron que ser pescadas.
- Durante la perforación de la zona baja, las pistolas fueron posicionadas utilizando un sustituto orientador. Esto requirió una corrida extra de línea de acero para orientar las pistolas, sin embargo, esta fue la mejor manera para posicionar las pistolas. Se prefirió disparar la zona en condiciones balanceadas, que en condiciones bajo balance. Las pistolas fueron sacadas del agujero sin problemas.

Tomó considerable tiempo recuperar las herramientas colocadas en la cima del liner de 7", lo cual fue función del posicionamiento del liner en la parte baja del agujero horizontal. Para pozos futuros las consideraciones que se harán serán: correr una sarta completa o llevar el liner a una parte más arriba del agujero con un ángulo menos severo.

### **-EVALUACIÓN DEL POZO.**

Básicamente, el B-11 fue perforado hasta la profundidad total sin mayores problemas, con la excepción de la perforación a través de la sección superior de la sal. No ocurrieron problemas de pegaduras por presión diferencial, los cuales causaban mayor preocupación particularmente en la zona horizontal del agujero.

## PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

El sistema de fluido utilizado se comporto exitosamente y el utilizar un equipo con top drive proporcionó un beneficio especial cuando se perforó la sección de alcance extendido del agujero. La fase de terminación llevó más tiempo que el esperado por los problemas relacionados con el traslape del liner.

### **-LOGROS.**

Un pozo con una exitosa relación entre la desviación horizontal y la profundidad vertical de 2.45 fue perforado en el Golfo ( U.S. ) alcanzando ángulos de 90 °. El ángulo máximo fue de 90.75 ° y el ángulo promedio fue de 68 °. El uso de coples para valores altos de torque hizo posible que el liner fuera rotado los últimos 983 pies al fondo, cuando el liner dejó de deslizarse. El análisis de riesgo de arrastre fue utilizado para las operaciones de revestimiento y de registro.

### **-OBSERVACIONES.**

- Las reservas de un bloque costa fuera pueden ser ahora desarrolladas desde bloques adyacentes
- Ahora resulta factible el desarrollar reservas someras desde plataformas existentes.
- La clave para lograr una exitosa planeación de un pozo de alcance extendido con alto ángulo es el uso numeroso de análisis de riesgo de arrastre.
- En ciertos casos, cuando los liners son corridos hasta la profundidad total, puede ser conveniente llevar la cima del liner a una zona más vertical del agujero o el correr una sarta completa.
- Mantenerse adelante de la trayectoria propuesta, particularmente en la porción superior del pozo. Si el pozo se mantiene detrás, considerar el taponar y reperfurar el agujero con una barrena más pequeña y con una combinación de motor de fondo-sustituto curvo con mayor ángulo.
- Cuando las tuberías o el liner se detengan y dejen de deslizarse, debido a peso negativo o nulo, se deben utilizar bajas rpm y bajos gastos para romper la resistencia debida a la fricción.



**CONCLUSIONES**

- Con la perforación direccional de alcance extendido se aumentan los volúmenes de hidrocarburos y se reducen los costos de producción.
- Se incrementa la producción a través de intervalos más largos en la formación productora debido al elevado incremento del ángulo en la sección de desviación del agujero.
- Este tipo de pozos ofrecen una alta variedad de aplicaciones, entre estas aplicaciones están:
  1. La perforación en domos salinos y formaciones con fallas geológicas.
  2. La perforación de pozos de alivio, en problemas de pozos descontrolados.
  3. La perforación lateral de diferentes estructuras.
  4. Reducción del número de plataformas para el desarrollo de campos marinos.
  5. Los pozos de alcance extendido permiten perforar desde un barco o de una localización terrestre, un objetivo que se localice mar adentro.
  6. La exploración de múltiples yacimientos a partir de un sólo pozo.
  7. La perforación de zonas pobladas ó inaccesibles que actualmente son inalcanzables.
- Los altos ritmos en la desviación y los grandes desplazamientos en la horizontal ocasionan problemas los cuales se mencionan:
  1. Resistencia al avance de la T.P. dentro del agujero por fuerzas axiales y de torsión que impiden el movimiento de la sarta de perforación.
  2. Reducción en la capacidad de controlar el peso sobrebarrena y la dirección del avance de la barrena.
  3. Reducción de la capacidad para limpiar el agujero y riesgos por pegaduras de la T.P. y de las T.Rs. por presión diferencial.
  4. Las cargas en el gancho y torque que determinan la acción de la barrena son enormemente neutralizados por la gran resistencia al avance de la sarta de perforación y por la perforación en pozos con altos ángulos de inclinación.
- En los pozos de alcance extendido se presentan diferentes esfuerzos ó cargas en la sección vertical, en la sección de desviación y en la sección horizontal. Algunos de estos esfuerzos son; tensión, torsión, flexión y compresión.
- El buen manejo y diseño de sartas de perforación ayudan a eliminar el pandeo, y se deben de controlar los incrementos de las cargas axiales y de torque, así como los problemas inherentes al diseño de los aparejos de fondo.
- Es recomendable emplear tubería extrapesada desde el inicio de la desviación hasta el inicio de la sección horizontal para ayudar a eliminar el pandeo, los lastrabarrenas se colocan en la sección vertical.

### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

- Los cálculos de torque, arrastre y pandeo crítico son esenciales para planear la operación de perforación
- La ecuación de Dawson-Pasley se utiliza para predecir el pandeo en la tubería de perforación y se cuentan con gráficas para su fácil aplicación.
- El diseño de T.R para pozos horizontales viene siendo el mismo que para pozos de alcance extendido.
- El orden de la configuración primaria y de contingencia para un pozo de alcance extendido es inverso, es decir primero se explicarán las características de la T.R. de Producción y al final las de T.R Conductora.
- El diseño de T.R para un pozo de alcance extendido debe ser planeado para las operaciones de terminación y cementación( son similares a los de un pozo horizontal ). De tal forma que permita el paso de las herramientas para la sección de desviación y las juntas de las T.R's. deben ser lo suficientemente resistentes al torque para permitir la rotación.
- El mejor sistema de perforación horizontal es aquel que permite llegar al objetivo al menor costo, para conseguir esto se cuentan con diferentes trayectorias, las cuales son los métodos de radio corto, radio largo y radio medio.
- La diferencia más importante entre la perforación de un radio largo y radio medio es la habilidad ó inhabilidad para rotar la sarta sin exceder los límites de la resistencia de los componentes.
- El aparejo de fondo tiene la finalidad de guiar a la barrena a la horizontal y mantener el ángulo por cientos de metros en las extensas zonas horizontales, el ángulo de construcción tiende a producir altos torques y cargas de arrastre en la sarta.
- Los métodos para predecir la trayectoria del pozo son esenciales y se utilizan para determinar la posición de la barrena desde que inicia la desviación hasta que termina la desviación del pozo.
- El método propuesto en esta tesis para la trayectoria del pozo, por su alta exactitud y confiabilidad de los datos medidos y registrados, fue el método de Radio de curvatura.

**BIBLIOGRAFÍA.**

---

- 1-. Simple PC program plans Extended Reach Horizontal wells.  
Dr. Abdel-Alim Hashem.  
Petroleum Engineer International, April 1995.
- 2-. Torque and Drag: Key factors in Extended Reach Drilling.  
T.V Aarstad and Harold Blikra.  
IADC/SPE 27491, February 1994.
- 3-. Horizontal and Extended Reach Drilling Come of Age.  
The Oilman, April 1988.
- 4-. North Sea Advances in Extended Reach Drilling .  
IADC/SPE 25750, February 1993.
- 5-. Application of Innovative Extended Reach and  
Horizontal Drilling Technology in Oilfield development.  
R.A Bell, R.M Hinkel and M.T. Bunyak  
IADC/SPE 1994, February 1994.
- 6-. Proposed Extended Reach Drilling Project.  
R.D Turner, P.A Boyd and R.L Gattiff  
OTC 5900, MAY 1989.
- 7-. Extended Reach Drilling For Shallow Oil and Gas Field.  
R.M Hinkle and M.G Minsk  
Oil and Gas, January 1993.
- 8-. Back to Basics in Extended Reach Medium to long radius horizontal drilling.  
Shell Berhad and Markus  
OSEA 90160, December 1990.
- 9-. Most problems in Horizontal Completions are resolved.  
Alain Sprex, Christian Georges  
Oil and Gas Journal, June 1988.
- 10-. Word Record in Extended Reach Drilling Well, 33/9-C10 Statfjord field,  
Norway.  
B. Rasmussen, J.O Sorheim, E. Seiffert and D.Angeltvadh  
SPE/IADC 21984.

PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO

11-. Technology Drag and Torque Calculations For Horizontal Wells Simplified for Fields Use.

Jiang w2, Hansc J.A  
Oil and Gas Journal, April 1991.

12-. Extended Reach, Horizontal and Complex Design Wells: Challenges, Achievements and Cost-Benefits.

Herald Blikra Dreudal and T.V Aarrestad  
SPE 28005, June 1994.

13-. An Integrate Approach to Enhancing the Mechanical Life of Drillpipe in Extended Reach Wells.

Yoder Hood Craig  
OTC 6712, May 1991.

14-. Extended Reach Drilling From Platform Irene.

M. Q. Bunyak  
OTC 6224, May 1990.

15-. Directional Technology Will Extend Drilling Reach .

Dellinger gravley Tolle  
Oil and Gas Journal, september 1980.

16-. Short-Radius Drilling Expands Horizontal Well Application.

Leazer clint and Marquez Michel R.  
Petroleum Engineer International, November 1993.

17-. How Extended Reach Torque and Drag May Be Affected By Composites.  
Offshore Staff, April 1995.

18-. Extended Reach and Complex Designer Wells Demonstrate Innovation.

Sorheim Jan and Skoggeth Otta  
Petroleum Engineer International, November 1994.

19-. Mobil Identifies Extended-Reach Drilling Advantages Possibilities in North Sea.

Tolle Glen and Dellinger Thomas  
Oil and Gas Journal, May 1986.

20-. Horizontal Drilling Use on the Rise; Why and When.

Mahony B.T  
World Oil, October 1988.

**PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

**21-. Recent Advances Increase Drilling Reach in the North Sea.**  
Eck-Olsen Johan  
World Oil, 1994.

**22-. Extended-Reach Debuts in Prudhoe-Bay.**  
Franco Alvaro  
Drilling Contractor Vol 42 No. 4, April 1986.

**23-. Extended Reach Wells.**  
Designing and Drilling Extended Reach Wells ( Part 1 )  
G. John Guild, Tom H. Hill and Marc A. Summers  
Petroleum Engineer International, November 1994.

**24-. Extended Reach Wells.**  
Designing and Drilling Extended Reach Wells ( Part 2 )  
G. John Guild, Tom H. Hill and Marc A. Summers  
Petroleum Engineer International, January 1995.

**25-. Extended Reach Wells.**  
Designing and Drilling Extended Reach Wells ( Part 3 )  
G. John Guild, Tom H. Hill and Marc A. Summers  
Petroleum Engineer International, February 1995.

**26-. Extended Reach Wells.**  
Designing and Drilling Extended Reach Wells ( Part 4 )  
G. John Guild, Tom H. Hill and Marc A. Summers  
Petroleum Engineer International, March 1995.

**27-. Extended Reach Wells.**  
Designing and Drilling Extended Reach Wells ( Part 5 )  
G. John Guild, Tom H. Hill and Marc A. Summers  
Petroleum Engineer International, April 1995.

**28-. How to Design Casing Strigs for Horizontal Wells.**  
Greep Jonh F. Jr  
Petroleum Engineer International, December 1989.

**29-. Drillpipe Buckling in Inclined Holes.**  
Dawson, R. and Paisley, P.R  
SPE 11167, Octubre 1984.

**30-. Applied Drilling Engineering.**  
Bourgoyne Jr. And Millheim K.  
SPE Textbook Series Vol.2, 1986.

### **PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE ALCANCE EXTENDIDO**

- 31-. **Drilling Engineering: A Complete Well Planing Approach.**  
Neal J. Adams.  
Pen Well Books, Tulsa 1985.
- 32-. **Fallas en las Tuberías de T.R debido al efecto de pandeo.**  
Flores Rodríguez, José Isabel  
Tesis de Ing, Petrólera 1988, F.I. UNAM.
- 33-. **Estabilidad Mecánica de Pozos Direccionales.**  
García Valenzuela, Carlos  
Tesis de Ing. Petrólera 1992, F.I. UNAM.
- 34-. **La Perforación Horizontal una Nueva Alternativa en la Explotación de Hidrocarburos.**  
Castro Castro, René  
Tesis de Ing. Petrólera 1991, F.I. UNAM.
- 35-. **Tecnología de Perforación. Planeación de la Perforación.**  
Angel J. Solano Ortega.  
Pemex 1992.
- 36-. **Long-Reach, High-Angle Drilling in the Gulf of México:  
A Case History of Eugne Island Block 370 Well B-11.**  
R.L Gadbery and S.S Switzer  
IADC/SPE 23866, February 1992.
- 37-. **A 78° Extended Reach Well in the Gulf of México,  
Eugene Island 326 No. A-6.**  
C.F. Kimball, C.N. Colwell and J.W Knell  
OTC. 6711.
- 38-. **Horizontal Drilling, Manual del Curso de Perforación.**  
Horizontal de Eastman Christensen  
Eastman c, 1990.
- 39-. **Informe Final de Actividades en el Campo Agua Fria, Poza Rica Ver.**  
División de Técnicas Especiales.  
IMP.
- 40-. **Manual Técnico de Perforación.**  
Vladimir Gusev and Nadir Kiazimov  
Editorial M.I.R  
MOSCÚ, Unión Sovietica.
-