



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“SELECCIÓN DE BARRENAS POR  
CORRELACIÓN”**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO PETROLERO  
PRESENTA:

**PABLO ANTONIO DE LA TORRE GONZÁLEZ**

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. ALEJANDRO CORTÉS CORTÉS

# AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su apoyo y extrema paciencia.

A mis amigos, por hacer de mi paso por la facultad algo divertido.

A mis profesores, por haberme dado las bases para ser un buen profesionista.

Pero sobre todo, me agradezco a mí, por ser tan necio, orgulloso y no desistir de ser ingeniero.

El dolor es una ilusión de los sentidos,  
la desesperación es una ilusión de la mente.

Inquisidor Díaz de Torquemada

# TEMARIO

<b>RESUMEN</b>	1
<b>CAPITULO 1. CONCEPTOS GENERALES.</b>	2
1.1 Definición de Barrena.	3
1.2 Mineralogía	3
1.3 Propiedades Mecánicas de las Rocas	3
1.4 Clasificación de Barrenas	4
1.4.1 Barrenas Tricónicas	6
1.4.1.1 Mecanismos de Corte de las Barrenas Tricónicas	7
1.4.1.2 Cojinete y Sello	8
1.4.1.3 Almacén de Grasa	9
1.4.1.4 Clasificación IADC para Barrenas Tricónicas	10
1.4.2 Barrenas de Cortadores Fijos	12
1.4.2.1 Mecanismos de Corte	13
1.4.2.2 Perfil de la Barrena	14
1.4.2.3 Calibre o Gauge	15
1.4.2.4 Clasificación IADC para Barrenas de Cortadores Fijos	16
1.5 Ejemplo de Hoja de Desgaste para Barrenas Tricónicas y de PDC	17
1.6 Ejemplo de Hoja Técnica de Barrenas	21
1.7 Tiempo de Operación de la Barrena	22
<b>CAPITULO 2. CONCEPTOS Y PARÁMETROS DE PERFORACIÓN QUE INFLUYEN EN EL RENDIMIENTO DE LA BARRENA.</b>	23
2.1 Condiciones de Operación.	23
2.1.1 Gasto Óptimo de Operación (GPM)	24
2.1.2 Peso Sobre la Barrena (WOB)	26
2.1.3 Revoluciones por Minuto (RPM)	28
2.1.4 Torque y Arrastre	29

2.2 Diseño del Ensamble de Fondo	32
2.2.1 Tubería Pesada	32
2.2.2 Lastrabarrenas	33
2.3 Litología	34
2.3.1 Lutita	35
2.3.2 Areniscas	36
2.3.3 Carbonatos	37

### **CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE PARA LA SELECCIÓN DE BARRENAS EN LA ETAPA DE DISEÑO.**

3.1 Métodos de Selección de Barrenas	40
3.2 Metodología Utilizando los UCS.	40
3.2.1 Determinación del Esfuerzo No Confinado.	41
3.3 Selección de Barrenas por Energía Específica	43
3.4 Calculo de la ROP	47
3.4.1 Cálculo de la ROP utilizando el Método de Energía Específica.	47
3.4.2 Cálculo de la ROP utilizando el Modelo de Warren Modificado.	48

### **CAPITULO 4.PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE BARRENAS.**

4.1 Estado Mecánico del Pozo a Perforar	51
4.2 Barrenas Utilizadas en Pozos de Correlación	52
4.3 Selección de las Características de las Barrenas	53
4.3.1 Selección del Tamaño de las Estructuras de Corte (barrenas de cortadores fijos)	54
4.3.2 Selección del Número de Cortadores (barrenas de cortadores fijos)	55
4.3.3 Número de Aletas (barrenas de cortadores fijos)	56
4.3.4 Direccionalidad	57
4.3.5 Ángulo de Ataque de los Cortadores para Barrenas de PDC	58
4.3.6 Orientación de los Cortadores	59
4.4 ROP Promedio del Campo	60
4.5 Selección de Barrenas	62

<b>CAPITULO 5. CASO DE APLICACIÓN.</b>	64
Solución	67
<b>CONCLUSIONES.</b>	83
<b>RECOMENDACIONES.</b>	84
<b>FUENTES DE CONSULTA.</b>	85

# INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es de proporcionar un documento que sirva como base para la selección de barrenas utilizando la información obtenida de la perforación de los pozos vecinos al que se desea perforar.

Existen muchas metodologías para la selección de barrenas, la mayoría solo ayuda a determinar tres parámetros principales para barrenas de cortadores fijos (número de aletas, número de cortadores y diámetro de los cortadores). Estos métodos, como el de Energía Específica no siempre son recomendables ya que no determinan las características de la barrena sino que utilizan la que presentó el mejor desempeño en alguno de los pozos vecinos sin hacer ningún análisis de sus características. El método para determinar la tasa de penetración que se obtendrá en cada etapa de la perforación mediante el Método de Warren Modificado requiere conocer algunas de las características de las barrenas e ir las variando para realizar un ajuste de la ROP. La metodología de Selección de Barrenas por Correlación no solo proporciona las tres características principales que deberá tener la barrena, sino que también ayuda a determinar las características “secundarias” como Back Rake, Rake Side, longitud del calibre y protección al calibre, por lo que este método es muy recomendable siempre que sea utilizado para pozos de desarrollo y no para exploratorios ya que al igual que el método de Energía Específica utiliza información obtenida de pozos vecinos.

Es necesario mencionar que la selección de barrenas no se basa en los parámetros de perforación que se pretenden ocupar. Aunque esto parece contradictorio ya que las barrenas son sometidas a parámetros como peso sobre la barrena, gasto del lodo, revoluciones por minuto de la mesa rotaria y/o motor de fondo, etc., estos parámetros varían constantemente durante la perforación debido las condiciones reales de las formaciones que se estén perforando, además que las barrenas cuentan con un amplio margen en sus especificaciones de diseño, los cuales se pueden observar en sus hojas técnicas.

# RESUMEN

En esta tesis se mostrará una metodología para la selección de barrenas utilizando información de pozos de correlación. Para poder explicar la metodología propuesta será necesario definir algunos de los conceptos que se utilizarán de manera común a lo largo de este documento. Esto estará incluido dentro del primer capítulo.

Existen parámetros operacionales durante la perforación como peso sobre la barrena, rpm, torque, arrastre, gasto del lodo, etc., los cuales será necesario comprender para asegurar que el comportamiento de la barrena sea óptimo. Además de los parámetros operacionales, uno de los principales factores que afectan el rendimiento de las barrenas es la litología, por lo que dependiendo del tipo de roca que se deberá perforar dependerán las características de la barrena. Este factor será dividido principalmente en tres tipos: lutitas, calizas y arenas, se hará mención a este aspecto a lo largo del segundo capítulo y toda la tesis.

En el tercer capítulo se hará mención a la metodología de selección de barrenas utilizando la metodología de Energía Específica y por Esfuerzos No Confinados. También se explicará la metodología de Energía Específica y la de Warren Modificado para estimar la tasa de penetración.

En el cuarto capítulo se propone una metodología para la selección de barrenas utilizando información de operaciones, rendimiento de las barrenas, litología y parámetros operativos de pozos cercanos al que se desea perforar, por lo que estos hacen la función de pozos de correlación. Con el estudio y comprensión de la información obtenida de los pozos vecinos es posible seleccionar la barrena más adecuada para la perforación de nuevos pozos. El cálculo de la tasa de penetración para esta metodología se llevará a cabo mediante la Tasa de Penetración Promedio del Campo. Esta metodología no requiere de fórmulas, pero serán incluidas para ser utilizadas si es que se considera necesario. Esta metodología solo requiere de la correcta interpretación de la información de los pozos vecinos, los parámetros de perforación y del impacto que provocan cada una de las características de la barrena.

En el quinto capítulo se presentará un ejemplo de aplicación de la Metodología de Selección de Barrenas por Correlación y de Energía Específica, así como un breve comparativo entre estos métodos.

# CAPITULO 1

## CONCEPTOS GENERALES.

Durante la perforación de un pozo, en la etapa de diseño se toman decisiones para la selección de barrenas bajo la premisa de lo que puede suceder en el fondo del agujero. Existen muchos factores que pueden afectar el rendimiento de la perforación, los cuales tienen una relación directa entre el equipo de perforación en superficie y el ensamble de fondo; tanto los parámetros de perforación como los tipos de litología influyen de forma directa con el comportamiento dinámico de la sarta y el desgaste de la barrena.

El estudio de la mecánica de las barrenas ha llevado a desarrollos de ecuaciones que permiten predecir los tiempos de penetración durante la perforación, tal es el modelo de Warren<sup>1</sup> modificado, que incluye un modelo de limpieza imperfecta, fuerza de impacto de la tobera, esfuerzos sin confinamiento y abrasividad de la roca. Esto por lo tanto trae consigo un tema de gran interés para todas las operadoras de perforación, la optimización de la barrena a través de modelos diversos utilizando el esfuerzo compresivo de las rocas. Por otro lado, existen métodos para determinar el mejor rendimiento de las barrenas utilizando una correlación directa entre pozos perforados y pozos a perforar. Esto requiere de un conocimiento sólido de la interpretación de los parámetros de perforación en el sitio del pozo.

Es necesario entender correlación como sinónimo de comparación, por lo que la Selección de Barrenas por Correlación es el utilizar información de pozos vecinos y compararla entre si para determinar el tipo y características de la barrena a utilizar en cada etapa de la perforación.

Para entender en forma mas clara el desarrollo de este trabajo, en este capítulo se definirán algunos conceptos que es importante conocer.

---

<sup>1</sup> RASTEGAR, M. "Optimization of Multiple bit Runs Based on ROP Models and Cost Equation: A new Methodology Applied for One of the Persian Gulf Carbonate Fields", SPE, 2008.



## **1.1 DEFINICIÓN DE BARRENA.**

La barrena es el primer elemento de la sarta de perforación, la cual tiene contacto con la formación y es la encargada de cortar, romper y/o triturar la roca mediante movimientos giratorios.

## **1.2 MINERALOGIA.**

La mineralogía, se encarga del estudio de los minerales (sólidos cristalinos homogéneos) que componen las rocas, analizar sus propiedades físicas y químicas, su composición y su origen.

Dentro de las características mineralógicas que se deben considerar para la selección de barrenas se encuentra la abrasividad de la roca. Se considera que existe abrasividad si la roca está compuesta por minerales con dureza mayor de seis según la escala de dureza de Mohs. Por ejemplo, la arenisca es abrasiva porque la mayoría (no siempre) está compuesta por Ortoclasa y Cuarzo (seis y siete en la escala de Mohs), respectivamente.

La abrasividad aumenta dependiendo de la compresibilidad de la formación, por lo que la dureza de la roca y la dureza de los minerales que componen la roca influyen en la abrasividad presentada por ésta.

## **1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS.**

La mecánica de rocas estudia las propiedades físicas de la roca y la forma en la que éstas responden a modificaciones debidas a operaciones como la perforación.

Dentro de las propiedades físicas más comunes tenemos: *fractura, exfoliación, dureza, elasticidad, densidad, esfuerzos no confinados y esfuerzos confinados.*

**Fractura:** Según Páez<sup>2</sup>, una fractura es cuando un mineral o una roca es sometida a un esfuerzo compresivo y puede responder rompiéndose de manera irregular. Esto es conocido como fractura.

**Exfoliación:** para Jaegger<sup>3</sup> es cuando un mineral es sometido a un esfuerzo compresivo, produciendo separación en superficies planas. No todos los minerales presentan este aspecto.

**Dureza:** Es definida<sup>4</sup> como la resistencia que opone una superficie a ser rayada por otra. La dureza de cada especie mineral es constante y puede ser referida o comparada con la escala de dureza de Mohs.

**Elasticidad:** Según Jaegger<sup>5</sup>, es la habilidad para resistir y recuperarse de las deformaciones producidas debido a fuerzas. Es una propiedad directamente relacionada con la cohesión entre los minerales.

**Peso específico o densidad de la roca:** De acuerdo con el autor anterior<sup>6</sup>, es la masa sobre la unidad de volumen de los minerales o rocas y depende de los átomos que lo constituyen, por lo que minerales con la misma fórmula química tienen diferentes pesos específicos.

**Esfuerzos no confinados** ó esfuerzo uniaxial, se define como<sup>7</sup>: la fuerza compresiva de una muestra de roca medida bajo condiciones atmosféricas.

**Esfuerzos confinados** o esfuerzo triaxial es<sup>8</sup>: la fuerza real de la roca bajo condiciones del yacimiento antes de que la roca sea perforada o expuesta a la columna de fluido en el pozo.

## 1.4 CLASIFICACIÓN DE BARRENAS.

Aunque todas las barrenas son capaces de perforar casi cualquier tipo de formación, la velocidad de perforación y el desgaste que sufren será diferente

---

<sup>2</sup> UAC, “Mecánica de Rocas”. 2007

<sup>3</sup> JAEGGER, “Fundamentals of Rock Mechanics”, 1987

<sup>4</sup> CARTILLO, C. “Apuntes de Geología de Yacimientos” 2004

<sup>5</sup> JAEGGER, “Fundamentals of Rock Mechanics”, 1987

<sup>6</sup> JAEGGER, “Fundamentals of Rock Mechanics”, 1987

<sup>7</sup> KUMAR, J. “The Effect of Poisson’s Ratio on Rock Properties”, 1976

<sup>8</sup> KUMAR, J. “The Effect of Poisson’s Ratio on Rock Properties”, 1976

dependiendo del tipo de barrena seleccionada. Dentro de cada tipo existen características diferentes, por esto, es necesario tener una idea de cada una de ellas para poder así hacer una selección adecuada.

En la ingeniería de perforación, las barrenas son clasificadas en tricónicas (Figura 1.2) y de diamante policristalino compacto (PDC) (Figura 1.1). A continuación se hace una clasificación, descripción y análisis de cada una:

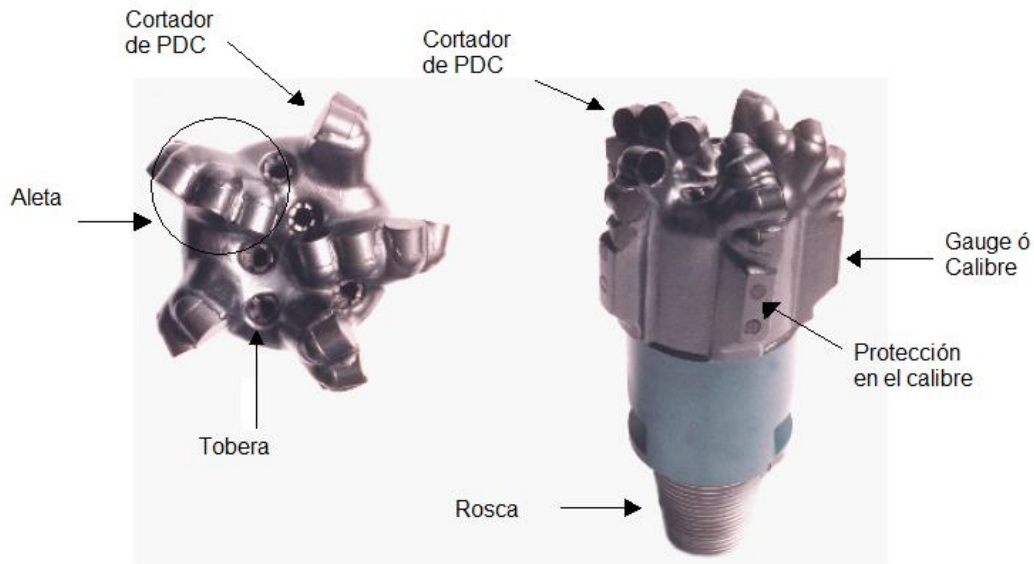


Figura 1.1 Barrenas con cortadores de PDC<sup>9</sup>

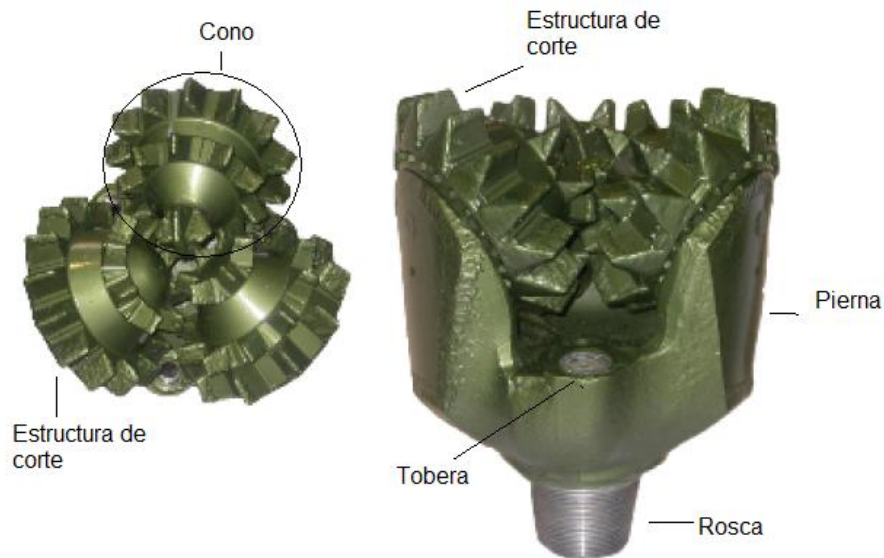


Figura 1.2 Barrenas Tricónicas<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Smith International. "Teoría de Mechas", documento electrónico. 2005

<sup>10</sup> Smith International. "Teoría de Mechas", documento electrónico. 2005

### 1.4.1 Barrenas Tricónicas.

Las barrenas tricónicas, poseen conos de metal que contienen insertos o dientes maquilados (Figura 1.3) que giran en forma independiente sobre su propio eje, al mismo tiempo que la barrena rota en el fondo del pozo. Cada uno de los conos cuenta con una estructura cortante (dientes de acero resistentes al desgaste, o insertos de carburo de tungsteno) que cortan y trituran, o penetran y rompen la roca, dependiendo de la formación. Los principales componentes de los conos de una barrena tricónica son:

- Estructura cortadora.
- Cojinete.
- Sello.
- Almacén de la grasa.

Existen dos tipos de barrenas de acuerdo a la estructura cortadora: Barrenas de dientes de acero, donde los dientes son fundidos y forjados del mismo cuerpo del cono con bordes de compuestos de carburo resistentes al desgaste y Barrenas con insertos de carburo de tungsteno en los cuales los insertos son formados por separado y colocados a presión en la superficie de los conos.

Las barrenas tricónicas con dientes de acero se utilizan en formaciones blandas con baja resistencia a la compresión. Las que poseen insertos se utilizan para perforar formaciones que van de semiduras a duras semiabrasivas y duras abrasivas.



Barrena de Dientes



Barrena de Insertos

Figura 1.3 Tipo de cortadores en barrenas tricónicas<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Smith International. “Teoría de Mechas”, documento electrónico. 2005

### 1.4.1.1 Mecanismos de corte de las barrenas tricónicas.

Los elementos de corte de las barrenas tricónicas corresponden a hileras de dientes alrededor de cada cono que se entrelazan sin tocarse con las de los conos adyacentes a manera de engranes.

Este tipo de barrenas, remueve la roca raspándola o triturándola. Los conos giran y realizan una acción de trituración. A medida que los conos se apartan del movimiento giratorio real, las estructuras cortantes penetran y raspan más.

El desplazamiento o excentricidad del cono y la forma del mismo (Figura 1.4), provocan que los conos dejen de girar periódicamente a medida que gira la barrena. Como resultado, las estructuras cortantes se deslizan en el fondo del pozo y raspan la formación. Los ángulos de desplazamiento varían de  $5^\circ$  para formaciones blandas, a  $0^\circ$  para formaciones duras<sup>12</sup>. Las barrenas para formaciones blandas utilizan estructuras de corte más largas con ángulos de desplazamiento en los conos que reducen el movimiento de rotación, los cortadores cortos en los conos que giran más, provocan una acción de trituración en las formaciones duras.



Figura 1.4. Desplazamiento o excentricidad de los conos.<sup>13</sup>

<sup>12</sup> BURGOYNE, Adam. "Applied Drilling Engineering". SPE, 1991

<sup>13</sup> BURGOYNE, Adam. "Applied Drilling Engineering". SPE, 1991

### 1.4.1.2 Cojinete y Sello

Los cojinetes son estructuras que funcionan como un eje alrededor de los cuales giran los conos. Estos elementos son diseñados tomando en cuenta la velocidad de rotación (RPM) y el peso sobre la barrena (WOB).

El sello generalmente es un elastómero el cual no permite el contacto entre el fluido de perforación y la parte interna del cono. Generalmente cuenta con partes reforzadas de diferente material para poder resistir el desgaste producido por la rotación del cono.

Dentro del cono se encuentra un sistema de retención formado por balineras, las cuales evitan que el cono se salga de la parte superior de la barrena. Estas balineras son ingresadas al momento de ensamblar la barrena. Existen varios tipos de cojinetes. Estos pueden ser: (Figura 1.5)

- Cojinete de Rodillos: Los cojinetes de rodillos soportan grandes pesos sobre barrena y bajas revoluciones por minuto puesto que las cargas se distribuyen de manera puntual en los rodillos. Estos cojinetes se utilizan en tamaños de barrenas superiores a 12 ¼<sup>14</sup>.
- Cojinete de Fricción: Los cojinetes de fricción soportan altas revoluciones por minuto y bajos pesos sobre la barrena debido a que las cargas se distribuyen de manera uniforme en la superficie del cojinete.

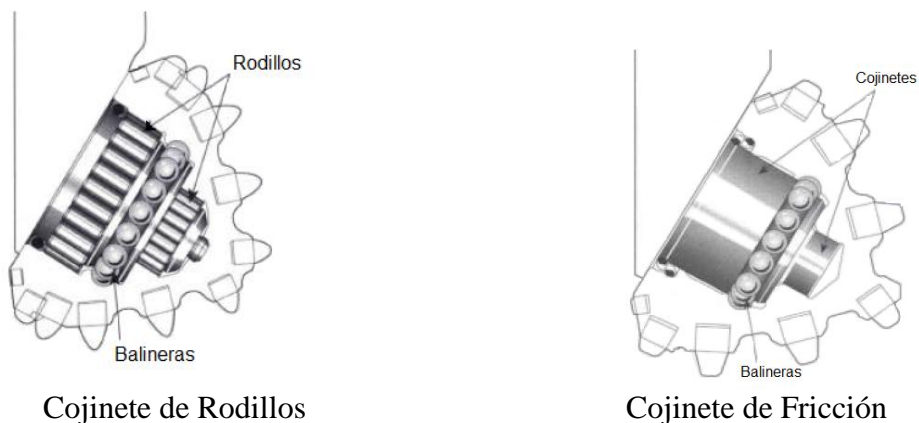


Figura 1.5 Tipo de Cojinetes<sup>15</sup>

<sup>14</sup> STC, "Drilling Bits Manual", documento electrónico 1990

<sup>15</sup> Schlumberger, "Tecnología de Perforación". Capítulo 6, 2004

### 1.4.1.3 Almacén de grasa.

Como su nombre lo indica, este elemento permite almacenar la grasa que sirve como lubricante al cojinete y al sistema interno del cono. El objetivo de este almacén es proveer el lubricante al interior del cono, el cual es movido dentro de la barrena por diferencial de presión. Cuando existe un cambio de presión dentro de la barrena, se acciona un sello interno que permite el desplazamiento de la grasa.

Físicamente, el almacén de grasa se encuentra en la parte inferior de la pierna de la barrena junto con el compensador de presión conectado por un canal hacia el cojinete (Figura 1.6).

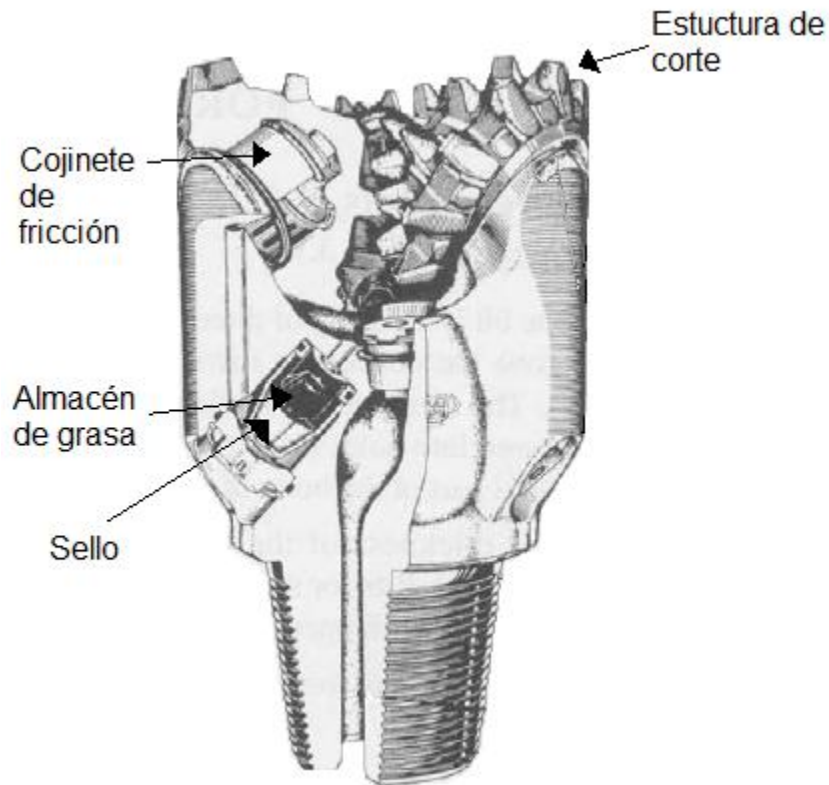


Figura 1.6 Almacén de grasa<sup>16</sup>

<sup>16</sup> BURGOYNE, Adam. "Applied Drilling Engineering". SPE, 1991

#### 1.4.1.4 Clasificación IADC para barrenas tricónicas.

La asociación internacional de contratistas de perforación (por sus siglas en inglés, IADC), proporciona un método de clasificación de las barrenas tricónicas, con el cual se nombra de una manera estándar cada barrena (Tabla 1.1). El sistema de clasificación permite hacer comparaciones entre los tipos de barrenas que ofrecen los fabricantes.

La clasificación se basa en un código de tres caracteres numéricos.

- Primer Caracter (Serie de la estructura cortadora 1-8).

Los caracteres de esta serie indican la dureza de la formación, así como también el tipo de estructura de corte la barrena, ya sea dientes o insertos.

Las series del 1 al 3 indican qué barrena tiene dientes de acero. La serie del 4 al 8 indica que la barrena tiene insertos de carburo de tungsteno (TCI). Se considera que en la serie 1 la formación será muy blanda, aumentando hasta la serie 8, en donde la formación será muy dura.

- Segundo Caracter (Tipos de estructura cortadora).

El segundo caracter presenta una clasificación de dureza dentro de la dureza definida anteriormente. Cada serie está dividida en cuatro tipos en la mayoría de los casos. El 1 indica que es una formación muy blanda, hasta el 4 que indica una formación muy dura

- Tercer Caracter (Cojinete/ Calibre).

Este caracter indica una descripción interna y externa de la barrena. Hace referencia al diseño del cojinete y a la protección del calibre. Está dividido en siete categorías:

1. Cojinete de rodillo estándar no sellado
2. Cojinete de rodillo enfriado con aire.
3. Cojinete de rodillo con calibre protegido.
4. Cojinete de rodillo sellado.
5. Cojinete de rodillo sellado con calibre protegido.
6. Cojinete de fricción sellado.



7. Cojinete de fricción sellado con calibre protegido.

	1er Carácter		2o Caracter	3er Carecter						
	SERIE	FORMACIONES	DUREZA	CATEGORIAS						
DIENTES	1	Blandas	1 Suave	1. Cojinete de rodillo estándar no sellado	2. Cojinete de rodillo enfriado con aire	3. Cojinete de rodillo con calibre protegido	4. Cojinete de rodillo sellado	5. Cojinete de rodillo sellado con calibre protegido	6. Cojinete de fricción sellado	7. Cojinete de fricción sellado con calibre protegido.
			2 Media Suave							
			3 Media Dura							
			4 Dura							
	2	Medias	1 Suave							
			2 Media Suave							
			3 Media Dura							
			4 Dura							
	3	Duras	1 Suave							
			2 Media Suave							
			3 Media Dura							
			4 Dura							
INSERTOS	4	Muy Blanda	1 Suave							
			2 Media Suave							
			3 Media Dura							
			4 Dura							
	5	Blanda	1 Suave							
			2 Media Suave							
			3 Media Dura							
			4 Dura							
	6	Media	1 Suave							
	7	Dura	1 Suave							
			2 Media Suave							
			3 Media Dura							
			4 Dura							
	8	Muy Dura	1 Suave							
			2 Media Suave							
			3 Media Dura							
			4 Dura							

Tabla 1.1 Código IADC para barrenas tricónicas

## 1.4.2 Barrenas de cortadores fijos.

Las barrenas de cortadores fijos, a diferencia de las tricónicas no cuentan con partes móviles. Estas cuentan con cortadores planos en forma de pastilla montados sobre aletas fabricadas del mismo cuerpo de la barrena. Este tipo de barrenas es altamente efectivo para trabajar durante una gran cantidad de horas.

Existen varios tipos de barrenas de cortadores fijos (Figura 1.7); la mayoría están formadas por cuerpos de carburo de tungsteno con cortadores de diamante policristalino compacto (PDC). Aunque también existen las de cuerpo de acero con cortadores de PDC y las barrenas de cuerpo de carburo de tungsteno y PDC con cortadores de diamantes naturales ó impregnados.

Las barrenas de diamante natural ó impregnadas son aptas para formaciones semiduras y extremadamente duras, cuya abrasividad es mediana ó extremadamente alta.

Las barrenas PDC son más adecuadas para formaciones que van de blandas a duras, de baja a alta abrasividad.

Las híbridas combinan la tecnología del PDC y del diamante natural

Dependiendo de la forma de la barrena, la ubicación de sus cortadores será la que a continuación se esquematiza.

C - Cone (Cono)  
G - Gauge (Calibre)  
T - Taper (Flanco)

S - Shoulder (Hombro)  
N - Nose (Nariz)

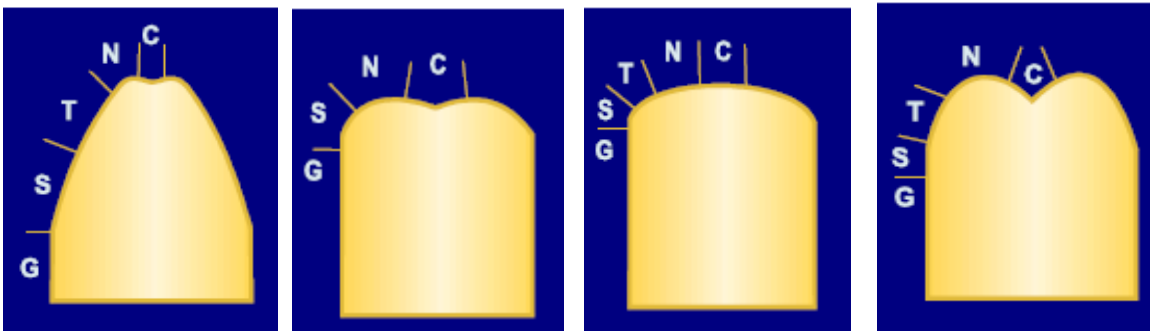


Figura 1.7 Ubicación de los cortadores dependiendo de su forma.

### 1.4.2.1 Mecanismos de corte.

La barrena PDC es un dispositivo mecánico diseñado para transmitir energía a fin de perforar cizallando la roca. La perforación es rápida por lo que se requiere menos energía que la utilizada por las barrenas que necesitan grandes cargas y que ocasionan fallas por compresión en las formaciones.

Las barrenas de diamante natural y las impregnadas de diamante perforan lentamente pulverizando la roca, lo que hace que ambas requieran una gran carga sobre la barrena y altos esfuerzos de torsión (torque). Estas barrenas deben ser operadas a altas RPM para que su funcionamiento sea óptimo.

En cuanto a las híbridas, éstas combinan los insertos impregnados de diamante natural con los PDC. Cuando las barrenas híbridas están nuevas, los insertos impregnados de diamante no hacen contacto con la formación y las barrenas se desempeñan como barrenas PDC. A medida que los cortadores de PDC se desgastan con las formaciones duras, los insertos de diamante penetran en la formación.



Barrena de PDC



Dientes de PDC



Barrenas impregnadas



Diente impregnado

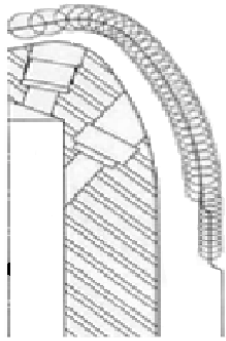
Figura 1.8 Tipos de barrenas de cortadores fijos.<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Smith International. “Teoría de Mechas”, documento electrónico. 2005

### 1.4.2.2 Perfil de la Barrena

El perfil de la barrena se refiere a qué tan altos o bajos están los cortadores de la nariz con respecto al gauge (Figura 1.9). A diferencia de las barrenas de conos, las cuales cuentan con perfiles muy similares, las barrenas de cortadores fijos cuentan con cuatro tipos principales. Cada uno de estos es utilizado para obtener un cierto resultado durante la perforación y debe ser escogido con cuidado.

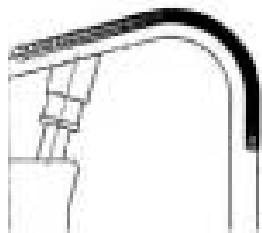
Las barrenas con un perfil parabólico largo y medio son utilizadas principalmente en pozos verticales, mientras que las barrenas con el perfil parabólico corto y perfil plano son utilizadas con mayor frecuencia en la perforación de pozos direccionales.



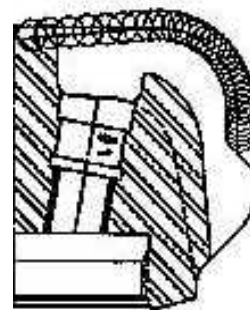
Perfil parabólico largo



Perfil parabólico medio



Perfil parabólico corto



Perfil plano

Figura 1.9 Tipos de perfiles de barrenas de cortadores fijos.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> BURGOYNE, Adam. "Applied Drilling Engineering". SPE, 1991

### 1.4.2.3 Calibre o Gauge.

En una barrena, el calibre es referido a la parte más baja de la aleta y está encargada de darle estabilidad a las aletas. Existen diferentes tamaños para el calibre (Figura 1.10), esto depende de su uso (tipo de pozo a perforar) y tamaño de la misma, ya que mientras mayor sea el diámetro de la barrena mayor podrá ser la longitud del gauge.

En esta zona de la barrena es posible la localización de cortadores de PDC y/o de protección adicional formada por pastillas de PDC adheridas al costado del calibre. Estas características dependen de la aplicación a la que será sometida.

Las barrenas con calibres muy largos son utilizadas principalmente en pozos verticales y las de calibres cortos en pozos direccionales, aunque esto no es una regla, ya que se tiene que observar en conjunto con esta característica el perfil de la barrena.



Barrena con Calibre corto  
y con calibre protegido



Barrena con Calibre largo

Figura 1.10 Tamaño del calibre<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Baker-Huges. “Hughes Naming and Features”, documento electrónico. 2008

#### 1.4.2.4 Clasificación IADC para barrenas de cortadores fijos.

Se utiliza un código utiliza al igual que para las barrenas tricónicas, de cuatro caracteres para clasificar las barrenas, el primero alfabético y los tres restantes numéricos (Tabla 1.2).

- Primer Caracter (Tipo de cuerpo de la barrena).

En el primer caracter se muestra el material del que está fabricada la barrena. Con una “M” si es de matriz, y con una “S” si es de acero.

- Segundo Caracter (Dureza de la formación).

El segundo caracter presenta la dureza de formación. La dureza va desde el 1 que indica que es una formación muy blanda, hasta el 7 que indica que se trata de una formación muy dura.

- Tercer Caracter (Tamaño y tipo de cortador).

Este caracter indica el tipo de cortador y el diámetro de las pastillas de PDC. Esta va desde durezas de formaciones muy blandas a medias. De las durezas de formaciones medias-duras a extremadamente duras ya no es utilizada la pastilla de PDC.

- Cuarto Caracter (Perfil de la barrena).

Muestra el perfil de la barrena. Se utiliza el 1 para perfil plano, hasta el 4 que es el perfil parabólico largo.

1er Caracter		2o Caracter		3er Caracter		4o Caracter			
CUERPO		FORMACIÓN		TAMAÑO		PERFIL			
<b>"M" MATRIZ</b>	<b>"S" ACERO</b>	1	Muy blanda	2	PDC, 19 milímetros	1. Perfil Plano	2. Perfil Parabólico Corto	3. Perfil Parabólico Medio	4. Perfil Parabólico Largo
				3	PDC, 13 milímetros				
				4	PDC, 8 milímetros				
		2	Blanda	2	PDC, 19 milímetros				
				3	PDC, 13 milímetros				
				4	PDC, 8 milímetros				
		3	Blanda a media	2	PDC, 19 milímetros				
				3	PDC, 13 milímetros				
				4	PDC, 8 milímetros				
		4	Media	2	PDC, 19 milímetros				
				3	PDC, 13 milímetros				
				4	PDC, 8 milímetros				
		5	Medianamente dura	1	Diamante natural				
				2	TSP				
				3	Combinación				
		6	Dura	1	Diamante natural				
				2	TSP				
				3	Combinación				
		7	Extremadamente dura	1	Diamante Natural				
				4	Impregnada de diamante				

Tabla 1.2 Clasificación IADC para barrenas de PDC.

### 1.5 EJEMPLO DE HOJAS DE DESGASTE PARA BARRENAS TRICÓNICAS Y DE PDC

En estas hojas se reporta el estado de la barrena después de ser usada y nos será posible analizar el desempeño de la barrena, su razón de salida y tipo de daño recibido.

Esto puede servir de ayuda para comprender mejor la litología de la locación, ya que no todas las formaciones generan el mismo tipo de daño a los

cortadores; de igual manera nos muestra si nuestra selección de barrenas fue la indicada, ya que un desgaste pequeño o nulo indicará que nuestra selección fue la correcta, mientras que un desgaste moderado o alto indicará que realizamos una mala selección. Esto debe ser comparado con los parámetros utilizados durante la perforación para descartar que estos excedieran los marcados en la hoja técnica de la barrena.

Existen dos tipos de hojas de desgaste, una para barrenas de PDC y otra para tricónicas. Aunque son muy similares, la hoja de desgaste para barrenas tricónicas presenta la opción de reporte de desgaste de los baleros o sellos para cada uno de sus conos.

Obviamente la opción anterior no es tomada en cuenta en la hoja de desgaste, aunque por lo general cuenta con un espacio en lugar de tres. En este espacio deberá ponerse una "X". Para ambos casos, tiene que ser reportado el valor del desgaste en las hileras interiores y exteriores, así como su característica (dientes gastados, cortadores rotos, cortadores astillados, etc.) y localización del desgaste (nariz, hombro, etc.).

También es reportado el estado del calibre, si existen otras características de desgaste y su razón de salida, cualquiera que esta sea (terminar la etapa, toma de registros, poca tasa de penetración, etc.).

A continuación se muestran como ejemplo dos hojas de desgaste, la primera para Tricónicas y la segunda para Cortadores de PDC.



Ejemplo de llenado de las hojas de desgaste:



En una barrena con uno o más conos que muestran fisuras, pero los conos permanecen en su lugar. Es causado principalmente por la aplicación de excesivo peso sobre la barrena, tiempo excesivo de uso, impactos excesivos, fatiga térmica o por el ambiente de perforación.

EVALUACION DE BARRENA									
COMPANIA:	XXXXXXXXXX	PROF. ENTRADA:	150	DIAM. BNA.:	12 1/4				
POZO:	XXXXXXXXXX	PROF. SALIDA:	1150	TIPO:	TRIC				
EQUIPO:	XXXXXXXXXX	HRS:	50	No. SERIE:	XXXXXXXXXX				
FECHA:	XXXXXXXXXX	ROP:	20	IADC:	117				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ESTRUCTURA DE CORTE			LOCA LIZACION	BALERO SELLO	BALERO SELLO	BALERO SELLO	CALIBRE	OTRA CARAC.	RAZONES DE SALIDA
HILERAS INTERIORES	HILERAS EXTERIORES	CARAC DESGASTE		B	B	B	G		
3	5	CC	C	E	E	E	I	BT	TD

**DESGASTE DEL CORTADOR**

0= SIN DESGASTE  
\*  
\*  
8= SIN ESTRUCTURA DE CORTE USABLE

**CARACTERISTICAS DE DESGASTE**

\*BC= CONO ROTO  
BT= DIENTE/CORTADOR ROTO  
BU= EMBOLADA  
\*CC= CONO FRACTURADO  
\*CD= CONO ARRASTRADO  
\*CF= INTERFERENCIA DE CONOS  
CR= DESGASTE CENTRAL  
CT= DIENTE ASTILLADO  
ER= EROSION  
FC= CORTADOR PLANO  
HC= SOBRECALENTAMIENTO  
JD= DANO POR CHATARRA  
\*LC= CONO PERDIDO  
LN= TOBERA PERDIDA  
LT= DIENTES PERDIDOS  
OC= DESGASTE EXCENTRICO  
PB= BARRENA COMPRIMIDA  
PN= TOBERA TAPADA  
RG= CALIBRE REDONDEADO  
RO= ANILLADO  
SD= DANO DEL FALDON  
SS= DESGASTE AUTOFILADO  
TR= ARRASTRE  
WT= DIENTE CORTADOR DESGASTADO  
NO= SIN DESGASTE IMPORTANTE

\*BARRENAS TRICONICAS

**LOCALIZACION DEL DESGASTE**

C= CONO 1, 2, 3  
N= NARIZ  
T= HILERA INTERMEDIA  
S= HOMBRO  
G= GAUGE o CALIBRE  
A= TODAS LAS AREAS

**DESGASTE DEL BALERO**

**BALEROS NO SELLADOS**

0= SIN DESGASTE  
\*  
\*  
8= TOTALMENTE DESGASTADOS

**BALEROS SELLADOS**

E= SELLO EFECTIVO  
F= SELLO FALLADO  
X= BARRENAS PDC

**DESGASTE DEL CALIBRE**

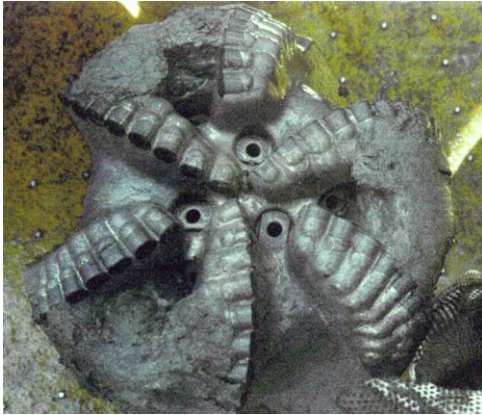
I= CALIBRE  
1 = 1/16" DESGASTADO  
2 = 2/16" DESGASTADO ETC...  
\*  
\*

**RAZON DE SALIDA**

BHA= CAMBIO DE EMSAMBLE DE FONDO  
DNF= FALLA DE MOTOR DE FONDO  
DSF= FALLA DE LA SARTA DE PRODUCC.  
DST= PRUEBA DE PERFORACION  
DTF= FALLA HERRAMIENTA DE FONDO  
LOG= TOMA DE REGISTROS  
CM= CONDICIONES DEL LODO  
CP= CORTE DE NUCLEO  
DP= SARTA TAPADA  
FM= CAMBIO DE FORMACION  
HP= PROBLEMAS EN EL AGUJERO  
PP= PRESION DE BOMBAS  
PR= RITMO DE PENETRACION  
RIG= REPARACION DEL EQUIPO  
TD= PROFUNDIDAD TOTAL / TR  
TO= TORQUE  
TW= SARTA TORCIDA  
WC= CONDICIONES CLIMATOLOGICAS

Figura 1.11 Ejemplo de hoja de desgaste para barrenas Tricónicas.<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Smith International. "Manual de entrenamiento", documento electrónico, 2005



Se caracteriza por la obstrucción de uno o más canales de flujo que disminuye o impide el flujo de lodo.

Puede ser causada por:

- Tipo de formación
- Barrena con muchas aletas
- Pobre diseño hidráulico
- Intercalaciones litológicas
- Alto WOB
- Baja tasa de flujo

EVALUACION DE BARRENA							
COMPañÍA:	XXXXXXXXXX	PROF. ENTRADA	150	DIAM. BNA.:	12 1/4		
POZO:	XXXXXXXXXX	PROF. SALIDA	1150	TIPO:	PDC		
EQUIPO:	XXXXXXXXXX	HRS	20	No. SERIE:	XXXXXXXXXX		
FECHA:	XXXXXXXXXX	ROP	50	IADC	M224		
1	2	3	4	5	6	7	8
ESTRUCTURA DE CORTE				B	G	OBSERVACIONES	
HILERAS INTERIORES	HILERAS EXTERIORES	CARAC. DESGASTE	LOCALIZACION	BALERO SELLO	CALIBRE	OTRA CARAC.	RAZONES DE SALIDA
1	1	BU	A	X	I	WT	PR
<b>DESGASTE DEL CORTADOR</b> 0= SIN DESGASTE * 8= SIN ESTRUCTURA DE CORTE USABLE				<b>DESGASTE DEL BALERO</b> <b>BALEROS NO SELLADOS</b> 0= SIN DESGASTE * 8= TOTALMENTE DESGASTADOS  <b>BALEROS SELLADOS</b> E= SELLO EFECTIVO F= SELLO FALLADO X= BARRENAS PDC			
<b>CARACTERISTICAS DE DESGASTE</b> *BC= CONO ROTO BT= DIENTE/CORTADOR ROTO BU= EMBOLADA *CC= CONO FRACTURADO *CD= CONO ARRASTRADO *CI= INTERFERENCIA DE CONOS CR= DESGASTE CENTRAL CT= DIENTE ASTILLADO ER= EROSION FC= CORTADOR PLANO HC= SOBRECALENTAMIENTO JD= DANO POR CHATARRA *LC= CONO PERDIDO LN= TOBERA PERDIDA LT= DIENTES PERDIDOS OC= DESGASTE EXCENTRICO PB= BARRENA COMPRIMIDA PN= TOBERA TAPADA RG= CALIBRE REDONDEADO RO= ANILLADO SD= DANO DEL FALDON SS= DESGASTE AUTOFILADO TR= ARRASTRE WT= DIENTE CORTADOR DESGASTADO NO= SIN DESGASTE IMPORTANTE * BARRENAS TRICONICAS				<b>DESGASTE DEL CALIBRE</b> 1= CALIBRE 1 = 1/16" DESGASTADO 2 = 2/16" DESGASTADO ETC... *			
<b>LOCALIZACION DEL DESGASTE</b> C= CONO 1, 2, 3 N= NARIZ T= HILERA INTERMEDIA S= HOMBRO G= GAUGE o CALIBRE A= TODAS LAS AREAS				<b>RAZON DE SALIDA</b> BHA= CAMBIO DE EMSAMBLE DE FONDO DNF= FALLA DE MOTOR DE FONDO DSF= FALLA DE LA SARTA DE PRODUCC. DST= PRUEBA DE PERFORACION DTF= FALLA HERRAMIENTA DE FONDO LOG=TOMA DE REGISTROS CM= CONDICIONES DEL LODO CP= CORTE DE NUCLEO DP= SARTA TAPADA FM= CAMBIO DE FORMACION HP= PROBLEMAS EN EL AGUJERO PP= PRESION DE BOMBAS PR= RITMO DE PENETRACION RIG= REPARACION DEL EQUIPO TD= PROFUNDIDAD TOTAL / TR TQ= TORQUE TW= SARTA TORCIDA WC= CONDICIONES CLIMATOLOGICAS			

Figura 1.12. Ejemplo de hoja de desgaste para barrenas de cortadores de PDC<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Smith International. "Manual de entrenamiento", documento electrónico, 2005


## 1.6 EJEMPLO DE HOJA TÉCNICA DE BARRENA.

La hoja técnica de la barrena es un documento en el cual se muestra información adicionada por el fabricante respecto a las características, diseño, así como los parámetros operativos que es capaz de soportar.

Dentro de las características de diseño se encuentran: número de cortadores, tamaño de los cortadores, número de aletas, tipo de rosca, numero de toberas, longitud del gauge, longitud total y longitud del cuello para pesca.

Dentro de los parámetros operativos a los que puede ser sometida se encuentran: el peso máximo sobre la barrena, la cantidad de revoluciones por minuto, los galones por minuto y potencia hidráulica que es que puede manejar.

**6-1/8" MDi516**  
(155.575 MM)  
Product ID: 641909 ER: 25032 IADC: M123



Smith Bits is uniquely positioned to provide drill bits that will consistently deliver superior performance in directional applications with steerable motors and both push-the-bit and point-the-bit rotary steerable systems. IDEAS (Integrated Dynamic Engineering Analysis System), the industry's most advanced engineering design system, offers the unparalleled ability to accurately model not just the interaction of the bit and the formation, but also the complete BHA and each of its individual components including the rotary steerable system or the steerable motor.




SPECIFICATIONS	
Total Cutters	20
Cutter Size	13mm (1/2"), 16mm (5/8")
Face Cutters	(15) 16mm
Gauge Cutters	(5) 13mm
Blade Count	5
Nozzles	3 Standard Series 40N, 2 Standard Series 60N
Bit Connection	3-1/2" API Reg.
Junk Slot Area (sq in)	n/a
Gauge	Length: 1-1/2" Protection: Options Available
Length	Make-Up: 7-3/8" Overall: 11"
Fishing Neck	Diameter: 4-5/8" Length: 3-1/4"


OPERATING PARAMETERS	
Rotary Speed	Rotary Steerable BHA
Weight-on-Bit	2,500 To 19,000 (lbs) 1,136 To 8,636 (60kN) 1 To 9 (Tonnes)
Flow Rate (GPM)	150 To 300
Hydraulic Horsepower (HHP)	1 To 6

Operating parameters are typical ranges. Please contact your Smith Bits representative for recommendations for your individual well.

**PEOPLE  
TECHNOLOGY  
RESULTS**

**FEATURES**

- Short gauge length for enhanced steering efficiency 
- High gauge stand-off improves hydraulic flow, optimizes bit cleaning & ensures that maximum ROP is attained. 
- CFD optimized nozzle placement for improved hydraulics 



**SMITH BITS**

Date: 05/11/2007 ID: 10620 USA Copyright © 2007 by Smith International, Inc. All Rights Reserved.

PEOPLE TECHNOLOGY RESULTS

**SMITH**

Figura 1.13 Ejemplo de hoja técnica de barrena.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Smith International, “ejemplo de Hoja técnica de barrena”

## 1.7 TIEMPO DE OPERACIÓN DE LA BARRENA.

El tiempo de operación de la barrena puede ser estimado principalmente por la tasa de penetración esperada, el tipo de litología que se espera encontrar y la profundidad final de cada etapa.

En principio es posible suponer que la litología, mientras mayor sea su dureza (arenas o calizas) mayor será el tiempo de perforación, por lo que disminuirá la tasa de penetración, esto sin tomar en cuenta la longitud del intervalo a perforar. Este último aspecto combinado con la litología pueden llegar a ser muy importantes al momento de hacer una predicción de los tiempos de operación, ya que mientras mayor sea el intervalo a perforar y la formación sea más dura influirá en el desgaste de las barrenas, por lo que habrá una tendencia a disminuir la tasa de penetración.

Tomando en cuenta que en este punto solo se tiene información del estado mecánico, el tiempo de operación de la barrena puede ser calculado:

$$T_o = \frac{L}{ROP} \quad (1.1)$$

Donde:

$T_o$  = tiempo de operación de la barrena [horas].

$L$  = longitud del intervalo a perforar [m].

$ROP$  = tasa de penetración [m/hrs].

# CAPITULO 2.

## CONCEPTOS Y PARÁMETROS DE PERFORACIÓN QUE INFLUYEN EN EL RENDIMIENTO DE LA BARRENA.

### 2.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Existen parámetros y condiciones de logística que pueden influir de diferentes maneras en el rendimiento y costo de una barrena durante la operación. Es importante definir estos parámetros y condiciones. Los parámetros de perforación son definidos como Gasto Óptimo de Operación, Peso Sobre la Barrena, Revoluciones por Minuto, Torque y Arrastre. Por otro lado, la mala planeación de la logística de materiales repercute en el abastecimiento de estos, provocando posibles retrasos en la operación.

Muchos de estos parámetros no recaen únicamente en las herramientas usadas sobre la barrena, en las características geológicas y en la selección misma de la barrena, sino principalmente en cuestiones operativas las cuales, dependiendo del personal, pueden ayudar o perjudicar al rendimiento y comportamiento de la barrena.

El costo por pie perforado se puede determinar con la siguiente relación.

$$C = \frac{R(T+D)+B}{F} \quad (2.1)$$

Donde:

C = costo de perforación por pie [\$/pie].

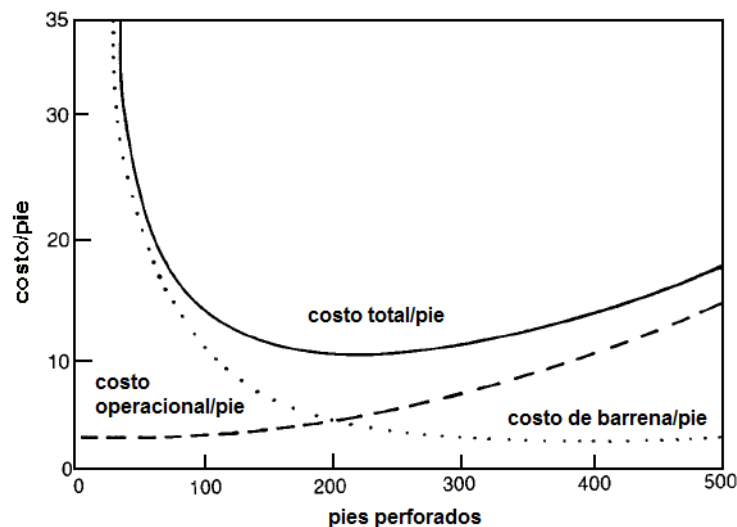
R = costo operativo del equipo de perforación [\$/hr].

T = tiempo de viaje [hr].

D = tiempo de perforación [hr].

B = costo de la barrena [\$/].

F = pies perforados [pies].



Gráfica 2.1 Comportamiento del costo en función a los pies perforados.<sup>1</sup>

### 2.1.1 Gasto Óptimo de Operación (GPM)<sup>2</sup>

Para optimizar el desempeño de la barrena es necesario considerar el gasto de lodo que deben producir las bombas. Esta selección es función de las características del lodo y sus propiedades, diámetro de las toberas, coeficiente de descarga de la barrena y la profundidad a perforar. Otro parámetro es el comportamiento del flujo y sus caídas de presión en el espacio anular

No es conveniente reducir el gasto mínimo, ya que un gasto bajo podría provocar embolamiento y reduce la limpieza del agujero, provocando la disminución en la tasa de penetración, incrementando el costo de operación.

Para seleccionar una tasa de flujo y una presión de circulación que permita una buena limpieza del pozo y una potencia adecuada en la barrena, siempre que no exceda la presión máxima permitida en superficie y en el espacio anular es necesario considerar:

- Si las bombas son capaces de bombear a la velocidad requerida.
- Si el gasto seleccionado no interfiere con el funcionamiento de las otras herramientas de la sarta (MWD, LWD).

<sup>1</sup> ADAMS, Neal J. "Drilling Engineering, A Complete Well Planning Approach", TULSA, 1985, Capítulo 7,

<sup>2</sup> Schlumberger, "Tecnología de Perforación". Capítulo 6, 2004

- Si el gasto optimo seleccionado es superior a la velocidad anular crítica mínima.
- Si el gasto optimo seleccionado es inferior a la velocidad anular crítica máxima.

La velocidad anular crítica<sup>3</sup> debe ser considerada al tratar de definir el gasto óptimo, ya que es importante evitar la retención de sólidos en el espacio anular, debido a que el incremento en la densidad del lodo podría causar pérdidas de fluido hacia las formaciones.

Es posible calcular la velocidad anular crítica utilizando la siguiente fórmula:

$$V_c = \left[ \frac{(3470 - 1370n)(100)K \left( \frac{2n+1}{3n} \right)^n}{928W(DI_{\text{agujero}} - DE_{\text{tuberia}}) \left( \frac{144}{DI_{\text{agujero}} - DE_{\text{tuberia}}} \right)^{1-n}} \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (2.2)$$

Donde:

$V_c$  = velocidad anular crítica [pie/min]

$n$  = cte. de la ley de potencias para el espacio anular-

$W$  = densidad del lodo [ppg]

$DI_{\text{agujero}}$  = diámetro interno del agujero o de la TR [pulgadas]

$DE_{\text{tuberia}}$  = diámetro externo de la tubería [pulgadas]

$K$  = factor de consistencia para el espacio anular [cp]

Una vez calculada la velocidad anular promedio es posible calcular el gasto crítico<sup>4</sup> con la fórmula siguiente:

$$Q_c = 2.45V_c(DI_{\text{agujero}}^2 - DE_{\text{tuberia}}^2) \quad (2.3)$$

Donde:

$Q_c$  = gasto anular crítico [gpm].

$V_c$  = velocidad anular crítica [pie/min].

$DI_{\text{agujero}}$  = diámetro interno del agujero o de la TR [pg].

$DE_{\text{tuberia}}$  = diámetro externo de la tubería [pg].

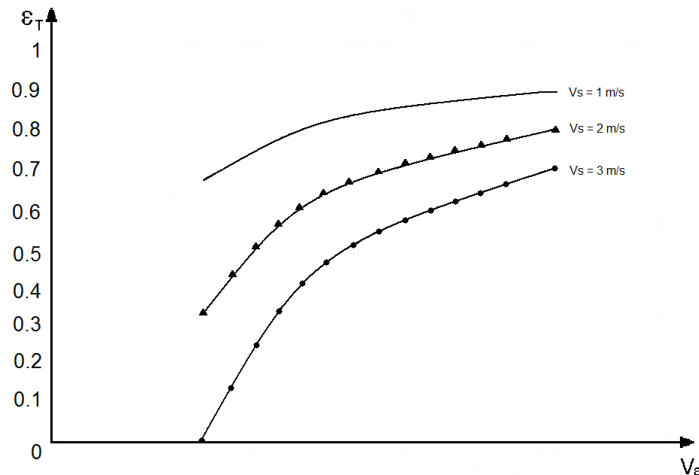
<sup>3</sup> Schlumberger, "Tecnología de Perforación". Capítulo 6, 2004, pag 11

<sup>4</sup> Schlumberger, "Tecnología de Perforación". Capítulo 6", 2004, pag 11

Para calcular los valores de  $n$  y  $k$  se pueden utilizar las siguientes fórmulas con la ayuda del viscosímetro FANN.

$$n = 0.657 * \log\left(\frac{\theta_{100}}{\theta_3}\right) \quad (2.4)$$

$$K = \frac{511 * \theta_3}{5.11^n} \quad (2.5)$$



Gráfica 2.2 Eficiencia en el transporte de recortes vs velocidad anular.<sup>5</sup>

### 2.1.2 Peso sobre la Barrena (WOB)<sup>6</sup>

El peso aplicado sobre la barrena es aquel que permite incrementar la tasa de penetración dentro de las recomendaciones que marca la directriz de la hoja de especificaciones del fabricante. Suele ser un factor importante para la perforabilidad de los diferentes intervalos, para aumentar o disminuir la tasa de penetración, así como optimizar la vida de la barrena.

Las exigencias del WOB dependen del tipo y dureza de la formación. Cuando aumenta la fuerza compresiva de la formación, es importante aumentar el peso aplicado sobre la barrena y bajar la tasa de rotación. El WOB no debe ser aumentado más de lo que recomiendan las hojas técnicas de las barrenas, ya que esto podría romper los elementos de corte en las barrenas tricónicas y/o PDC, o

<sup>5</sup> WALKERS et al. "Desing of muds for Carrying Capacity", SPE, 1998

<sup>6</sup> Baker Hugues, "Drilling Engineering Workbook. Capítulo 3", 1995, pag. 137



en un caso peor, romper una aleta o cono y causar la formación de chatarra en el fondo del pozo.

Si la formación es altamente abrasiva, es necesario mantener o reducir ligeramente el WOB y bajar las RPM, ya que esto incrementará el desgaste de los dientes de la barrena.

El WOB generalmente deberá aumentar en la medida que los elementos de corte se desgasten para mantener un óptimo ROP y la estabilidad de la barrena aumenta generalmente cuando se aumenta el WOB. Esto es porque el comportamiento dinámico provocaría vibración y la pérdida de calibre. Siempre se debe optimizar el WOB para reducir daños en la barrena, causados por vibraciones.

Para calcular el peso sobre la barrena es necesario tomar en cuenta si el pozo es vertical o direccional, por lo que para pozos verticales:

$$WOB = Ff * WBHA_{aire} * Fs \quad (2.6)$$

Dónde.

WOB = peso sobre la barrena [lbf].

Ff = factor de flotación.

WBHA<sub>aire</sub> = peso del BHA en el aire [lb].

Fs = factor de seguridad = 1.15

Para calcular el WOB en pozos direccionales tenemos:

$$WOB = Ff(WBHA_{aire}) \cos(\beta) + 1617 \left[ \frac{Ff(D^2 - d^2)(D^4 - d^4) \sin(\beta)}{H - D} \right]^{0.5} \quad (2.7)$$

Donde:

WOB = peso sobre la barrena [lbf].

Ff = factor de flotación.

WBHA<sub>aire</sub> = peso del BHA en el aire [lb].

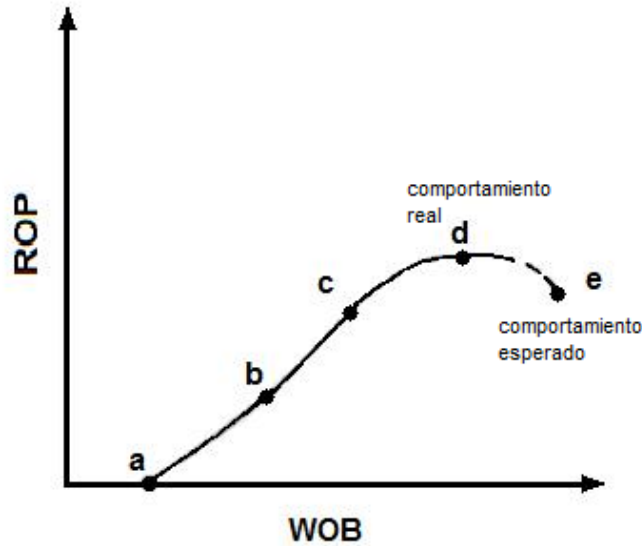
Fs = factor de seguridad = 1.15

$\beta$  = ángulo de inclinación del pozo [grados].

D = diámetro externo de la tubería de perforación [pg].

d = diámetro interno de la tubería de perforación [pg].

H = diámetro del agujero [pg].



Gráfica 2.3 Respuesta típica de la ROP al cambio de peso sobre la barrena.<sup>7</sup>

### 2.1.3 Revoluciones por minuto (RPM)<sup>8</sup>

Las revoluciones por minuto son el número de vueltas que gira la sarta en un minuto. Si se tiene un motor de fondo la cantidad de RPM total aumentará. Para calcular el número de revoluciones por minuto totales es necesario sumar las vueltas en el equipo superficial y las del motor de fondo.

$$RPM_T = RPM_S + RPM_M \quad (2.8)$$

Donde:

$RPM_T$  = revoluciones por minuto totales [rpm].

$RPM_S$  = revoluciones por minuto del equipo superficial [rpm].

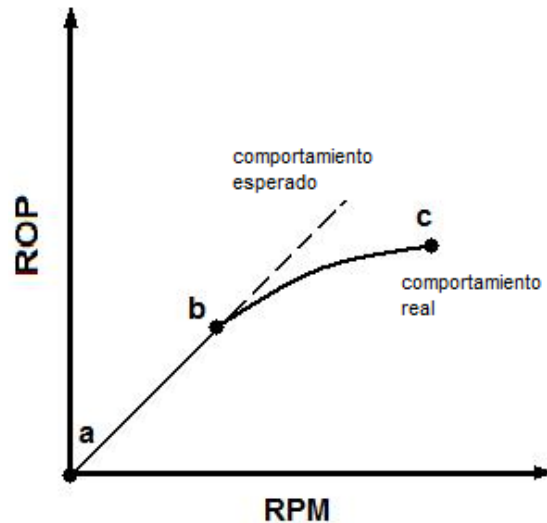
$RPM_M$  = revoluciones por minuto del motor de fondo [rpm].

La cantidad de RPM depende de la dureza y abrasión de la formación. Al aumentar la fuerza compresiva de la formación es necesario bajar las RPM, ya que con RPM más altas es más eficiente la perforación en formaciones blandas. Al contrario, un RPM más bajo es eficiente en formaciones duras o abrasivas ya que

<sup>7</sup> PRASSL, Wolfgang. "Drilling Engineering". Curtin University of Technology. Pag 111.

<sup>8</sup> ENI, "Drilling Design Manual", documento electrónico, 2008, pag 150

minimiza vibraciones y desgaste de los elementos de corte. Algunas formaciones pueden ser considerablemente blandas pero abrasivas. Siempre es necesario optimizar las RPM para prevenir vibraciones.



Gráfica 2.4 Respuesta típica de la ROP al cambio de la velocidad de rotación.<sup>9</sup>

#### 2.1.4 Torque y Arrastre<sup>10</sup>.

El torque puede ser definido de manera simple como la resistencia ejercida por la tubería a girar durante la perforación por el contacto de la tubería con las paredes del pozo. En un pozo con trayectoria direccional el torque aumenta.

Se dice que se perfora rotando, cuando se utiliza la mesa rotaria para imprimirle revoluciones por minuto a la sarta, y se le llama deslizar cuando la sarta se encuentra inmóvil mientras se le ajusta la inclinación y el azimut para poder direccionar el pozo, utilizando únicamente el gasto de lodo y el motor de fondo.

Un torque excesivo puede limitar la longitud del intervalo horizontal ya que esto podría ocasionar daño a las juntas o a las conexiones más débiles de la tubería o a las paredes más delgadas de ésta.

<sup>9</sup> PRASSL, Wolfgang. "Drilling Engineering". Curtin University of Technology. Pag 110.

<sup>10</sup> MITCHELL, Bill. "Advanced Oilwell Drilling Engineering". 1995, pag 404

Cuando se perfora rotando es cuando el torque es mayor ya que toda la tubería se encuentra en movimiento, al contrario que al estar deslizando, ya que es en esta operación que el torque es mínimo.

El incremento en el torque puede ser causado por cambios en el ángulo del pozo, cambios de formación, incremento en el peso sobre la barrena, entre otros. La disminución en el torque se puede deber a cambios en la formación, cambios en la velocidad de rotación, disminución en el peso sobre la barrena o enderezamiento del ángulo del pozo. El incremento en el torque puede provocar un aumento en el daño que sufren los cortadores, desprender conos o romper aletas.

La formula con la que se puede calcular el torque es.

$$Q = \frac{0.096167 J}{D} \left( Y^2 - \frac{T^2}{A^2} \right)^{0.5} \quad (2.9)$$

Donde:

Q = torque [lb-pie].

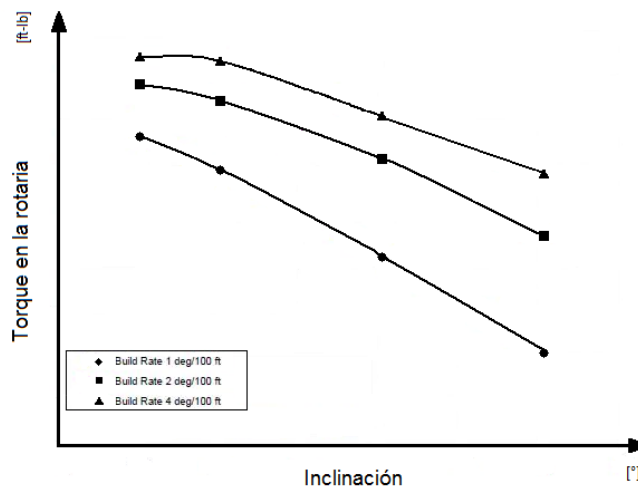
J = momento polar inercial [ $pg^4$ ] =  $(\pi/32)(DE^2 - DI^2)$ .

D = diámetro externo de la tubería [pg].

Y = mínima fuerza cedente [psi].

T = carga tensional [lb].

A = área de las paredes de la tubería [ $pg^2$ ].

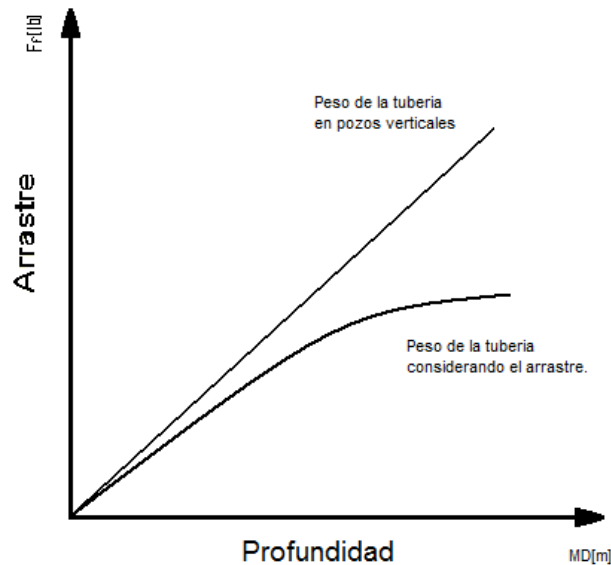


Gráfica 2.5 Variación del Torque con respecto a la inclinación del pozo..<sup>11</sup>

<sup>11</sup> CARDEN, Richard. "Horizontal and Directional Drilling". PetroSkill. 2007. Cap 9, pag 14.

El arrastre puede ser entendido como la fricción que sufre la tubería con las paredes del pozo.

El arrastre se incrementa en pozos direccionales y es mayor mientras más inclinado sea el pozo, siendo el máximo en pozos horizontales. El arrastre mínimo se presenta en pozos verticales o en la sección vertical. El aumento en el arrastre puede provocar desgaste en el gauge de la barrena, hombro y pérdida de calibre.



Gráfica 2.6 Variación del arrastre de la tubería vs profundidad desarrollada.<sup>12</sup>

La ecuación para calcular el arrastre es:

$$F_f = \sum \left[ \mu * B_f * W_s * DL \pm \mu * 2 * T * \sin \left( \frac{DLS * LOS}{2} \right) \right] \quad (2.10)$$

Donde:

$F_f$  = arrastre [lb].

$B_f$  = factor de flotación.

$W_s$  = peso en el aire por cada pie de la sección de la tubería [lb/pie].

$DL$  = longitud de partida de una sección de la tubería [ft].

$T$  = tensión axial [lb].

$DLS$  = severidad [grados/100pies].

$LOS$  = longitud de la sección desviada [ft].

$\mu$  = coeficiente de fricción entre la tubería y el pozo [lb/lb].

<sup>12</sup> JOHANCSIK, et al. "Torque and Drag in Directional Wells- Prediction and Measurement" SPE 2002

## 2.2 DISEÑO DEL ENSAMBLE DE FONDO

El BHA constituye la herramienta principal en el control de direccionamiento de los pozos, ya que una configuración adecuada de sus componentes permite obtener la trayectoria de perforación planificada. Existen muchos elementos que conforman el ensamblaje de fondo, como lo son los lastrabarrenas, la tubería pesada, los estabilizadores y demás accesorios como el MWD, LWD, motores, RSS, etc.

### 2.2.1 Tubería pesada<sup>13</sup>

La tubería pesada, es la componente intermedia del ensamblaje de fondo, sirve de zona de transición entre los lastrabarrenas y la tubería de perforación para minimizar los cambios de rigidez entre los componentes de la sarta. En la perforación direccional es la encargada de dar estabilidad y ayuda a tener mucho menos contactos con la pared del pozo, con lo cual es más fácil direccionar la tubería.

Para calcular la Longitud Mínima de la Tubería Pesada<sup>14</sup> (HWDP) se puede utilizar la formula:

$$L_{HWDP} = \frac{\left[ \frac{WOB * DF_{BHA}}{K_B * \cos \theta} - (W_{DC1} * L_{DC1}) - (W_{DC2} * L_{DC2}) \right]}{W_{HWDP}} \quad (2.11)$$

Donde:

$L_{HWDP}$  = longitud mínima de la HWDP [pies].

WOB = peso sobre la barrena [lbf].

$DF_{BHA}$  = factor de diseño para el sobrepeso.

$K_B$  = factor de flotación.

$\theta$  = ángulo máximo del pozo [grados].

$W_{DC1}$  = peso unitario de los lastrabarrenas en la primera sección [lb/pie].

$W_{DC2}$  = peso unitario de los lastrabarrenas en la segunda sección [lb/pie].

$W_{HWDP}$  = peso unitario de la tubería pesada [lb/pie].

<sup>13</sup> PDVSA, “Teoría de Perforación”, documento electrónico, 2008, pag 111

<sup>14</sup> Schlumberger, “Tecnología de Perforación”. Capítulo 4, 2004, pag 14

$L_{DC1}$  = longitud de la primera sección de los lastrabarrenas [pies].  
 $L_{DC2}$  = longitud de la segunda sección de los lastrabarrenas [pies].

### 2.2.2 Lastrabarrenas<sup>15</sup>.

Los lastrabarrenas son tubos lisos o en espiral de acero o metal no magnético de espesores significativos, pesados y rígidos, los cuales sirven de unión entre la barrena y las tuberías de perforación. En la perforación direccional son preferibles los de espiral debido a que sus ranuras reducen el área de contacto con la pared, reduciendo la probabilidad de producir pegaduras. Al colocarlos en el fondo de la sarta de perforación proporcionan la rigidez y el peso suficiente para producir la carga requerida sobre la barrena para una penetración más efectiva de la formación.

Los lastrabarrenas tienen las siguientes funciones:

- Proporcionan el peso sobre la barrena.
- Soportan y dan rigidez a la parte inferior de la sarta de perforación.
- Sirven de apoyo y estabilizador de la barrena.

Para calcular la Longitud Mínima de los Lastrabarrenas<sup>16</sup> se utiliza:

$$L_{DC} = \frac{WOB * DF_{BHA}}{W_{DC} * K_B * \cos \theta} \quad (2.12)$$

Y si el pozo es vertical:

$$L_{DC} = \frac{WOB * DF_{BHA}}{W_{DC} * K_B} \quad (2.13)$$

Donde:

WOB = peso sobre la barrena [lbf].

$DF_{BHA}$  = factor de diseño para el sobrepeso.

$K_B$  = factor de flotación.

$\theta$  = ángulo máximo del pozo [grados].

$W_{DC}$  = peso unitario de los lastrabarrenas [lb/pie].

<sup>15</sup> PDVSA, “Teoría de Perforación”, documento electrónico, 2008, pag 112

<sup>16</sup> Schlumberger, “Tecnología de Perforación”. Capítulo 6, 2004, pag 14

## 2.3 LITOLOGÍA.

El estudio litológico es un factor primario para la selección de las barrenas, sus características y condiciones de operación. Esto con la finalidad de obtener el mayor rendimiento posible, tanto en velocidad de penetración como en rendimiento específico.

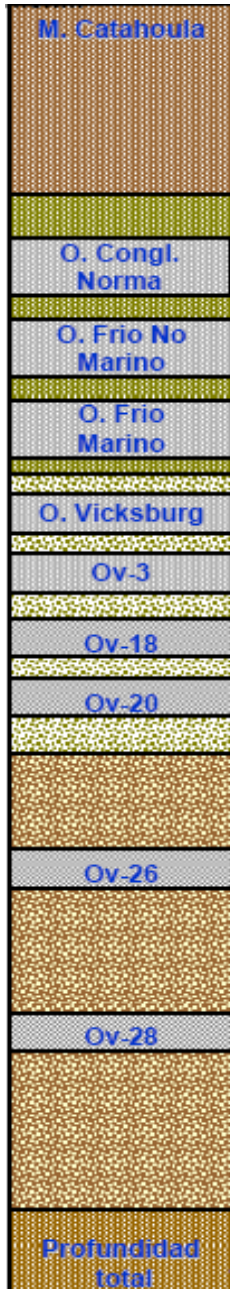
Las propiedades litológicas inducen diferentes comportamientos a diferentes condiciones así como características de desgastes diferentes según el tipo de roca que se esté perforando.

Si la intercalación de litologías distintas y de diferentes durezas es muy grande, provocará un efecto de impacto, esto es, que cuando la barrena perfora una litología blanda y cambia de manera repentina a una mucho más dura, provoca vibración de ésta contra la formación. Si este tipo de litologías son muy frecuentes causan daño por astillamiento o cortadores rotos.

Todo este tipo de características litológicas es posible verlas por medio de registros geofísicos y de correlaciones de los pozos vecinos, aunque también es presentada en el estado mecánico del pozo que se desea perforar por medio del perfil litológico, aunque estas son estimaciones y podrían variar de la realidad.

El perfil litológico muestra los diferentes tipos y nombres de las formaciones así como la era geológica a la que pertenecen, las profundidades a las que es probable encontrarlas, sus coordenadas en superficie, coordenadas del objetivo, y presión y temperatura esperadas en el yacimiento, todo esto tomando como base pozos de correlación.





**Datos del Pozo:**

Obj: Ov-28  
 Clas: Productor  
 Superficie:  
 Coord X: 559,002.04 m  
 Coord Y: 2,797,535.67 m  
 Objetivo:  
 Coord X: 559,038.00 m  
 Coord Y: 2,797,640.00 m

**Datos de Yacimiento:**

Presión: 397 kg/cm<sup>2</sup> (5,645 psi) en relación al pozo más cercano.  
 Temperatura: 113° C @ 2400 m

Formación	Aflora MD [m]	Aflora TVD [m]	Inclinación [grados]	Azimut [grados]
M. Catahoula	0	0	0	0
KOP	330	330	0	19.27
EOC	570	565	19.97	19.27
OCN	834	821	6.77	19.27
O. Frio No Marino	988	975	0.2	19.27
O. Frio Marino	1148	1135	0	19.27
O. Vickburg	1418	1405	0	19.27
Arena OV-3	1443	1430	0	19.27
Arena OV-18	1698	1685	0	19.27
Arena OV-20	1808	1795	0	19.27
Arena OV-26	2048	2035	0	19.27
Arena OV-28	2276	2263	0	19.27
PT	2713	2700	0	19.27

**2.3.1 Lutita.**

Las lutitas son rocas sedimentarias detríticas cuyos componentes tienen un diámetro inferior a 1/16 mm<sup>17</sup>. Son de gran importancia en cuanto a la selección de

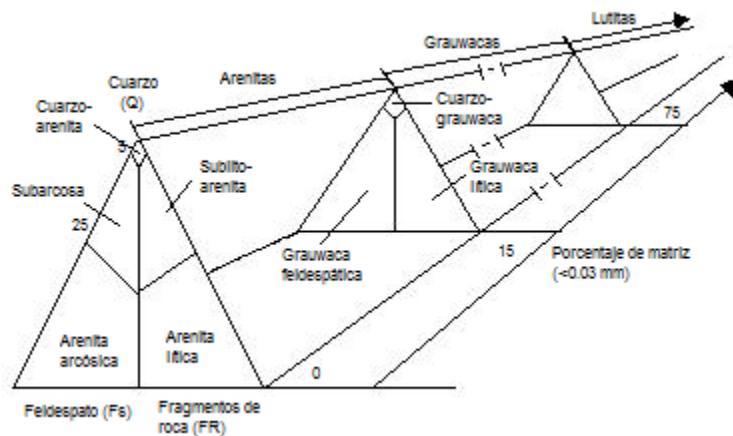
<sup>17</sup> FOUNCAULT Alain et al, “Diccionario de Geología”, 1985, Barcelona

barrenas se refiere. Por lo general, cualquier tipo de barrena es capaz de perforar este tipo de roca con facilidad, provocándole un desgaste normal a la estructura de corte, por lo que si el intervalo esperado de lutita es muy grande es posible utilizar barrenas con características que generen una mejor tasa de penetración (cortadores más grandes, menor número de aletas, etc.) y menos consideraciones con el desgaste, como las utilizadas para otro tipo de formaciones.

Incluso las lutitas muy comprimidas no presentan mucho problema para la barrena al momento de perforar, basta con tener estructura de corte con características para impacto de moderado a bajo y aplicar un poco mas de peso sobre la barrena.

### 2.3.2 Areniscas.

Las Arenas son rocas sedimentarias detríticas terrígenas compuestas por un 85 % de granos de cuarzo mas o menos redondeados de 1/16 mm a 2 mm<sup>18</sup>. En la perforación son consideradas como rocas muy abrasivas y más si su contenido de cuarzo es muy alto, lo que representa un problema de desgaste en la estructura de corte y en el cuerpo de la barrena, provocando pérdida de calibre.



Gráfica 2.7 Clasificación de rocas detríticas propuesta por Pettijhon.<sup>19</sup>

<sup>18</sup> FOUNCAULT Alain et al, “Diccionario de Geología”, 1985, Barcelona

<sup>19</sup> ADAMS A.E. et al “Atlas de Rocas Sedimentarias”. 1997 Barcelona

Es importante considerar las areniscas como formaciones abrasivas y no como formaciones de impacto, aunque por lo general son duras debido a la cantidad de sílice que contienen.

Un alto contenido de areniscas junto con una compresibilidad alta, obliga a la selección de barrenas con cortadores especialmente fabricados para abrasión. Además es importante saber que una barrena con cuerpo de acero sufre mucho mayor desgaste que una con cuerpo de matriz.

### **2.3.3 Carbonatos.**

Para efecto práctico las rocas carbonatadas pueden ser divididas en calizas y dolomías. Las calizas son rocas carbonatadas que contienen por lo menos un 50% de calcita  $\text{CaCO}_3$ <sup>20</sup>. Las dolomías son rocas carbonatadas que contienen por lo menos un 50% de carbonato del que al menos la mitad se presenta como dolomita  $(\text{Ca, Mg})(\text{CO}_3)_2$ <sup>21</sup>.

Las formaciones con alto contenido de carbonatos suelen ser muy duras y muy poco abrasivas. Este tipo de formaciones provocan ruptura y astillamiento de las estructuras de corte.

Las formaciones carbonatadas pueden provocar el sobrecalentamiento de las barrenas si es que no se aplica el suficiente peso sobre ellas y comienzan a “patinar” en el fondo del pozo causando una ROP mínima, lo que causa fricción excesiva. En estos casos es recomendable que se utilice mayor peso y barrenas con cortadores pequeños para que puedan soportarlo mejor y tengan mayor tasa de penetración.

Para pozos en los que se encuentran formaciones carbonatadas, es bueno el uso de barrenas con cuerpo de acero, que combinadas con cortadores pequeños son capaces de disminuir significativamente el daño a la barrena, por lo que se esperaría una ROP más estable. Las barrenas con cuerpo de matriz son igualmente útiles y, de la misma manera, una buena combinación entre este tipo de cuerpo y tamaño de los cortadores pueden ayudar mucho a la perforación.

---

<sup>20</sup> FOUNCAULT Alain et al, “Diccionario de Geología”, 1985, Barcelona

<sup>21</sup> FOUNCAULT Alain et al, “Diccionario de Geología”, 1985, Barcelona

<b>Disminución de ROP</b>	<b>Aumento de ROP</b>	<b>Torque Irregular</b>	<b>Características direccionales distintas</b>	<b>Aumento de presión en la bomba</b>	<b>Disminución de presión en la bomba</b>
Mala selección de barrena	Propiedades del lodo	Cambio de formación	Cambio de formación	Barrena embolada	Cambio de tipo de lodo
Mala selección de WOB y RPM	Buena selección de WOB y RPM	Vibración	Desgaste de la barrena	Toberas tapadas	Tobera perdida
Barrena embolada	Cambio de formación	Formaciones intercaladas	Mala selección de barrena	Mala limpieza del pozo	Falla de la bomba
Cambio de formación	Buena limpieza del pozo	Chatarra	Problemas con el motor de fondo	Espacio anular obstruido	
Chatarra	Buena selección de barrena	Fuera de calibre		Cambio de tipo de lodo	
Propiedades del lodo				Falla de la bomba	

Tabla 2.1 Rendimiento de la barrena

# CAPITULO 3.

## ESTADO DEL ARTE PARA LA SELECCIÓN DE BARRENAS EN LA ETAPA DE DISEÑO.

El fin principal de una buena selección de barrenas es el poder generar una mayor tasa de penetración, ya que con esto es posible reducir los costos de perforación.

Existen diferentes métodos para la selección de barrenas y para estimar la tasa de penetración. De entre las metodologías más utilizadas para la selección de barrenas se encuentran las de Esfuerzos no Confinados y por Energía Específica.

Muchos modelos, como los de Energía Específica<sup>1</sup> y el Método de Warren Modificado<sup>2</sup> han sido desarrollados y modificados basándose en el concepto de Esfuerzo no Confinado, el cual es inversamente proporcional a la tasa de penetración, por lo que mientras menor sea el UCS, mayor será la ROP. Muchos de estos modelos pueden predecir la ROP al utilizar diferentes tipos de barrenas independientemente del tipo de yacimiento que se trate (aceite o gas).

Existen muchos parámetros que afectan la tasa de penetración, entre estos tenemos: condiciones de operación, tipo de barrenas, litología, la hidráulica y el desgaste de la barrena, entre otros.

Dentro de los modelos existentes para calcular la ROP, el desarrollado por Tommy y Warren en 1981 es de los más completos. Este modelo sugiere que el comportamiento de la barrena está regida por cuatro condiciones principales: peso sobre la barrena, revoluciones por minuto, tamaño de la barrena y la compresibilidad de la formación. Posteriormente, Hareland y Hoberock en 1993 modificaron el modelo de Warren. El nuevo modelo quedó en función de las condiciones operativas, compresibilidad de la formación, parámetros de la barrena, hidráulica en la barrena y el desgaste de la misma.

Los ejemplos para la selección de barrenas utilizando el método de UCS y Energía Específica y cálculo de la ROP por energía Específica serán definidos en

---

<sup>1</sup> Baker-Hughes, “Bit Presentation”, documento electrónico 2001

<sup>2</sup> RASTEGAR, M. “Optimization of Multiple bit Runs Based on ROP Models and Cost Equation: A new Methodology Applied for One of the Persian Gulf Carbonate Fields”, SPE, 2008.

el capítulo 5. El cálculo de ROP utilizando el Modelo de Warren Modificado no será ejemplificado por falta de información.

### **3.1 MÉTODOS DE SELECCIÓN DE BARRENAS.**

Aunque existen diferentes tipos de métodos de selección de barrenas, la utilización del método de selección de barrenas por Energía Específica y el de UCS son los que se utilizan con mayor frecuencia.

El método de UCS (Esfuerzo No Confinado) calcula la fuerza compresiva de la roca, por lo que se deberán elegir diferentes características de la barrena dependiendo de qué tan grande sea esta. El cálculo de la UCS es muy importante para decidir las características de las barrena, ya que esta es utilizada en la mayoría de los métodos.

En la eficiencia mecánica del método de Energía Específica puede ser calculada con el Esfuerzo No Confinado, siendo estos directamente proporcionales, por lo que será mayor mientras aumente la fuerza compresiva de la formación. Este método no propone directamente todas las características que deberá tener la barrena.

En este capítulo se explican de manera rápida los diferentes métodos antes descritos para la selección de barrenas. Ya que estos métodos no son es el tema principal de este trabajo no se verán a profundidad ninguno de estos subtemas.

### **3.2 METODOLOGÍA UTILIZANDO LOS UCS.**

Este es uno de los métodos más utilizados para la selección de barrenas, pues hace una comparación entre valores de UCS determinados en laboratorio y valores UCS determinados por el método de Mason<sup>3</sup>, a través de registros de tiempo de tránsito compresional y cizallamiento. Una vez determinados los UCS en psi se determina el tipo de litología en función de la clasificación de la IADC.

---

<sup>3</sup> MASON, K.L. "Three-Cone Bit Selection with Sonic Logs", SPE 1987

### 3.2.1 Determinación del Esfuerzo No Confinado.

A partir de las herramientas básicas como el registro sísmico convencional, densidad y rayos gamma se puede determinar la velocidad de la onda compresional utilizada para calcular el módulo dinámico de Young.

El módulo dinámico de Young ( $E_D$ ) puede ser estimado a partir de los datos del registro sísmico teniendo en cuenta los valores de tiempo de tránsito de las ondas compresionales, además de los datos del registro de densidad, usando la primera correlación, la cual consiste en calcular la razón de Poisson y Módulo Cizallamiento ( $G$ ), para finalmente calcular el módulo dinámico de Young:

$$G=1.347*10^{10}*(\rho_b/t_c^2) \quad (3.1)$$

$$E_D = 2G(1+ \nu) \quad (3.2)$$

Donde:

$G$  = Módulo de Cizallamiento.

$t_c$  = tiempo de tránsito de la onda compresional [microsegundos].

$\rho_b$  = densidad de la formación [lb/pie<sup>3</sup>].

La segunda correlación para determinar el módulo dinámico de Young utiliza el tiempo de tránsito de la onda compresional ( $t_c$ ) y la densidad de la formación ( $\rho_b$ ), la cual se halla a partir de la porosidad obtenida de los tiempos de tránsito.

$$E_D(10^6 \text{ psi})=(1.13*10^4* \rho_b)/t_c^2 \quad (3.3)$$

La última correlación para determinar el módulo dinámico de Young solamente utiliza la velocidad de la onda compresional ( $V_c$ ) expresada en (microsegundos/pie), estimada del registro sísmico la cual implica que el módulo dinámico de Young ( $E_D$ ) depende básicamente de la velocidad de onda compresional ( $V_C$ ).

$$E_D=0.265*V_c^{2.04} \quad (3.4)$$

Posteriormente para cada correlación se utiliza el módulo estático de Young.

Una vez determinado el módulo dinámico de Young es necesario conocer la litología que se presenta en la sección estudiada para encontrar el módulo estático

de Young. Con el registro Gamma Ray se halla el índice de arcillosidad así como su volumen.

Si el contenido de volumen de arcillas (Vsh) es mayor a 0.35 se consideran arenas y si es menor o igual a 0.35 se habla de arcillas.<sup>4</sup>

Es posible determinar el módulo estático de Young (Es) para arenas, con la siguiente ecuación:

$$E_S = 0.0293 * E_D^2 + 0.4533 * E_D \quad (3.5)$$

O por la siguiente ecuación, donde los valores de A0 y A1 se encuentran especificados en la Tabla 1.

$$E_S = 10(A_0 + A_1 \log E_D) \quad (3.6)$$

<b>Consolidación</b>	<b>Porosidad</b>	<b>A<sub>0</sub></b>	<b>A<sub>1</sub></b>
Consolidada	10% a 15%	2.137	0.6612
Moderadamente Consolidada	15% a 25%	1.829	0.692
Poco consolidada	>25%	-0.4575	0.9402

Tabla 3.1 Valores de A0 y A1<sup>5</sup>

Una correlación similar existe para arcillas. Donde ED y ES están expresados en 10<sup>6</sup> psi.

$$E_S = 0.0482 * E_D^2 + 0.2334 * E_D \quad (3.7)$$

Finalmente el Esfuerzo No Confinado (UCS) es determinada por la ecuación:

$$UCS = 0.2787 * E_S^2 + 2.458 * E_S \quad (3.8)$$

El Esfuerzo No Confinado está expresado en kpsi y el módulo estático de Young en 10<sup>6</sup> psi.

<sup>4</sup> Kumar, J. "the effect of Poisson's Ratio on rock properties", SPE, 1976

<sup>5</sup> Kumar, J. "the effect of Poisson's Ratio on rock properties", SPE, 1976



Una vez calculado el Esfuerzo No Confinado es posible seleccionar la barrena utilizando la clasificación IADC para barrenas tricónicas y/o de PDC. Se debe considerar la siguiente tabla:

UCS (psi)	FORMACIÓN
0 a 4500	Muy blanda
4500 a 9000	Blanda
9000 a 13500	Blanda a media
13500 a 18000	Media
18000 a 22500	Medianamente dura
22500 a 27000	Dura
Mas de 27000	Extremadamente dura

Tabla 3.2 de referencia de dureza de las formaciones con respecto a la UCS

### 3.3 SELECCIÓN DE BARRENAS POR ENERGÍA ESPECÍFICA.

La Energía Específica se define como la cantidad de energía necesaria para remover una unidad de volumen de roca. Este método no permite calcular las propiedades de la barrena de manera directa, utiliza parámetros de perforación utilizados en pozos correlación, como son, el peso sobre la barrena, torque, revoluciones por minuto y la tasa de penetración, a fin de poder calcular la Energía Específica de la locación.

La Energía Específica está definida por la ecuación:

$$E_s = \left( \frac{WOB}{A_{HOLE}} \right) + \frac{13.33 * WOB * \mu * N}{A_{HOLE} * ROP} \quad (3.9)$$

$\mu$  es calculada de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{36 * T}{WOB * D_{bit}} \quad (3.10)$$

Donde:

WOB = peso sobre barrena [lbf].

$A_{HOLE}$  = área del agujero [ $pg^2$ ].

N = velocidad rotando [rpm].

$D_{BIT}$  = diámetro de la barrena [pg].

ROP = tasa de penetración [pies/hora].

T = Torque [lb-ft].

$\mu$  = agresividad [lb/lbf].

Para utilizar este método es necesario:

1. Ordenar la información como se muestra en la tabla 3.3, donde  $t_{RD}$  es el tiempo de rotación diaria y  $t_{RA}$  es el tiempo de rotación acumulada.

Avance (m)	Avance acumulado (m)	Prof. alcanzada (m)	$W \times N \times 1000$ (ton-rpm)	$T_v$ (hr)	$t_{RD}$ (hr)	$t_{RA}$ (hr)	C (\$/m)	Es ( $pg \text{ lb/pg}^3$ )

Tabla 3.3 Información obtenida de registros geofísicos.

2. Calcular la Energía Específica con la ecuación (3.9) para cada intervalo.
3. Graficar los datos de energía Específica obtenidos para cada barrena utilizada en pozos de correlación vs profundidad alcanzada (figura 1.1).

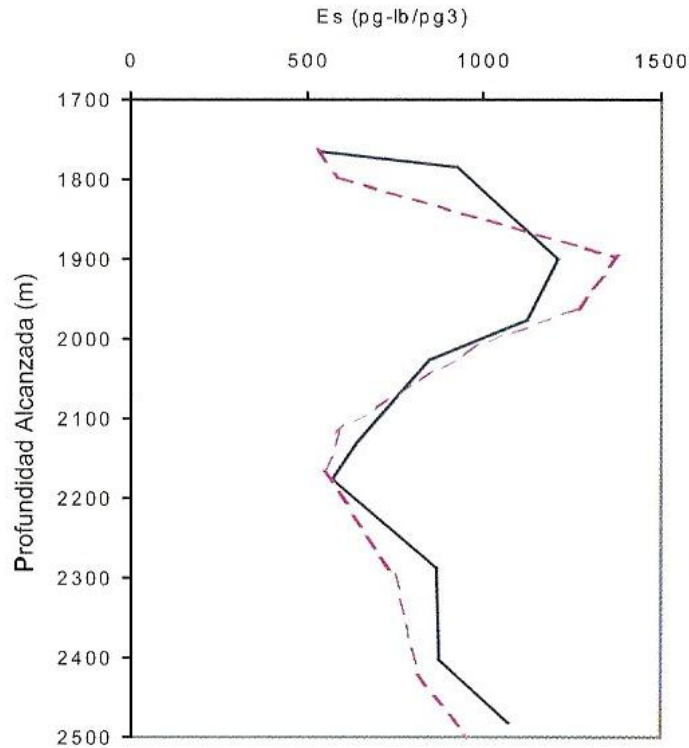


Figura 3.1 Grafica generada de profundidad acumulada vs Es para dos barrenas utilizadas en pozos de correlación.

4. Se deberá escoger la barrena que presente menor Es. Esto indica que las características de la barrena seleccionada son las más adecuadas para perforar cierto intervalo.

A continuación se muestra la metodología utilizando la Es para determinar el tiempo de vida útil de la barrena<sup>6</sup>.

1. Ordenar la información como se muestra en la tabla 1.1
2. Calcular la Energía específica para cada intervalo.
3. Graficar Avance acumulado vs Es semejante al que se muestra en la figura. 3.2

<sup>6</sup> PEMEX, “Guía para la Perforación, selección de barrenas”. 2006

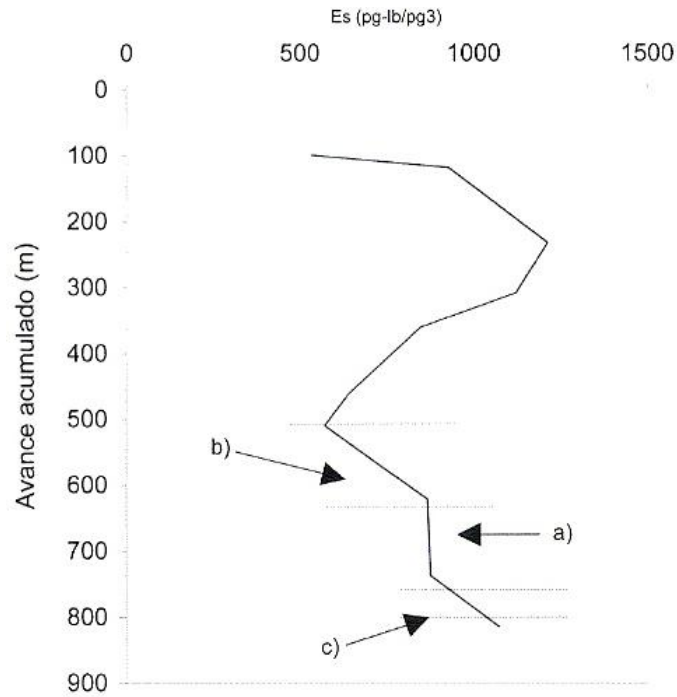


Figura 3.2 Avance acumulado vs Es

4. Graficar Avance Acumulado vs Torque semejante al que se muestra en la figura 3.3

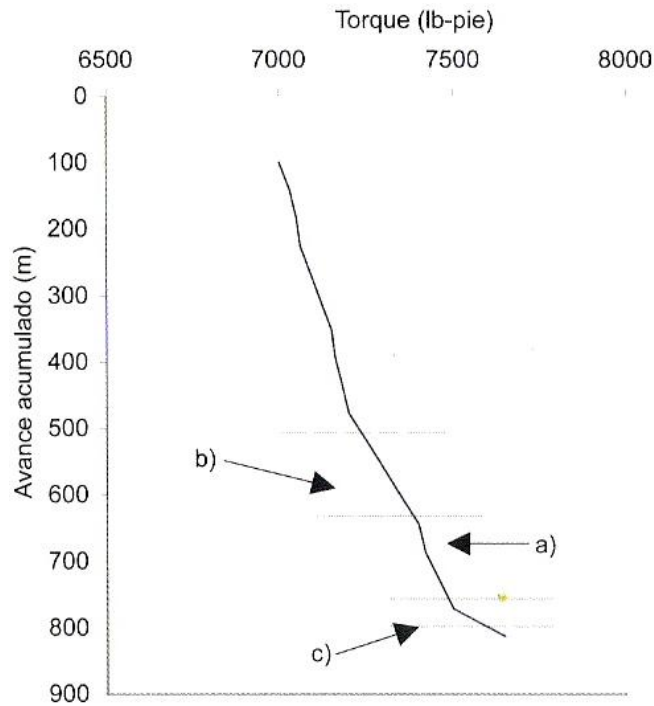


Figura 3.3 Avance Acumulado vs Torque.

Para estos casos, a), b) y c) son diferentes intervalos. En a la figura 3.2, se puede observar que la energía específica aumenta en los intervalos b) y c). Con la figura 3 se interpreta un aumento en el torque, lo que indica que le está costando trabajo perforar la formación. Es posible que este fenómeno se deba a cambios en la litología, por lo que se deberán revisar constantemente los recortes para constatar esto, ya que si se está perforando una misma litología, si el torque y la Es en el intervalo c) aumenta es posible que la barrena esté desgastada, por lo que se deberá sacar a superficie y ser remplazada.

### **3.4 CÁLCULO DE LA ROP.**

La finalidad de una buena selección de barrenas es la de optimizar la tasa de penetración. Por lo que si nuestra selección de barrenas fue la adecuada, esperaremos una disminución en los tiempos de perforación, y por consiguiente, la disminución de costos de operación.

Existen varios métodos para calcular la tasa de penetración. En este subtema solo se hará mención al de “Energía Específica” y al “Modelo de Warren Modificado”

#### **3.4.1 Cálculo de la ROP utilizando el método de Energía Específica.**

Después de seleccionar las barrenas a utilizar en cada etapa de la perforación, calcular los parámetros promedios de perforación y haber calculado la Energía Específica de la locación para cada etapa, el siguiente paso es calcular la ROP que se tendrá, por lo que si ésta es muy baja se tendrá que hacer un ajuste en la selección de barrenas o en los parámetros de perforación.

Para calcular la ROP que esperamos obtener para cada sección del pozo es necesario despejarla de la ecuación de Energía Específica. Se debe utilizar el coeficiente de fricción promedio, los parámetros promedios de perforación y la Energía Específica de la locación; todo esto para cada etapa de la perforación.

Al despejar la ROP de la ecuación (3.9) obtenemos:

$$ROP = \frac{13.33 * \mu * N}{D_{bit} \left( \frac{Es}{WOB} - \frac{1}{A} \right)} \quad (3.11)$$

Este paso deberá repetirse para cada etapa y barrena seleccionada.

### 3.4.2 Cálculo de la ROP utilizando el Modelo de Warren Modificado.

En 1993, Hareland y Hoberock modificaron el modelo de Warren para el cálculo de la ROP tomando como base el efecto que tiene el desgaste de la barrena en la tasa de penetración, introduciendo la función de desgaste ( $W_f$ ), la cual es calculada de la siguiente manera:

$$W_f = 1 - \frac{\Delta BG}{8} \quad (3.12)$$

Donde:

$\Delta BG$  = cambio en el desgaste de los dientes [adim].

Este cambio puede ser calculado tomando como base el WOB, RPM, abrasividad relativa de la roca y la compresibilidad confinada.

$$\Delta BG = W_c \sum_{i=1}^n WOB_i, RPM_i, A_{br_i}, CCV_i \quad (3.13)$$

Donde:

$W_c$  = coeficiente de desgaste [adim].

$CCV$  = Esfuerzo confinado de la formación [psi].

$A_{br}$  = abrasividad relativa [adim].

$WOB$  = peso sobre la barrena [klbf].

$RPM$  = revoluciones por minuto [rev/min].

Para calcular la esfuerzo con confinamiento de la formación se utiliza la formula siguiente:

$$CCV = UCS(1 + a_s P_e^{b_s}) \quad (3.14)$$

Donde:

$a_s$  y  $b_s$  = coeficientes litológicos de la fuerza de la roca [adim].

$P_e$  = presión diferencial [psi].

UCS = Esfuerzo no confinado de la formación [psi].

Por lo que, después de introducir la función de desgaste en la ecuación de Warren, se obtuvo:

$$ROP = W_f \left[ f_c(P_e) \left( \frac{aCCV^2 D_{bit}^3}{RPM * WOB} + \frac{b}{RPM * D_{bit}} \right) + \frac{cD_{bit} \gamma_f \mu}{F_{jm}} \right]^{-1} \quad (3.15)$$

Donde:

ROP = tasa de penetración [ft/hr].

$a, b, c$  = constantes de la barrena [adim].

$D_{bit}$  = diámetro de la barrena [pg].

$\gamma_f$  = gravedad específica del fluido [adim].

$\mu$  = viscosidad plástica del lodo [cp].

$F_{jm}$  = fuerza de impacto del yet modificado [klbf].

$f_c(P_e)$  = chip hold down.

# CAPITULO 4.

## PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE BARRENAS.

En este capítulo se propone una metodología para la selección de barrenas por correlación tomando como base la información de los parámetros de operación de pozos perforados, los cuales pueden ser utilizados como pozos de correlación. Usando la información derivada de ellos, es posible determinar las características que deberá tener la barrena para poder tener un buen desempeño durante su operación.

La metodología mencionada no requiere del uso de fórmulas de manera directa, aunque pueden ser utilizadas como apoyo. Por este motivo, en este capítulo se planteará de manera simple el impacto que genera cada una de las características de la barrena, lo cual ayudará a seleccionar las características requeridas a fin de obtener un desempeño óptimo durante la perforación.

Para seleccionar una barrena a través de este método, es necesario construir un perfil de comportamiento dinámico de la barrena en función de la litología, tamaño de los cortadores, número de aletas, direccionalidad, Back Rake, Side Rake y diseño del pozo.

Este es un proceso relativamente sencillo, pero el buen uso de este método depende de la persona encargada de realizarlo y de la información disponible.

El proceso de selección por correlación es usado para pozos de desarrollo y aunque podría ser utilizado para pozos exploratorios, este método no sería de mucha ayuda y podría resultar contraproducente, ya que es posible que los pozos más cercanos estén a varios kilómetros de distancia.

Este proceso involucra conocimiento y análisis de diversas situaciones, herramientas y procedimientos para poder realizar la selección óptima de las barrenas.



Los factores que comúnmente se toman en cuenta para realizar la selección son:

- Compresibilidad de la formación.
- Estado mecánico del pozo a perforar.
- Barrenas utilizadas en pozos cercanos.
- Decisión de las características de las posibles barrenas seleccionadas.
- Decisión de la ROP esperada.

#### **4.1 ESTADO MECÁNICO DEL POZO A PERFORAR.**

El estado mecánico del pozo, es una síntesis del programa de perforación, en el cual es posible observar las formaciones que se espera perforar, la profundidad a la que se encuentran las diferentes formaciones, el survey o programa direccional que se planea ejecutar (si es que existe), características mecánicas y geométricas de la TR, profundidad de asentamiento de las TR's, número de etapas y el diámetro de barrenas que se requiere.

La litología, como se vio con anterioridad, es lo primero que hay que revisar para poder tener una primera idea de las características que debe tener la barrena para poder generar lo mejores resultados posibles ocasionándole el menor daño.

En cuanto a la profundidad de desarrollo de cada etapa, si resulta ser larga la corrida, es posible que se necesite una barrena con características especiales dependiendo del tipo de formación(es) que se espera perforar, lo que posiblemente disminuiría la ROP, o la necesidad de perforar este intervalo en dos o más corridas.

Un aspecto importante es el del programa de direccionamiento del pozo. En muchas ocasiones el pozo es direccional, por lo que en este tipo de pozos es necesario que la barrena cuente con ciertas características para poder ser útil en el direccionamiento del pozo, pero dependiendo del ángulo del pozo, nos ayudará a decidir el tipo de barrena a seleccionar, ya que no todas las barrenas con características direccionales nos son útiles para todo tipo de ángulos.

El uso de motores de fondo proporciona una mejor desviación del pozo, pero daña el calibre de la barrena, por lo que en estos casos es recomendable que la

barrena cuenta con protección en el calibre, calibre reforzado, o calibre activo (cortadores en el calibre).

## **4.2 BARRENAS UTILIZADAS EN POZOS DE CORRELACIÓN.**

La información generada en pozos cercanos al pozo a desarrollar es utilizada para definir perfiles litológicos, cambios de litología, parámetros de perforación, tipo de barrena y en ocasiones, sus características.

Para poder tener una idea más clara de la barrena que podría funcionar en ese pozo, es necesario observar y analizar las barrenas utilizadas en los pozos vecinos.

Además de este parámetro, el reporte de desgaste de las barrenas de los pozos de correlación nos ayuda a obtener información de la litología y a decidir algunas de las características de la barrena, ya que si las barrenas en los pozos de correlación terminaron muy dañadas es posible que la formación sea más dura de lo esperado originalmente. Este aspecto debe ser verificado con los reportes de operación para determinar si las características operacionales como peso sobre la barrena y las rpm no excedieron los establecidos en la hoja técnica de la barrena. En este caso se recomienda aumentar el número de aletas o disminuir el diámetro de los cortadores. Es muy posible que estas dos características disminuyan un poco a la ROP esperada, pero es la mejor forma de asegurar el término de la etapa, con lo que se ahorraría en viajes, tiempo y costos de perforación.

Por el contrario, si las barrenas terminaron sin desgaste o con desgaste mínimo, se recomienda disminuir en número de aletas o aumentar el tamaño de los cortadores, lo que ayudará a aumentar la tasa de penetración y a disminuir costos, aunque es posible que la barrena seleccionada termine con daño.

El tipo de barrenas utilizadas en cada etapa de los pozos de correlación nos sirve de guía en la selección de nuestras barrenas, ya que podemos ver el número de aletas y diámetro de los cortadores que se utilizaron, esto reduce el análisis, permitiéndonos utilizar esta información como base en nuestra selección.

Las características de las barrenas utilizadas en los pozos de correlación junto con los reportes de perforación nos proporcionan información sobre el rendimiento de algunas características como el Back Rake, perfil de la barrena y gauge. El

ángulo de los cortadores nos da una idea de la dureza de la formación, aunque es necesario observar el desgaste de las barrenas y la litología para determinar si los ángulos seleccionados fueron la mejor opción. Para saber si los perfiles y el gauge de las barrenas utilizadas en pozos de correlación fueron los adecuados, hay que observar los ángulos de inclinación de cada pozo y verificar si se cumplió el programa direccional o las dificultades que fue necesario resolver para cumplirlo debido a problemas relacionados con la barrena.

### 4.3 SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BARRENAS.

En algunas circunstancias, la idea de cambiar el modelo de barrenas que se ha visto que funciona de manera adecuada mediante el análisis de pozos vecinos, pudiera no resultarnos favorable, por lo que será necesario comprender la importancia y el impacto que estas características generan en el comportamiento de la barrena para poder justificar nuestra decisión.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, se incluirán formulas que nos permitirán calcular el tamaño de los cortadores, número de cortadores y número de aletas.

Si se desea utilizar las formulas mas utilizadas, es necesario calcular el esfuerzo confinado<sup>1</sup>.

$$\Delta V_s = \frac{1}{\Delta t_s} \quad (4.1)$$

Si es una profundidad menor a 610 metros:

$$CCV = \frac{\Delta V_s * H_{cima}}{1524} \quad (4.2)$$

Si es una profundidad mayor a 610 metros:

$$CCV = \left(1 + \frac{H_{cima}}{1524}\right) \Delta V_s \quad (4.3)$$

---

<sup>1</sup> PEMEX, “Guía para la Perforación, selección de barrenas”. 2006

Donde:

CCV = esfuerzo confinado [psi].

$\Delta t_s$  = velocidad de la onda compresional del registro sónico [s/pie].

$\Delta V_s$  = velocidad de cizallamiento [pie/seg].

$H_{cima}$  = altura de la cima de la formación respecto al nivel del suelo [m].

También puede ser utilizada la ecuación (3.14) vista en el capítulo 3 para calcular el esfuerzo confinado

#### 4.3.1 Selección del Tamaño de las Estructuras de Corte (barrenas de cortadores fijos).

La compresibilidad de la formación es el punto más importante para la selección del diámetro de los cortadores, ya que la abrasividad se incrementa mientras mayor sea la compresibilidad (dependiendo del tipo de litología).

Tomando en cuenta lo anterior, es posible hacer una tabla rápida de referencia con la cual es posible determinar el número de aletas y tamaño de los cortadores utilizando la el esfuerzo no confinado como referencia.

UCS [psi]	DIAMETRO DE CORTADORES (pulgadas)
Menos de 3000	22
3000 a 6000	19
6000 a 10000	19 a 16
10000 a 15000	16
15000 a 20000	13
20000 a 27000	13 a 8
Más de 27000	diamante

Tabla 4.1 Tabla de referencia de diámetro de cortadores con respecto al esfuerzo no confinado.

El otro aspecto que influye en la decisión del tamaño del cortador es el peso sobre la barrena. Esto no siempre suele ser tomado en cuenta ya que los parámetros operativos no son fijos y cambian constantemente dependiendo de la litología que se esté atravesando, además de que las barrenas tienen un rango alto de peso que se puede ejercer sobre ellas.

Es recomendable utilizar poco peso mientras mayor sea el tamaño del cortador ya que estos pueden romperse o astillarse si se aplica peso excesivo. Se procederá de manera contraria si la formación es muy blanda, ya que si la barrena cuenta con cortadores grandes en este tipo de formaciones y se aplica mayor peso, las estructuras de corte penetrarán más en la formación y aumentará la cantidad de recortes, aumentando la tasa de penetración.

El diámetro de los cortadores que deberá tener una barrena puede ser calculado utilizando la ecuación siguiente:

$$C_n = 21.617 - 0.0002 * CCV \quad (4.4)$$

Donde:

CCV = esfuerzo confinado [psi].

$C_n$  = diámetro de los cortadores [cm].

#### **4.3.2 Selección del Número de Cortadores (barrenas de cortadores fijos).**

Mientras mayor sea el número de cortadores, menor será la tasa de penetración, ya que es mayor el área de la barrena que está en contacto con el fondo del agujero, pero alargará la vida de la barrena y la cantidad de metros que podrá perforar.

El número de cortadores que podrá tener una barrena está en función del número de aletas y diámetro de los cortadores, por lo que un número mayor de aletas podrá tener una mayor cantidad de cortadores, pero siempre restringido por el diámetro de estos.

El número de cortadores que deberá tener una barrena puede ser calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$C_R = [51.967 * \ln(CCV) - 442.8] \quad (4.5)$$

Donde:

$C_R$  = número de cortadores.

CCV = esfuerzo confinado [psi].

### **4.3.3 Número de Aletas (barrenas de cortadores fijos)**

La selección del número de aletas que deberá tener una barrena para ser considerada adecuada para la perforación de un pozo se determina con base en la litología esperada y en la cantidad de metros que se desea perforar.

Como se ha mencionado con anterioridad, las areniscas son rocas del tipo abrasivas. Perforar formaciones con gran contenido de areniscas siempre implica un riesgo de desgaste prematuro en las estructuras de corte y en el cuerpo mismo de la barrena. Este riesgo aumenta cuando se desea perforar una mayor cantidad de metros con la misma barrena. Una mayor cantidad de aletas permite tener mas estructuras de corte, por lo que es capaz de perforar una mayor cantidad de metros sufriendo un desgaste menor puesto que mientras más cortadores tenga una barrena, el repaso que tendrán que hacer estos en una misma sección es mínimo y en algunos casos, nulo.

Algo semejante ocurre cuando se perfora roca caliza, ya que en general este tipo de roca no es abrasiva pero sí suele estar mucho más compacta que la arenisca, por lo que la barrena sufre desgaste por impacto, además de que este tipo de roca provoca el aumento en la vibración en la sarta de perforación añadiendo condiciones que promueven el desgaste de la barrena por cortadores rotos. Este problema puede disminuir si se aumenta el número de aletas ya que esto provoca mayor estabilidad en el fondo, disminuyendo así la vibración. El uso de aletas extra ayuda de igual manera a aumentar el tiempo de vida de la barrena y poder perforar mas metros en una sola corrida.

Otro factor importante es la velocidad de rotación a la que va a estar sometida, mientras mayor sea la cantidad de revoluciones por minuto a que esté sometida, se hará indispensable en el uso de aletas extras para disminuir el desgaste que puedan sufrir las estructuras de corte, porque se tendría que sacar la sarta por

baja tasa de penetración, por lo que si se planea utilizar bajas rpm se puede ocupar sin problemas una barrena con pocas aletas.

Por lo anterior, parecería que escoger un número alto de aletas en una barrena sería ideal para perforar, sin embargo, el mayor número de aletas provoca una menor tasa de penetración, esto se debe a que mientras mayor sea el número de aletas mayor es la cantidad de estructuras de corte (en la mayoría de los casos), por lo que el área que está en contacto con la formación es mayor, lo cual aumenta la fricción y torque dando como resultado que la velocidad de penetración de la barrena disminuya.

UCS [psi]	# ALETAS
Menos de 3000	3 a 4
3000 a 6000	4 a 5
6000 a 10000	5 a 6
10000 a 15000	6 a 7
15000 a 20000	7 a 8
20000 a 27000	8 o mas
Más de 27000	Impregnada

Tabla 4.2 Tabla de referencia del número de aletas con respecto al esfuerzo no confinado.

Para calcular el número de aletas<sup>2</sup> es necesario tomar en cuenta el número de cortadores:

$$B_n = -0.0006 * C_R^2 + 0.1576 * C_R - 1.0245 \quad (4.6)$$

#### 4.3.4 Direccionabilidad.

Una barrena se considera que tiene características direccionales cuando cumple principalmente con una longitud de calibre corto y un perfil plano.

La protección en el calibre es muy importante para poder aumentar el tiempo de vida de una barrena y ayudar a disminuir el desgaste provocado en esta zona al momento de direccionar ya que el cuello mantiene un contacto constante con la

<sup>2</sup> PEMEX, “Guía para la Perforación, selección de barrenas”. 2006

formación por efecto del deslizamiento que va adquiriendo conforme avanza la perforación.

Mientras más plano sea el perfil de la barrena, será de mayor utilidad para el direccionamiento, ya que un perfil más agresivo o parabólico entierra los cortadores de la nariz en la formación de manera más profunda que los de perfil más plano, así que la barrena tenderá a irse en la dirección recta. Este problema es menor en las de perfil plano porque la mayoría de los cortadores están en contacto con la formación y la fuerza ejercida sobre estos se distribuye, de esta manera los cortadores no penetran tanto en la formación, permitiendo el cambio de dirección.

#### **4.3.5 Ángulo de Ataque de los Cortadores para Barrenas de PDC.<sup>3</sup>**

El grado de ataque de los cortadores se define como el ángulo con que los cortadores atacan o impactan en la superficie que se esté perforando (Back Rake). En muchas ocasiones, el ángulo de los cortadores no es tomado muy en cuenta en la selección de barrenas, pero esta característica puede ayudar a que su desempeño sea mejor de lo esperado, ayudando a aumentar la tasa de penetración y durabilidad de la barrena.

Los ángulos de ataque altos mejoran la resistencia al impacto ocasionado por las intercalaciones entre litología suave y dura, además de ayudar a disminuir el desgaste. Contrario a esto, un ángulo de ataque bajo ayuda a aumentar la tasa de penetración.

Si la formación a perforar es suave, es recomendable utilizar un ángulo bajo, lo que hace más agresiva a la barrena e incrementa la ROP, pero si la formación es dura, es preferible utilizar un ángulo más alto por lo mencionado anteriormente.

---

<sup>3</sup> Burgoyne, A. et al, "Applied Drilling Engineering", 1991 pag. 195



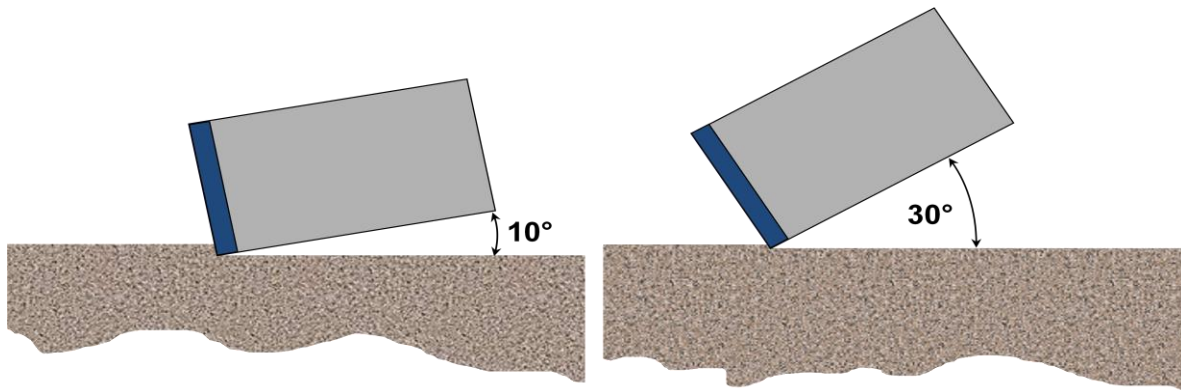


Figura 4.1 Ángulo de Ataque de los Cortadores.

Ángulo (grados)	Dureza de la Formación	Otra característica
5 a 10	Muy suave	Genera una mayor ROP
15	Todas las formaciones	Funciona mejor en formaciones blandas
20	Todas las formaciones	Mejora la vida del cortador y funciona mejor en formaciones abrasivas (areniscas)
30	Formaciones duras	Los cortadores con este ángulo generalmente se ubican en el calibre

Tabla 4.3 Características de los diferentes ángulos en los cortadores.

#### 4.3.6 Orientación de los cortadores.<sup>4</sup>

La orientación de los cortadores (side rake), es el ángulo que presentan los cortadores con respecto a la dirección de la aleta.

Esta característica es recomendable en formaciones de dureza blanda a media ya que aumenta la tasa de penetración. El side rake ayuda a la formación de recortes ya que añade agresividad a los cortadores haciendo que se entierren más profundo en la formación. No se recomienda el uso del side rake en formaciones

<sup>4</sup> Burgoyne, A. et al, "Applied Drilling Engineering", 1991 pag. 195

duras y que además presenten abrasividad, ya que podría ocasionar un mayor desgaste a los cortadores.

La orientación de los cortadores también ayuda al desalojo de los recortes en el fondo del pozo, de esta manera evitará que tengan contacto nuevamente con los cortadores o el cuerpo de la barrena.

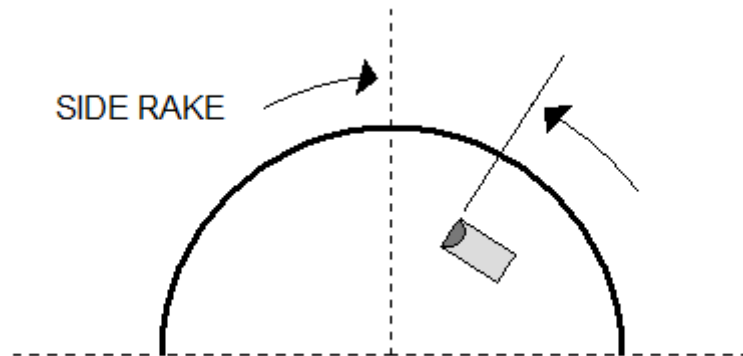


Figura 4.2 Orientación de los cortadores o Side Rake<sup>5</sup>.

#### 4.4 ROP PROMEDIO DEL CAMPO.

El objetivo principal de una adecuada selección de barrenas es el de aumentar la tasa de penetración y disminuir los tiempos de operación.

El análisis de la correlación entre pozos es indispensable para tener una idea clara de la tasa de penetración que genera un tipo de barrena en un campo específico. Los métodos vistos en el Capítulo 3, como el Método de Warren Modificado y el de Energía Específica nos ayudan a estimar la tasa de penetración.

En este subtema se planteará una metodología para estimar la ROP promedio del campo, utilizando los datos obtenidos de los pozos de correlación. Con ayuda de estos datos se estimará la tasa de penetración promedio del campo para cada etapa de la perforación con un cierto tipo de barrenas, por lo que se podrá mejorar la ROP a medida que se mejore la selección de barrenas.

---

<sup>5</sup> Burgoyne, A. et al, “Applied Drilling Engineering”,1991

Ya que esta metodología supone tener información de pozos vecinos, será de poca ayuda si el pozo es de tipo exploratorio y no existen pozos lo suficientemente cercanos para considerarlos pozos de correlación.

La metodología para calcular la ROP promedio del campo es más sencilla. La información necesaria para poder utilizar este método es:

- Las ROP que se alcanzaron en cada uno de los pozos de correlación (por etapa).
- El tipo de barrena utilizada en los pozos de correlación (por etapa).
- La evaluación del desgaste de las barrenas utilizadas en los pozos de correlación (por etapa).

El primer paso del procedimiento es utilizar la información (por etapas) para identificar tipo barrena y la ROP obtenida en cada pozo de correlación. Una vez que ya se tiene definido el tipo de barrena que se utilizó en ese pozo y sus características, se procede a observar la tasa de penetración que se obtuvo en esa etapa. Después de realizar los dos pasos anteriores, se observa el desgaste de las barrenas para obtener mayor información del desempeño realizado por ésta, ya que en ocasiones es posible observar una ROP baja, pero al analizar el código de desgaste nos damos cuenta que ocurrió por alguna causa ajena a la buena o mala selección de la barrena, por ejemplo, daño en el motor de fondo ó el tipo de lodo utilizado no es el adecuado, entre otras. Este procedimiento será necesario llevarlo a cabo para cada pozo de correlación y para cada etapa.

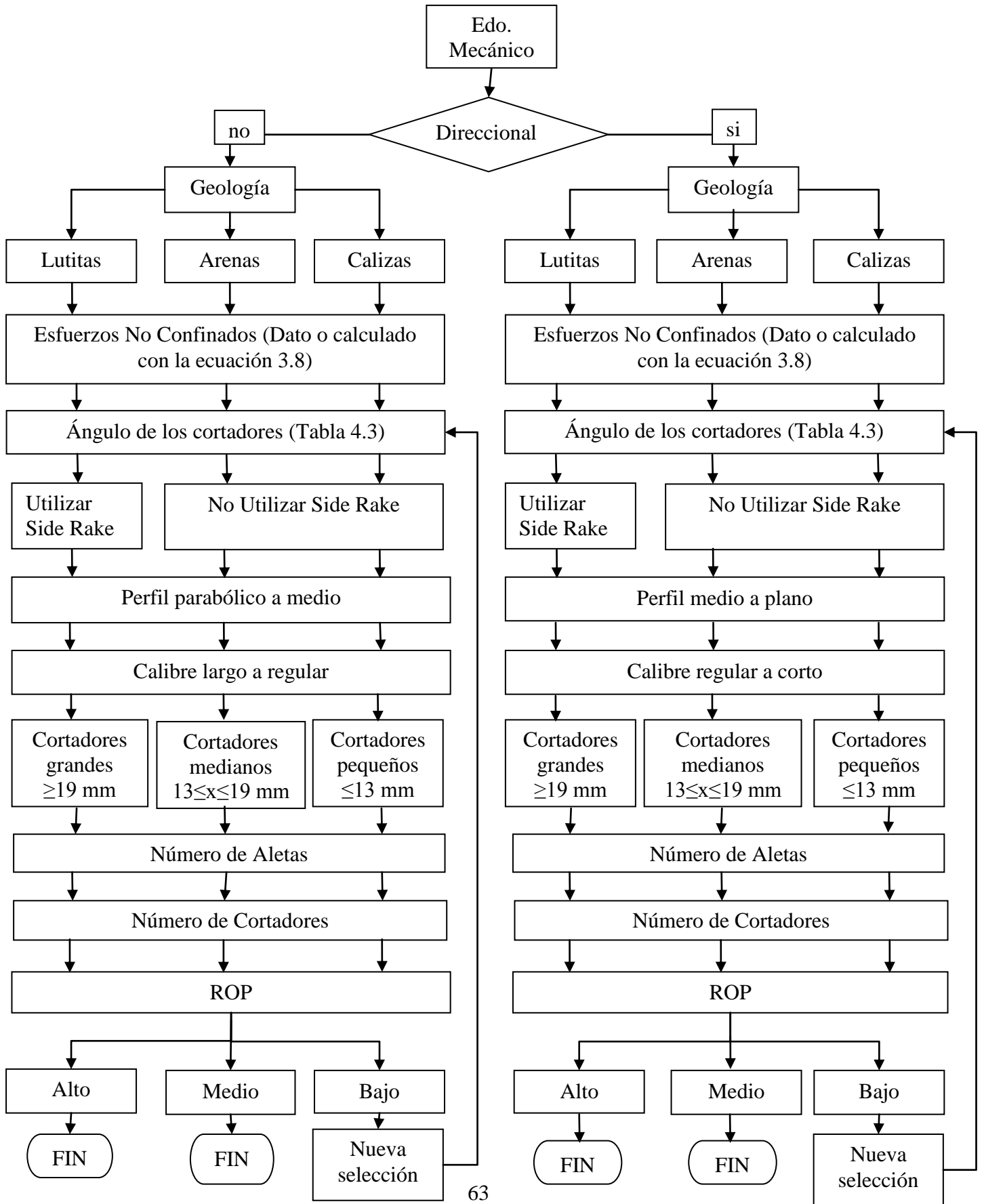
Una vez que se ha hecho lo anterior por pozo y por etapa, es posible tener una idea de la ROP que se espera alcanzar si la selección de las barrenas fue la adecuada.

En muchos casos, este método también es utilizado como una ayuda en la selección de barrenas, ya que se observará el número de aletas y tamaño de cortadores específicos utilizados, lo que generará que se retomen estos dos elementos y solo se concentre la atención en las demás características que se necesitan en esta herramienta como direccionabilidad de la misma y el ángulo de ataque en los cortadores.

#### **4.5 SELECCIÓN DE BARRENAS.**

A continuación se presenta un diagrama en el cual se muestra la metodología para el proceso de selección de barrenas por correlación.

En él se resume lo visto en este capítulo, pero es necesario que cada uno de los pasos de esta metodología sea analizado de manera detallada a fin de evitar al máximo el uso de ecuaciones, siendo éste el objetivo de este método.

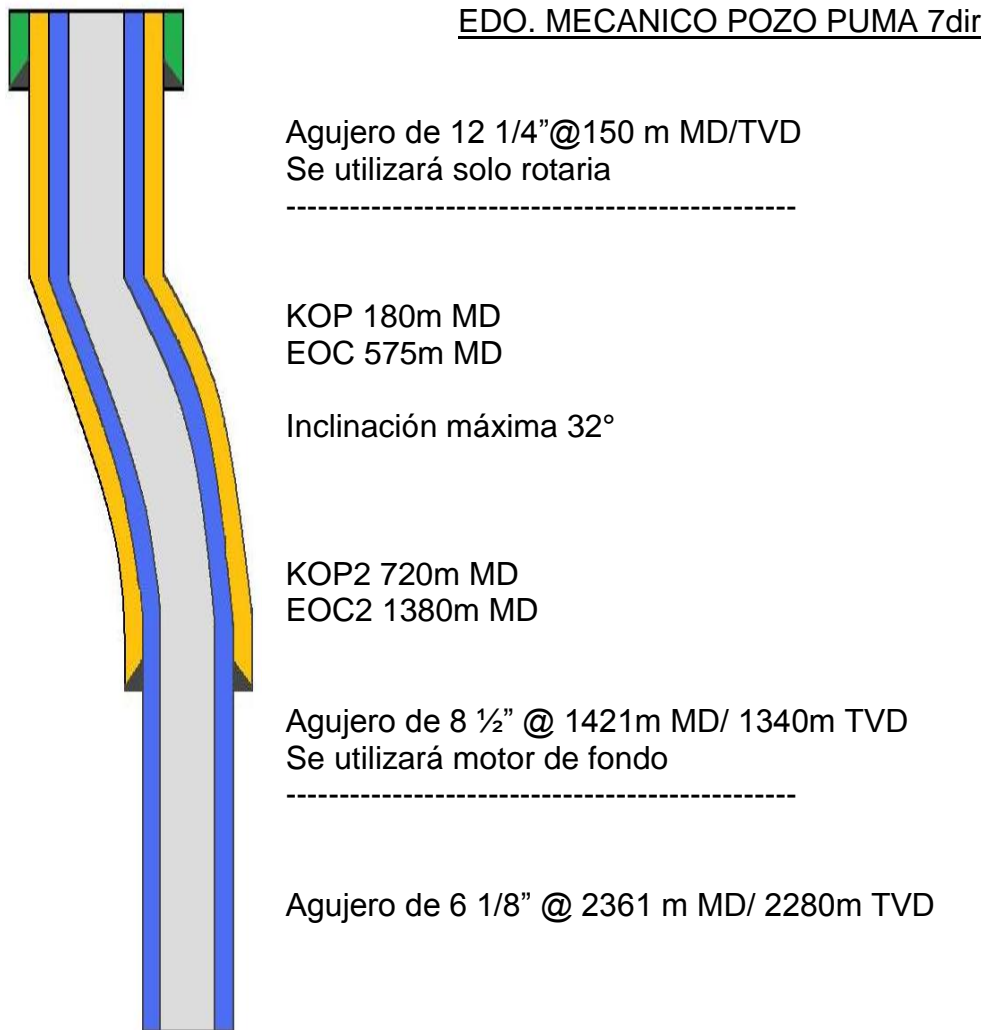


# CAPITULO 5.

## CASO DE APLICACIÓN.

Se desea perforar un pozo de desarrollo en un yacimiento conocido para aumentar la producción. El programa de perforación es semejante al de los pozos vecinos, siendo estos en tres etapas; el pozo será direccional tipo “S” con un ángulo máximo de 32°. Con los datos siguientes determine:

- El tipo de barrena que se deberá usar para perforar el pozo “PUMA 7 dir” utilizando los métodos: “Selección de Barrenas por Correlación”, “Energía Específica” y “UCS”. Compare los resultados.
- La ROP que se espera alcanzar por los métodos: “ROP Promedio del Campo” y por “Energía Específica”. Compare los resultados.



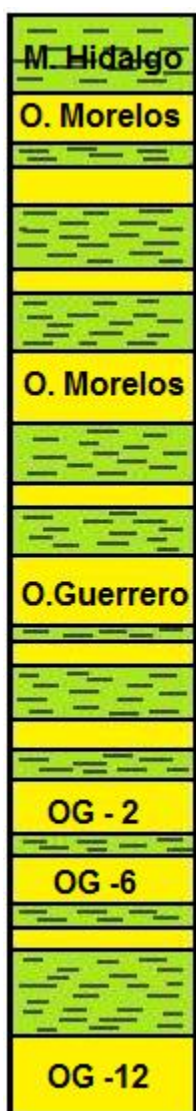
Datos de los pozos vecinos al pozo PUMA 7dir

NOMBRE	DIAM	TIPO	P SAL	M PER	HRS	ROP	I	O	D	L	B	G	O	R
PUMA 1DIR	12.25	TC	147	139	13.25	10.49	1	1	WT	A	E	IN	NO	TD
PUMA 1DIR	8.5	519	1156	1009	39.11	25.8	0	0	NO	A	X	IN	NO	TD
PUMA 1DIR	6.125	419	2334	1178	45.8	25.72	1	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 2DIR	12.25	519	156	149	20.57	7.24	1	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 2DIR	8.5	519	1256	1100	43.43	25.33	0	2	WT	T	X	IN	NO	TD
PUMA 2DIR	6.125	419	2376	1120	38.57	29.04	0	3	WT	A	X	IN	CT	TD
PUMA 3DIR	12.25	TC	59	52	14	3.71	2	2	WT	A	E	IN	NO	TD
PUMA 3DIR	8.5	519	460	401	24.08	16.65	2	2	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 3DIR	6.125	419	1100	640	82.05	7.8	1	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 4DIR	12.25	519	152	146	5.27	27.7	2	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 4DIR	8.5	519	1350	1198	56.96	21.03	1	2	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 4DIR	6.125	419	2369	1019	21.91	46.51	0	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 5	12.25	519	151	142	9.22	15.4	0	0	NO	A	X	IN	NO	TD
PUMA 5	8.5	519	1244	1093	16.58	65.92	0	0	NO	A	X	IN	NO	TD
PUMA 5	6.125	419	2307	1063	25.6	41.52	0	1	WT	N	X	IN	NO	TD
PUMA 6DIR	12.25	519	147	139	7.6	18.29	2	4	WT	A	E	IN	NO	TD
PUMA 6DIR	8.5	519	1250	1103	27.35	40.33	0	0	NO	A	X	IN	NO	TD
PUMA 6DIR	6.125	419	2220	970	25.33	38.29	0	1	WT	NT	X	IN	NO	CP
PUMA 6DIR	6.125	419	2300	80	3.92	20.41	0	1	WT	NT	X	IN	NO	TD

POZO	ETAPA	PSB (tons)	TORQUE (amp)	VEL ROT	A (pg2)	ROP
PUMA 1DIR	12.25	2	300	100	118	10.49
PUMA 1DIR	8.5	5	700	250	57	25.8
PUMA 1DIR	6.125	7	250	150	29	25.72
PUMA 2DIR	12.25	1	280	90	118	7.24
PUMA 2DIR	8.5	6	650	260	57	25.33
PUMA 2DIR	6.125	7	230	180	29	29.04
PUMA 3DIR	12.25	2	280	95	118	3.71
PUMA 3DIR	8.5	6	710	250	57	16.65
PUMA 3DIR	6.125	7	220	160	29	7.8
PUMA 4DIR	12.25	1	290	100	118	27.7
PUMA 4DIR	8.5	5	700	250	57	21.03
PUMA 4DIR	6.125	8	250	150	29	46.51

PUMA 5	12.25	1	300	100	118	15.4
PUMA 5	8.5	4	300	260	57	65.92
PUMA 5	6.125	7	280	140	29	41.52
PUMA 6DIR	12.25	2	300	90	118	18.29
PUMA 6DIR	8.5	4	720	250	57	40.33
PUMA 6DIR	6.125	6	250	140	29	38.29
PUMA 6DIR	6.125	7	240	160	29	20.41

Datos geológicos.



**Datos del Pozo:**

Obj: Oligoceno Guerrero-12  
Clas: Productor

Superficie:

Coord X: xxx,xxx.xx m  
Coord Y: x,xxx,xxx.xx m  
Objetivo:  
Coord X: xxx,xxx.xx m  
Coord Y: x,xxx,xx.xx m

**Datos de Yacimiento:**

Presión: 397 kg/cm<sup>2</sup> (5,645 psi) en relación al pozo más cercano.  
Temperatura: 113° C @ 2400 m

Formación	Aflora MD [m]	Aflora TVD [m]	Inclinación [grados]	Azimut [grados]
M. Hidalgo	0	0	0	0
O. Morelos	160	160	0	0
KOP 1	180	180	0	0
O. Morelos	329	320	12	0
EOC 1	575	560	32	0
O. Morelos	590	585	32	0
O. Morelos	612	600	32	0
O. Guerrero	700	683	32	0
KOP 2	720	702	32	0
O. Guerrero	1228	1200	11	0
EOC 2	1380	1361	0	0
Arena OG-2	1865	1822	0	0
Arena OG-6	2048	2000	0	0
PT	2361	2280	0	0



Se incluyen los datos promedio del esfuerzo no confinado en cada etapa de los pozos vecinos.

POZO	ETAPA	UCS
PUMA 1DIR	12.25	3000
PUMA 1DIR	8.5	6000
PUMA 1DIR	6.125	3100
PUMA 2DIR	12.25	3200
PUMA 2DIR	8.5	8000
PUMA 2DIR	6.125	4000
PUMA 3DIR	12.25	3000
PUMA 3DIR	8.5	7000
PUMA 3DIR	6.125	4000
PUMA 4DIR	12.25	2800
PUMA 4DIR	8.5	9000
PUMA 4DIR	6.125	4000
PUMA 5	12.25	3200
PUMA 5	8.5	8000
PUMA 5	6.125	3100
PUMA 6DIR	12.25	3000
PUMA 6DIR	8.5	8000
PUMA 6DIR	6.125	3300
PUMA 6DIR	6.125	3100

## **SOLUCIÓN.**

Aunque es posible determinar el tipo de barrena utilizando las tablas 1 y 2 vistas en el capítulo 4, será necesario analizar toda la información obtenida de los pozos de correlación para asegurar que la barrena seleccionada sea la mejor opción.

Para iniciar el análisis, el primer paso será el analizar el estado mecánico del pozo a perforar. Para este caso, el pozo PUMA 7dir está conformado por tres etapas ( $12\frac{1}{4}$ ,  $8\frac{1}{2}$  y  $6\frac{1}{8}$ ) y cada una de estas etapas tiene que ser analizada de manera independiente.

La etapa de  $12\frac{1}{4}$  es la primera, superficial y que es vertical, por lo que no necesitará barrenas con características especiales.

La etapa de  $8\frac{1}{2}$  presenta un direccionamiento tipo “S” importante ( $32^\circ$ ). Es en esta etapa que será necesario poner especial atención a las características de la barrena ya que deberá presentar características que le permitan lograr el ángulo deseado.

En la etapa de  $6\frac{1}{8}$  continúa la verticalidad del pozo por lo que se podrá escoger una barrena que permita ir más rápido para recuperar el tiempo pedido durante el direccionamiento de la etapa anterior.

#### **a) DETERMINANDO EL TIPO DE BARRENA A UTILIZAR.**

Cada aplicación de los diferentes métodos de selección de barrenas presenta una serie de ventajas y desventajas en su uso, por lo que en ocasiones es necesario comparar los resultados obtenidos entre sí para seleccionar las características de la barrena.

#### **“Selección de Barrenas por Correlación”.**

Por las características de profundidad de cada etapa del pozo PUMA 7dir y por su diseño es posible descartar los pozos PUMA 3dir y PUMA 5. El primero no se deberá tomar en cuenta como pozo de correlación debido a que las profundidades de sus etapas no son comparables con las profundidades a las que se llegará en el pozo PUMA 7dir, por lo que es posible que las características geológicas y el tipo de barrena por etapa no sea la misma. El segundo es un pozo vertical.

#### **Etapas de $12\frac{1}{4}$ .**

Para la etapa de  $12\frac{1}{4}$  la información de esfuerzos no confinados de los pozos de correlación y las tablas 1 y 2 del capítulo 4 nos indican que es suficiente una barrena de 4 o 5 aletas y cortadores de 19 milímetros, por lo que tenemos la

opción de utilizar una barrena 419 o una 519. Si analizamos el desgaste podemos ver que al utilizar una barrena 519 (excepto en el pozo PUMA 1dir, donde se utilizó tricónica), su desgaste va desde 0 a 2 en la mayoría de los casos, con dientes gastados, por lo que una barrena con menos aletas aumentaría el riesgo de desgaste excesivo y podría provocar que la barrena tenga que ser sacada a superficie antes de terminar la etapa.

NOMBRE	DIAM	ROP	I	O	D	L	B	G	O	R
PUMA 1DIR	12.25	10.49	1	1	WT	A	E	IN	NO	TD
PUMA 2DIR	12.25	7.24	1	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 4DIR	12.25	27.7	2	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 6DIR	12.25	18.29	2	4	WT	A	E	IN	NO	TD

Con la información de esfuerzo no confinado observamos que se trata de una formación suave, por lo que el ángulo (Back Rake) de los cortadores puede ser de entre 5 y 10 grados.

El perfil de la barrena deberá ser parabólico, esto le dará mayor tasa de penetración ya que no es una etapa direccional, además deberá tener un cuello estándar o largo para ayudar a mantener la verticalidad. Ya que el esfuerzo no confinado de la formación superficial es bajo, el Rake Side deberá ser alto para ayudar al desalojo de recortes.

### Etapa de 8 ½

La barrena deberá tener características que puedan ayudar al direccionamiento del pozo y lograr la mayor velocidad posible.

El tipo de barrena utilizada en los pozos vecinos es de 5 aletas y cortadores de 19 milímetros. El desgaste mostrado por estas barrenas de los pozos vecinos en esta etapa varía entre 0 y 2. Utilizando estos dos criterios, se concluye que es necesario seleccionar una con 5 aletas, para evitar un posible desgaste prematuro.

NOMBRE	DIAM	TIPO	ROP	I	O	D	L	B	G	O	R
PUMA 1DIR	8.5	519	25.8	0	0	NO	A	X	IN	NO	TD
PUMA 2DIR	8.5	519	25.33	0	2	WT	T	X	IN	NO	TD
PUMA 4DIR	8.5	519	21.03	1	2	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 6DIR	8.5	519	40.33	0	0	NO	A	X	IN	NO	TD

La formación en la segunda etapa tiene un esfuerzo no confinado mayor que la superficial, por lo que es necesario seleccionar una barrena con un ángulo de cortadores de 15 grados, ya que no se considera lo suficientemente blanda como para seleccionar un ángulo de 5 a 10 grados ni tan dura como para seleccionar un ángulo de cortadores mayor.

El cuello de la barrena deberá ser corto y el perfil plano para que pueda disminuir los problemas de direccionamiento derivado de las características de la barrena. El calibre deberá contar con protección para evitar el desgaste excesivo ya que esta parte de la barrena se desgasta por la fricción generada al estar en contacto con la formación. De igual manera es posible ayudar a disminuir este efecto si se utilizan cortadores en el calibre. El Rake Side deberá ser de 0.

#### Etapas de 6 1/8.

Esta etapa es vertical por lo que las consideraciones especiales que deberá tener la barrena cambian. En los pozos vecinos se seleccionó una barrena de 4 aletas y cortadores de 19 milímetros, el desgaste de las barrenas de estos pozos va de 0 a 1 en la mayoría de los casos. Este nivel de desgaste se considera bajo, por lo que es posible arriesgar un poco el desgaste en los cortadores y escoger una barrena con cortadores de 22 milímetros la cual ayudaría al aumento en la tasa de penetración o utilizar el modelo 419 ya probado para esta etapa. Para este caso, se decide utilizar el modelo 419 para evitar riesgos de desgaste.

NOMBRE	DIAM	TIPO	ROP	I	O	D	L	B	G	O	R
PUMA 1DIR	6.125	419	25.72	1	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 2DIR	6.125	419	29.04	0	3	WT	A	X	IN	CT	TD
PUMA 4DIR	6.125	419	46.51	0	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 6DIR	6.125	419	38.29	0	1	WT	NT	X	IN	NO	CP
PUMA 6DIR	6.125	419	20.41	0	1	WT	NT	X	IN	NO	TD

El esfuerzo no confinado en esta sección es bajo por lo que el ángulo de los cortadores deberá ser de 5 a 10 grados. El Rake Side deberá ser medio ya que se espera la presencia de arena. No se requiere perfil plano ni cuello corto pero si protección en el calibre ya que es común la corrección de ángulo del pozo para mantener verticalidad.

### “Energía Específica”

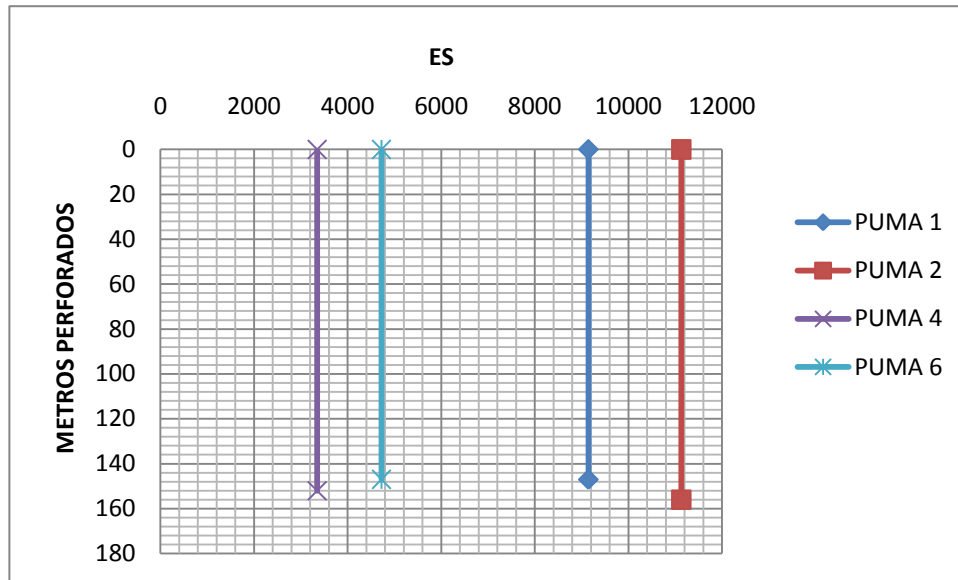
Con los datos de los pozos vecinos y utilizando las ecuaciones 3.9 y 3.10 calculamos la Energía Específica para cada etapa. Al igual que para el caso anterior, se eliminará del análisis a los pozos PUMA 3dir y PUMA 5. Posteriormente, se utilizará la metodología vista en el capítulo 3.

#### Etapas de 12 ¼

Utilizando la formulas 3.9 y 3.10 obtenemos los valores de agresividad y Energía Específica.

POZO	ETAPA	PSB (tons)	TORQUE (amp)	VEL ROT	A (pg2)	ROP	MU	ES
PUMA 1DIR	12.25	2	300	100	117.9	10.49	440.82	9145
PUMA 2DIR	12.25	1	280	90	117.9	7.24	822.86	11131
PUMA 4DIR	12.25	1	290	100	117.9	27.7	852.24	3348
PUMA 6DIR	12.25	2	300	90	117.9	18.29	440.82	4721

Con estos datos graficamos Energía Específica vs Metros Perforados.



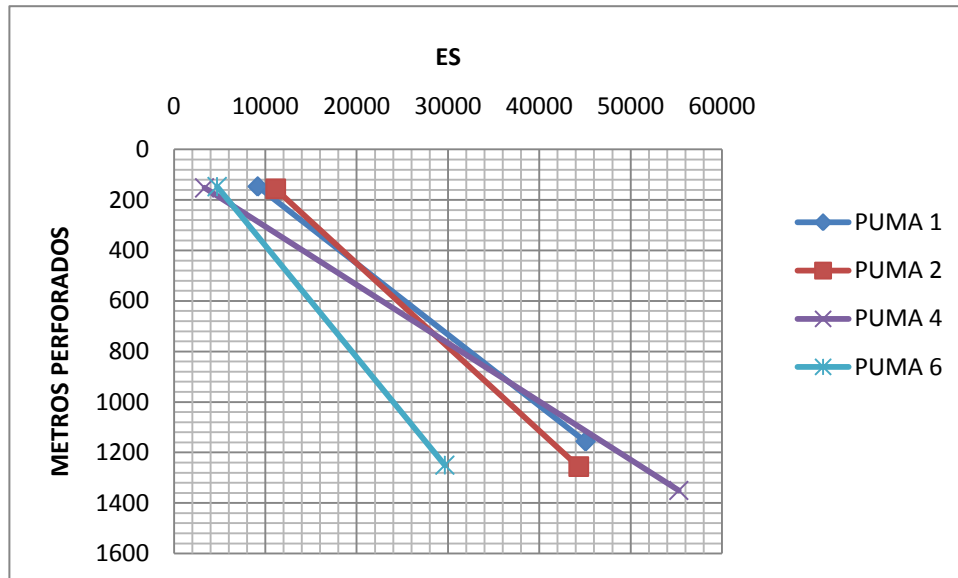
En esta gráfica se muestra que la barrena utilizada en el pozo PUMA 4 Dir es la que genera menor energía específica, por lo que se recomienda el uso del mismo tipo de barrena de 5 aletas, cortadores de 19 milímetros y con características semejantes (longitud del cuello, perfil, back rake y rake side) a la utilizada en este pozo.

### Etapa de 8 ½

Al igual que en el caso anterior, utilizando la formulas 3.9 y 3.10 obtenemos los valores de agresividad y Energía Específica.

POZO	ETAPA	PSB (tons)	TORQUE (amp)	VEL ROT	A (pg2)	ROP	MU	ES
PUMA 1DIR	8.5	5	700	250	56.7	25.8	592.94	45052
PUMA 2DIR	8.5	6	650	260	56.7	25.33	458.82	44315
PUMA 4DIR	8.5	5	700	250	56.7	21.03	592.94	55271
PUMA 6DIR	8.5	4	720	250	56.7	40.33	762.35	29644

Graficando Energía Específica vs Metros Perforados.



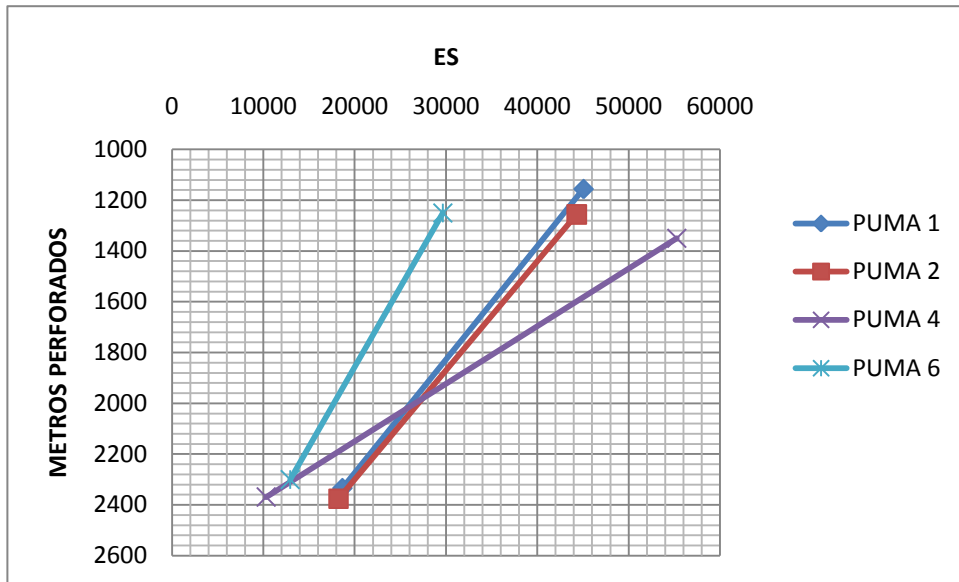
La barrena del pozo PUMA 4Dir es la que generan menor energía específica. Para esta etapa se recomienda el uso del mismo tipo de barrena de 5 aletas, cortadores de 19 milímetros y con características semejantes a la utilizada en el pozo PUMA 4Dir .

### Etapa de 6 1/8

Por último, se calcula la agresividad y energía específica para la etapa de 6 1/8.

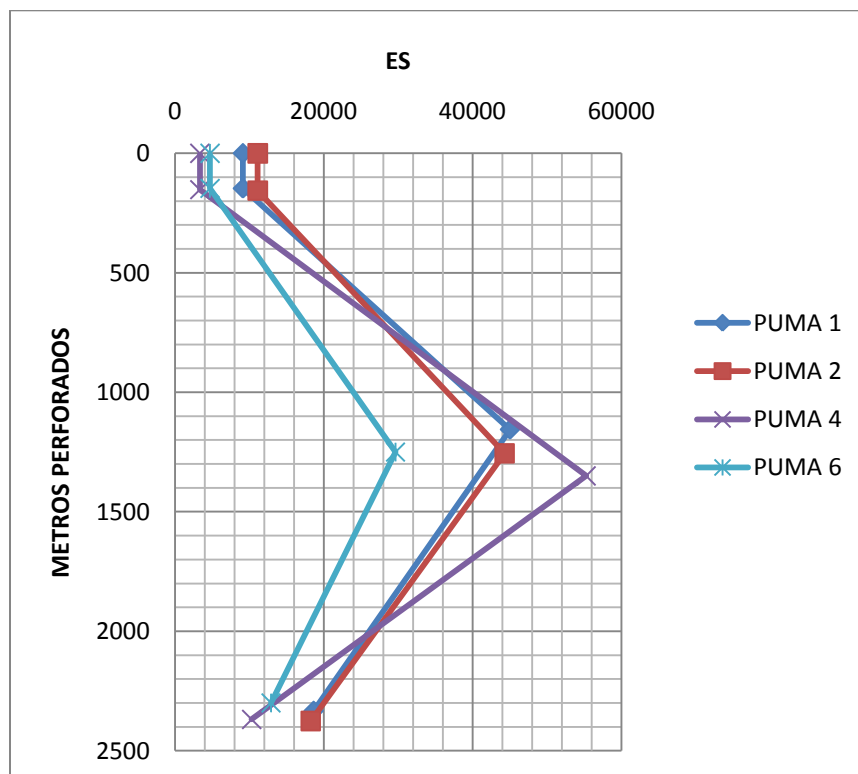
POZO	ETAPA	PSB (tons)	TORQUE (amp)	VEL ROT	A (pg2)	ROP	MU	ES
PUMA 1DIR	6.125	7	250	150	29.5	25.72	209.91	18650
PUMA 2DIR	6.125	7	230	180	29.5	29.04	193.12	18236
PUMA 4DIR	6.125	8	250	150	29.5	46.51	183.67	10314
PUMA 6DIR	6.125	6	250	140	29.5	38.29	244.90	11693
PUMA 6DIR	6.125	7	240	160	29.5	20.41	201.52	24067

Graficando Energía Específica vs Metros Perforados.



La gráfica muestra que la energía específica más baja corresponde a la barrena utilizada en el pozo PUMA 4Dir, por lo que se recomienda el uso de una barrena semejante a la utilizada en este pozo, así como el mismo tipo de características.

A continuación se muestra la gráfica de todas las etapas juntas.





## “UCS”.

Utilizando la información de esfuerzos no confinados obtenidos del análisis de pozos vecinos, la tabla 2 del capítulo 3 y el código IADC para barrenas de cortadores fijos del capítulo 1, se determinará el tipo de barrena que se deberá utilizar en cada etapa. El uso del código IADC para barrenas de cortadores fijo y no para tricónicas se debe a que en los pozos vecinos se utilizaron barrenas con cortadores de PDC.

### Etapas de 12 ¼.

El esfuerzo no confinado en los pozos vecinos para la primera etapa varía de 3000 a 3200 (psi). Utilizando la tabla 2 del capítulo 3 nos indica que es una formación considerada muy blanda.

Con la información anterior y sabiendo que esta etapa es vertical, utilizamos el código IADC. La barrena indicada en el código es: cuerpo de matriz (M), para formaciones muy blandas (1), cortadores de 19 milímetros (2) y con perfil parabólico (4).

### Etapas de 8 ½.

En la segunda etapa, el promedio de esfuerzo no confinado en los pozos vecinos varía entre 6000 y 9000 (psi). Estos valores catalogan a la litología como blanda, por lo que el código IADC indica que la barrena debe ser: cuerpo de matriz (M), para formaciones blandas (2), cortadores de 19 milímetros (2) y con perfil plano (1).

## Etapa de 6 1/8.

En la última etapa, los valores de esfuerzo no confinado varían de 3100 a 4000 (psi), esto la cataloga como muy blanda, por lo que el código IADC indica que se debe utilizar una barrena: cuerpo de matriz (M), para formaciones muy blandas (1), cortadores de 19 milímetros (2) y con perfil parabólico (4).

### **“Comparando resultados.”**

Los resultados obtenidos para este caso de aplicación coincidieron en el tipo de barrena a utilizar en cada una de las etapas, pero cada método tiene su ventaja y desventaja al respecto.

Aunque es posible suponer que cualquiera de los tres métodos puede ser utilizado para la selección de barrenas es necesario notar las diferencias. En cada etapa, el resultado obtenido utilizando cada método fue el mismo.

El método más rápido sin duda es el de UCS, ya que solo es necesario hacer uso de la tabla 2 del capítulo 3 y el código IADC para barrenas. Esto no implica una ventaja, ya que este método no considera características secundarias (back rake, rake side, longitud del calibre y perfil de la barrena) de la barrena, las cuales representan un factor importante en su rendimiento.

El método de Energía Específica supone un análisis más detallado. La barrena seleccionada deberá ser la misma (o contar con todas las características de la barrena seleccionada), por lo que se espera un rendimiento semejante al obtenido en el pozo en que fue utilizada. Las desventajas de este método es que depende directamente de los parámetros de operación y las características secundarias de la barrena no son analizadas, por lo que es posible que la barrena seleccionada pueda ser optimizada si se cambia alguna de estas características. Para este caso, en la etapa de 8 1/2 se llevó a cabo trabajo direccional, el método seleccionó la barrena con menor energía específica, pero la falta de información nos impide saber si el ángulo del pozo perforado es mayor o menor al del PUMA 7Dir. En un pozo mientras mayor sea su trabajo direccional mayor será la energía específica que desarrolle, esto

implica que si la barrena seleccionada realizó un trabajo direccional pequeño en comparación al pozo deseado es posible que el resultado no sea el óptimo.

Utilizando el método de selección de barrenas por correlación es posible determinar las características primarias y secundarias que deberá tener la barrena utilizando como mínimo la siguiente información: del estado mecánico, litología esperada e información de los pozos vecinos. El problema que presenta este método es la falta de información adicional como reportes de perforación, aunque esta información no suele ser determinante en la selección de barrenas.

## **b) DETERMINANDO LA ROP.**

Se eliminará del análisis a los pozos PUMA 3Dir y PUMA 5 por los motivos mencionados con anterioridad.

### **“ROP Promedio del Campo”.**

Este método requiere tener información de la tasa de penetración lograda, parámetros y reportes de perforación de los pozos vecinos para determinar si la ROP fue afectada por algún factor diferente a la selección de la barrena. Para utilizar este método se tomará en cuenta las barrenas seleccionadas mediante el método de selección de barrenas por correlación.

#### Etapa de 12 ¼.

En esta etapa la ROP no es muy alta teniendo un promedio de 16 metros/hora aunque el rango de variación es muy alto (de 7.24 a 27.7). Es posible que la variación de esta tasa de penetración se deba a problemas en su operación o mala selección de barrena, para verificar esto es necesario contar con los reportes de operación de los pozos vecinos.

<b>NOMBRE</b>	<b>DIAM</b>	<b>TIPO</b>	<b>ROP</b>	<b>I</b>	<b>O</b>	<b>D</b>	<b>L</b>	<b>B</b>	<b>G</b>	<b>O</b>	<b>R</b>
PUMA 1DIR	12.25	TC	10.49	1	1	WT	A	E	IN	NO	TD
PUMA 2DIR	12.25	519	7.24	1	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 4DIR	12.25	519	27.7	2	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 6DIR	12.25	519	18.29	2	4	WT	A	E	IN	NO	TD

La tasa de penetración más alta corresponde al pozo PUMA 4Dir en el cual no se reporta el uso de peso sobre barrena, velocidad rotando o un torque mayor a los demás pozos, pero el desgaste de sus cortadores es mayor que en los pozos PUMA 1Dir y PUMA 2Dir, los cuales tuvieron una tasa de penetración mucho menor. En el caso del pozo PUMA 1Dir se utilizó una barrena tricónica, En los pozos PUMA 2Dir y PUMA 6Dir se utilizaron barrenas 519, posiblemente se utilizó un perfil plano a medio y un back rake bajo, lo que explicaría la ROP baja si es que el problema está relacionado con la selección de barrenas, pero también, influye la calidad de los cortadores lo que es propio de cada fabricante de barrenas.

Tomando en cuenta que el promedio de ROP para esta sección del campo es de 16 metros/hora utilizaremos este como un valor mínimo para la tasa de penetración generada por nuestra barrena en el pozo a perforar. Con base en lo anterior, las características seleccionadas para nuestra barrena contribuirán a alcanzar una ROP mayor que el promedio, esperando alcanzar e incluso superar a la generada en el pozo PUMA 4Dir.

### Etapa de 8 ½

En la segunda etapa, tomando en cuenta que se desarrolla trabajo direccional se tiene un promedio de ROP de 28 metros/hora el cual es superior a la alcanzada en tres de los pozos.

<b>NOMBRE</b>	<b>DIAM</b>	<b>TIPO</b>	<b>ROP</b>	<b>I</b>	<b>O</b>	<b>D</b>	<b>L</b>	<b>B</b>	<b>G</b>	<b>O</b>	<b>R</b>
PUMA 1DIR	8.5	519	25.8	0	0	NO	A	X	IN	NO	TD
PUMA 2DIR	8.5	519	25.33	0	2	WT	T	X	IN	NO	TD
PUMA 4DIR	8.5	519	21.03	1	2	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 6DIR	8.5	519	40.33	0	0	NO	A	X	IN	NO	TD

Aunque la tasa de penetración en el pozo PUMA 6Dir es mayor que en los demás pozos, esto no indica que se pueda alcanzar esta velocidad de penetración en el pozo PUMA 7Dir ya que es posible que el ángulo de inclinación del pozo PUMA 6Dir sea mucho menor que el programado para nuestro pozo, lo que tiende a aumentar la tasa de penetración. Para evitar problemas en el análisis será necesario contar con información mas detallada de los pozos de correlación.

Si tomamos en cuenta lo anterior, solo utilizaremos la información de los tres primeros pozos, con lo que la ROP promedio es de 24 metros/hora. Esta es nuestra ROP mínima esperada para esta etapa al utilizar la barrena y características seleccionadas previamente.

### Etapa de 6 1/8.

Antes de hacer el promedio de ROP de esta sección es necesario observar que el pozo PUMA 6Dir presenta dos valores ya que se llevó la barrena a superficie para la toma de núcleos. Ya que la tasa de penetración no es la misma después de volver a meter la barrena, utilizamos la información de metros perforados y la ROP para determinar su promedio en toda la etapa de este pozo.

NOMBRE	DIAM	TIPO	ROP	I	O	D	L	B	G	O	R
PUMA 1DIR	6.125	419	25.72	1	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 2DIR	6.125	419	29.04	0	3	WT	A	X	IN	CT	TD
PUMA 4DIR	6.125	419	46.51	0	1	WT	A	X	IN	NO	TD
PUMA 6DIR	6.125	419	38.29	0	1	WT	NT	X	IN	NO	CP
PUMA 6DIR	6.125	419	20.41	0	1	WT	NT	X	IN	NO	TD

En el pozo mencionado anteriormente, el total de metros perforados en la última etapa fue de 1050 metros, la primera corrida fue de 970 metros con una ROP de 38.29 metros/hora y la segunda corrida fue de 80 metros con una ROP de 20.41 metros/hora. Ya que la primera corrida fue de una distancia mucho mayor que la segunda es posible considerar la ROP de toda la etapa como la alcanzada en esta. Otro método es: considerando que la distancia recorrida en el primer viaje representa un 92.4 % y el segundo viaje un 7.6%, entonces:

$$\text{ROP} = 38.29[\text{m/h}](0.924) + 20.41[\text{m/h}] (0.076) = 36.93[\text{m/h}]$$

Una vez obtenido el valor de la ROP para la última etapa del pozo PUMA 6Dir obtenemos el promedio de ROP para toda la sección utilizando la información de los todos los pozos de correlación. Esta tasa de penetración es de 34.55 metros/hora, la cual se considerará como la ROP mínima que desarrollará nuestra barrena seleccionada en el pozo PUMA 7Dir.

### “Energía Específica”

Para determinar la ROP esperada para cada etapa del pozo PUMA 7Dir se tomarán en cuenta las barrenas seleccionadas mediante este método así como la fórmula 3.11 del capítulo 3, los datos de perforación y la energía específica desarrollada por cada barrena en cada etapa en el análisis del inciso a).

#### Etapas de 12 ¼.

La barrena seleccionada mediante este método fue la del pozo PUMA 4Dir, por lo que si se utilizan los mismos parámetros de perforación se esperaría generar la misma tasa de penetración de 27.7 metros/hora.

Es posible aumentar la ROP si modificamos la velocidad de rotación y el peso sobre la barrena. Es recomendable hacer una tabla e ir variando estos valores para determinar los parámetros óptimos de perforación (utilizando la fórmula 3.11) que permitan generar una ROP mayor, conservando los valores originales de energía específica y la agresividad obtenidos por la barrena seleccionada en esta sección.

ES	MU	PSB (ton)	V rot (rpm)	ROP (m/h)
3348	852	1	100	27.7
3348	852	2	100	55.4
3348	852	2	90	49.9
3348	852	1	110	30.47

Aunque en apariencia es necesario aumentar el peso sobre la barrena para poder tener un aumento muy marcado en la ROP necesitamos tomar en cuenta que esto aumentaría el torque y es posible que aumente el desgaste de los cortadores. Esto es posible que cause problemas, ya que el desgaste generado con los parámetros originales fue de 2 y 1.

Por lo anterior se recomienda no incrementar el peso, pero si la velocidad de rotación en un 10 o 15%. Esto generará un aumento en el torque, este será menor al igual que el desgaste generado si se incrementa el WOB.

### Etapa de 8 ½

De la misma manera que para la etapa superficial, para determinar la ROP que se espera obtener durante la perforación de la etapa direccional de utilizará como referencia la energía específica y agresividad generada por la barrena seleccionada, para este caso es la barrena del pozo PUMA 6Dir.

ES	MU	PSB (ton)	V rot (rpm)	ROP (m/h)
29644	762	4	250	40.33
29644	762	4	260	41.94
29644	762	5	250	50.41
29644	762	5	260	52.43

La tabla muestra que se puede aumentar la tasa de penetración si se aumenta el peso sobre la barrena y la velocidad de rotación. Es recomendable aumentar el WOB en una tonelada ya que la barrena utilizada previamente resulto sin daño después de ser utilizada en el pozo de correlación, aunque esto aumentará el torque, por lo que se recomienda utilizar 250 rpm a fin de aumentarlo demasiado.

### Etapa de 6 1/8.

Siguiendo el mismo criterio que en las etapas anteriores, se generó la tabla siguiente:

ES	MU	PSB (ton)	V rot (rpm)	ROP (m/h)
10314	184	8	150	46.51
10314	184	8	160	49.61
10314	184	7	150	40.70
10314	184	9	150	52.32

Al igual que en los casos anteriores, si se aumenta el WOB y la velocidad de rotación es posible aumentar la ROP. Ya que la barrena seleccionada para perforar esta etapa presentó un daño en sus cortadores bajo durante la perforación del pozo PUMA 6Dir se recomienda aumentar en una tonelada el WOB y mantener la velocidad de rotación en 150 rpm.

### **“Comparando resultados.”**

El método de ROP promedio del campo supone que la mínima tasa de penetración esperada utilizando la barrena seleccionada esté dentro de lo realizado anteriormente por los pozos de correlación y el aumento de esta sea el resultado de la buena selección de las características secundarias de la barrena. Por otra parte, el método de Energía Específica supone una ROP mínima la cual será igual a la realizada por la misma barrena en el pozo de correlación y aumentará la tasa de penetración al variar los parámetros de perforación.

El primer método suele ser más conservador en la determinación de la ROP esperada que el de Energía Específica, ya que aunque los parámetros de operación son importantes en el rendimiento de la barrena, estos siempre se aplican de acuerdo a lo ocurrido en el pozo durante la perforación, por lo que las recomendaciones no siempre pueden ser tomadas en cuenta, e incluso, si es que se llegan a aplicar, será necesario un monitoreo constante para verificar que no se excedan los límites presentes en la hoja técnica de la barrena.



# CONCLUSIONES

La selección de barrenas por correlación es una metodología sencilla y rápida con la cual se puede definir cada una de las características primarias y secundarias de las barrenas.

En general, la selección de barrenas se realiza con el análisis de la información de los pozos vecinos. De los métodos presentados, el que analiza de manera mas detallada la información y propone todas las características de las barrenas es el de Selección de Barrenas por Correlación.

La litología es el parámetro que influye mayormente en la selección de barrenas, ya que son las características de las rocas las que determinan las características primarias y secundarias que deberán tener las barrenas para que presenten un buen desempeño.

La principal ventaja del uso de la metodología de Selección de Barrenas por Correlación en comparación con el de los demás métodos es el de poder determinar las características secundarias de las barrenas, además de no ser necesario el uso de formulas; por otro lado, este método no es recomendable para pozos exploratorios ya que la cantidad de información dificulta el uso de este método.

# RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de la metodología de Selección de Barrenas por Correlación para determinar las características primarias y secundarias de las barrenas a utilizar en la perforación de pozos de desarrollo; es recomendable no utilizar este método si el pozo es exploratorio.

Se recomienda utilizar este documento como material de consulta para estudiantes y profesionistas ya que la metodología presentada ayuda entender la importancia de la selección de barrenas, así como de sus características primarias y secundarias.

# FUENTES DE CONSULTA

## LIBROS.

BURGOYNE, Adam. "Applied Drilling Engineering". SPE, 1991.

ADAMS, Neal J. "Drilling Engineering, A Complete Well Planning Approach", TULSA, 1985.

WALKERS et al. "Desing of muds for Carrying Capacity", SPE, 1998.

PRASSL, Wolfgang. "Drilling Engineering". Curtin University of Technology.

MITCHELL, Bill. "Advanced Oilwell Drilling Enginnering". 1995.

CARDEN, Richard. "Horizontal and Directional Drilling". PetroSkill. 2007.

JOHANCSIK, et al., "Torque and Drag in Directional Wells-Prediction and Measurement", SPE, 2002.

FOUNCAULT Alain et al, "Diccionario de Geología", Barcelona, 1985.

ADAMS A.E. et al "Atlas de Rocas Sedimentarias", Barcelona, 1997.

## OTROS DOCUMENTOS.

RASTEGAR, M. "Optimization of Multiple bit Runs Based on ROP Models and Cost Equation: A new Methodology Applied for One of the Persian Gulf Carbonate Fields", SPE, 2008.

PDVSA, "Teoría de Perforación", documento electrónico, 2008.

SCHLUMBERGER, "Tecnología de Perforación", documento electrónico, 2004.

UAC, "Mecánica de Rocas", documento electrónico, 2007.

JAEGGER, "Fundamentals of Rock Mechanics", documento electrónico, 1987.

CARTILLO, C. "Apuntes de Geología de Yacimientos", 2004.

KUMAR, J., "The Effect of Poisson's Ratio on Rock Properties", documento electrónico, SPE, 1976.

SMITH INTERNATIONAL. "Teoría de Mechas", documento electrónico, 2005.

STC, "Drilling Bits Manual", documento electrónico 1990.

SCHLUMBERGER, "Tecnología de Perforación", documento electrónico, 2004.

BAKER-HUGHES, "Hughes Naming and Features", documento electrónico, 2008.

BAKER-HUGHES, "Drilling Engineering Workbook", documento electrónico, 1995.

ENI, "Drilling Design Manual", documento electrónico, 2008.

BAKER-HUGHES, "Bit Presentation", documento electrónico, 2001.

MASON, K.L. "Three-Cone Bit Selection with Sonic Logs", documento electrónico, SPE, 1987.

PEMEX, "Guía para la Perforación, selección de barrenas", 2006.