



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 16 de Enero de 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
Ciudad Neiva, Huila

El (Los) suscrito(s), EDUARD ANDRES CALDERON ARCHILA, identificado con C.C. 1.075'289.615 de Neiva (Huila) y NELSON ENRIQUE CANGREJO PINZON, identificado con C.C. 1.075'289,355 de Neiva (Huila), autores de la tesis y/o trabajo de grado, titulado: ESTUDIO Y ANALISIS DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA TASA DE PENETRACION (ROP) APLICANDO LA METODOLOGIA DE ENERGIA MECANICA ESPECIFICA EN LA PERFORACION DE POZOS PETROLEROS; presentado y aprobado en el año 2019, como requisito para optar al título de Ingeniero de petróleos.

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open Access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Eduard Andrés Calderón

Firma: _____

EDUARD ANDRÉS CALDERÓN ARCHILA
C.C. 1.075'289.615 de Neiva (Huila)

Firma: _____

NELSON ENRIQUE CANGREJO PINZÓN
C.C. 1.075'289.355 de Neiva (Huila)

Vigilada Mineducación



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA TASA DE PENETRACION (ROP) APLICANDO LA METODOLOGÍA DE ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA EN LA PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CALDERÓN ARCHILA	EDUARD ANDRÉS
CANGREJO PINZÓN	NELSON ENRIQUE

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VARGAS CASTELLANOS	CONSTANZA

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero de Petróleos.

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería de Petróleos

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2019

NÚMERO DE PÁGINAS: 55

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general X Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___
Tablas o Cuadros X

Vigilada mieducación



SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: SI, WELLDATA.NET

MATERIAL ANEXO: Software desarrollado A.P.D. (Axial Profile Determination)

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Eficiencia mecánica</u>	<u>Mechanical efficiency</u>	6. _____	_____
2. <u>Rata de penetración</u>	<u>Rate of penetration</u>	7. _____	_____
3. <u>Peso sobre la broca</u>	<u>Weight on bit</u>	8. _____	_____
4. <u>Revoluciones por minuto</u>	<u>Rotation per minute</u>	9. _____	_____
5. _____	_____	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En la industria petrolera es muy importante determinar las tasa de penetración (ROP) es por ello que en este trabajo se mencionan algunos de los modelos matemáticos existentes, esta medida es importante ya que determina aportes fundamentales para el desarrollo de la perforación, aunque cabe resaltar que estos métodos son empíricos y solo se pueden utilizar como una medida de tendencia.

En este punto la optimización se convierte en una herramienta eficaz en la industria petrolera, aunque esta no ha tenido difusión especialmente en países subdesarrollados como el nuestro. El uso de la prueba de perforabilidad nos proporciona estos parámetros óptimos como lo son el WOB y RPM, la cual es una prueba sencilla que se realiza en tiempo real.

El aumento en la investigación de la tasa de penetración (ROP) sirve para mejorar el diseño y procesos de perforación. En este proceso es importante incluir en los análisis y ecuaciones el tipo de broca, la abrasividad y homogeneidad de la formación, así como los efectos del peso sobre la broca. Básicamente el conocimiento y puesta en funcionamiento de nuevos métodos ayudara a realizar perforaciones viables económicamente.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

In the oil industry it is very important to determine the penetration rate (ROP) it is for it that in this work some of the existent mathematical models are mentioned, this measure is important since it determines fundamental contributions for the development of the perforation, although it is necessary to stand out that these methods are empiric and alone they can be used like a tendency measure.

In this point the optimization becomes an effective tool in the oil industry, although this he/she has not had diffusion especially in underdeveloped countries as ours. The use of the Drill off test provides us these good parameters as they are it the WOB and RPM, which is a simple test that is carried out in real time.

The increase in the investigation of the penetration rate (ROP) it is good to improve the design and perforation processes. In this process it is important to include in the analyses and equations the drill type, the abrasiveness and homogeneity of the formation, as well as the effects of the weight on the drill. Basically the knowledge and setting in operation of new methods helped to carry out viable perforations economically.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Luis Humberto Orduz

Firma:

Nombre Jurado: Luis Fernando Bonilla

Firma:

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA
TASA DE PENETRACION (ROP) APLICANDO LA METODOLOGÍA DE
ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA EN LA PERFORACIÓN DE POZOS
PETROLEROS**

**EDUARD ANDRÉS CALDERÓN ARCHILA
NELSON ENRIQUE CANGREJO PINZÓN**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENERÍA
INGENERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA (HUILA)
2019**

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA
TASA DE PENETRACION (ROP) APLICANDO LA METODOLOGÍA DE
ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA EN LA PERFORACIÓN DE POZOS
PETROLEROS**

**EDUARD ANDRÉS CALDERÓN ARCHILA
NELSON ENRIQUE CANGREJO PINZÓN**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTANDO COMO REQUISITO PARA
OPTAR EL TÍTULO DE INGENERO DE PETRÓLEOS**



DIRECTORA:

CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS

DOCENTE DEL PROGRAMA DE INGENERIA DE PETROLEOS

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENERÍA

INGENERÍA DE PETRÓLEOS

NEIVA (HUILA)

2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a Dios por darme el entendimiento y los recursos para el desarrollo de esta carrera profesional, a mis padres Eduard Calderón Hernández y Doris Archila Rojas por su aporte, comprensión y apoyo, a mi compañera sentimental Luz Marina Pachón Velasco por su cariño, acompañamiento y amor incondicional, que la vuelve una persona fundamental en mi existencia, a mis abuelos y en general a todas las personas que de alguna manera colaboraron e influyeron en tan importante suceso en mi vida.

EDUARD ANDRÉS CALDERÓN ARCHILA

A papá, sea donde esté en esta inmensa realidad, no hubiera iniciado esta travesía sin el apoyo que él me brindó.

NELSON ENRIQUE CANGREJO PINZÓN

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mis agradecimientos a Dios, a mis padres: Eduard Calderón y Doris Archila por su perseverancia y apoyo en todo este proceso, además a nuestra directora de tesis Msc Constanza Vargas Castellanos por su guía ,apoyo y aportes en la realización de este trabajo de grado.

A Luz Marina Pachón por su apoyo y acompañamiento en esta carrera profesional, a la Universidad Surcolombiana por ser mi casa de estudios además de todos los profesores tanto de la facultad de ingeniería como en las otras facultades que ayudaron en mi formación.

Y en general quiero agradecer a todas las personas que ayudaron en la realización de este gran logro de mi vida personal.

EDUARD ANDRÉS CALDERÓN ARCHILA

A lo largo de mi carrera universitaria, tuve buenas experiencias y otras no tan buenas pero, afortunadamente estuve rodeado de grandes personas que me brindaron su amistad y guiaron a través de esta experiencia. A todos ellos, infinitas gracias.

NELSON ENRIQUE CANGREJO PINZÓN

CONTENIDO

	Págs.
LISTA DE TABLAS.....	3
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	4
LISTA DE ECUACIONES.....	5
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	8
OBJETIVOS.....	9
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos.....	9
1. MODELOS DE PREDICCIÓN DE (ROP) APLICANDO LA METODOLOGÍA (MSE).....	10
1.1 MÉTODO DE WARREN.....	10
1.1.1 Requerimientos.....	10
1.1.2 Procedimiento.....	11
1.1.2.1 Cálculo constante de diseño a, b y c.....	11
1.1.3 Factibilidad.....	13
1.2 MÉTODO DE BINGHAM.....	14
1.2.1 Requerimientos.....	14
1.2.2 Procedimiento.....	14
1.2.3 Factibilidad.....	15
1.3 MÉTODO DE YOUNG Y BOURGOYNE.....	15
1.3.1 Requerimientos.....	16
1.3.2 Procedimiento.....	17
1.3.3 Factibilidad.....	20
1.4 MÉTODO DE ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA.....	21
1.4.1 Requerimientos.....	21
1.4.2 Procedimiento.....	22
1.4.3 Factibilidad.....	23
1.5 INTERPRETACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN ROP.....	23
1.6 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN ROP.....	23
2. PRUEBA DE PERFORABILIDAD.....	25
2.1 PROCEDIENDO PARA REALIZAR LA PRUEBA DE PERFORABILIDAD.....	26
2.2 ANÁLISIS DE LA PRUEBA DE PERFORABILIDAD.....	27
3. LIMITADORES DE LA PERFORACIÓN.....	28
3.1 CLASIFICACION DE LOS LIMITADORES.....	28
3.1.1 Limitadores inalterables.....	28

3.1.2 Limitadores alterables.....	30
4. ESFUERZOS COMPRESIVOS DE LA ROCA.....	33
4.1 ESFUERZO COMPRESIVO SIN CONFINAMIENTO DE LA ROCA.....	33
4.2 ESFUERZO COMPRESIVO CONFINADO DE LA ROCA.....	34
5. SEVERIDAD INTERFACIAL.....	36
5.1 COMO EVITAR LA SEVERIDAD INTERFACIAL.....	37
6. EJEMPLO APLICATIVO.....	39
6.1 CÁLCULO ROP MÉTODO DE WARREN.....	39
6.2 CÁLCULO ROP MÉTODO DE BINGHAM.....	41
6.3 CÁLCULO ROP MÉTODO DE YOUNG Y BOURGOYNE.....	42
6.4 CÁLCULO ROP MÉTODO DE MSE.....	44
6.5 TABLA DE RESULTADOS.....	44
RECOMENDACIONES.....	46
CONCLUSIONES.....	47
BIBLIOGRAFIA.....	48

LISTA DE TABLAS

TABLA 1	Valores de los parámetros utilizados para calcular a,b y c.....	13
TABLA 2	Parámetros cálculo ROP en MSE.....	22
TABLA 3	Resumen de los limitadores de la ROP.....	32
TABLA 4	Cálculo de UCS con distintos autores.....	34
TABLA 5	Características de los problemas en la MSE.....	37
TABLA 6	Datos de entrada cálculo ROP método Warren.....	39
TABLA 7	Ecuaciones de las líneas de tendencia Warren.....	40
TABLA 8	Valores obtenidos de a, b y c.....	42
TABLA 9	Datos entrada método Bingham.....	42
TABLA 10	Coeficientes de Young y Bourgoyne.....	43
TABLA 11	Parámetros de perforación.....	--44
TABLA 12	Datos entrada método MSE.....	45
TABLA 13	Datos obtenidos de la tabla.....	46

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Forma de obtención de los coeficientes a, b y c.....	12
Ilustración 2	Diagrama obtención parámetros modelo Young Y Bourgoyne.....	20
Ilustración 3	Ejemplo de una prueba de perforabilidad.....	25
Ilustración 4	Gráfico ROP vs WOB para prueba de perforabilidad.....	27
Ilustración 5	Afectación de la relación profundidad vs tiempo.....	29
Ilustración 6	Prueba de laboratorio para UCS.....	33
Ilustración 7	Resistencia confinada de la roca	34
Ilustración 8	Representación de los efectos de la ROP vs WOB.....	36
Ilustración 9	Características para evitar la severidad interfacial.....	37
Ilustración 10	Problemas de la perforación.....	38
Ilustración 11	Ubicación del pozo 1.....	39
Ilustración 12	Grafica obtención de parámetros a, b y c.....	40
Ilustración 13	Obtención del valor b con el error porcentual.....	41
Ilustración 14	Ajuste de obtención de los valores.....	41

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1	Modelo matemático de Warren para cálculo ROP.....	11
Ecuación 2	Resistencia compresiva no confinada de la roca.....	13
Ecuación 3	Cálculo datos del eje Y del modelo de T.M Warren.....	13
Ecuación 4	Cálculo datos del eje X del modelo de T.M Warren.....	13
Ecuación 5	Modelo matemático de Bingham para cálculo ROP.....	14
Ecuación 6	Modelo matemático de Young y Bourgoyne para cálculo ROP.....	17
Ecuación 7	Función 1 modelo matemático de Young y Bourgoyne.....	17
Ecuación 8	Función 2 modelo matemático de Young y Bourgoyne.....	18
Ecuación 9	Función 3 modelo matemático de Young y Bourgoyne.....	18
Ecuación 10	Función 4 modelo matemático de Young y Bourgoyne.....	18
Ecuación 11	Función 5 modelo matemático de Young y Bourgoyne.....	19
Ecuación 12	Función 6 modelo matemático de Young y Bourgoyne.....	19
Ecuación 13	Función 7 modelo matemático de Young y Bourgoyne.....	19
Ecuación 14	Función 8 modelo matemático de Young y Bourgoyne.....	19
Ecuación 15	Modelo matemático MSE para cálculo ROP	22
Ecuación 16	Cálculo del Torque	22
Ecuación 17	Cálculo ROP a partir de la MSE.....	23

RESUMEN

En la industria petrolera es muy importante determinar la tasa de penetración (ROP) es por ello que en este trabajo se mencionan algunos de los modelos matemáticos existentes, esta medida es importante ya que determina aportes fundamentales para el desarrollo de la perforación, aunque cabe resaltar que estos métodos son empíricos y solo se pueden utilizar como una medida de tendencia.

En este punto la optimización se convierte en una herramienta eficaz en la industria petrolera, aunque esta no ha tenido difusión especialmente en países subdesarrollados como el nuestro. El uso de la prueba de perforabilidad nos proporciona estos parámetros óptimos como lo son el WOB y RPM, la cual es una prueba sencilla que se realiza en tiempo real.

El aumento en la investigación de la tasa de penetración (ROP) sirve para mejorar el diseño y procesos de perforación. En este proceso es importante incluir en los análisis y ecuaciones el tipo de broca, la abrasividad y homogeneidad de la formación, así como los efectos del peso sobre la broca. Básicamente el conocimiento y puesta en funcionamiento de nuevos métodos ayudara a realizar perforaciones viables económicamente.

Palabras claves: Eficiencia mecánica; peso sobre la broca; revoluciones por minuto; tasa de penetración.

Abstract

In the oil industry it is very important to determine the penetration rate (ROP) it is for it that in this work some of the existent mathematical models are mentioned, this measure is important since it determines fundamental contributions for the development of the perforation, although it is necessary to stand out that these methods are empiric and alone they can be used like a tendency measure.

In this point the optimization becomes an effective tool in the oil industry, although this he/she has not had diffusion especially in underdeveloped countries as ours. The use of the Drill off test provides us these good parameters as they are it the WOB and RPM, which is a simple test that is carried out in real time.

The increase in the investigation of the penetration rate (ROP) it is good to improve the design and perforation processes. In this process it is important to include in the analyses and equations the drill type, the abrasiveness and homogeneity of the formation, as well as the effects of the weight on the drill. Basically the knowledge

and setting in operation of new methods helped to carry out viable perforations economically.

Keywords: Mechanical efficiency; weight on the drill; revolutions per minute; penetration rate.

INTRODUCCIÓN

El uso de la metodología de la energía mecánica específica (MSE) aporta en la perforación de pozos disminución en los tiempos y en consecuencia genera costos operacionales más bajos, ya que se encarga de determinar los parámetros óptimos en la perforación garantizando un mejor desempeño en el proceso.

Además es muy importante en la utilización de esta metodología conocer la reología del fluido, que nos ayuda a predecir y determinar las condiciones óptimas para desarrollarla, es una herramienta útil para detectar irregularidades, es por eso que se convierte en una manera eficaz para controlar los parámetros de la perforación, entre los más críticos encontramos: el peso de la broca (WOB), el caudal, entre otros, cuyas variaciones inciden notablemente en la tasa de penetración (ROP).

OBJETIVOS

Objetivo General:

- Analizar los modelos de predicción de la tasa de penetración (ROP): método de Bingham, método de Warren, método de Bourgoyne y Young, método de MSE; aplicando la metodología de energía mecánica específica (MSE) en la perforación de pozos petroleros buscando la factibilidad de los procesos.

Objetivos Específicos:

- Comparar e interpretar los modelos de predicción de ROP dando prioridad a ventajas, desventajas, requerimientos, factibilidad, entre otros.
- Analizar la finalidad y el procedimiento de la prueba de perforabilidad (Drill off test).
- Analizar el proceso para detectar los limitadores de la perforación aplicando la MSE.
- Analizar el comportamiento y la afectación de la roca tanto confinada como no confinada (USC y CCS) en la MSE.
- Determinar las causas y consecuencias de la severidad interfacial (interfacial severity) en la MSE.

1. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA TASA DE PENETRACIÓN (ROP) APLICANDO LA METODOLOGÍA DE ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)

Se pretende en este capítulo comparar e interpretar los modelos de predicción de la tasa de penetración (ROP), entre los cuales se encuentran el método de Warner, el método de Bingham, el método de Bourgoyne y Young, y el método de MSE, tratando de enfatizar en las principales ventajas, desventajas, fórmulas utilizadas para el cálculo de ROP, estos modelos tienen que ser analizados para cada caso en particular, en algunos de estos modelos se tiene en cuenta la relación resistiva no confinada de la roca (USC) y algunos son independientemente del tipo de formación analizada.

1.1 MÉTODO DE WARREN

El modelo matemático desarrollado por T.M Warren en 1981, tiene como propósito fundamental predecir la tasa de penetración (ROP) basado en el resultado de estudiar varias pruebas usando análisis dimensional y curvas generalizadas, las cuales incluían la generación inicial de daños y la eliminación de recortes. Su función es tratar de cubrir las fallas que presentan otros modelos al tratar de aplicarlos para predecir velocidades de perforación de barrenas tricónicas en formaciones blandas. Aportando como ventajas:

- Modelo de perforación para brocas en formaciones suaves.
- Se puede usar tanto en brocas con dientes de acero como en brocas de insertos o tricónicas.
- Proporcionar un límite superior para la ROP con RPM constante.
- Es útil en pozos con buen índice de acarreo de sólidos.
- Análisis dimensional de curvas.

Por su parte, este método de T.M Warren presenta las siguientes desventajas:

- El modelo considera una limpieza perfecta, ya que no tiene en cuenta el efecto de retención de los recortes generados en el fondo del pozo.
- Nivel de medición de ROP bastante limitada.

1.1.1 Requerimientos

Para el desarrollo del modelo de T.M Warren se deben tener los siguientes datos para realizar el cálculo de la tasa de penetración (ROP) los cuales son:

- Peso sobre la broca (WOB): Valor en libras fuerza que soporta la broca.
- RPM: Velocidad con la que el Top drive hace girar la sarta y la broca.
- Diámetro de la broca: Medida del diámetro externo de la broca.
- Resistencia compresiva no confinada de la roca (UCS): Máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial.
- Constante de diseño de la broca *a*: Componente de diseño adimensional de la broca propio del modelo de T.M Warren que es obtenido de la Ilustración 1 que corresponde a la pendiente de la recta.
- Constante de diseño de la broca *b*: Componente de diseño de la broca adimensional propio del modelo de T.M Warren que es obtenido de la Ilustración 1, el cual es obtenido al graficar la recta.
- Constante de diseño de la broca *c*: Componente de diseño adimensional de la broca propio del modelo de T.M Warren que es obtenido de la Ilustración 1 que corresponde a la intersección de la recta.

1.1.2 Procedimiento

La ecuación 1 presenta dos términos, el primero nos define la tasa máxima de apoyo al peso sobre la broca sin la tasa de penetración de los dientes de la broca, por su parte el segundo término considera la distribución del peso con una mayor cantidad de dientes al penetrar la formación.

$$ROP = \left(\frac{aUCS^2D^3}{RPM^bWOB^2} + \frac{c}{RPM} \right)^{-1} \quad (1)$$

Modelo matemático de Warren para cálculo ROP

Dónde:

ROP = Tasa de Penetración (ft/hr).

RPM = Revoluciones por minuto en la broca (rev/min).

WOB = Peso sobre la broca (Lbf).

a, b, c = Constantes de diseño de broca (adimens).

UCS = Resistencia compresiva no confinada de la roca (psi)

D = Diámetro de la broca en (in).

1.1.2.1 Cálculo de constantes de diseño *a*, *b* y *c*

En la ilustración 1 se observa un ejemplo de cómo obtener las constantes *a*, *b* y *c* del modelo de T.M Warren, que se obtuvieron utilizando datos en los cual se mantuvo constante los parámetros de perforación, con el fin de simular una prueba de perforabilidad.

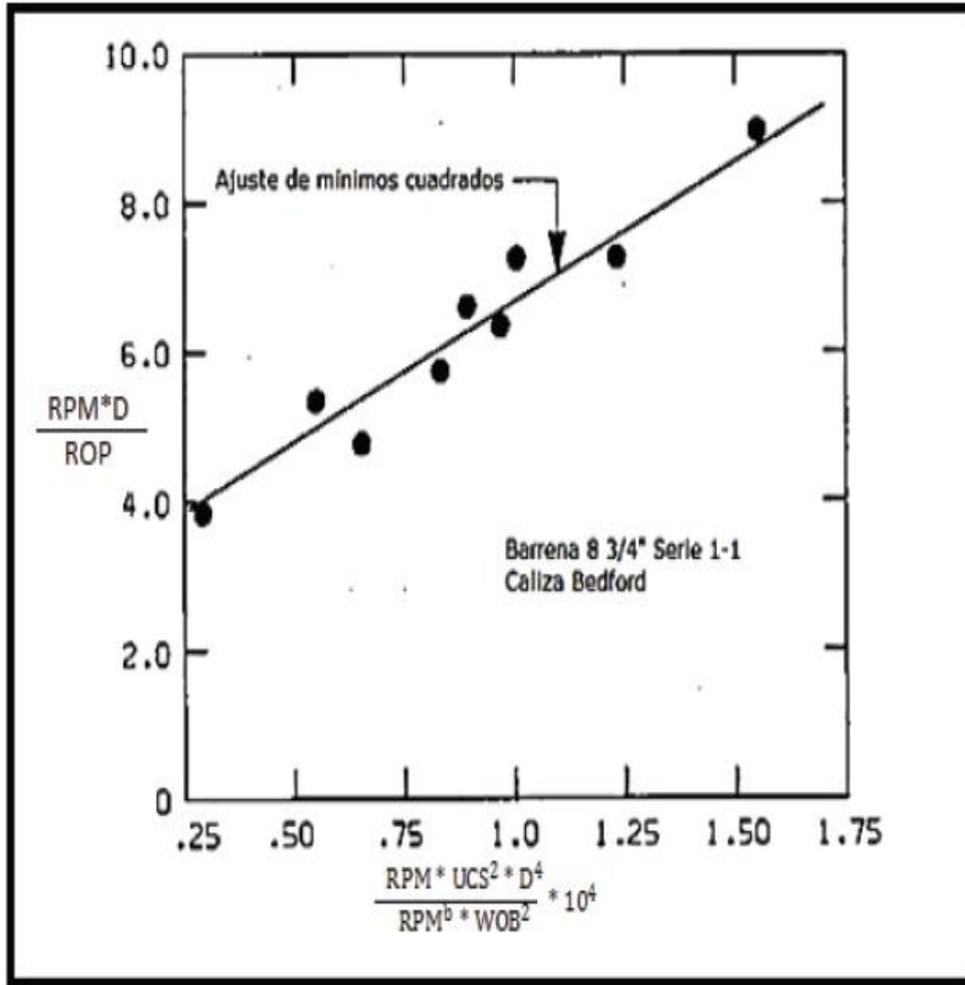


Ilustración 1. Forma de obtención de los coeficientes a, b y c
Fuente: Warren T.M, Drilling Soft-Formation Bits, (Junio 1981)

La ilustración anterior nos muestra una prueba realizada en un pozo con una barrena de 8 ¾ en una caliza, en el eje de las abscisas se toma una ecuación de Warren donde se relaciona la resistencia no confinada de la roca con RPM y WOB, por su parte, en el eje de las ordenadas se relaciona RPM con D y ROP, luego de tener los datos se realiza la distribución de los puntos en la gráfica y se traza la línea de tendencia para ajustar los datos, de allí se obtienen que la intercepción es la constante C y la pendiente la constante a.

El procedimiento es el siguiente:

- 1) Hacer una tabla con los valores requeridos, como se ilustra en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Valores de los parámetros utilizados para calcular a, b y c.

ROP	WOB	RPM	D	USC
[ft/hrs]	[klbs]	[ft/hr]	(pulg)	(psi)

Fuente: Benavides. María José. Trabajo de grado, Quito, 2015,198p.

NOTA: En caso de no tener la resistencia compresiva no confinada de la roca se puede utilizar la siguiente ecuación 2:

$$USC = 227 \exp(-10\phi) \quad (2)$$

Resistencia compresiva no confinada de la roca

- 2) Después de obtener los parámetros requeridos se procede a calcular con las ecuaciones siguientes (3) y (4), una serie de puntos variando b ente 0.1 a 1.

$$\frac{RPM D}{ROP} \quad (3)$$

Cálculo datos del eje Y del modelo de T.M Warren

$$\frac{RPM UCS^2 D^4}{RPM^b WOB^2} \quad (4)$$

Cálculo datos del eje X del modelo de T.M Warren

- 3) Realizar la gráfica donde la pendiente obtenida corresponde a la constante de diseño a y el punto de intercepción a la constante C, un ejemplo de ello es mostrado en la ilustración 1.

1.1.3 Factibilidad

Para aplicar el modelo de T.M Warren es muy importante tener a la mano parámetros como el peso sobre la broca (WOB), las revoluciones por minuto de la broca (rpm), USC y D, como necesita pocas variables su confiabilidad o factibilidad es media, lo cual lo hace uno de los métodos a utilizar al calcular la ROP. Un ejemplo de cálculo se presenta en el numeral 6.1 Calculo ROP método de Warren.

1.2 MÉTODO DE BINGHAM

El modelo matemático de Bingham tiene como base de sus análisis el estudiar experimentalmente pruebas de perforación de laboratorio y campo, este es una modificación del método de Maurer. Aportando las siguientes ventajas:

- Aplicable a valores bajos de RPM.
- Buena modelación a valores bajos de WOB.

Por su parte, este método presenta la siguiente desventaja:

- Este modelo es totalmente experimental.

1.2.1 Requerimientos

Para el desarrollo del modelo de Bingham se tienen los siguientes datos para realizar el cálculo de la tasa de penetración (ROP) los cuales son:

- Peso sobre la broca (WOB): Es el valor en libras fuerza que soporta la broca.
- RPM: Es el número de revoluciones por minuto que se aplica en la superficie por medio del top drive a la sarta de perforación.
- Diámetro de la broca: Es la medida del diámetro externo de la broca.
- Constante de proporcionalidad K: También llamado coeficiente de empalme es la relación entre la velocidad de penetración ROP calculada con el ROP real.
- Exponente de diseño a_5 : Valor propio adimensional del modelo matemático de Bingham, este varía de 0.6 a 2.0.
- Exponente de diseño a_6 : Valor propio adimensional del modelo matemático de Bingham, este varía de 0.85 a 0.95.

1.2.2 Procedimiento

La ecuación 5 muestra como calcular la tasa de penetración (ROP) a través del modelo matemático de Bingham, en la cual surge como interrogantes principales la obtención de los exponentes a_5 y a_6 .

$$ROP = K \left(\frac{WOB}{D} \right)^{a_5} \left(\frac{RPM}{60} \right)^{a_6} \quad (5)$$

Modelo matemático de Bingham para calculo ROP

ROP = Tasa de Penetración (ft/hr).

K = Constante de proporcionalidad (adim).

RPM = Revoluciones por minuto en la broca (rev/min).

WOB = Peso sobre la broca (Lbf).

D = Diámetro de la broca en (in).

Para obtener el cálculo se debe seguir el siguiente procedimiento:

- a) Conocer los datos de los parámetros WOB, RPM, D y K.
- b) Obtener el valor del exponente de diseño a_5 graficando Δt vs WOB o ROP vs WOB, en el cual la pendiente es su valor, este varía entre 0.6 a 2.
- c) Obtener el valor del exponente de diseño a_6 se obtiene usando el ROP a dos velocidades pero al mismo valor de peso sobre la broca, este varía entre 0.85 a 0.95.
- d) Proceder al cálculo.

NOTA: los exponentes de diseño a_5 y a_6 se pueden obtener también aplicando las pruebas de perforabilidad .

1.2.3 Factibilidad

Para aplicar este modelo de Bingham se tiene una factibilidad medianamente baja, ya que es necesario gran cantidad de datos de campo y laboratorio, así como el obtener la constante de proporcionalidad (K) y por tomar muestras experimentalmente. Un ejemplo de cálculo se presenta en el numeral 6.2 Cálculo ROP método de Bingham.

1.3 MÉTODO DE YOUNG Y BOURGOYNE

El modelo matemático de Young Y Bourgoyne también llamado modelo de tasa de penetración lineal se realizó por estos dos intérpretes en (1974) el cual tuvo lugar después de analizar y monitorear varios pozos, este análisis consistió en una regresión múltiple de datos de perforación con el fin de seleccionar la velocidad óptima de rotación (RPM) con el peso de la broca (WOB) y la hidráulica de la broca. El modelo es útil y tiene las siguientes ventajas:

- Lograr coeficientes de regresión múltiples específicos de la formación.
- Relacionar la tasa de penetración con la predicción de la profundidad como una función de varios parámetros de perforación.
- Determinar parámetros específicos óptimos de la perforación.
- Poder ser utilizado en tiempo real.
- Ayudar a la detección de presiones anormales.
- Tener una buena precisión ya que se realiza una regresión múltiple a intervalos cortos.

Por el contrario, este método presenta las siguientes desventajas:

- Predecir con mayor exactitud en formaciones litológicamente homogéneas, es por ello que casi no es factible su utilización en formaciones heterogéneas.
- Las funciones y cálculos realizados se basan en estudios de laboratorio y campo.
- Necesitar extensas pruebas de campo y cálculos complejos para determinar sus coeficientes para el cálculo de la ROP.

1.3.1 Requerimientos

Para el desarrollo del modelo de Young Y Bourgoyne se deben tener los siguientes datos para realizar el cálculo de la tasa de penetración (ROP) los cuales son:

- Coeficiente por efecto de la resistencia de la formación a_1 : Valor adimensional que representa el efecto del tipo de broca y dureza de la formación en la ROP.
- Coeficiente por efectos de consolidación a_2 : Valor adimensional que representa el aumento de los esfuerzos debido a la compactación normal con la profundidad.
- Coeficiente por efectos de sobrepresión a_3 : Valor adimensional que representa el efecto de la compactación sobre la ROP, en este caso es útil para formaciones presionadas anormalmente.
- Coeficiente por efectos de Presión Diferencial a_4 : Valor adimensional que representa el efecto del sobrebalance existente sobre la ROP.
- Coeficiente por efectos del peso sobre la broca y el diámetro de la broca a_5 : Representa el límite superior de la prueba.
- Coeficiente por efectos de la velocidad de rotación (RPM) a_6 : Valor adimensional que identifica el comportamiento de la perforación (normal o anormal).
- Coeficiente por efectos de desgaste de la broca a_7 : Valor adimensional que representa el estado de los dientes de la broca.
- Coeficiente por efectos de la hidráulica de la broca a_8 : Valor adimensional que representa el efecto de la hidráulica de la broca sobre la ROP.
- Profundidad vertical verdadera: Es la profundidad del pozo verticalmente.
- Diámetro de la broca: Medida del diámetro externo de la broca.
- Densidad equivalente de presión poral: Densidad efectiva ejercida por los poros de la formación contra el fluido de perforación.

- Densidad equivalente de circulación: Densidad efectiva ejercida por un fluido de perforación en circulación contra la formación, tiene en cuenta la caída de presión en el espacio anular encima del punto de interés.
- Peso sobre la broca (WOB): Es el valor en libras fuerza que soporta la broca.
- Peso mínimo sobre la broca: Es el valor mínimo en libras fuerza que soporta la broca.
- RPM: Es el número de revoluciones por minuto que se aplica en la superficie por medio del top drive a la sarta de perforación.
- Altura fraccional de los dientes de la broca: es la medida del tamaño de los dientes, generalmente es dado en mm.
- Fuerza de impacto hidráulica por debajo de la broca (lbf): Proporciona el total de la fuerza en libras que se ejerce en la cara de la formación al hacer circular el fluido a través de las toberas de la barrena.

1.3.2 Procedimiento

Para este modelo de Young y Bourgoyne es necesario realizar un estudio de 8 funciones para modelar las diferentes variables de la perforación sobre la tasa de penetración (ROP), resultado de ello surge la siguiente ecuación 6:

$$ROP = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \dots \dots f_8 \quad (6)$$

Modelo matemático de Young y Bourgoyne para cálculo ROP

Para solucionar estas relaciones funcionales se desarrollaron las siguientes funciones:

- La función f_1 mostrada en la ecuación 7 representa el efecto del tipo de broca y dureza de la formación en la ROP, es de aclarar que aunque esta función incluya los efectos de las variables de la perforación tales como tipo de lodo, contenido de sólidos y sales, entre otros, estos no están incluidos en este método de perforación. Comúnmente se llama a este término perforabilidad de la formación.

$$f_1 = e^{2.303a_1} \quad (7)$$

Función 1 modelo matemático de Young y Bourgoyne

Dónde:

f_1 = Efecto de la dureza de la formación y tipo de broca en la ROP (ft/hr).
 a_1 = Coeficiente por resistencia de la formación (adim).

- La función f_2 mostrada en la ecuación 8 para representar el aumento de los esfuerzos debido a la compactación normal con la profundidad, junto con la

función f_3 tiene como propósito presentar en conjunto el efecto de la compactación sobre la tasa de penetración (ROP).

$$f_2 = e^{2.303a_2(10000-TVD)} \quad (8)$$

Función 2 modelo matemático de Young y Bourgoyne

Dónde:

f_2 = Incremento de esfuerzos de la roca debido a la compactación con h (ft/hr).

a_2 = Coeficiente por efectos de consolidación (adim).

TVD = Profundidad vertical verdadera (ft).

- La función f_3 mostrada en la ecuación 9 es útil para calcular en formaciones presionadas anormalmente, y al igual f_2 para ayudar al modelo de Young Y Bourgoyne a determinar el efecto de la compactación sobre la tasa de penetración (ROP).

$$f_3 = e^{2.303a_3 D^{0.69}(gp-9.0)} \quad (9)$$

Función 3 modelo matemático de Young y Bourgoyne

Dónde:

f_3 = Compactación en formaciones presionadas anormalmente (ft/hr).

a_3 = Coeficiente por efectos de sobrepresión (adim).

D = Diámetro de la broca en (in).

gp = Densidad equivalente de presión poral (lb/gal).

- La función f_4 mostrada en la ecuación 10 presenta el efecto del sobrebalance existente sobre la tasa de penetración, cabe resaltar que para un sobrebalance igual a cero la función toma un valor de 1.0.

$$f_4 = e^{2.303a_4 TVD(gp-ECD)} \quad (10)$$

Función 4 modelo matemático de Young y Bourgoyne

Dónde:

f_4 = Efecto de la compactación en la ROP (ft/hr).

a_4 = Coeficiente por efectos de Presión Diferencial (adim).

TVD = Profundidad vertical verdadera (ft).

gp = Densidad equivalente de presión poral (lb/gal).

ECD = Densidad equivalente de circulación (lb/gal).

- Esta función f_5 mostrada en la ecuación 11 trata de identificar el límite superior de la prueba que corresponde al punto de esfuerzo de la broca.

$$f_5 = \left(\frac{\left(\frac{WOB}{D}\right) - \left(\frac{WOB}{D}\right)_t}{4 - \left(\frac{WOB}{D}\right)_t} \right)^{a_5} \quad (11)$$

Función 5 modelo matemático de Young y Bourgoyne

Dónde:

f_5 = Efecto de WOB y RPM sobre la ROP (ft/hr).

a_5 = Coeficiente por efectos del peso sobre la broca y el diámetro de la broca (adim).

D = Diámetro de la broca en (in).

WOB = Peso sobre la broca (Lbf).

$(WOB/D)_t$ = Peso mínimo sobre la broca (Lbf).

- Esta función f_6 mostrada en la ecuación 12 trata de identificar el comportamiento de la perforación, para un valor de 1 la perforación se considera normal.

$$f_6 = \left(\frac{RPM}{60} \right)^{a_6} \quad (12)$$

Función 6 modelo matemático de Young y Bourgoyne

Dónde:

f_6 = Efecto de WOB y RPM sobre la ROP (ft/hr).

a_6 = Coeficiente por efectos de la velocidad de rotación (adim).

RPM = Revoluciones por minuto en la broca (rev/min).

- Esta función f_7 mostrada en la ecuación 13 se realiza para obtener el estado de los dientes de la broca, para unos dientes nuevos su valor es 1.0.

$$f_7 = e^{-a_7 h} \quad (13)$$

Función 7 modelo matemático de Young y Bourgoyne

Dónde:

f_7 = Efecto del desgaste de la broca sobre la ROP.

a_7 = Coeficiente por efectos de desgaste de la broca.

h = Altura fraccional de los dientes de la broca.

- Esta función f_8 mostrada en la ecuación 14 se realiza para obtener el Efecto de la hidráulica de la broca sobre la ROP.

$$f_8 = \left(\frac{F_j}{1000} \right)^{a_8} \quad (14)$$

Función 8 modelo matemático de Young y Bourgoyne

Dónde:

f_8 = Efecto de la hidráulica de la broca sobre la ROP (ft/hr).
 a_8 = Coeficiente por efectos de la hidráulica de la broca (adim).
 F_j = Fuerza de impacto hidráulica por debajo de la broca (lbf).

En la Ilustración 2 se presenta una síntesis del proceso a desarrollar para la obtención del cálculo de la ROP utilizando el método de Young y Bourgoyne.

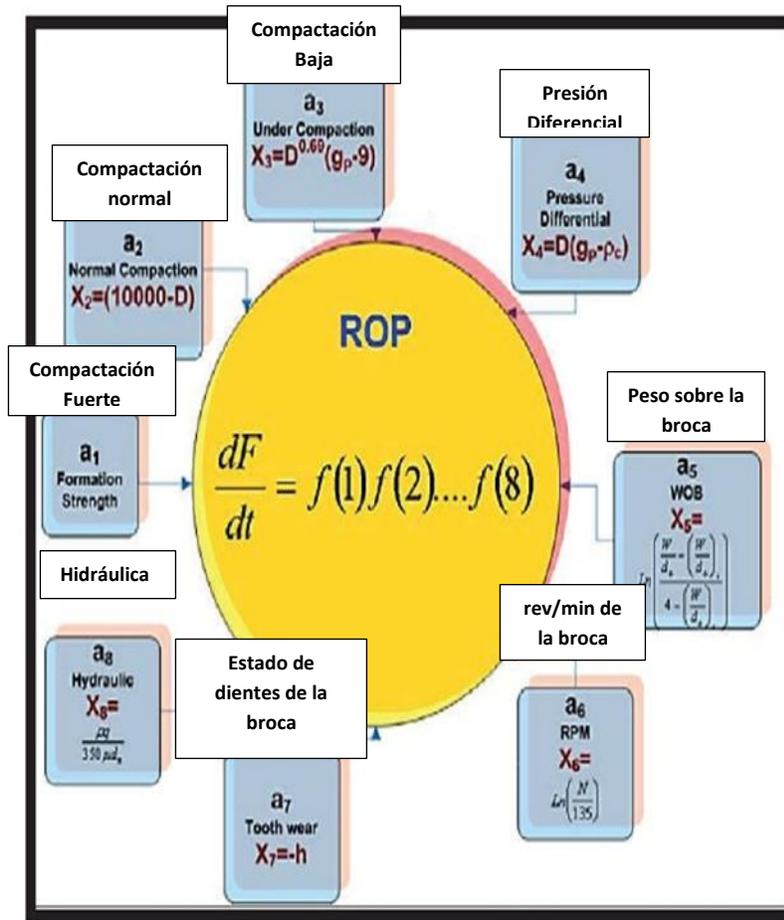


Ilustración 2. Diagrama obtención parámetros modelo Young y Bourgoyne
 Fuente: Tuna Eren; Eni E&P y M.Evren Ozbayoglu, SPE (2010)

1.3.3 Factibilidad

Para aplicar este modelo de Young y Bourgoyne se tiene factibilidad media, ya que se centra en regresiones múltiples, que ayudan a modelar los datos tomados en laboratorio o campo. Un ejemplo de cálculo se presenta en el numeral 6.3 Cálculo ROP método Young y Bourgoyne.

1.4 MÉTODO DE ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)

Este modelo matemático propuesto por Tale en 1965 trata de cuantificar la relación existente entre la energía de entrada y la tasa de penetración (ROP). Este se fundamentó en pruebas de laboratorio a condiciones atmosféricas.

Este modelo de perforación tiene las siguientes ventajas:

- Ensayos en laboratorio y campo.
- Proporcionar un valor útil para predecir los requerimientos de potencia para que la broca perfore a un ROP dado a un tipo de roca.
- Evaluar el desempeño de las brocas de perforación.
- Útil para medir la eficiencia mecánica en operaciones de campo.
- Proporciona el rediseño de diversos componentes y procesos como lo son la optimización de parámetros de perforación, selección de brocas, distribución del torque, entre otras.
- Las gráficas resultantes de su cálculo son útiles para determinar y evaluar los desgastes de la broca en tiempo real y tomar decisión en operaciones de perforación.

Por su parte, este método presenta las siguientes desventajas:

- Sus valores calculados son inexactos ya que no se tiene en cuenta las pérdidas por fricción de la sarta de perforación con las paredes del pozo.
- Solo se puede utilizar como una medida de tendencia o un valor estimado.

1.4.1 Requerimientos

Para el desarrollo del modelo de MSE se deben tener los siguientes datos para realizar el cálculo de la tasa de penetración (ROP) los cuales son:

- Peso sobre la broca (WOB): Es el valor en libras fuerza que soporta la broca.
- RPM: Es el número de revoluciones por minuto que se aplica en la superficie por medio del top drive a la sarta de perforación.
- Torque (T): Medida de la resistencia a la rotación generada por la fricción entre la sarta de perforación o tubería de revestimiento con la pared del pozo.
- Diámetro de la broca: Medida del diámetro externo de la broca.
- Resistencia compresiva confinada de la roca (CCS): Máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión con confinamiento.
- Eficiencia mecánica EFF_M : Relación entre la energía específica mínima con la energía mecánica específica su valor es porcentual.

1.4.2 Procedimiento

Para este modelo de energía mecánica específica es necesario realizar la siguiente ecuación 15:

$$MSE = \frac{480TRPM}{D^2ROP} + \frac{4WOB}{\pi D^2} \quad (15)$$

Modelo matemático MSE para cálculo ROP

Dónde:

ROP = Tasa de Penetración (ft/hr).

RPM = Revoluciones por minuto en la broca (rev/min).

WOB = Peso sobre la broca (Lbf).

D = Diámetro de la broca en (in).

T=torque (Lbf .ft)

Para realizar este método se necesita realizar lo siguiente:

- Realizar toma de datos de parámetros de perforación entre los cuales se debe contar con WOB, RPM, Torque, ROP. Este paso se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 .Parámetros cálculo ROP en MSE.

DEPTH (ft)	WOB (klbs)	RPM	TQ (klbs.ft)	ROP (ft/hr)	DIAM. (pulg)	MSE (psi)
436	8	50	1472	67,7	16	2038,44

Fuente: Benavides. María José. Trabajo de grado, Quito, 2015,198p.

NOTA: En caso de no tener el Torque se puede utilizar la ecuación 16:

$$T = \frac{\mu * D * WOB}{36} \quad (16)$$

Cálculo del Torque

Dónde:

- Calcular la MSE con la ecuación 15 mostrada anteriormente.
- Calcular la ROP con la ecuación 17 .

$$ROP = \frac{13.33 * T * RPM}{D * \left(\frac{MSE}{WOB} - \frac{1}{\pi D^2} \right)} \quad (17)$$

Cálculo ROP a partir de la MSE

1.4.3 FACTIBILIDAD

Este modelo de MSE para calcular la tasa de penetración tiene una factibilidad muy alta, debido a la gran información que se cuenta y a los registros de perforación utilizados para el desarrollo de su ecuación. Un ejemplo de cálculo se presenta en el numeral 6.4 Cálculo ROP método de MSE.

1.5 INTERPRETACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN ROP

Los modelos que se describen en este capítulo se obtuvieron las siguientes interpretaciones:

- El modelo a utilizar para valores bajos de ROP y WOB es el modelo de Bingham.
- Para realizar una perforación en una formación suave se debe utilizar el modelo matemático de Warren.
- Los modelos con mayor precisión son los de Young y Bourgoyne y MSE, el primero ya que realiza una regresión múltiple a intervalos cortos y el MSE por la gran información de datos de campo disponibles para su utilización.
- Los modelos más inexactos son el de Warren y energía mecánica específica, ya que los valores de ROP son limitados y no tienen en cuenta las pérdidas por fricción de la sarta.
- Si se desea proporcionar un límite superior de ROP con RPM constante es el modelo de Warren.
- Para determinar los parámetros óptimos de la perforación es el modelo matemático de Young y Bourgoyne.
- El modelo de Young y Bourgoyne es utilizado para ayudar a detectar presiones anormales.
- En el caso de estar realizando la operación de perforación y necesitar datos de ROP en tiempo real el modelo a utilizar es el Young y Bourgoyne.
- El modelo de la energía mecánica específica es proporcional al rediseño de parámetros de perforación, selección de brocas, entre otras.

1.6 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN ROP

De acuerdo a los modelos estudiados se obtuvo las siguientes comparaciones:

- Todos los modelos estudiados presentan un desarrollo a través de pruebas de laboratorio o campo, pero el modelo de Young y Bourgoyne es el que necesita mayor cantidad de datos de campo.

- Los valores a calcular de ROP por el método de Warren son bastante limitados ya que no considera la retención de recortes en fondo del pozo, por su parte el modelo de Bingham es igual de limitado por ser realizado experimentalmente. El modelo de Young y Bourgoyne es extenso y complejo pero con buena precisión.
- El modelo de Young y Bourgoyne acompañado del MSE pueden ser utilizados en tiempo real, lo que no se realiza en los modelos de Warren y Bingham.

2. PRUEBA DE PERFORABILIDAD

La prueba de perforabilidad es un procedimiento sencillo y práctico propuesto por Lubinski tiene como finalidad determinar la combinación óptima del peso sobre la broca (WOB) y de RPM para producir un ROP más elevado, lo cual lo hace aplicable en distintas formaciones, en la ilustración 3 se muestra una prueba de estas.

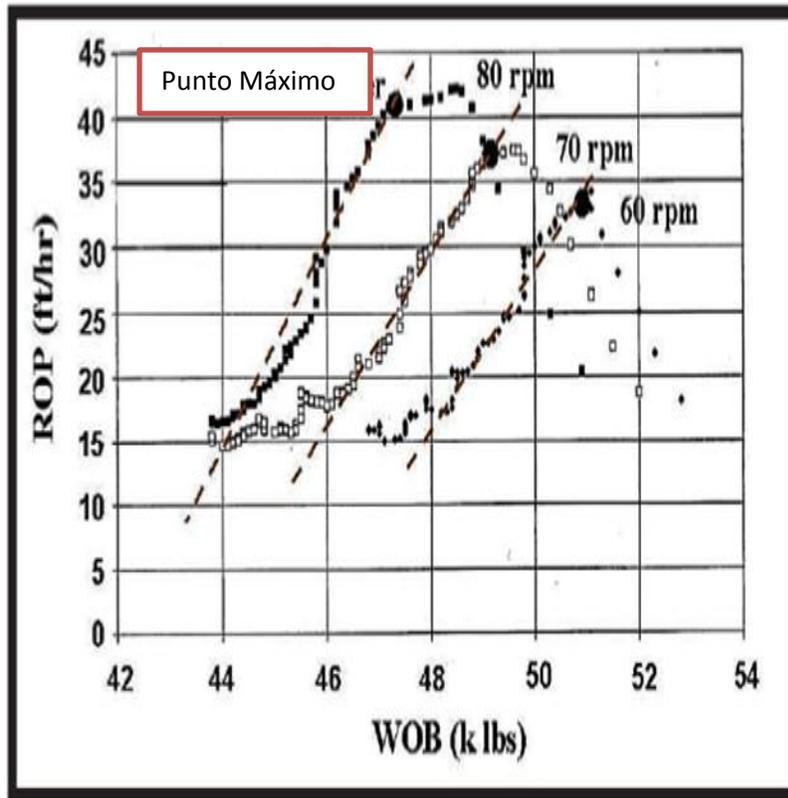


Ilustración 3: Ejemplo de una prueba de perforabilidad

Fuente: Fred E. DuPriest; ExxonMobil and William L. Koederitz, SPE (2005)

La ilustración anterior nos muestra un ejemplo en el cual se observan 3 pruebas de perforabilidad, en esta gráfica en el eje de las abscisas encontramos el peso sobre la broca en Klbs y en el eje de las ordenadas la tasa de penetración (ROP), se toman datos de campo a tres RPM distintas a 80,70 y 60. De esta manera se puede observar que a mayor RPM se necesita menor WOB y por consiguiente el ROP resultante es mayor, también que el punto en el que la tasa de penetración deja de tener un comportamiento lineal con el WOB en las 3 pruebas es el Punto máximo. Se aprecian tres zonas en cada prueba, en la primera se tiene una inadecuada profundidad de corte debido al WOB bajo, la zona 2 comienza cuando la profundidad de corte es adecuada para estabilizar el desempeño de la brocas, se evidencia cuando los datos se comportan lineales y por último la zona 3 que es donde comienza el punto máximo en la cual la transferencia de energía es restringida.

La prueba está definida por:

- Cambio de formación
- Cambio de ROP.
- Cambio de Torque.
- Cambio de Personal.
- Cambio en patrones operacionales (propiedades de lodo, propiedades petrofísicas, etc).

La prueba de perforabilidad tiene como objeto alterar los parámetros de perforación para maximizar la tasa de penetración con el fin de encontrar el punto óptimo cuando ROP con WOB y RPM se dejan de comportar de una manera lineal.

2.1 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA PRUEBA DE PERFORABILIDAD

Para realizar una prueba de perforabilidad se sigue el siguiente proceso:

- Seleccionar la velocidad de rotación (RPM) que se recomienda o desea y mantenerla constante.
- Seleccionar la tasa de flujo y mantenerla constante.
- Retornar al fondo del pozo y aumentar el peso de la broca al máximo posible.
- Registrar el tiempo necesario para perforar en un incremento de peso determinado por los requerimientos operacionales.
- Continuar hasta que todo el peso sobre la broca haya sido perforado o hasta que el tiempo de incremento empiece a tener un aumento significativo.
- Obtener el tiempo más corto que indicara el peso óptimo para esa velocidad de rotación.
- Aumentar la velocidad de rotación (RPM) y repetir los 2 pasos anteriores.
- Realizar un gráfico ROP vs WOB o RPM como el mostrado en la ilustración 4.
- Seleccionar el WOB más bajo que generó el ROP más rápido. Luego mantenga esta WOB constante y repita procedimiento variando RPM, hasta alcanzar la optimización.

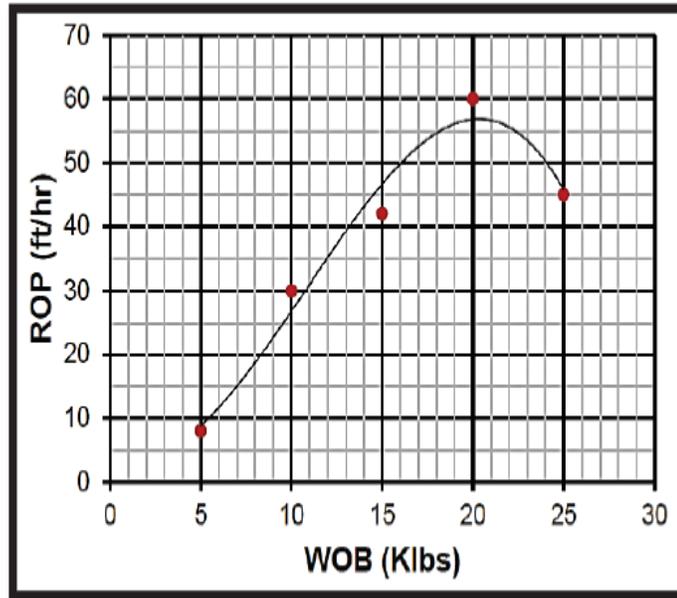


Ilustración 4: Gráfico ROP vs WOB para prueba de perforabilidad
Fuente: Halliburton, Drilling Guidelines

La ilustración 4 nos muestra una gráfica WOB vs ROP en la cual se toma una prueba de perforabilidad compuesta por 5 datos de perforación, luego de ello se construye la figura obteniendo el punto máximo de ROP, se observa que no hay una inadecuada profundidad de corte ya que la recta lineal se mantiene desde el punto 1 hasta el 4 lo que significa que la roca está bien estabilizada con la profundidad de corte.

2.2 ANÁLISIS DE LA PRUEBA DE PERFORABILIDAD

- Para optimizar el peso sobre la broca (WOB) y RPM de la prueba de perforabilidad es necesario esperar que el BHA o parte de este haya pasado por la zapata de revestimiento.
- Para que la prueba de perforabilidad tenga el peso de la broca (WOB) y RPM óptimos para una aplicación específica, estos se deben emplear en una formación homogénea.
- Si los valores de la tasa de penetración ocurren en varios intervalos de WOB/RPM escoger el intervalo menor para optimizar la vida útil de la broca.
- Valores iniciales de RPM en esta prueba de perforabilidad son generalmente correlaciones o informaciones iniciales del producto.
- La prueba se recomienda ser utilizada en ensambles sin motor de fondo, y de utilizarlo se debe vigilar la presión de la bomba para evitar el frenado del motor con el peso sobre la broca.

3 .LIMITADORES DE LA PERFORACIÓN

En esta sección se va a hablar sobre los limitadores que afectan la perforación, sus principales características, en este capítulo podemos detallar los limitadores alterables y los inalterables, cuya clasificación se realizó por Lammus en 1970.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS LIMITADORES

De acuerdo a Lammus entre 1969 y 1970 estos limitadores se agrupan en 2 grandes familias las cuales son:

- **ALTERABLES:** Características o variables que se desarrollan en la perforación y que se pueden alterar o modificar, en otras palabras son aquellas que se pueden controlar y cambiar en tiempo real en la perforación de un pozo, como por ejemplo el peso del lodo, el tipo de barrena, etc.
- **INALTERABLES:** Características o variables que se desarrollan en la perforación y que no pueden ser modificados durante el proceso de la perforación, las cuales no pueden ser alteradas por el operador y no tienen nada que ver con el lugar o la formación a perforar.

3.1.1 Limitadores inalterables

Se van a describir los principales limitadores inalterables en el proceso de la perforación:

- **El clima:** Este limitador es de vital importancia para conocer las condiciones del medio ambiente donde se va a desarrollar la operación de perforación, ya que permite conocer la humedad ,la salinidad, el procedimiento de extracción del hidrocarburo ,así como condiciones óptimas para que los trabajadores desarrollen su labor.
- **La localización:** Este es para determinar la facilidad para suministrar recursos y equipos al grupo de trabajo, lo cual significa que una locación lejana es más difícil entregar recursos, viveres, herramientas que en una locación cercana. Por lo tanto, es necesario un mayor grado de prevención para evitar pérdida de tiempo costos innecesarios.
- **La profundidad:** Es muy importante para estimar las condiciones de esperar en el fondo del pozo como lo son la presión, temperatura, para ayudar a seleccionar la tubería y el equipo de perforación. En la ilustración 5 se muestra la relación entre la profundidad vs el tiempo.

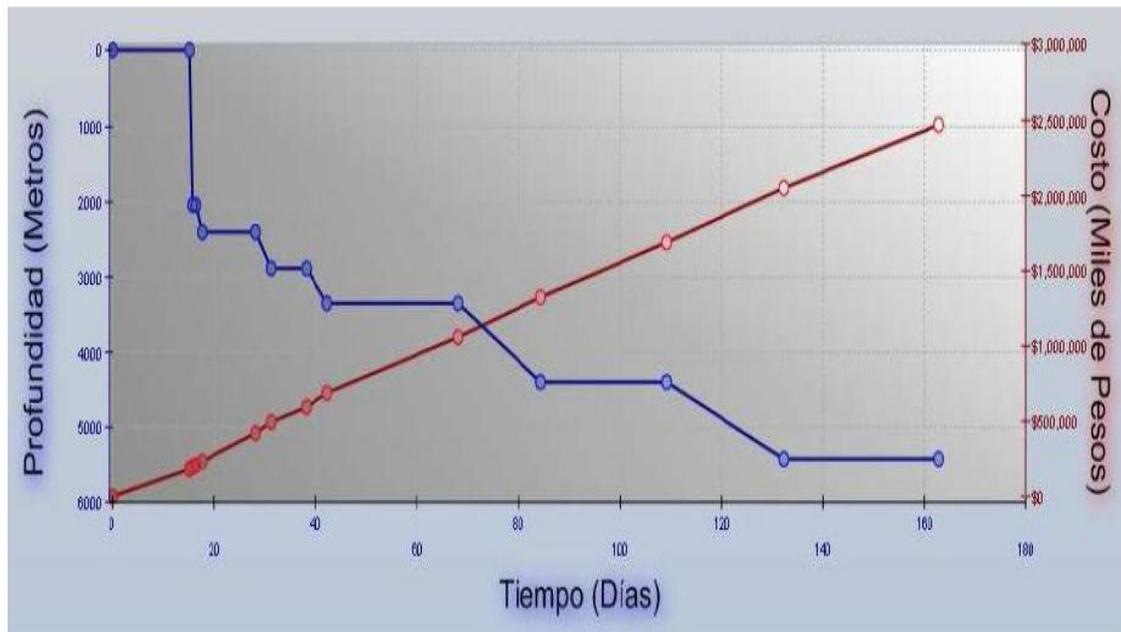


Ilustración 5: Afectación de la relación profundidad vs tiempo

Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

Esta ilustración nos muestra un gráfico con dos rectas en la cual el eje de las abscisas está compuesto por el tiempo en días y en el eje de la ordenada izquierda la profundidad en metros además presenta una ordenada derecha con el costo de la operación, de allí se puede observar que el aumento de días en la perforación es proporcional al costo y que la profundidad varia de una manera relativa con el tiempo, el corte entre las dos rectas significa el tiempo y la profundidad optima en un proceso adecuado.

- **Disponibilidad de agua:** Este factor es esencial para ayudar a la continuidad de las operaciones, la falta de agua puede presentar graves consecuencias como la pérdida del pozo debido a la disminución en mantener el lodo de perforación.
- **Personal de perforación:** este limitador está para determinar el tiempo de operación. Por lo tanto, es necesario tener un equipo de trabajo con capacidad, eficiencia, con buen entrenamiento y motivados para el desarrollo de la operación.
- **Equipo de perforación:** Este permite subir y bajar sartas en el pozo, si este presenta problemas es necesario realizar cambios o adaptar el mismo, lo cual afecta la eficiencia de la operación. Por lo tanto, es necesario contar con una buena capacidad, potencia y automatización del equipo.

- **Características de la roca:** El efecto de la roca incide esencialmente en el proceso de perforación, es por ello que es necesario clasificar, determinar los esfuerzos existentes (compresión, tensión o corte), para evitar problemas futuros en el proceso.

3.1.2 limitadores alterables

Se van a describir los principales limitadores alterables en el proceso de perforación:

1) **Propiedades del lodo de perforación:** Son los principales factores ya que controla la velocidad de penetración, aunque no se ha podido cuantificar y concluir su efecto. Entre los que encontramos:

- **Tipo de lodo:** Se tiene un estudio en 1961, el cual se realiza para conocer el efecto de la velocidad de penetración utilizando diferente tipo de lodo, en él se concluyó que la ROP en los lodos base aceite es menor y su manejo mejor en arenas y arcillas.
- **Densidad del lodo:** Este afecta en una mayor proporción al ROP, ya que permite obtener el peso de la columna de lodo, y por consiguiente un factor para determinar parámetros de perforación.
- **Viscosidad:** Hay que tener en cuenta que al aumentar la viscosidad trae consigo una mayor caída de presión del sistema, mayor presión de bombeo y más difícil la remoción de recortes. Por ello es recomendable tener un fluido de baja viscosidad (cercana a la del agua) en un régimen turbulento para asegurar la remoción completa de recortes.
- **Perdida de filtrado:** Este factor permite al haber un alto índice de pérdida de filtrado ecualizar las presiones de fondo de pozo, pero minimizando el efecto de retener recortes e invadir la formación para causar daño a la misma.
- **Contenido de sólidos:** Son elementos inevitables en un lodo de perforación, pero una gran cantidad de estos hace que se comience a recircular los recortes debido a una mala limpieza del lodo.
- **Contenido de aceite:** En diversas investigaciones se realizó la adición de aceite de las cuales se obtuvo que la ROP aumentaba al incrementar la concentración del aceite, esto es debido a que el aceite no reacciona con las arcillas evitando el hinchamiento.

2) **Hidráulica:** Esta hidráulica del pozo contiene los siguientes limitadores:

- **Presión en el fondo:** Tiene la función de mantener el fluido en movimiento.

- **Gasto de fluido:** Es muy importante y debe cumplir con las siguientes características como lo son: la velocidad en el espacio anular debe ser suficiente para remover los recortes y la velocidad alcanzar la potencia en la barrena la cual no debe ser demasiada para no erosionar la formación.
- **Potencia hidráulica:** En relación a la ROP, para valores bajos de potencia hidráulica se tiene un incremento en la tasa de penetración, a valores intermedios un aumento mayor y a valor alto de HHP se presenta un valor bajo de la ROP.

3) Factores mecánicos

- **Peso sobre la barrena:** De diversos estudios se desprendió que el peso sobre la barrena es el factor más importante para determinar la tasa de penetración, limitada por la hidráulica existente en el pozo.
- **Velocidad de rotación:** No se tiene bases claras de su efecto sobre la ROP, pero estudios muestran que la velocidad de perforación aumenta de forma proporcional con la velocidad de rotación.

4) Barrena

- **Tipo de barrena:** Para seleccionar una barrena adecuada se debe realizar un minucioso estudio de las características de la perforación como geología, esfuerzos presentes, elasticidad, etc.
- **Desgaste de la broca:** Es un limitador muy importante ya que su desgaste disminuye la tasa de penetración ROP, aunque este problema depende de las condiciones de operación.

Cabe de notar que esta clasificación no es estricta y está dada por cambios en el proceso de perforación, debido a que algunas variables inalterables se pueden convertir en alterables, un ejemplo de ello es cuando cambiamos el lodo de perforación esto hace que se pueda utilizar otra barrena, en este caso los esfuerzos internos de la roca permanecen constantes pero las propiedades de perforabilidad son alteradas.

Para la detección de los limitadores de la perforación es necesario:

- 1) Llevar un control de todos los limitadores de la perforación.
- 2) Hacer un listado de los limitadores de acuerdo a si el ROP: baja, sube o es variable; lo cual nos sirve para detectar más rápido la causa de fallas operacionales.
- 3) Realizar pruebas de rutina a todos los equipos, herramientas y materiales del equipo de perforación.

Tabla 3: Resumen de los limitadores de la ROP.

<i>Alterables</i>	<i>Inalterables</i>
<u>Propiedades del lodo de perforación</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Tipo ○ Contenido de sólidos ○ Viscosidad ○ Pérdida de filtrado ○ Densidad ○ Contenido de aceite 	<u>Entorno</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Clima ○ Localización ○ Disponibilidad de agua ○ Profundidad
<u>Hidráulica</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Presión en las bombas ○ Gasto del fluido ○ Potencia hidráulica ○ Fuerza de impacto hidráulico ○ Velocidad en el espacio anular 	<u>Personal</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Capacidad ○ Eficiencia ○ Entrenamiento ○ Motivación ○ Relación empresa-trabajador ○ Factores psicológicos
<u>Factores mecánicos</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Peso sobre barrena ○ Velocidad de rotación 	<u>Equipo de perforación</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Condiciones ○ Capacidad ○ Flexibilidad, grado de automatización ○ Potencia
<u>Barrena</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Tipo de barrena ○ Desgaste de la barrena 	<u>Características de la formación</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Esfuerzos de la roca ○ Elasticidad ○ Tendencia a embolamiento ○ Permeabilidad ○ Contenido de fluidos/Presión de formación ○ Porosidad ○ Temperatura

Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

4. ESFUERZOS COMPRESIVOS DE LA ROCA

La roca está compuesta por un esfuerzo compresivo de la roca no confinado y el esfuerzo compresivo confinado, estas se detallaran en los subíndices siguientes.

4.1 ESFUERZO COMPRESIVO SIN CONFINAMIENTO DE LA ROCA

Este esfuerzo es un aspecto fundamental en la mecánica de rocas ya que este ayuda a la determinación del máximo esfuerzo que soporta la roca, en la figura mostrada seguidamente se puede denotar que el punto más alto corresponde a el UCS, este es utilizado en problemas de geomecánica, tales como la estabilidad del pozo, producción de arena, selección de barrena, etc. Este UCS puede ser determinado en laboratorio a partir de pruebas de esfuerzos triaxiales en muestras cilíndricas de roca tomadas del sitio de interés, como se muestra en la ilustración 6.

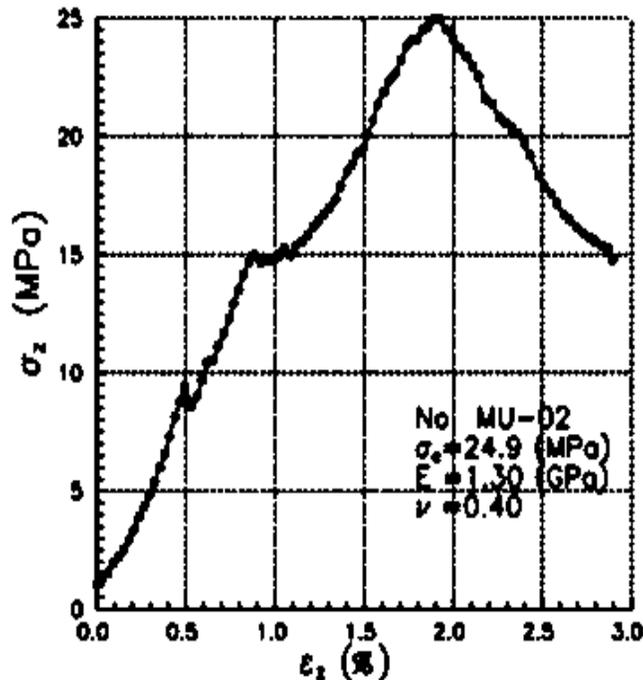


Ilustración 6: Prueba de laboratorio para UCS

Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

Se muestra una prueba de laboratorio donde se relaciona el esfuerzo de la roca en forma porcentual con la fuerza aplicada, en esta prueba se obtienen los datos que se grafican y se determina el punto más alto que corresponde a el esfuerzo compresivo de la roca.

4.1.1 Cálculo

A continuación se muestra algunas ecuaciones para la determinación del esfuerzo compresivo sin confinamiento de la roca, a partir de registros geofísicos para diferentes tipos de roca, en estos se tiene en cuenta la porosidad como se ilustra en la tabla 4 y el delta de tiempo obtenidos en el registro sísmico.

Tabla 4: Cálculo de UCS con distintos autores

Ec.	UCS (MPa)	Región	Comentario	Referencia
1	$1200\exp(-0.036\Delta t)$	Australia	Arenas de grano fino con cualquier rango de porosidad	McNally (1987)
2	$227\exp(-10\phi)$	---	Arenas con un rango $290 < UCS < 52200\text{psi}$ y $0.002 < \phi < 0.33$	Chang et. al. (2006)
3	$0.77(304.8/\Delta t)^{2.93}$	Mar del Norte	Desarrollada para arcillas con alta porosidad del Terciario	Horsud (2001)
4	$1.35(304.8/\Delta t)^{2.6}$	Global	Arcillas	Chang et. al. (2006)
5	$(7682/\Delta t)^{1.82}/145$	---	Desarrollada para calizas y dolomías	Militzer & Stoll (1973)
6	$135.9\exp(-4.8\phi)$	---	Desarrollada para calizas y dolomías con porosidad moderada ($0 < \phi < 0.2$) y altos UCS ($10 < UCS < 300\text{MPa}$)	Chang et. al. (2006)

Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011, 117p.

4.2 ESFUERZO COMPRESIVO CONFINADO DE LA ROCA

Esta es la fuerza aplicada sobre una área determinada para cizallar la roca a presión atmosférica esta es también conocida como la resistencia a la compresión triaxial, en la ilustración 7 se muestran los esfuerzos a los cuales es sometido la roca.

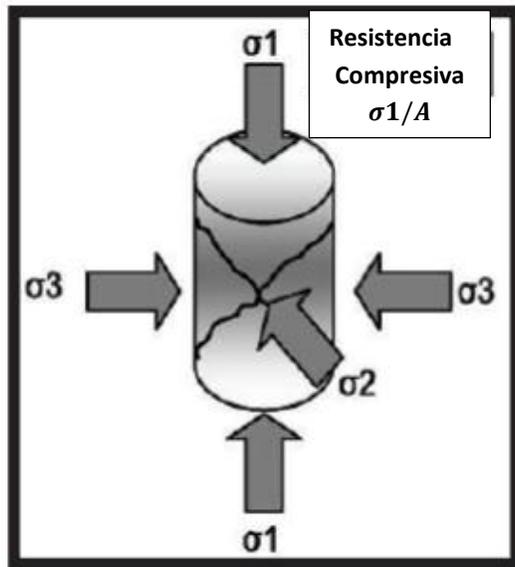


Ilustración 7: Resistencia confinada de la roca
Fuente: Halliburton, Mecánica de Rocas

La ilustración 7 nos muestra 3 formas de aplicar resistencia compresiva confinada a la roca es por ello que uno de los métodos de obtención son la prueba triaxial, la cual se realiza en laboratorio incrementando la carga axial y de confinamiento hasta alcanzar el esfuerzo hidráulico recomendado.

4.2.1 Cálculo

Para calcular este parámetro del esfuerzo compresivo de la roca confinada es necesario contar con los siguientes registros geofísicos:

- Registro eléctrico sísmico.
- Registro de densidad.
- Porosidad neutrónica.
- Registro de presión de poro.

Para esto ya existen software especializados para su cálculo entre el cual encontramos a el SPARTA, que es un mecanismo geomecanico el cual tiene automatizado los modelos de litología, permeabilidades, porosidad y compresibilidad

5. SEVERIDAD INTERFACIAL

La severidad interfacial se da cuando hay inclusiones o capas duras en la formación que provoca choques axiales y por consiguiente rompe los cortadores de la broca. La figura 8 ilustra cuando ocurre este fenómeno. Este daño se produce ya que la fuerza de la broca se concentra en el cortador el cual se pone en contacto con el material duro causado este problema.

Para entender mejor en una capa uniforme la carga que se ejerce en la cara del cortador es de igual magnitud a la fuerza de compresión de la roca, en cambio en una formación dura la carga en el punto alto ocurre en los puntos del cortador o dientes de la broca, haciendo que la fuerza compresiva de la roca sea mayor.

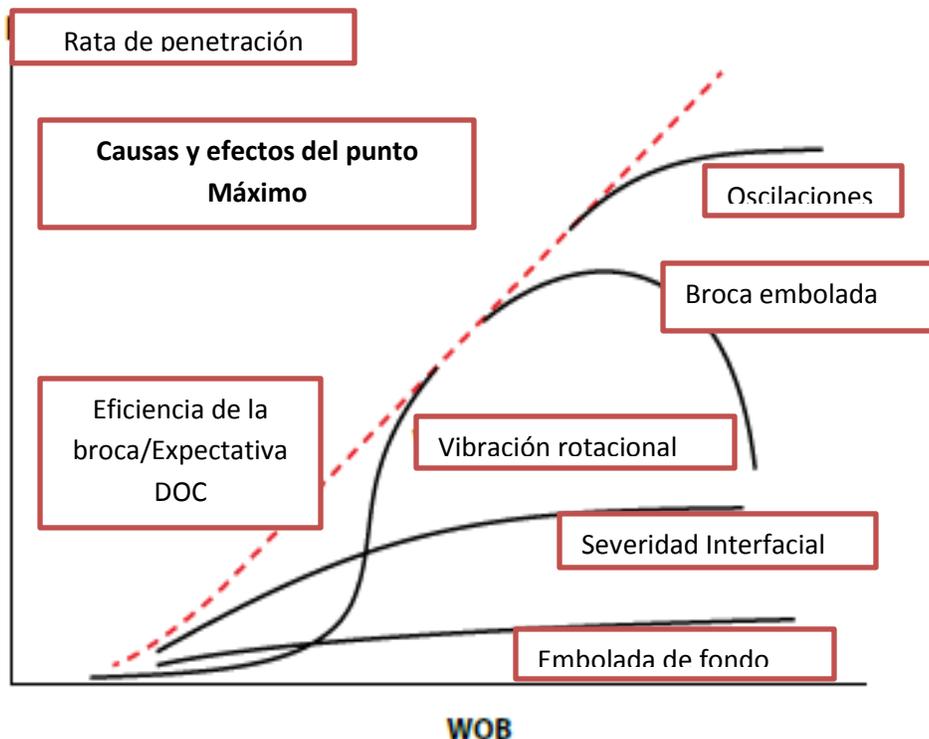


Ilustración 8: Representación de los efectos de la ROP vs WOB
Fuente: Drilling Systems automation technical section

La ilustración 8 nos muestra una gráfica en la cual en el eje de las abscisas se encuentra el WOB y en el eje de las ordenadas ROP con datos de un pozo el que se desarrolla la metodología de la energía mecánica específica, en ella se evidencian los problemas de perforación a una baja eficiencia de la roca y a una profundidad de corte (DOC) variable.

5.1 COMO EVITAR LA SEVERIDAD INTERFACIAL

Para evitar este problema de la perforación aplicando la metodología de energía mecánica específica (**MSE**), es necesario reducir el peso sobre la broca (**WOB**) para de esta manera limitar el daño sobre los dientes de la broca. Otro procedimiento que se puede llevar a cabo es operar la broca a valores moderados de **RPM**, se muestra en la ilustración 9.

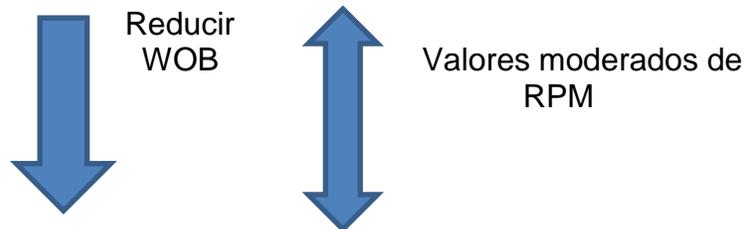


Ilustración 9: Características para evitar la severidad interfacial

Tabla 5: Características de los problemas en la MSE

TIPO	WOB	RPM	Concern
Vibración rotacional	↑	↓	Si
Oscilaciones	↓	↑	Si
Embolada de fondo	↓	↑	No
Severidad Interfacial	-	↑	No
Broca embolada	↓	-	Puede ser

Fuente: Drilling Systems automation technical section

Este problema de perforación en la MSE no lleva al fracaso de la operación, por lo cual es fácilmente manejable con lo expuesto anteriormente, a continuación se presentan algunas características propicias para su detención:

- Es encontrado generalmente en pozos verticales en intervalos cortos de la formación.
- En pozos donde la fuerza general compresiva de la roca esta alrededor de 10 a 20 Ksi.

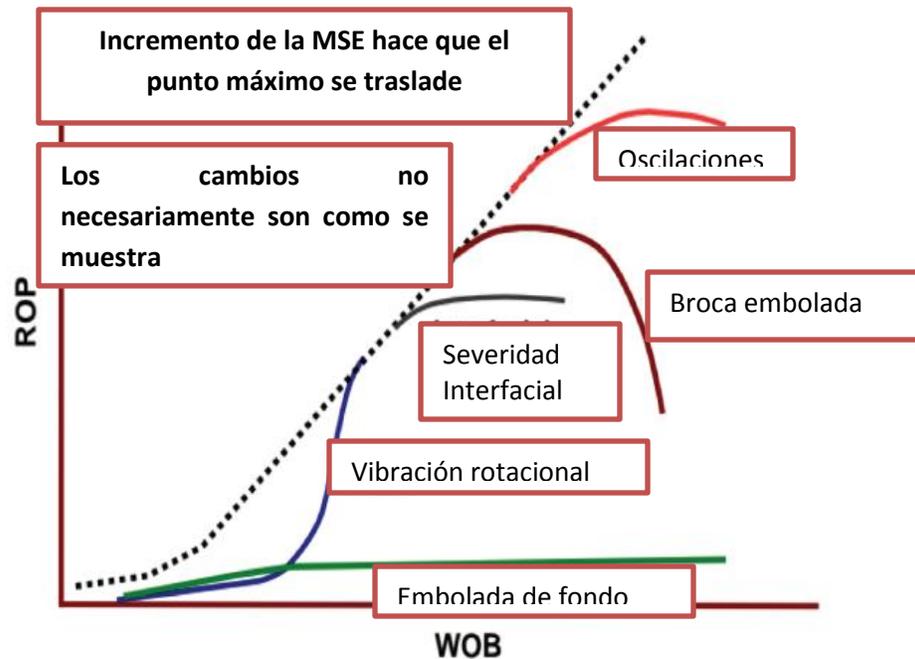


Ilustración 10: Problemas de la perforación
Fuente: Drilling Systems automation technical section

La ilustración 10 nos muestra una gráfica WOB vs ROP en donde se presentan todos los problemas de una perforación al utilizar la metodología de la energía mecánica específica (MSE), en ella se visualiza un aumento de la MSE que provoca un alejamiento del Punto máximo, al comportarse así los problemas de la MSE no se distribuyen en el gráfico en el orden indicado, en este caso la severidad interfacial fue desplazada de la gráfica por la vibración rotacional.

6. EJEMPLO APLICATIVO

Se realizó una perforación de un pozo ubicado en la Región Norte de Petróleos mexicanos perforado en la parte Oriental de la Cuenca Terciaria de Veracruz, el cual se llamó pozo 1, en la ilustración 11 se muestra su ubicación.



Ilustración 11: ubicación del pozo 1

Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

6.1 CÁLCULO ROP MÉTODO DE WARREN

- En la tabla 6 se muestra los parámetros utilizados para calcular a, b y c

Tabla 6: Datos de entrada cálculo ROP método Warren

ROP (ft/h)	WOB (ton)	WOB (lb)	RPM	D (in)	UCS (psi)
114.93	2	4409.245	120	12.25	200
139.36	2	4409.245	120	12.25	220
101.21	2	4409.245	120	12.25	250

Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

- Posteriormente con dichos valores y utilizando la ecuación y se obtuvieron distintos puntos variando b entre 0.1 a 1.0, las cuales se graficaron y se obtuvo la ilustración 12, en ella se incluyen las líneas de tendencia.

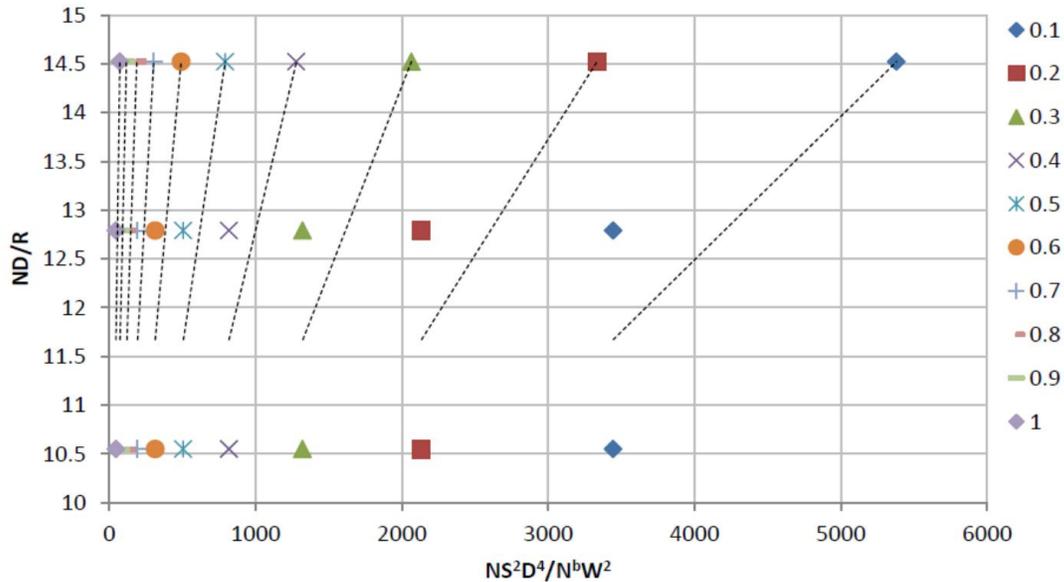


Ilustración 12: Grafica obtención de parámetros a, b y c
 Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

- De la ilustración 12, salieron las siguientes líneas de tendencia y valores de a, b y c cuyas ecuaciones se muestran en la tabla 7

Tabla 7: Ecuaciones de las líneas de tendencia Warren

Ecuación	A	b	c
$y = 0.00147x + 6.59384$	0.00147	0.1	6.59384
$y = 0.00238x + 6.59384$	0.00238	0.2	6.59384
$y = 0.00384x + 6.59384$	0.00384	0.3	6.59384
$y = 0.00620x + 6.59384$	0.00620	0.4	6.59384
$y = 0.01000x + 6.59384$	0.01000	0.5	6.59384
$y = 0.01614x + 6.59384$	0.01614	0.6	6.59384
$y = 0.02605x + 6.59384$	0.02605	0.7	6.59384
$y = 0.04205x + 6.59384$	0.04205	0.8	6.59384
$y = 0.06787x + 6.59384$	0.06787	0.9	6.59384
$y = 0.10955x + 6.59384$	0.10955	1.0	6.59384

Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

- Posteriormente con dichos ecuaciones y parámetros se obtienen nuevamente los valores para realizar una comparación entre el valor calculado y el real, en este caso se tomó el error de cada ecuación y su promedio, para obtener un valor de b, la ilustración 13 muestra este paso, de esta se puede observar que el menor error se encuentra en el valor de b que va de 0.6 a 0.8.

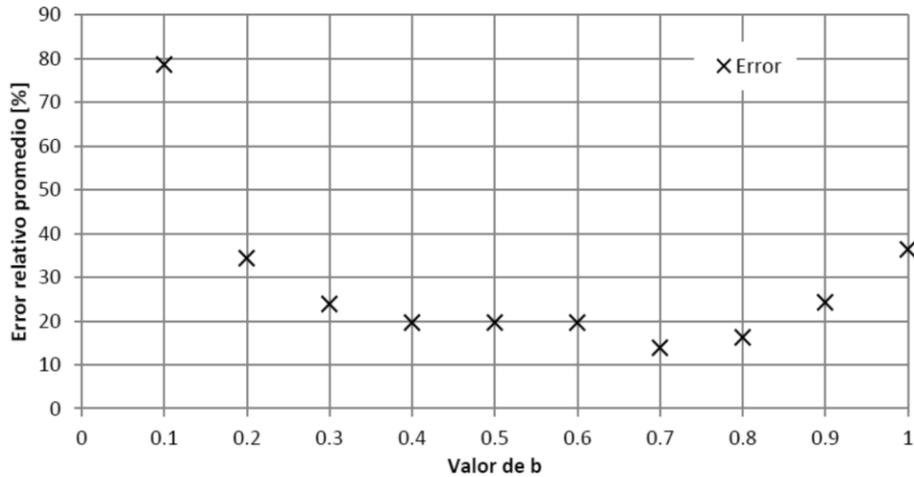


Ilustración 13: Obtención del valor b con el error porcentual
Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

- Para reducir el error realizar una ilustración 13 con un refinamiento de 0,01 entre los valores de 0,6 a 0,8 como se muestra en la ilustración 14.

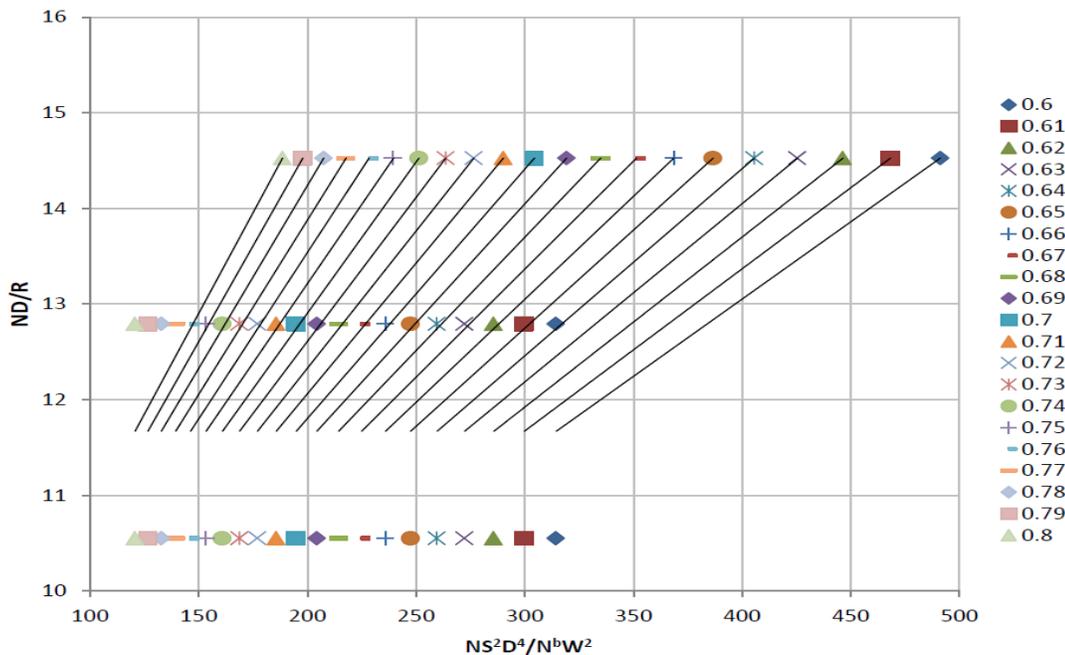


Ilustración 14: Ajuste de obtención de los valores
Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

- Tras realizar la gráfica anterior y obtener las ecuaciones y hallar el error de cada ecuación se obtuvieron los siguientes valores de los coeficientes a, b y c que se muestran la tabla 8:

Tabla 8: Valores obtenidos de a, b y c.

a	b	c
0.02257	0.67	6.59634

Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

- Se sustituyen los valores en la ecuación 1 :

$$ROP = \left(\frac{aUCS^2D^3}{RPM^bWOB^2} + \frac{C}{RPM D} \right)^{-1}$$

$$ROP = \left(\frac{(0,02257)200^2(12,25)^3}{120^{0.67}4409,245^2} + \frac{6.59634}{120(12,25)} \right)^{-1}$$

$$ROP = 125,93 \text{ ft/h}$$

El valor obtenido por el método de Warren comparado con el valor de referencia de los datos de entrada de ROP 114,93 ft/h está muy alejado, en el desarrollo de este método se tomaron 2 valores más para calcular ROP, en los demás métodos como lo son el de Bingham, Bourgoyne y Young y MSE se realiza con un solo dato, este valor de 125,93 ft/h tiene un error del 9,5% ,lo que da como resultado estar cerca del punto máximo que causaría que la transferencia de energía de la broca sea restringida y que no se puede aumentar más el ROP.

6.2 CÁLCULO ROP MÉTODO DE BINGHAM

Para el desarrollo del modelo matemático de Bingham necesitamos los datos registrados en la tabla 9 mostrada a continuación:

Tabla 9: Datos entrada método Bingham

K	0.8008
WOB	4409,245
RPM	120
D	12,25
a5	0,75
a6	0,95

Se desarrolla el siguiente procedimiento descrito en la ecuación 5:

$$ROP = K \left(\frac{WOB}{D} \right)^{a_5} \left(\frac{RPM}{60} \right)^{a_6}$$

$$ROP = 0.8008 \left(\frac{4409,245}{12.25} \right)^{0.75} \left(\frac{120}{60} \right)^{0.95}$$

$$ROP = 127,842 \text{ ft/h}$$

El valor obtenido por el método de Bingham comparado con el valor de referencia de los datos de entrada de ROP 114,93 ft/h está muy alejado de los datos de campo, , este valor de 127,842 ft/h tiene un error del 11,3% ,lo que nos indica que es un método sencillo y de malos resultados al utilizar una ecuación empírica y que es aplicable a valores bajos de WOB y RPM .Esto afectaría ocasionando igualmente que en el método de Warren que la transferencia de energía a la broca sea restringida y no se pueda aumentar ROP.

6.3 CÁLCULO ROP MÉTODO DE YOUNG Y BOURGOYNE

A continuación en la tabla 10 se presenta los valores a tomar para desarrollar este modelo matemático, estos fueron obtenidos por múltiples datos de campo y simulaciones en laboratorio.

TABLA 10: Coeficientes de Young y Bourgoyne

Parámetro	Valores Estándar	Coeficientes	
		Límite inferior	Límite superior
$(RPM_{sf})_N$	100 [rpm]	n/a	n/a
TVD_N	10.000 [ft]	n/a	n/a
EPP_N	9 [ppg]	n/a	n/a
$\left(\frac{WOB_{sf}}{OD_{bit}}\right)_N$	4 [klbf/ in]	n/a	n/a
$(F_j)_N$	1.000 [lbf]	n/a	n/a
a_1	n/a	0.5	1.9
a_2	n/a	0.000001	0.0005
a_3	n/a	0.000001	0.0009
a_4	n/a	0.000001	0.0001
a_5	n/a	0.5	2
a_6	n/a	0.4	1
a_7	n/a	0.3	1.5
a_8	n/a	0.3	0.6
Relative error	n/a	n/a	

Fuente: Espinosa. Saúl Eduardo. Trabajo de grado, México, 2011,117p.

Para el desarrollo el modelo matemático necesitamos los datos registrados en la tabla 11 mostrada a continuación:

Tabla 11: Parámetros de perforación

TVD	4985,3	ft
gp	9,5	ppg
D	12,25	In
ECD	9,79	ppg
Peso mínimo	1000	Lbf
WOB	4409,245	Lbf
H dientes	19	mm
F impacto	1200	Lbf

El primer paso es el cálculo de f_1 :

$$f_1 = e^{2.303a_1}$$

$$f_1 = e^{2.303*1.2}$$

$$f_1 = 15,85 \text{ ft/h}$$

2. cálculo f_2 :

$$f_2 = e^{2.303a_2(10000-TVD)}$$

$$f_2 = e^{2.303*0.0004*(10000-4985.3)}$$

$$f_2 = 101,447 \text{ ft/h}$$

3. cálculo f_3 :

$$f_3 = e^{2.303a_3 D^{0.69}(gp-9.0)}$$

$$f_3 = e^{2.303*0.009*12.25^{0.69}(9.5-9.0)}$$

$$f_3 = 1,0601 \text{ ft/h}$$

4. cálculo f_4 :

$$f_4 = e^{2.303a_4 TVD(gp-ECD)}$$

$$f_4 = e^{2.303*0.001*4985.3*(9.5-9.79)}$$

$$f_4 = 0,7168 \text{ ft/h}$$

5. cálculo f_5

$$f_5 = \left(\frac{\left(\frac{WOB}{D} \right) - \left(\frac{WOB}{D} \right)_t}{4 - \left(\frac{WOB}{D} \right)_t} \right)^{a_5}$$

$$f_5 = \left(\frac{\left(\frac{4409.245}{12.25} \right) - 1000}{4 - 1000} \right)^{0.75}$$

$$f_5 = 0,7177 \text{ ft/h}$$

6. cálculo f_6

$$f_6 = \left(\frac{RPM}{60} \right)^{a_6}$$

$$f_6 = \left(\frac{120}{60}\right)^{0.95} = 1,932 \text{ ft/h}$$

7. cálculo f7

$$f_7 = e^{-a_7 h}$$

$$f_7 = e^{-0.3 * (19/2.54)}$$

$$f_7 = 0,106 \text{ ft/h}$$

8. cálculo f8

$$f_8 = \left(\frac{F_j}{1000}\right)^{a_8}$$

$$f_8 = \left(\frac{1200}{1000}\right)^{0.6} = 1,115 \text{ ft/h}$$

- Ahora si después del desarrollo de estas ecuaciones se procede a calcular la tasa de penetración ROP.

$$ROP = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \dots \dots f_8$$

$$ROP = 122,94 \text{ ft/h}$$

El valor obtenido por el método de Bingham y Young comparado con el valor de referencia de los datos de entrada de ROP 114,93 ft/h es muy cercano, este valor de 122,94 ft/h tiene un error del 6,9% ,lo hace un método muy confiable ya que se tiene en cuenta en sus ecuaciones presiones anormales, compactación de la roca, así como la hidráulica y desgaste de la broca .Esto nos proporciona desarrollar una prueba donde la profundidad de corte (DOC) es adecuada para estabilizar el desempeño de la broca ,lo que conlleva a mantener la eficiencia de la broca al aumentar el WOB hasta encontrar el punto máximo.

6.4 CÁLCULO ROP MÉTODO DE MSE

Para el desarrollo del modelo matemático de MSE necesitamos los datos registrados en la tabla 12 mostrada a continuación:

Tabla 12: Datos entrada método MSE

WOB	4409.245
rpm	120
d	12,25
μ	0,6
ROP	114,93

Se desarrolla el siguiente procedimiento descrito en la ecuación 16 para calcular el torque:

$$T = \frac{\mu * D * WOB}{36}$$

$$T = \frac{0,6 * 12,25 * 4.409245}{36}$$

$$T = 0,9 \text{ Lbsft}$$

Se desarrolla el siguiente procedimiento descrito en la ecuación 15 para calcular la MSE:

$$MSE = \frac{480TRPM}{D^2ROP} + \frac{4WOB}{\pi D^2}$$

$$MSE = \frac{480 * 0,9 * 120}{12,25^2 * 114,93} + \frac{4 * 4,409245}{\pi * 12,25^2}$$

$$MSE = 3,03 \text{ psi}$$

Se desarrolla el siguiente procedimiento descrito en la ecuación 17 para calcular la ROP:

$$ROP = \frac{13.33 * T * RPM}{D * \left(\frac{MSE}{WOB} - \frac{1}{\pi D^2} \right)}$$

$$ROP = \frac{13.33 * 0,9 * 120}{12,25 * \left(\frac{3,03}{4,409245} - \frac{1}{\pi * 12,25^2} \right)}$$

$$ROP = 113,867 \text{ ft/h}$$

El valor obtenido por el método de MSE comparado con el valor de referencia de los datos de entrada de ROP 114,93 ft/h es muy cercano, este valor de 113,867 ft/h tiene un error del 0,9%, lo hace un método muy confiable y con mayor exactitud ya que se cuenta con registros y datos de pozo en campo.

6.5 TABLA DE RESULTADOS

La tabla 13 nos muestra los datos obtenidos de ROP por los distintos métodos de predicción, en el cual se menciona un error porcentual que se calcula así:

$$Error(\%) = \frac{v_{calculado} - v_{real}}{v_{real}}$$

Tabla 13: Datos obtenido al realizar el ejercicio

	ROP(ft/h)	Error (%)	Factibilidad
Dato de la prueba	114,93		
Método de Warren	125,93	9,5	Mala
Método de Bingham	127,84	11,3	Mala
Método de Bourgoyne y YOUNG	122,94	6,9	Buena
Método de MSE	113,86	-0,9	Buena

RECOMENDACIONES

- Para el desarrollo de los modelos de predicción se deben incluir más características como la permeabilidad, la heterogeneidad de la formación, para así obtener parámetros óptimos en la perforación en formaciones heterogéneas, anormales o gran contenido de recortes.
- Se debe contar con mayor cantidad de métodos de predicción en tiempo real ,ya se cuenta solo con el método de Young y Bourgoyne y MSE, así al contar con solo estos métodos es difícil de comparar y no se tendría un valor óptimo con un error porcentual bajo.
- Se debe tomar más datos de campo para el desarrollo del método de Warren, esta se componía solo de 3 datos, como mínimo tener en cuenta de 15 a 20 valores de ROP.

CONCLUSIONES

- Se analizó los métodos de predicción de ROP, los cuales son viables en general a la mayoría de formaciones ,en el ejercicio se muestra como el valor de entrada de ROP que corresponde a 114,93 ft/h se modela bien con el método de la energía mecánica específica, el cual tiene un error mínimo.
- Se obtuvo que el método de Bingham es el modelo más alejado del dato real de ROP el cual tiene un error del 11,3%, esto se presenta por su poca integración de parámetros de perforación.
- Se obtuvo que estos valores de ROP que se hallaron en el ejercicio están acorde a la tasa de penetración de un pozo antes de llegar al punto máximo, por lo cual se determina que la perforación está en una profundidad de corte adecuada.
- Los datos de ROP obtenidos para este caso por el método de Warren y Bingham presentan una factibilidad mala debido a las condiciones donde se localiza, aunque en otras condiciones podría ser viable.

Nomenclatura

Nombre	Simbología	unidades
Tasa de Penetración	ROP	ft/h
Revoluciones por minuto en la broca	RPM	(rev/min).
Peso sobre la broca	WOB	Lbs
Constantes de diseño de broca a	a	adim
Constantes de diseño de broca b	b	adim
Constantes de diseño de broca c	c	adim
Resistencia compresiva no confinada de la roca	UCS	psi
Constante de proporcionalidad	K	adim
Diámetro de la broca	D	in
Efecto de la dureza de la formación y tipo de broca en la ROP	f_1	ft/h
Coefficiente por resistencia de la formación	a_1	adim
Incremento de esfuerzos de la roca debido a la compactación con h	f_2	ft/h
Coefficiente por efectos de consolidación	a_2	adim
Profundidad vertical verdadera	TVD	ft
Compactación en formaciones presionadas anormalmente	f_3	ft/h
Coefficiente por efectos de sobrepresión	a_3	adim
Densidad equivalente de presión poral	gp	Lbs/gal
Efecto de la compactación en la ROP	f_4	ft/h
Coefficiente por efectos de Presión Diferencial	a_4	adim
Densidad equivalente de circulación	ECD	Lbs/gal
Efecto de WOB y RPM	f_5	ft/h

sobre la ROP		
Coeficiente por efectos del peso sobre la broca y el diámetro de la broca	a_5	adim
Peso mínimo sobre la broca	$(WOB/D)_t$	Lbs
Efecto de WOB y RPM sobre la ROP	f_6	ft/h
Coeficiente por efectos de la velocidad de rotación	a_6	adim
Efecto del desgaste de la broca sobre la ROP	f_7	ft/h
Coeficiente por efectos de desgaste de la broca	a_7	adim
Altura fraccional de los dientes de la broca	h	in
Efecto de la hidráulica de la broca sobre la ROP	f_8	ft/h
Coeficiente por efectos de la hidráulica de la broca	a_8	adim
Fuerza de impacto hidráulica por debajo de la broca	F_j	Lbs

BIBLIOGRAFIA

Benavides. M. J., Ingeniería de petróleos, Quito, 2015,198p. Trabajo de grado (Implementación de la energía mecánica específica (MSE) para la optimización de los parámetros de perforación del campo palo azul).Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería en geología y petróleos.

BOURGOYNE,A.T.;CHENEVERET,M.E;MILLHEIM,K;YOUNG,F.S.Applied Drilling Engineering.SPE Text Book Series,Vol.1,Cap 5,1991.

Espinosa. S. E, Ingeniería de petróleos, México, 2011,117p.Trabajo de grado (Optimización de la perforación: conceptualización y diseño de un simulador de perforación).Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería.

Petrolera, I. (25 de Agosto de 2015). Ingeniería en petróleo. Obtenido de Perforando el pozo, cambios en la rata de perforación y chequeos de flujo: http://ingenieraenpetroleo.blogspot.com.co/2015/08/perforandoel-pozocambios-en-la-rata_25.html

Portilla Esteban, Suarez Fernando, Corzo Reinel. Metodología para la optimización de parámetros de perforación a partir de propiedades geomecánicas.Vol.10, No 2(Jul 2012), pp 5/11.

Silva J y Bahamón S. Ingeniería de petróleos, Neiva, 2017, 88p. Trabajo de grado (Análisis de la energía mecánica específica (MSE) aplicada a la optimización de la perforación de pozos petroleros).Universidad Surcolombiana. Facultad de ingeniería.

Teale, R. (marzo de 1965). The Concept of Specific Energy in Rock Drilling.International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &Geomechanics Abstracts 2, 57-73. DOI:[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(65\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(65)90022-7)

WARREN T.M (1981), Drilling Model for Soft –Formation Bits. Paper SPE 8438 of AIME. DOI: <https://doi.org/10.2118/8438-PA>.

WARREN T.M (1987), Penetration Rate Performance of Roller Cone Bits, Paper SPE 13259, Drilling Engineering. DOI: <https://doi.org/10.2118/13259-PA>

Young, F.S.,”Computerized Drilling Control”, J. Pet. Tech., pp.483-496,Apr.1969. DOI:<https://doi.org/10.2118/2241-PA>

Young, F.S., Gray, K.E., “Dynamic filtration during microbit drilling,”Trans. AIME (1967) Vol. 240, 1209. DOI:<https://doi.org/10.2118/1518-PA>