

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE PETROLEO

ANALISIS Y GENERACION DE UN MODELO PARA UNA  
PERFORACION OPTIMA A TIEMPO REAL

TESIS PRESENTADA POR

JORGE ROLANDO MORALES PINTO

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE PETROLEO

Promocion 1987-II

LIMA - PERU

1989

## INDICE GENERAL

Prefacio.

0. Introducción	1
●.1 Objetivo y contorno	1
0.2 Antecedentes	3

## CAPITULO I GENERALIDADES

1.1 Definición y filosofía de la perforación óptima a tiempo real.	4
1.1.1 Definición	4
1.1.2 Filosofía	4
1.2 Procedimiento, Hipótesis y Metodología.	6
1.2.1 Procedimiento e Hipótesis	6
1.2.2 Metodología	9
1.3 Fundamentos del Análisis de Sistemas	10
1.3.1 Términos usados en el Análisis de Sistemas	10
1.3.1.1 Restricción	10
1.3.1.2 Componente	10
1.3.1.3 Atributos	11
1.3.1.4 Contorno del Sistema	11
1.3.1.5 El Sistema Total	12
1.3.1.6 Subsistemas	12
1.3.1.7 Objetivo	13
1.3.1.8 Recursos	13

1.3.2 El Análisis de Sistemas como procedimiento para la resolución de problemas.	14
1.3.3 El Análisis de Sistemas aplicado a la optimización de la perforación.	17
1.3.3.1 Objetivo Global	17
1.3.3.2 Contorno del Sistema	18
1.3.3.3 Recursos y Atributos	19
1.3.3.4 Componentes	19
1.3.3.5 Subsistemas	19

## CAPITULO II

### CONCEPTO GENERAL DE LA OPTIMIZACION APLICADA A LA PERFORACION ROTATIVA.

2.1 Variables de la perforación (Recursos y Contornos del Sistema)	26
2.2 Variables consideradas en la perforación óptima a tiempo real.	29
2.3 Interacción de las variables considerados.	31

## CAPITULO III

### LAS VARIABLES CONSIDERADAS EN LA PERFORACION OPTIMA QUE AFECTAN A LA VELOCIDAD DE PENETRACION

3.1 Variables Mecánicas	35
3.1.1 Tipo de Broca	35
3.1.1.1 Análisis del Sistema	35
3.1.1.2 Mecanismo de fallamiento de la	

roca	37
3.1.1.3 Mecanismo de fallamiento de las rocas través de las brocas tricónicas.	38
3.1.1.4 Factores que afectan el enromamiento del diente.	42
3.1.1.4.1 Efecto de la altura del diente en la velocidad de enromamiento.	42
3.1.1.4.2 Efecto del peso sobre la broca en la velocidad de enromamiento del diente.	47
3.1.1.4.3 Efecto de la velocidad de rotación en la velocidad de enromamiento del diente.	50
3.1.1.4.4 Efecto de la hidráulica en la velocidad de enromamiento del diente.	51
3.1.1.4.5 Ecuación de la velocidad de enromamiento del diente. Ejemplo ilustrativo 3.1.	52
3.1.1.5 Factores que afectan a los insertos de carburo de tungsteno.	56



3.1.1.6 Factores que afectan la vida del cojinete. Ejemplo ilustrativo 3.2.	57
3.1.1.7 Análisis de los resultados obtenidos en los ejemplos ilustrativos 3.1 y 3.2. Ejemplo ilustrativo 3.3.	61
3.1.1.8 Modelo semiempírico de la vida del cojinete a fricción de las brocas a insertos. Ejemplo ilustrativo 3.4	67
3.1.1.9 Selección y Evaluación de brocas	76
3.1.2 Peso sobre la broca y velocidad de rotación.	77
3.1.2.1 Análisis del Sistema	77
3.1.2.2 Restricciones del Sistema	82
3.1.2.2.1 Longitud mínima requerida de lastrabarrenas para evitar el pandeo de la tubería de perforación. Ejemplo ilustrativo 3.5	82
3.1.2.2.2 El máximo producto permisible de peso sobre la broca por la velocidad de rotación, para evitar el falla-	

	miento instantáneo del cojinete a fricción.	89
3.1.2.2.3	El máximo producto permisible de peso so- bre la broca por la ve- locidad de rotación, compatible con el ca- ballaje hidráulico dis- ponible en la broca, para evitar la remo- lienda.	94
3.1.2.2.4	Velocidades de rota- ción críticas que cau- sen vibración, pandeo en la tubería de per- forar, desgaste exce- sivo, rápido deterioro y falla por fatiga.	101
	Ejemplo ilustrativo 3.6	
	Ejemplo ilustrativo 3.7	
3.1.3	Resumen	106
3.2	Variable Hidráulica	109
3.2.1	Análisis del Sistema	109
3.2.1.1	Objetivo del Subsistema	109
3.2.2	Teoría básica para una hidráulica óptima	110
3.2.2.1	Tipo de Métodos de programas hidráulicos óptimos.	111

3.2.2.2	Métodos que asumen la maximización de cierto criterio arbitrariamente establecido para estimar la limpieza del fondo del pozo.	114
3.2.2.2.1	Restricciones del Sub-sistema.	114
3.2.2.2.2	Máximo caballaje hidráulico en la broca	117
3.2.2.2.3	Máxima fuerza de impacto hidráulico.	121
3.2.2.2.4	Máxima velocidad en las boquillas de la broca	130
3.2.2.2.5	Número de Reynolds.	137
3.2.3	Procedimiento para calcular una hidráulica óptima teórica.	141
3.2.3.1	Datos de entrada	142
3.2.3.2	Procedimiento	143
	Ejemplo ilustrativo 3.8	
3.2.4	Procedimiento para calcular la hidráulica óptima a tiempo real.	155
3.2.4.1	Método de selección	156
	Ejemplo ilustrativo 3.9	
	Ejemplo ilustrativo 3.10	

CAPITULO IV  
ECUACION DE LA VELOCIDAD DE PENETRACION  
MODELOS MATEMATICOS

4.1 Modelos Matemáticos	205
4.1.1 Método de Regresión Múltiple de Bourgoy- ne y Young.	205
4.1.1.1 La Técnica de la Regresión Múl- tiple	211
Ejemplo ilustrativo 4.1	
4.1.2 Método de Regresión Lineal múltiple de Doiron, Tompkins y Watts.	223

CAPITULO V  
PARAMETROS OPTIMOS PARA UN MINIMO COSTO DEL PIE PERFORADO

5.1 Selección del peso sobre la broca y la veloci- dad de rotación óptimos	228
5.1.1 Pruebas de perforación o de penetrabili- dad, OT.	230
5.1.1.1 Procedimiento Práctico para tomar pruebas de penetrabilidad.	230
Ejemplo ilustrativo 5.1	
Ejemplo ilustrativo 5.2	
5.1.2 Cálculo de los parámetros mecánicos óp- timos para una broca con estructura cortante de acero.	237
5.1.2.1 Procedimiento del Método de	

Bourgoyne y Young para generar una tabla de costo por pie perforado.	240
5.1.2.2 Procedimiento Análítico de Bourgoyne y Young para calcular el peso sobre la broca y velocidad de rotación óptimas.	243
5.1.2.3 Aplicación del método de Bourgoyne y Young.	246
Ejemplo ilustrativo 5.3	
5.1.2.4 Análisis y Resumen de los resultados de la aplicación de la Teoría de Bourgoyne y Young a la formación Chira del Area de Carrizo.	267
5.1.3 Cálculo de los parámetros mecánicos óptimos para una broca con estructura cortante de insertos de carburo de Tungsteno.	284
5.1.3.1 Procedimiento del Método de Doiron, Tompkins y Watts.	284
5.1.3.2 Aplicación del método de Doiron, Tompkins y Watts.	287
Ejemplo ilustrativo 5.4	
5.1.3.3 Análisis y Resumen de los resultados de la aplicación de la Teoría de Doison, Tompkins y	

Watts al pozo 7368 Cuesta, formación Paríftas inferior.	296
---	-----

## CAPITULO VI

### GENERACION DEL MODELO PARA UNA PERFORACION OPTIMA A TIEMPO REAL

6.1 Determinación del Objetivo del Modelo	303
6.2 Construcción del modelo	303
6.2.1 Optimación Hidráulica	304
6.2.1.1 Recopilación de la información estadística	304
6.2.2 Optimación Mecánica	304
6.2.2.1 Recopilación de la Información estadística.	304
6.3 Recopilación de la información de pruebas	305
6.4 Balance entre la Energía mecánica e hidráulica	309

## CAPITULO VII

### ANALISIS ECONOMICO COMPARATIVO

7.1 Análisis económico comparativo con respecto a la broca de estructura cortante de acero, código IADC: 1-3-6, yacimiento: Carrizo, formación geológica: Chira	310
7.2 Análisis económico comparativo con respecto a la broca de estructura cortante de insertos de carburo de tungsteno, código IADC: 4-3-7,	

yacimiento: LEONES y CUESTA, formación geológica: Paríftas inferior.

311

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

CAPITULO IX

RECOMENDACIONES

CAPITULO X

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

## PREFACIO

El objetivo de la presente Tesis es el satisfacer los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero de Petróleo.

Debo especial agradecimiento al Ingeniero Don Félix Guerra Chávez por su incentivo para realizar el actual trabajo de Investigación.



## INTRODUCCION

### 0.1 Objetivo y Contorno.

El propósito de la presente Tesis es generar un modelo basado en teorías probadas que pueda ser aplicado directamente a tiempo real en las operaciones de perforación, con el fin de reducir los costos de operación al mínimo y en consecuencia nos permita hallar los parámetros mecánicos e hidráulicos óptimos apropiados.

El costo de las operaciones de perforación es uno de los principales componentes del costo de la exploración y desarrollo por petróleo y gas. Este desembolso se ha incrementado substancialmente en años recientes.

Al inferir un modelo para una perforación óptima con el fin de aplicarlos a una determinada formación geológica, estamos directamente involucrando métodos por los cuales podemos desarrollar las Teorías de optimización a tiempo real, lo que redundará en la reducción al mínimo del costo por pie perforado. Estadísticamente la aplicación de programas o modelos para mejorar los parámetros mecánicos e hidráulicos de perforación han significado

una reducción del 10 al 25% en los costos por pie perforado; este logro significativo puede y debe aplicarse directamente a la realidad de nuestros campos de petróleo y gas con el beneficio de ahorro de divisas y recursos.

Es imprescindible hacer notar la diferencia y por lo tanto la complejidad que encierra el proceso de optimización de la perforación a tiempo real con respecto a otras áreas tal como yacimientos y producción. Tal diferencia consiste que los resultados de la decisión del uso de determinado parámetro, luego de su cálculo apropiado, se contabiliza a los minutos de realizar la operación, mientras que en el área de yacimientos y producción desgraciadamente no se da el caso.

El análisis y generación del modelo se sustentará en procedimientos nuevos y conocidos. El estudio es básicamente bibliográfico pero tratando de aplicar los conocimientos teóricos en un determinado caso problema de la realidad nacional, como es reducir al mínimo el costo por pie perforado para una formación geológica de un determinado yacimiento.

Se definirá al sistema de tal manera que se asume que el fluido de perforación se utilizará en su estado óptimo, por lo tanto, se define al fluido de perforación así como al tipo de broca a emplear como una variable (no alterable). Estas asunciones simplifican el estudio y condiciona el presente trabajo de investigación. Los alcances de la presente tesis es generar un modelo práctico apropiado

para su uso en el campo para conseguir la optimización de la perforación a tiempo real.

## 0.2 Antecedentes.

Los trabajos de investigación que han sido fundamento para desarrollar el criterio de una perforación óptima fueron presentados en 1960 por Galle y Woods, quienes expusieron cómo seleccionar el mejor peso sobre la broca y velocidad de rotación para un costo mínimo por pie perforado; Kendall y Goins explicaron cómo calcular el tamaño de los orificios de las boquillas de la broca y la velocidad de circulación del fluido de perforación para maximizar la hidráulica. En 1973 Fullerton relaciona y compatibiliza los parámetros óptimos mecánicos e hidráulicos.

Los trabajos presentados posteriormente fueron un desarrollo de estas técnicas básicas.

Actualmente es necesario explicar el cómo y el por qué se debe utilizar estas técnicas de optimización, pues el Departamento de Perforación y el de Ingeniería de Petróleo de nuestra Empresa Estatal no recomiendan los parámetros mecánicos e hidráulicos, es pues con el fin de llenar este vacío que se analizó y generó un modelo en base a teorías probadas.

Para facilitar la aplicación de estas teorías se elaboró algoritmos en el lenguaje R.P.N. para la HP-41CV.

*degit*

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

#### 1.1 Definición y Filosofía de la perforación óptima a tiempo real.

##### 1.1.1 Definición.

La perforación óptima a tiempo real es el resultado del proceso lógico de analizar sistemáticamente los efectos y las interacciones de las variables durante la perforación, a través de un modelo matemático que permite alcanzar el máximo régimen adecuado de penetración, y lo más importante, es la reducción al mínimo del costo del pie perforado, es decir la obtención de la máxima eficiencia pero con un conveniente balance de las variables involucradas.

##### 1.1.2 Filosofía.

La filosofía de la perforación óptima a tiempo real consiste en que además de usar los datos del primer

pozo perforado como base de los cálculos y para la aplicación de técnicas óptimas al segundo o tercer pozo<sup>1</sup>, se debe registrar los parámetros característicos de la perforación, mediante pruebas tomadas en el pozo donde se pretenda realizar la optimización.

Esta filosofía dictamina que la planificación para la generación de un modelo para una perforación óptima a tiempo real debe ser canalizada de la siguiente forma:

a.- Los fluidos de perforación, en términos de la perforabilidad, limpieza y estabilidad del hueco perforado.

b.- La hidráulica, considerando al fluido de perforación disponible para proveer la debida hidráulica en la broca y también la limpieza y mantenimiento de la estabilidad del hueco perforado.

c.- El tipo de broca, con señalado énfasis primario en seleccionar la apropiada broca para una formación geológica específica.

d.- Luego que las tres condiciones previas se hayan conseguido, se proporcionará el peso sobre la broca y la velocidad rotatoria óptimos.

e.- Dependiendo de la formación geológica que se perfora, relacionar a tiempo real los efectos de variar la hidráulica óptima con la velocidad de penetración y el costo del pie perforado.

---

<sup>1</sup> J.L. Lummus.: "Drilling Optimization," J. Pet. Tech. (Nov 1970) 1380.

De acuerdo a las condiciones que se encuentre en el campo, debido a las particularidades de la operación de perforación o limitaciones del equipo, se deberá efectuar modificaciones en el modelo con la guía de la misma filosofía, por lo tanto: debe ponerse énfasis en obtener primero el fluido de perforación y la hidráulica mas apropiada, luego una debida selección de brocas, y por último una óptima combinación de peso-velocidad rotatoria de la broca<sup>2</sup>.

Es importante tomar en cuenta que, el costo mínimo del pie perforado resultará cuando las restricciones son impuestas de tal forma que no solamente se maximice la velocidad de penetración sino también la vida del equipo y la estabilidad del hueco, en algunos casos, si la vida del equipo y la estabilidad del hueco son maximizadas, se deberá aceptar un decrecimiento de la velocidad de penetración. En otras palabras, se debe desarrollar un modelo balanceado.

## 1.2 Procedimiento, Hipótesis y Metodología

### 1.2.1 Procedimiento e Hipótesis.

El análisis y generación del modelo se sustenta básicamente en un procedimiento de estudio de tipo bibliográfico por medio del cual se trata de aplicar los conocimientos teóricos en un determinado caso problema de la

<sup>2</sup> K. W. McDaniel y J. L. Lummus.: "Here's how to apply optimized - drilling techniques" Oil and Gas J. (Junio 14, 1971) 58.

realidad nacional, como es reducir al mínimo el costo por pie perforado para una formación geológica de una determinada área.

Se definirá al sistema de tal manera que se asume que el fluido de perforación se utilizará en su estado más óptimo, por lo tanto, se describe al fluido de perforación como una variable no alterable. Esta asunción simplifica el estudio y condiciona el presente trabajo de investigación.

Para poder orientar a la solución de la obtención de los parámetros óptimos de la perforación a tiempo real, se propone la siguiente Hipótesis:

El presente modelo a describir nos permite analizar y generar los parámetros óptimos en una determinada formación geológica a tiempo real.

Este patrón consta de los siguientes pasos:

Primero:

Usando los datos de perforación de formaciones similares de pozos vecinos, seleccionar apropiadamente el pozo en el cual se haya perforado más eficientemente la formación en estudio, es decir: Calcular y recopilar el menor costo por pie perforado. Este cálculo revela el efecto del cambio de las variables controlables disponibles para conseguir una perforación óptima<sup>3</sup>.

Segundo:

---

<sup>3</sup> David E. Korry.: "Optimizing deep drilling Programs", World Oil (Set. 1977) 54.

Recurriendo a la información obtenida en el primer paso, analizamos la hidráulica en la formación geológica de los pozos vecinos, determinado: el caudal, la velocidad anular, el caballaje hidráulico en la broca, caída de presión por fricción en el sistema de circulación, la presión disponible en superficie y la velocidad de penetración promedio. Este análisis define las condiciones existentes para la velocidad de flujo dadas ciertas restricciones tales como una combinación de boquillas de la broca, presión disponible en superficie, configuración de la sarta de perforación y propiedades del fluido de perforación<sup>4</sup>. También se debe registrar lo siguiente: Características de la formación geológica atravesada, tipo de broca, condiciones de operación, la constante promedio de la vida del cojinete, gradiente de presión del poro de la formación y peso específico del fluido de perforación<sup>5</sup>.

#### Tercero:

Dentro de las limitaciones del equipo se determina a tiempo real la hidráulica óptima para la formación geológica del pozo.

#### Cuarto:

De acuerdo a las brocas seleccionadas para el estudio y de acuerdo a una formación geológica, calcular a

---

<sup>4</sup> Korry: cit.

<sup>5</sup> A.T Bourgoyne, JR. y F.S. Young, JR.: "A multiple regression approach to optimal Drilling and abnormal pressure detection," Soc. Pet. Eng. J. (Agosto 1974) 371-384



tiempo real las combinaciones más óptimas de peso sobre la broca y velocidad de rotación, compatibles con la hidráulica óptima calculada en el paso anterior.

Quinto:

Dependiendo de la formación geológica que se perfora, relacionar a tiempo real los efectos de variar la velocidad de penetración debido al cambio de la hidráulica óptima disminuyendo el costo del pie perforado. Este estudio dictamina que las condiciones óptimas de operación de la bomba deben ser determinados de tal forma que se compare los incrementos del costo del combustible y el mantenimiento de las partes de la bomba con el incremento de la velocidad de penetración y la disminución del costo del pie perforado<sup>6</sup>.

### 1.2.2 Metodología.

La metodología a utilizar será el Análisis de Sistemas, por medio del cual demostraremos cómo diferentes factores están integrados dentro de un sistema y a su vez como estos factores conforman subsistemas.

Este método permite una correcta interpretación de la interacción de las diversas variables que afectan una perforación óptima, por lo tanto esta metodología se constituirá en una herramienta útil para la planificación, diseño y generación del modelo en cuestión.

<sup>6</sup> H.H. Doiron y J.D Deane.: "A new approach for optimizing Bit Hydraulics," SPE - 11677, Congreso Regional de California, Ventura, California, Marzo 23-25, 1983.

### 1.3 Fundamentos del Análisis de Sistemas<sup>7</sup>.

El análisis de sistemas consiste en descomponer toda operación o problema en actividades básicas que sean manejables. Para cada actividad básica se considera el objetivo del sistema, contorno operacional del sistema, recursos y restricciones del mismo.

#### 1.3.1 Términos usados en el análisis de sistemas.

##### 1.3.1.1 Restricción:

Definición.- Son todas las limitaciones dentro del sistema. Se puede ejercer algún control sobre algunas restricciones.

Significado.- Son todas las cosas que mantienen al sistema todo el tiempo fuera de su funcionamiento correcto o lo evitan. Generalmente son el límite máximo de la resistencia al esfuerzo de una parte del sistema.

Ejemplos.- El máximo caudal físico disponible de la bomba, la máxima presión disponible en superficie\*, la máxima vida útil de la broca, los tamaños disponibles de las boquillas de la broca, el máximo peso sobre la broca y velocidad de rotación compatibles.

##### 1.3.1.2 Componente:

Definición.- Es un objeto o entidad

<sup>7</sup> L. Douglas Patton y W.A. Abbott.: "Well completions and Workovers," H.B.J. (1985) 2.

\* Si se establece que el equipo de perforación no es parte del contorno

descrito por una determinada serie de parámetros llamados atributos. Los componentes tienen valores numéricos (atributos) que describen el estado del sistema.

Significado.- Parte del sistema que trabaja o tiene que apoyarse en él para ejecutar su operación.

Ejemplos.- El equipo de perforación, la broca, el fluido de perforación\*\*, la hidráulica, el peso sobre la broca y la velocidad de rotación, la velocidad de penetración.

#### 1.3.1.3 Atributos:

Definición.- Es la propiedad de un componente, descrito con valores numéricos.

Significado.- Generalmente usando números es como se describe las partes del sistema.

Ejemplos.- Una velocidad de penetración de 30 pies por hora, un peso sobre la broca de 20,000 libras, una broca con código IADC 437.

#### 1.3.1.4 Contorno del sistema:

Definición.- Se denomina contorno, a un grupo de componentes que no pertenecen al sistema, pero si lo pueden influenciar.

Significado.- Son las cosas que influyen o limitan al sistema, pero que no se puede ejercer ningún dominio sobre ellos. Se llama contorno también

-----  
\*\* Para el presente estudio consideramos al fluido de perforación como parte del contorno.

las restricciones fijas o establecidas.

Ejemplo.- El medio geográfico, presión de la formación, temperatura del reservorio, abrasividad de la formación, topes de las formaciones geológicas.

#### 1.3.1.5 El sistema total:

Definición.- Es un proceso constante formado por una serie de componentes que están relacionados entre si y sus atributos y con un número dado de restricciones, con la finalidad de producir un resultado específico en un determinado contorno.

Significado.- Es una serie de partes coordinadas para llevar a cabo un objetivo.

Ejemplos.- La perforación de una determinada formación geológica, el equipo de perforación, la hidráulica, las condiciones mecánicas de perforación (peso y velocidad rotatoria de la broca), la bomba del fluido de perforación.

#### 1.3.1.6 Subsistemas:

Definición.- Es el componente del proceso del sistema total, puede estar dividido en subsistemas mas detallados.

Significado.- Es una parte del sistema que está encadenado con otros subsistemas para constituir el todo.

Ejemplos.- La hidráulica de perforación, la bomba de fluido de perforación, el peso sobre la broca.

#### 1.3.1.7 Objetivo Globales:

Definición.- Se define como el propósito por el cual todos los componentes del sistema, atributos y sus interacciones han sido organizados.

Significado.- Es lo que se va a efectuar o llevar a cabo por el sistema, es algo con el cual se puede comparar rendimientos, regulaciones, metas afines.

Ejemplo.- Optimizar la perforación, reducir al mínimo el costo del pie perforado, optimizar los parámetros hidráulicos y mecánicos.

#### 1.3.1.8 Recursos:

Definición.- Es aquello sobre el cual depende el sistema para sostenerse o integrarse dentro del mismo. Los recursos son el reservorio general fuera del cual las acciones específicas del sistema pueden ser modificadas.

Significado.- Son todas las cosas que ayudan al sistema a lograr los objetivos. (género opuesto a la restricción).

Algunos recursos parecen ser parte del contorno; la diferencia principal entre recurso y contorno es que el recurso puede ser incrementado o mejorado en cambio el contorno es constante.

Ejemplo.- Recursos humanos, capital, divisas, equipo, experiencia, simuladores, pruebas de campo.

### 1.3.2 El análisis de sistemas como procedimiento para la resolución de problemas.

El análisis de los datos de perforación y sus características, así como también los datos del fluido de perforación, registros de brocas, reportes de reparación de las bombas, las definimos como antecedentes.

Los antecedentes son comparados con el rendimiento esperado de la perforación para determinar si los objetivos son alcanzados, y si no es así se debe buscar la razón que lo impiden. Este control a través de los antecedentes es el criterio básico del análisis de sistemas.

La gestión del sistema tiene que trabajar con la generación de modelos para el sistema, en estos patrones se debe considerar lo siguiente:

Los objetivos globales.

Contorno del sistema.

Recursos utilizables.

Componentes.

Restricciones potenciales.

El administrador fija los objetivos del Sistema, señala ciertos recursos que se utilizan para obtener componentes específicos y control del rendimiento del sistema.

El proceso del análisis de sistemas no es lineal, con unos aspectos más importantes que otros, si no todos los componentes se encuentran interrelacionados sin

que uno sea más preponderante que el otro.

Una ventaja obvia ya mencionada del método de análisis de sistema, es que divide al sistema total en subsistemas o componentes, proporcionando al analista el tipo de información que necesita para poder determinar si el sistema está operando apropiadamente y, si no, qué se podría hacer para subsanar el problema.

Este método ayuda a encontrar la causa del problema y diferenciarlo de los síntomas. En general, muchas de las fallas mecánicas son síntomas causados por una inapropiada aplicación, diseño o gestión del sistema. Por ejemplo se tiene dos bombas de fluido de perforación pero generalmente se utiliza solamente una de ellas a su máxima capacidad generando una mayor frecuencia de fallas mecánicas.

Se debería utilizar ambas bombas en paralelo al 60% de su capacidad de tal forma que disminuya la frecuencia de fallas mecánicas y se obtenga una mayor velocidad de flujo y posiblemente una mayor limpieza del fondo del hueco perforado.

Para sumarizar el método de análisis de sistemas para la solución de los problemas de la perforación exponemos lo siguiente:

- Contorno:

¿Esto afecta al sistema? (SI / NO)

Si es Si, ¿podemos controlarlo? (SI / NO)

Si es No, entonces esto es parte del contorno

- Objetivo: (medida del rendimiento)

¿Cuál es el rendimiento esperado?

¿Por qué no se está consiguiendo el rendimiento esperado?

¿Cuáles son las posibles decisiones futuras para mejorar el rendimiento?

- Recursos; componentes:

¿Qué operaciones están disponibles para retornar al nivel del rendimiento esperado?

¿Cuáles podremos usar?

- Restricciones:

¿Qué causa la falla?

¿Qué nos limita para obtener el rendimiento esperado?

¿Qué limitaciones pueden ser controlados o compensados?

- Antecedentes: (evaluación)

¿Cómo podemos conocer si la optimización alcanza sus objetivos?

¿Cómo compararemos los resultados con los esperados?

- Control a través de los antecedentes:

¿Cómo se mantendrá el nivel del rendimiento, una vez conseguido?

¿Qué se puede hacer para retornar al nivel, si



el análisis de los antecedentes muestra que el rendimiento está por debajo de lo esperado?

- La gestión, preparándose para el cambio:

¿Qué sucede si cambian los factores?

Uno de los aspectos más críticos de la gestión del sistema es el planeamiento para cambiar los modelos durante la optimación, nadie puede pretender tener toda una serie de objetivos globales en forma correcta todo el tiempo, la completa y exacta definición del contorno, la total y precisa determinación de los recursos (que pueden variar) y por último la exposición de los componentes, que se han usado.

### 1.3.3 El análisis de sistemas aplicado a la optimación de la perforación.

La definición del sistema estará enmarcado en la realidad peruana; varios recursos tales como equipo, logística, personal, divisas, pruebas de perforación y de hidráulica están considerados como contorno del sistema debido a las características actuales propias del País.

#### 1.3.3.1 Objetivo Global

Operar, reduciendo al mínimo el costo del pie perforado por medio de los parámetros mecánicos e hidráulicos óptimos; entendiendo que los parámetros óptimos, son aquellos con los que se puede conseguir el mínimo

costo compatible con las limitaciones del sistema.

### 1.3.3.2 Contorno del Sistema

Ubicación Geográfica

Clima

Profundidad final

- Desviación vertical permisible

Equipo de perforación\*

Flexibilidad del equipo de perforación

Temperatura del fondo del pozo

- Características de la formación perforada

Fluido de perforación

Supervisión

- Tiempo de conexión de un tubo de perforar

Tiempo de conexión de una barra de perforar

Tipo de broca

Experiencia del personal.

Tamaño del hueco perforado.

- Disponibilidad de agua dulce.

- Número de bombas disponibles.

- Eficiencia de la cuadrilla.

- Presión de la formación

Logística.

Gases corrosivos del fondo del pozo.

Datos de los pozos vecinos perforados.

- Divisas

-----  
Rangos de operación por encima de los límites físicos  
permisibles

- Pruebas tomadas de perforación
- Pruebas tomadas de hidráulica
- Regulaciones o políticas de la empresa.
- Presupuesto disponible

#### 1.3.3.3 Recursos y Atributos:

Métodos y técnicas de optimación.

- Pruebas de perforación.
- Pruebas de hidráulica.
- Datos de los pozos vecinos perforados con técnicas óptimas.

Programas diseñados para calculadoras programables.

La calculadora programable o la computadora portátil.

#### 1.3.3.4 Componentes:

La hidráulica.

- El peso sobre la broca.
- La velocidad rotatoria.
- La vida de la broca

#### 1.3.3.5 Subsistemas:

##### a) La Hidráulica:

Recursos y atributos:

Rangos de operación de la bomba del fluido de perforación:

- Presión de la bomba.
- Caballaje hidráulico.

Caudal o velocidad de circulación.

Caballaje hidráulico por pulgada cuadrada del área de la broca.

- Diametros de las camisas

Tamaño de los orificios o boquillas de la broca

Programas hidráulicos:

Máximo caballaje hidráulico en la broca con presión limitada.

Máxima fuerza de impacto a través de las boquillas con presión ilimitada.

- Número de Reynolds.

Restricciones:

Máxima presión disponible en superficie.

Máxima presión de estallamiento del sistema de circulación de superficie (tubo parado, unión giratoria etc).

Máximo caballaje hidráulico disponible en superficie.

Máximo caudal físico disponible en superficie.

- Tamaño de los diámetros de las camisas disponibles.

- Máximo caudal permisible para que el flujo sea laminar (caudal crítico) en el espacio anular entre la pared del pozo y la tubería de perforar.

- Velocidad anular mínima en el espacio anular

entre la pared del pozo y la tubería de perforación para levantar los detritus.

Mínimo caudal necesario para que el flujo sea turbulento en la tubería de perforación.

- Máxima corriente transversal para evitar daño a la broca y causar erosión y alta presión en el anular.

Máxima caída de presión a través de las boquillas de la broca para evitar su erosión.

Mayor consumo de combustible debido a un mayor caballaje hidráulico.

- Incremento en el costo de mantenimiento de la bomba por incremento de la presión y el caballaje.

b) El peso sobre la broca y la velocidad rotatoria:

Recursos y Atributos:

Número de lastrabarrenas

- Uso y diametro de la sarta de perforación.

Peso por pie de la lastrabarrena.

- Rango del tubo de perforación.

- Longitud de la Sarta de perforación

Potencia del motor de la masa rotatoria

Restricciones:

Longitud mínima de lastrabarrenas para evitar el pandeo de la tubería de perforación.

- El máximo producto permisible, de peso sobre

la broca en 1,000 libras por la velocidad de rotación en revoluciones por minuto, para evitar el fallamiento instantáneo del cojinete.

El máximo producto permisible, de peso sobre la broca en 1,000 libras por pulgada del diámetro de la broca por la velocidad de rotación, para un determinado caballaje hidráulico disponible en la broca que evite la remolienda.

Velocidades de rotación críticas que causan vibración, torcimiento en la tubería de perforación, excesivo uso, rápido deterioro y falla por fatiga.

### c) La vida de la broca.

Recursos y atributos:

- La vida del diente

Perforabilidad de la formación

- Geometría del diente

Peso sobre la broca

Velocidad rotatoria

- Acción de limpieza y enfriamiento debido al fluido de perforación.

- La vida del cojinete.

- Tipo de cojinete y excentricidad

- Peso sobre la broca

- Fluido de perforación

Temperatura

Velocidad en las boquillas

Volumen del sello.

- Resistencia del material del sello

Durabilidad del inserto de carburo de tungsteno:

Tipo de Inserto

Altura del inserto

Forma del inserto

Peso sobre la broca

Velocidad de rotación

Disposición de los insertos

- El calibre de la broca

Restricciones:

- El enroscamiento del diente:

Abrasividad de la formación.

Peso o velocidad rotaria excesivos.

Alto contenido de arena en el fluido de perforación.

Empaquetamiento de la broca.

Insuficiente velocidad de circulación

Procedimiento de "asentamiento" incorrecto que produce la rotura de los dientes.

Desgaste del cojinete:

- Velocidad rotatoria y peso sobre la broca excesivos.

Lastrabarrenas no estabilizados.

Alto contenido de arena en el fluido de perforación.

- Tipo de broca no adecuado

Insuficiente velocidad de circulación

Desgaste del calibre de la Broca:

- Tipo de broca inapropiada.

- Tiempo de rotación excesivos.



## CAPITULO II

### CONCEPTO GENERAL DE LA OPTIMIZACION APLICADA A LA PERFORACION ROTATIVA.

Matemáticamente, las variables de perforación pueden ser clasificadas como alterables o no modificables<sup>8</sup>.

Esta clasificación depende de la definición del contorno del sistema y sobre todo del objetivo global, i.e., e.g., si se asume que el fluido de perforación no es previamente tratado, para llevarlo a su estado óptimo se tendría que señalar el fluido de perforación como una variable alterable.

Estas asunciones son producto del modelo trazado por la gestión del sistema, en otras palabras es consecuencia de la voluntad del investigador en compatibilidad con el grado de exactitud del modelo que se desea construir.

---

<sup>8</sup> Lummus.: "Drilling Optimization" cit.

## 2.1 Variables de la perforación (Recursos y contornos del sistema)

En el capítulo anterior se expuso el sistema aplicado a la optimación de la perforación; en el cual se define al contorno y a los componentes los que constituyen subsistemas con sus respectivos atributos, recursos y restricciones.

Llamamos variables alterables y no alterables<sup>9</sup> de la perforación a los subsistemas con sus respectivos recursos y atributos, y al contorno del sistema respectivamente, ver tabla 1.

---

<sup>9</sup> Lummus.: "Drilling Optimization" cit.

TABLA I - VARIABLES DE LA PERFORACION

ALTERABLES	NO ALTERABLES
La Hidráulica	Ubicación geográfica
Presión de la bomba	Clima
- Caballaje hidraulico	Profundidad final
- Velocidad de circulación	Desviación vertical permisib.
- Diametro de las camisas	Equipo de perforación
- Velocidad anular	Flexibilidad del equipo de perforación
Tamaño de las boquillas	Temperatura del fondo del pozo
- Programas Hidráulicos	Características de la formación atravezada
El Peso sobre la broca y la velocidad de rotación	Fluido de Perforación
- Número de lastrabarrenas	Supervisión
- Uso y diámetro de la sarta de perforación	Tiempo de conección de un tubo de perforar
Peso por pie de la lastrabarrena	Tiempo de conección de una barra de perforar
Rango del tubo de perforación	El tipo de broca

## ALTERABLES

- Longitud de la sarta de perforación
- Potencia del motor de la mesa rotatoria
- La vida de la broca
- La vida del Diente
- La vida del cojinete
- La durabilidad del inserto de carburo de tungsteno
- El calibre de la broca

## NO ALTERABLES

- Experiencia del personal
- Tamaño del hueco
- Disponibilidad de agua
- Eficiencia de la cuadrilla
- Presión de la formación
- Logística
- Número de bombas disponibles
- Presupuesto disponible
- Regulaciones o políticas de la Empresa
- Pruebas tomadas de perforación e hidráulicas
- Divisas
- Datos de pozos vecinos perforados
- Gases corrosivos del fondo del pozo

## 2.2 Variables consideradas en la Perforación Óptima a Tiempo Real.

Según la experiencia y las investigaciones las variables consideradas para la optimización matemática de la perforación son seis, cuatro alterables y dos inalterables, ver tabla 2<sup>10</sup>.

TABLA 2 - VARIABLES CONSIDERADAS EN LA OPTIMACION

ALTERABLES	INALTERABLES
Fluido de perforación	Formación Geológica a perforarse
La Hidráulica	
Tipo de Broca	Profundidad
Peso sobre la broca y velocidad de rotación	

---

<sup>10</sup> Ibidem

Para las particularidades de nuestro estudio, tales como:

- Se asume que el fluido de perforación se utilizará en su estado óptimo.
- Las técnicas de optimización de la perforación se han llevado a cabo con ciertos tipos de brocas sin considerar una previa selección y evaluación de ellas.
- La finalidad del presente estudio es la construcción de un modelo que permita hallar los parámetros óptimos por medio de técnicas aplicadas a tiempo real, id, est, en la boca del pozo que se perfora. Determinamos modificaciones a la Tabla 2.

TABLA 2 MODIFICADA

ALTERABLES	INALTERABLES
La Hidráulica	Formación Geológica a perforarse
Peso sobre la broca y velocidad de rotación	Profundidad
	Fluido de perforación
	Tipo de broca

Nota:

Es importante remarcar que el presente estudio puede completarse con una apropiada selección de las brocas con el método de energía específica<sup>11</sup> y/o análisis a través de los registros sísmicos - rayos gamma<sup>12</sup>; éstos métodos están fuera del alcance del objetivo del presente trabajo de

investigación.

### 2.3 Interacción de las variables consideradas

La interacción entre las variables alterables existe, cuando el incremento de dos o mas variables no producen el efecto aditivo comparado con los efectos individuales, con respecto a la velocidad de penetración.

El significado de la interacción de las variables es ilustrado en la figura No. 1.

La figura No. 1 nos muestra la respuesta relacionada con la velocidad de penetración cuando las variables son incrementadas de un nivel a otro; individualmente primero, simultaneamente luego.

Existe interacción negativa cuando al incrementar ambas variables no producen una velocidad de penetración tan alta como la esperada, aunque esta velocidad puede ser más alta que cualquier incremento de las variables en forma individual.

Existe interacción positiva cuando la velocidad de penetración es más alta de lo esperado cuando ambas variables son incrementadas, id. est., una ayuda a la otra.

Una interacción negativa o positiva no significa una reducción o incremento de la velocidad de penetración, si

-----  
<sup>11</sup> Hussain Rabia.: "Specific Energy as a Criterion for bit Selection," J. Pet. Tech. (Julio 1985) 1225-1229

<sup>12</sup> L.A. Dernbach.: "Proper bit Selection Through sonic Gamma Ray Log Analysis," Conferencia de Tecnología de Perforación de la IADC, Houston, Marzo 9 - 11, 1982.

no, que la velocidad resultante de penetración, cuando dos o más variables son incrementadas, es menor que o mayor que lo normalmente se podría esperar si es que las variables tienen el efecto aditivo una sobre la otra.



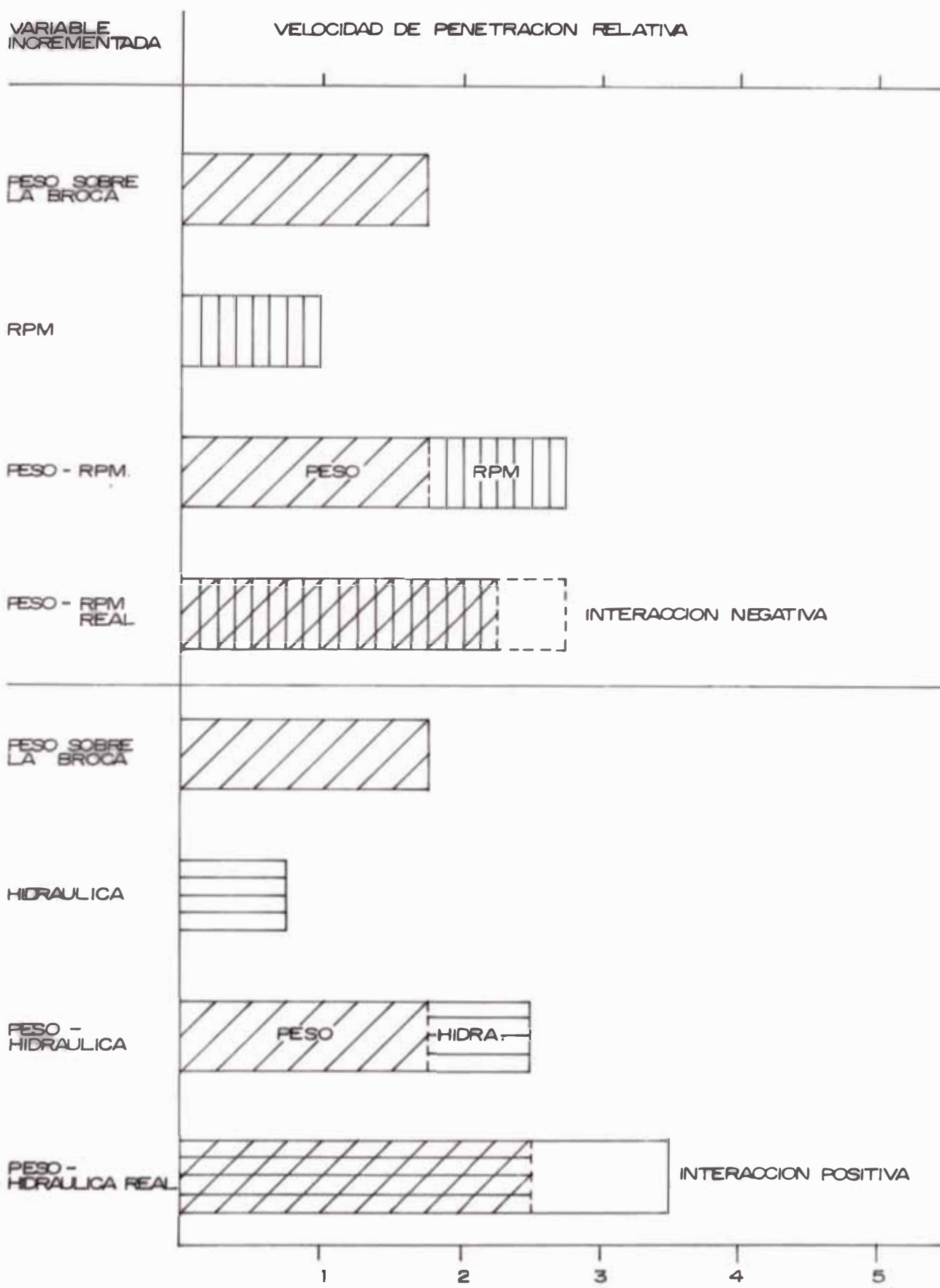


FIG. 1 INTERACCION POSITIVA Y NEGATIVA.

## CAPITULO III

### LAS VARIABLES CONSIDERADAS EN LA PERFORACION OPTIMA QUE AFECTAN A LA VELOCIDAD DE PENETRACION

Las variables que afectan la velocidad de penetración se clasifican en variables mecánicas, hidráulicas, Rheológicas y geológicas.

#### 3.1 Variables Mecánicas.

Las variables mecánicas de mayor efecto sobre la velocidad de penetración que se pueden mencionar son:

- El tipo de broca

Las condiciones de operación de la broca (peso y velocidad de rotación).

##### 3.1.1 Tipo de broca.

La selección del tipo de broca tiene un gran efecto sobre la velocidad de penetración. El tipo de broca generalmente se clasifica en tres grandes grupos tales como:

- Brocas de arrastre o fricción

Brocas de diamante policristalino (PCD).

Brocas tricónicas a rodillos

Las brocas que generalmente se usan en las operaciones del Nor Oeste del Perú son las brocas tricónicas, por lo tanto pondremos énfasis en su estudio.

#### 3.1.1.1 Análisis del Sistema

El objetivo central de la selección del tipo de broca es obtener mayores cantidades de pies perforados y el mejor promedio de penetración, a fin de disminuir los costos de perforación.

El contorno básico del sistema es el tipo de formación geológica perforada en el cual la abrasividad cumple un factor limitante en la vida de la broca.

Los recursos del sistema son la durabilidad del diente, del cojinete y del inserto que son manejados con mayor o menor efectividad a través de la interacción del peso sobre la broca y velocidad de rotación.

En el capítulo primero, en el punto 1.3.3.5 Subsistemas de desarrollo el sistema referente la vida de la broca con sus respectivas restricciones y componentes.

La clasificación IADC ayuda a comprender como los diferentes tipos de brocas son ordenados según el tipo de formación para lo cual han sido diseñadas.

Las brocas tricónicas a rodillos estan

clasificadas por el IADC de acuerdo a tres dígitos.

El primer dígito:

1, 2 y 3 : Designados para brocas de dientes de acero, con el 1 para formaciones blandas de baja resistencia a la compresión y alta perforabilidad, con el 2 para formaciones medianas a medianamente duras, una alta resistencia a la compresión; con el 3 para formaciones duras, semiabrasivas o abrasivas.

4, 5, 6, 7, y 8: designados para brocas con insertos de carburo de tungsteno, con el 4 para formaciones muy blandas con poca resistencias a la compresión y alta perforabilidad; con el 5 para formaciones blandas medianas con baja resistencia a la compresión; con el 6 para formaciones medianamente duras con alta resistencia a la compresión; con el 7 para formaciones duras, semiabrasivas y abrasivas, con el 8 para formaciones extremadamente duras y abrasivas.

El segundo dígito:

1, 2, 3 y 4: Designados para el mayor grado de dureza y abrasividad para cada uno de las escalas del primer dígito, i.,e., cada una de las escalas del primer dígito se subdividen en 4 grupos, con el 1 para el más blando y el 4 para el más duro.

El tercer dígito:

Depende del tipo de cojinete y protección especial del calibre del cono.

1. Cojinete no sellado, standard.
2. Cojinete no sellado, standard para uso con aire.
3. Cojinete no sellado, standard, con protección en el cono.
4. Cojinete sellado.
5. Cojinete sellado con protección en el cono
6. Cojinete journal sellado, o a fricción.
7. Cojinete journal sellado con protección en el cono.
8. Para trabajos de perforación direccional.
9. Otros.

#### 3.1.1.2 Mecanismo de fallamiento de la ROCA

Para operar apropiadamente una broca, se necesita entender tanto como sea posible, el mecanismo básico de la remoción de la roca de la formación perforada incluyendo:

- Efecto de cuña.
- Efecto raspante.
- Efecto de trituración
- Efecto de erosión por la acción de la salida del fluido de perforación a través de las boquillas, efecto "jet".
- Efecto de percusión.
- Efecto de comprimir.
- Efecto de torsión.

Debe entenderse que todos estos mecanis-

mos estan interrelacionados.

### 3.1.1.3 Mecanismo de fallamiento de las rocas a través de las brocas tricónicas de dientes de acero.

El diseño de brocas tricónicas con una excentricidad considerable de los ejes de los conos para perforar formaciones blandas, emplea todos los mecanismos básicos de remoción de la roca. Sin embargo, la acción de percusión y comprensión es un mecanismo que está predominantemente presente en las brocas tricónicas de las series IADC 3, 7 y 8 ; desde que estos tipos de brocas estan diseñados para el uso en formaciones duras en los cuales la velocidad de penetración tiende a ser baja y los costos de perforación se inclinan a ser altos, el mecanismo de percusión es de interés económico considerable<sup>14</sup>.

Maurer<sup>15</sup>, estudió la penetración del diente de la broca bajo condiciones simuladas de fondo del pozo por medio de un instrumental que simulaba la presión en el fondo del pozo, la presión de la formación y la presión de confinamiento de la roca de tal manera que se podrian variar independientemente.

El instrumental, ver fig. No 2, fue equipado con un aditamento especial que permitía simular

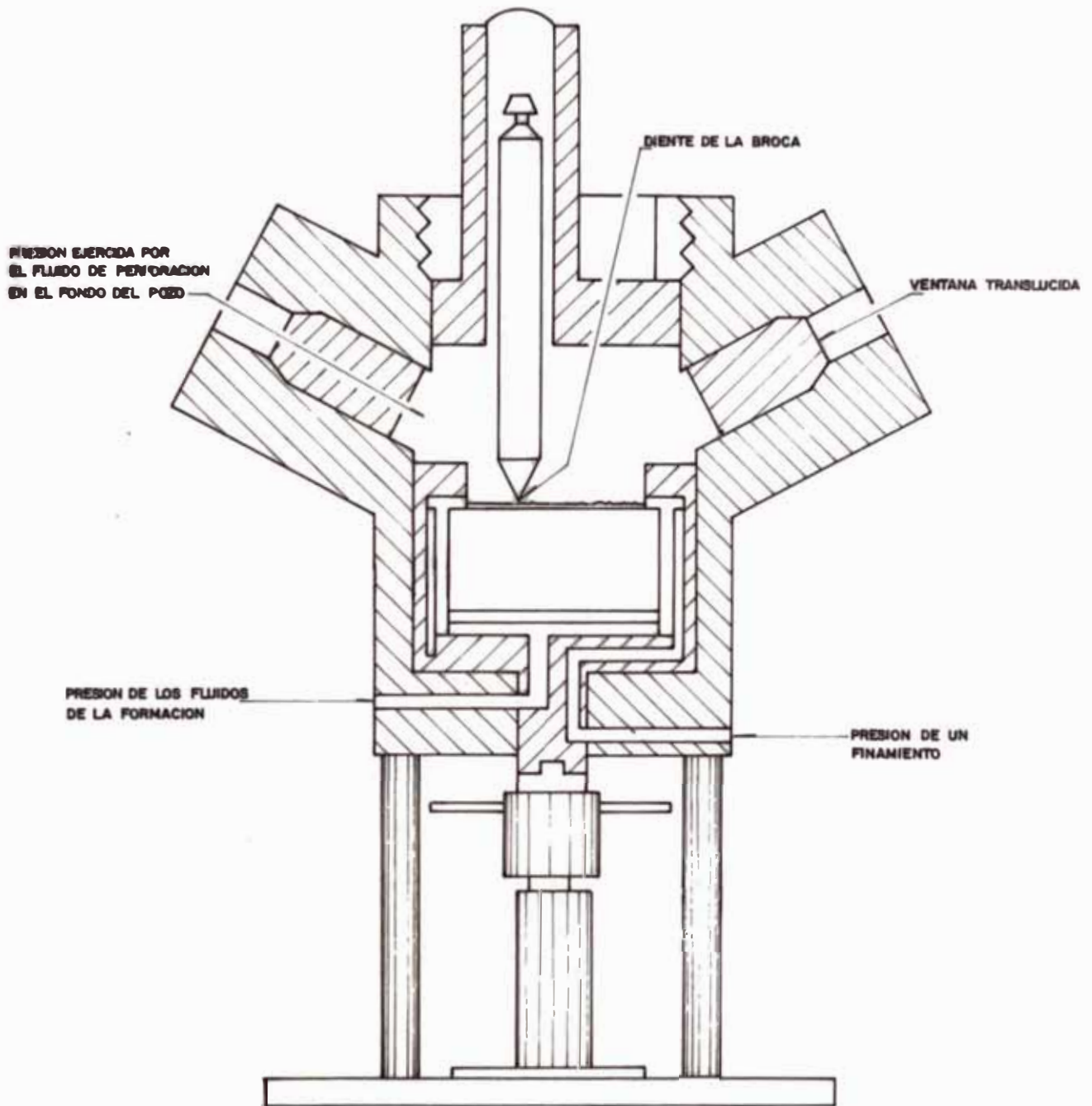
-----  
<sup>14</sup> A.T. Bourgoyne Jr., M.E. Chenevert, K.K Millheim y F.S. Young Jr.: APPLIED DRILLING ENGINEERING, SPE TEXT BOOK SERIES, ed. 1986, pag 208.

<sup>15</sup> W.C. Maurer.: "Bit - Tooth Penetration Under simulated Borehole Conditions," J. Pot Tech (Dic. 1965) 1433 - 42.

una fuerza constante de impacto similar a la que se produce en la perforación rotativa.

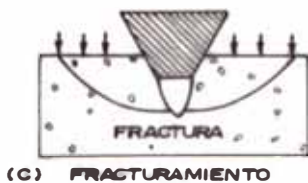
Maurer encontró que el mecanismo de formar un cráter o abertura dependía en cierto grado de la diferencia de la presión en el fondo del pozo y la presión de la formación. A valores bajos de presión diferencial la roca astillada debajo del diente de la broca era eyectada del cráter o abertura, mientras a valores altos de presión diferencial la roca astillada se deformaba de manera plástica y no era completamente eyectada del cráter. Este mecanismo para altas y bajas presiones diferenciales de fluido es descrita en la Figura No 3. La secuencia de los eventos mostrados en esta figura es descrita por Maurer como sigue:

Al instante en que es aplicado una carga al diente de la broca (A), la presión constante debajo del diente se incrementa hasta que exceda a la resistencia de rotura de la roca para formar debajo del diente una cuña de roca pulverizada fina (B). Según como la fuerza sobre el diente se incrementa, el material en la cuña se comprime ejerciendo altas fuerzas laterales en la roca sólida alrededor de la cuña hasta que el esfuerzo de corte  $T$  exceda al esfuerzo de corte  $S$  de la roca sólida y por consecuencia la roca se fracture (C). Esta fractura se propaga a lo largo de la superficie de corte máximo, el cual intersecta la dirección del esfuerzo principal bajo un ángulo constante cercano al previsto por el criterio de

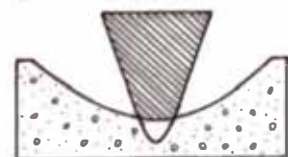


**FIG. N°2** : APARATO USADO PARA ESTUDIAR LA PENETRACION DE LA ESTRUCTURA CORTANTE (DIENTE) BAJO CONDICIONES SIMULADAS EN EL FONDO DEL POZO.





"BRITTLE"  
(BAJA PRESION)



"SEUDOPLASTICO"  
(ALTA PRESION)

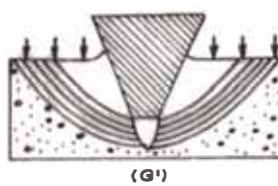
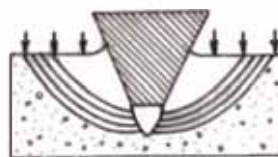
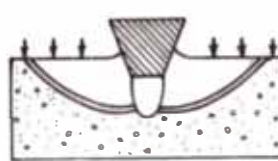


FIG. N°3 : MECANISMO DE FORMACION DEL CRATER DEBAJO DE LA ESTRUCTURA CORTANTE (DIENTE) DE LA BROCA.

fallamiento de Mohr\*. La fuerza en el cual el fracturamiento comienza debajo del diente se denomina fuerza inicial o de partida; según como la fuerza sobre el diente se incrementa por encima del valor inicial, ocurrirá un fracturamiento subsecuente encima de la región donde se produjo la fractura inicial, formando una zona de roca quebrada o debilitado (D).

A presiones diferenciales bajas, los recortes formados en la zona de roca quebrada o debilitada son fácilmente eyectados del cráter o abertura (E); luego el diente de la broca avanza hasta alcanzar el fondo del cráter y el proceso se repite (F,G).

A presiones diferenciales altas, la presión del fondo y las Fuerzas de fricción entre las rocas fragmentadas evitan la eyección de los recortes (E'); mientras que la fuerza sobre el diente es incrementada entonces, se efectúa un desplazamiento a lo largo de los planos fraturados paralelos a la fractura inicial (F', G'). Esto proporciona la apariencia de una deformación plástica, y los cráteres formados de esta forma son denominados cráteres pseudoplásticos.

#### 3.1.1.4 Factores que afectan el enroscamiento del diente de acero.

Uno de los objetivos de la evaluación de

---

El criterio de Mohr establece que la producción de fraturamiento suele ocurrir cuando el esfuerzo al corte excede a la suma de las fuerzas cohesivas del material y a la resistencia friccional de los planos dislocado.

la condición de la broca usada, es proporcionar suficiente conocimiento sobre la selección de un mayor intervalo de tiempo apropiado para el uso de la broca. Si la evaluación de una broca usada indica que la broca fue sacada antes de tiempo, id.est., con considerable vida de la broca remanente, esto significa que se ha gastado innecesariamente tiempo de operación del equipo en cambiar la broca. Sin embargo, si el intervalo de tiempo del uso de la broca se incrementa demasiado, la broca puede fallar y dejar algunas de sus partes en el pozo originando la necesidad de un tiempo adicional para "pescar".

Entonces, es necesario conocer la velocidad instantánea del enromamiento de la broca para determinar en cuanto se incrementará con un rango de seguridad el intervalo de tiempo de uso de la broca.

La velocidad del enromamiento del diente depende básicamente de:

- Abrasividad de la formación.
- Geometría de la estructura cortante (diente).

Peso sobre la broca.

Velocidad de rotación.

Limpieza y enfriamiento debido al fluido de perforación.

#### 3.1.1.4.1 Efecto de la altura del diente en la velocidad de enromamiento.

Campbell y Mitchell<sup>16</sup> experimentalmente mostraron que la velocidad al cual la altura del diente de acero puede ser gastada por efecto de la molienda rotante es inversamente proporcional al área del diente expuesto a la acción de molienda rotante. La forma del diente es generalmente triangular desde una vista frontal o lateral. Luego casi todos las brocas con dientes de acero pueden ser descritas usando la geometría mostrada en la figura No. 4.

El diente de la broca tiene inicialmente un área de contacto descrito por:

$$A_i = W_{x1} W_{y1}$$

Después de la remoción de cierta altura del diente,  $L_r$ , de la altura original del diente,  $L_i$ , el área de contacto del diente es:

$$A = W_x W_y \quad \dots (3.1)$$

$$\text{Si } \frac{W_{x2} - W_{x1}}{L_i} = \frac{W_x - W_{x1}}{L_r}$$

$$\text{Luego: } W_x = W_{x1} + \frac{L_r}{L_i} (W_{x2} - W_{x1})$$

<sup>16</sup> J.M. Campbell y B.J. Mitchell.: "Effect of Tooth Geometry on Tooth Wear Rate of Rotary Rock Bits," artículo presentado en la conferencia API Mid - Continent Dist. (Marzo 1959).

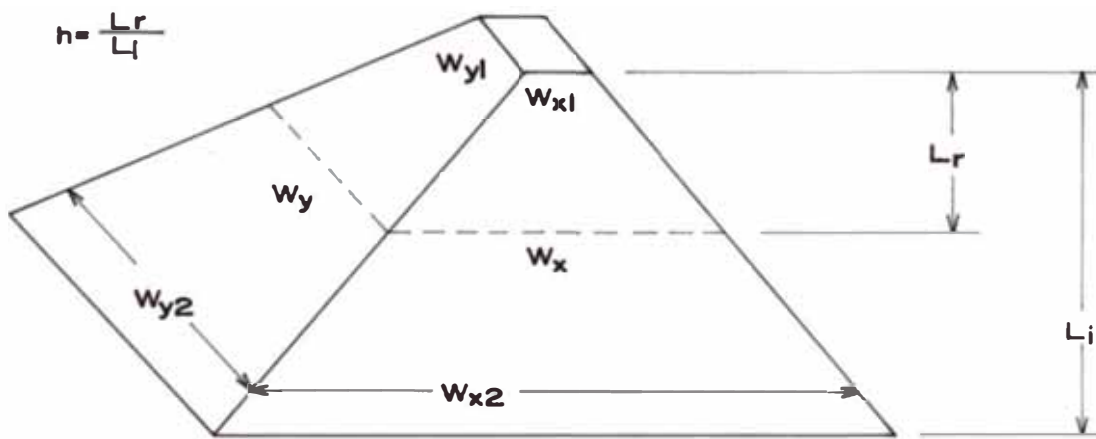


FIG. N°4 : GEOMETRIA TIPICA DE LA ESTRUCTURA CORTANTE (DIENTE DE ACERO) EN FUNCION DEL ENROMAMIENTO FRACCIONAL DEL DIENTE,  $h$ .

De la misma forma:

$$W_y = W_{y1} + \frac{L_r}{L_i} (W_{y2} - W_{y1})$$

reemplazando en la ecuación (3.1)

$$A = \left\{ W_{x1} + \frac{L_r}{L_i} (W_{x2} - W_{x1}) \right\} \cdot \left\{ W_{y1} + \frac{L_r}{L_i} (W_{y2} - W_{y1}) \right\}$$

La razón  $L_r/L_i$  es definida como el enrocamiento fraccional del diente,  $h$ :  $h = L_r/L_i \quad \dots (3.2)$

Expresando el área de contacto en términos del enrocamiento fraccional del diente,  $h$ , tenemos:

$$\begin{aligned} A &= \left\{ W_{x1} + h(W_{x2} - W_{x1}) \right\} \cdot \left\{ W_{y1} + h(W_{y2} - W_{y1}) \right\} \\ &= (W_{x1} W_{y1}) + [W_{y1} (W_{x2} - W_{x1}) + W_{x1} (W_{y2} - W_{y1})] h + \\ &= [(W_{x2} - W_{x1}) (W_{y2} - W_{y1})] h^2 \quad \dots (3.3) \end{aligned}$$

Si definimos a las constantes geométricas  $G_1$  y  $G_2$  por:

$$G_1 = [W_{y1} (W_{x2} - W_{x1}) + W_{x1} (W_{y2} - W_{y1})]/A_i$$

$$G_2 = [(W_{x2} - W_{x1}) (W_{y2} - W_{y1})]/A_i$$

Luego reemplazando en la ecuación (3) tenemos:

$$A = A_i (1 + G_1 h + G_2 h^2)$$

Dado que la velocidad instantánea de enromamiento  $dh/dt$  es inversamente proporcional al área de contacto,

$$\frac{dh}{dt} \propto \frac{1}{A_i (1 + G_1 h + G_2 h^2)}$$

la velocidad inicial de enromamiento, cuando  $h=0$ , es proporcional a  $A_i$ . Entonces, expresando  $dh/dt$  en términos de la velocidad inicial  $(dh/dt)_s$  tenemos:

$$\frac{dh}{dt} \propto \left\{ \frac{dh}{dt} \right\}_s \frac{1}{(1 + G_1 h + G_2 h^2)} \quad \dots (3.4)$$

Para la mayoría de los tipos de brocas, la dimensión  $(W_{x2} - W_{x1})$  es pequeña comparada con  $(W_{y2} - W_{y1})$ . Esto permite simplificar la ecuación (3.4) escogiendo la constante  $H_2$  de tal forma que la velocidad de enromamiento sería aproximadamente

$$\frac{dh}{dt} \propto \left\{ \frac{dh}{dt} \right\}_s \frac{1}{1 + H_2 h} \quad \dots (3.5)$$

El uso de la ecuación (3.5) en vez de la (3.4) simplifica notablemente el cálculo del enromamiento del diente en función del tiempo de rotación.

#### 3.1.1.4.2 Efecto del peso sobre la broca en la velocidad de enromamiento del diente.

Galle y Woods<sup>17</sup> publicaron una

de las primeras ecuaciones para predecir el efecto del peso sobre la broca en la velocidad instantánea de enromamiento del diente. La relación asumida por Galle y Woods es la siguiente:

$$\frac{dh}{dt} \propto \frac{1}{1 - \log (W/d_b)} \quad \dots (3.6)$$

donde:  $W$  : peso sobre la broca, en 1,000 libras

$d_b$  : diametro de la broca en pulgadas

$W/d_b < 10.0$

La velocidad de enromamiento para varios pesos sobre la broca puede ser normalizada en términos de una velocidad estandard de enromamiento de 4,000 libras - f/pulg.

Luego la velocidad relativa a esta velocidad estandard de enromamiento está dada por:

$$\frac{dh}{dt} \propto \frac{0.3979 \left\{ \frac{dh}{dt} \right\}_s}{1 - \log \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}} \quad \dots (3.7)$$

Se debe notar que  $dh/dt$  se vuelve infinito para  $W/d_b = 10$ , entonces esta ecuación predice que el diente fallará instantáneamente si se aplica 10,000 libras - f/pulgada del diámetro de la broca. Más

<sup>17</sup> E.M. GALLE y H.B. Woods.: "Best constant Weight and Rotary speed for Rotary Rock bits," Drilland Prod Frac, API (1963) 48-73.



adelante se modificó esta ecuación usando una relación más simple entre el peso sobre la broca y la velocidad de enromamiento del diente, esta relación está dada por:

$$\frac{dh}{dt} \propto \frac{1}{\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m - \frac{W}{d_b}} \quad \dots (3.8)$$

$(W/d_b)_m$  : es el peso máximo por pulgada del diámetro de la broca al cual el diente puede fallar instantáneamente.

$$W/d_b < (W/d_b)_m$$

Expresando la ecuación (3.8) en términos de la velocidad estandar de enromamiento a 4,000 libras - f/pulg. del diámetro de la broca, tenemos:

$$\frac{dh}{dt} \propto \left\{ \frac{dh}{dt} \right\}_s \left[ \frac{\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m - 4}{\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m - \frac{W}{d_b}} \right] \quad \dots (3.9)$$

La comparación de las velocidades relativas de enromamiento pronosticadas por las ecuaciones (3.7) y (3.9) asumiendo un peso máximo de 10,000 lb - f/pulg. pueden ser observadas en la tabla No.3. Los resultados son similares a los obtenidos en condiciones

encontrados usualmente en el campo; pero actualmente se usa más la ecuación (3.9).

TABLA.- 3. Comparación de las ecuaciones (3.7) y (3.9) para simular el efecto del peso sobre la broca en la velocidad de enromamiento del diente.

Peso sobre la broca lb-f/pulg. ( $W/d_b$ )	Velocidad de enromamiento relativo	
	$\left\{ \frac{dh}{dt} \right\} / \left\{ \frac{dh}{dt} \right\}_s$ EC. 3.7	EC. 3.9.
1	0.4	0.7
2	0.6	0.8
3	0.8	0.9
4	1.0	1.0
5	1.3	1.2
6	1.8	1.5

#### 3.1.1.4.3 Efecto de la velocidad de rotación en la velocidad de enromamiento del diente.

La primera publicación de la relación entre la velocidad instantánea de enromamiento del diente y la velocidad de rotación fue presentada también por Galle y Woods para las brocas tricónicas con dientes de acero. Esta relación es:

$$\frac{dh}{dt} \propto N + 4.34 \times 10^{-5} N^3 \quad \dots (3.10)$$

Sin embargo, muchos autores recientes han mostrado esencialmente los mismos resultados usando una relación más simple:

$$\frac{dh}{dt} \propto (N)^{H_1} \quad \dots (3.11)$$

Donde  $H_1$  es una constante que varía con el tipo de broca usada.

Es importante remarcar que la relación de Galle y Woods es aplicable solamente a brocas tricónicas con dientes de acero diseñadas para uso en formaciones suaves.

Si a la velocidad de enromamiento lo expresamos en términos de la velocidad estandard de enromamiento de 60 rpm, tenemos:

$$\frac{dh}{dt} \propto \left\{ \frac{dh}{dt} \right\}_s \left\{ \frac{N}{60} \right\}^{H_1} \quad \dots (3.12)$$

#### 3.1.1.4.4 Efecto de la hidráulica en la velocidad de enromamiento del diente.

No han sido todavía desarrollados modelos matemáticos para estimar el efecto de la hidráulica en la velocidad de enromamiento de la estructura cortante, pues el desarrollo de dichos modelos son extremadamente dificultosos debido a la variedad de dise-

ños de brocas.

Generalmente se asume, mientras que la velocidad de circulación este presente para limpiar y enfriar las estructuras cortantes, el efecto de la hidráulica en la velocidad de enromamiento del diente puede ser ignorada.

### 3.1.1.4.5 Ecuación de la velocidad de enromamiento del diente de acero.

Se puede componer una ecuación de la velocidad de enromamiento del diente a través de la combinación de los efectos tales como: el efecto de la geometría del diente, peso sobre la broca y velocidad rotaria<sup>18</sup>. Entonces la velocidad instantánea del enromamiento está dada por

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\tau_H} \left\{ \begin{matrix} N \\ \bullet \end{matrix} \right\}^{H_1} \left\{ \begin{matrix} \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m - 4 \\ \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m - \frac{W}{d_b} \end{matrix} \right\} \cdot \left\{ \begin{matrix} 1 + \frac{H_2}{2h} \\ 1 + H_2h \end{matrix} \right\} \dots \quad (3.13)$$

Donde:

t : tiempo, horas

h : altura fraccional del diente que ha sido usada

$H_1, H_2, \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m$  : constantes

<sup>18</sup> A.T. Bourgoyne, Jr. y F.S. Young, Jr.: "A Multiple Regression Approach to optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection," cit, pag. 373.

$W$  : peso sobre la broca, 1000 lb-f

$N$  : velocidad de rotación, RPM

$\tau_H$  : constante de abrasividad de la formación horas

De acuerdo a la clasificación IADC para brocas de dientes de acero, los valores para las constantes  $H_1$ ,  $H_2$  y  $(W/db)_{max}$  están registradas en la tabla No. 4.

TABLA 4.- VALORES RECOMENDADOS PARA LAS CONSTANTES

Usadas en la ecuación de la velocidad instantánea del enromamiento de la estructura cortante<sup>19</sup>.

<u>Tipo de broca</u>	<u><math>H_1</math></u>	<u><math>H_2</math></u>	<u><math>(W/d)_{max}</math></u>
1-1 hasta 1-2	1.90	7	7.0
1-3 hasta 1-4	1.84	6	8.0
2-1 hasta 2-2	1.80	5	8.5
2-3	1.76	4	9.0
3-1	1.70	3	10.0
3-2	1.65	2	10.0
3-3	1.60	2	10.0
3-4	1.5	2	10.0

Es importante observar, que la ecuación (3.13) ha sido normalizada de tal forma que la constante de abrasividad de la formación,  $\tau_H$ , es numérica-

-----  
<sup>19</sup> Ibidem.

mente igual al tiempo en horas requerido para que el diente de la broca sea completamente enromado, cuando esta broca sea operada a un peso constante de 4,000 libras - f/pulg. y a una velocidad de rotación constante de 60 rpm. Usando la ecuación (3.13) y el enromamiento final del diente  $h_f$  de una broca que ha sido usada durante un intervalo de la perforación se puede calcular la abrasividad promedio de la formación perforada. Si definimos el parámetro de enromamiento del diente  $J_2$  usando:

$$J_2 = \frac{\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m - \frac{W}{d_b}}{\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m - 4} \left[ \frac{60}{N} \right]^{H_1} \left\{ \frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}} \right\} \dots (3.14)$$

La ecuación (3.13) puede expresarse en términos de la ecuación (3.14)

$$\int_0^{t_b} dt = J_2 \tau_H \int_0^{h_f} (1 + H_2 h) dh \dots (3.15)$$

Integrando la ecuación (3.15)

$$t_b = J_2 \tau_H (h_f + H_2 h_f^2 / 2) \dots (3.16)$$

Despejando la constante de abrasividad de la formación.

$$\tau_H = \frac{t_b}{J_2 (h_f + H_2 h_f^2 / 2)} \dots (3.17)$$

Se debe enfatizar que las

ecuaciones 13, 14, 15, 16 y 17 han sido desarrolladas basados en el modelo de la pérdida de altura de los dientes de acero en brocas tricónicas, por lo tanto no es recomendable aplicarlo en brocas tricónicas a insertos de carburo de tungsteno, pues la mecánica de pérdida o desgaste es diferente.

#### Ejemplo Ilustrativo 3.1:

En el pozo 6762 - carrizo se perforó con la broca de código IADC 1-3-6 desde la profundidad de 255 pies hasta 744 pies en 13 horas con un peso promedio sobre la broca y velocidad de rotación de 20,000 lb-f y 90 rpm. respectivamente. Cuando la broca fue sacada su condición de salida era T-6, B-4, G-I. Calcule la abrasividad promedio de la formación para este intervalo y también estime el tiempo requerido para enromar completamente el diente del mismo tipo de broca a las mismas condiciones de peso sobre la broca y velocidad de rotación.

Solución: Usando la tabla 4 obtenemos,  $H_1 = 1.84$ ,  $H_2 = 6$ ,  $(W/d_b)_{max} = 8.0$ . Usando la ecuación (3.14)

$$J_2 = \left[ \frac{8.0 - \frac{20}{7.875}}{8.0 - 4.0} \right] \left[ \frac{60}{90} \right]^{1.84} \cdot \left[ \frac{1}{1 + \frac{6}{2}} \right] = 0.162$$

Con la ecuación 3.17 calculamos la constante de abrasividad usando el enromamiento final del diente según la condición de salida, 6/8, ó 0.75

(T-6), tenemos:

$$T_H = \frac{13}{0.162 (0.75 + 6 \frac{(0.75)^2}{2})} = 32.9 \text{ horas}$$

El tiempo requerido para enro-  
mar completamente el diente ( $h_f = 1.0$ ), puede ser calcula-  
do por la ecuación (3.16)

$$t_b = 0.162 (32.9) [ 1 + \frac{6(1)^2}{2} ] = 21.3 \text{ horas}$$

### 3.1.1.5 Factores que afectan a los insertos de carburo de Tungsteno.

Los insertos de carburo de Tungsteno son  
muy resistentes al desgaste pero son muy quebradizas. La  
rotura del inserto en vez del desgastamiento o enroma-  
miento es el problema principal que concierne a las brocas  
tricónicas a insertos.

Un alto impacto con moderado peso puede  
dañar o romper severamente los insertos. Si la broca es  
usada debajo de los pesos y velocidades de rotación que  
producen la rotura de los insertos la vida de la broca  
depende de la vida del cojinete.

Generalmente la pérdida de los insertos  
suelen ocurrir en la última etapa de rotación debido a que  
la carcasa del cono de la broca se desgasta debilitando la  
zona que retiene al inserto o aumentando la altura o pro-  
yección del mismo lo que lo hace mas susceptible a la



rotura.

No se han desarrollado o formulado ecuaciones matemáticas que expliquen debidamente los problemas citados anteriormente.

#### 3.1.1.6 Factores que afectan la vida del cojinete.

La predicción del desgaste del cojinete es más dificultoso que la predicción del enromamiento del diente. Así como el enromamiento del diente, la velocidad instantánea de desgaste del cojinete depende de las condiciones de la broca.

Después de que la superficie del cojinete se comienza a dañar, se incrementará notoriamente la velocidad de desgaste del cojinete. Sin embargo como las superficies del cojinete no pueden ser examinadas durante la evaluación de la broca usada, se asume un comportamiento lineal de desgaste del cojinete. Se asume también que la vida del cojinete varía linealmente con la velocidad de rotación.

Existe tres tipos de cojinetes:

Cojinetes no sellados a bolillas.

Cojinetes sellados o autolubricados a bolillas.

Cojinetes sellados a fricción "journal"

El efecto del peso sobre la broca en la

vida del cojinete depende del número y tipo de cojinetes usados, y si son o no, cojinetes sellados.

Cuando los cojinetes no son sellados, la lubricación del cojinete depende del tipo de fluido de perforación y de sus propiedades.

La acción hidráulica del fluido de perforación en la broca juega un papel en la vida del cojinete. Tanto como se incrementa la velocidad de circulación, la habilidad del fluido para enfriar los cojinetes se incrementará. En todo caso, se cree generalmente que bajo suficientes velocidades de circulación o flujo para levantar los cortes, también será suficiente para prevenir una subida excesiva de temperatura en los cojinetes.

Lummus<sup>20</sup> indicó que a muy altas velocidades en las boquillas de la broca puede producir daños y en consecuencia disminución de la vida del cojinete. La erosión del metal puede ocurrir y producir una falla en el cierre o retén para la grasa; Lummus discutió este problema, y en su ejemplo expuso que este fenómeno fue importante para valores de caballaje hidráulicos en la broca por encima de 4.5 h.p./pulg.<sup>2</sup>. No obstante no presentó un modelo general para pronosticar el efecto de la hidráulica en el desgaste del cojinete.

La ecuación del desgaste<sup>21</sup> que estima la vida del cojinete está formulado por:

---

<sup>20</sup> J. L. Lummus, "Analysis of Mud Hydraulics Interactions," Pet. Eng. (Feb. 1974)

<sup>21</sup> A.T. Bourgoyne, Jr. y F.S. Young, Jr. cit

$$\frac{db}{dt} = \frac{1}{\tau_B} \left\{ \frac{N}{60} \right\}^{B_1} \left\{ \frac{W}{4d_b} \right\}^{B_2} \quad \dots (3.18)$$

donde:

b = Vida fraccional del cojinete que ha sido consumido

t = tiempo, horas

W = peso sobre la broca, 1,000 lb-f

N = Velocidad de rotación, rpm

d<sub>b</sub> = diámetro de la broca, pulgadas

B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> = exponentes del desgaste del cojinete

τ<sub>B</sub> = constante del cojinete, horas.

Los valores recomendados para los exponentes del desgastamiento del cojinete están dados por la tabla 5.

TABLA 5 - Exponentes recomendados para el desgastamiento del cojinete en las brocas tricónicas<sup>22</sup>

<u>Tipo de Cojinete</u>	<u>Tipo de fluido de perforación</u>	<u>E<sub>1</sub></u>	<u>E<sub>2</sub></u>
(1) No sellado	(1.1) Base baritina	1.0	1.0
	(1.2) Base sulfato	1.0	1.0
	(1.3) Base agua	1.0	1.2
	(1.4) Base arcilla/agua	1.0	1.5
	(1.5) Base aceite	1.0	2.0
(4) Sellados a bolillas		0.70	0.85
(6) Sellados a fricción		1.6	1.00

<sup>22</sup> Ibidem

Se puede notar que la ecuación (3.18) del desgaste del cojinete está normalizada para que la constante del cojinete,  $\tau_B$ , sea numericamente igual a la vida de los cojinetes si fueran operados a 4,000 lb-f/pul y 60 rpm.

La constante del cojinete puede ser evaluado a través de la ecuación (3.18). Si definimos el parámetro de desgastamiento  $J_3$  usando:

$$J_3 = \left\{ \frac{60}{N} \right\}^{B1} \left\{ \frac{4d_b}{W} \right\}^{B2} \quad \dots (3.19)$$

La ecuación (3.18) puede expresarse también por:

$$\int_0^{t_b} dt = J_3 \tau_B \int_0^{b_f} db \quad \dots (3.20)$$

Donde  $b_f$  es el estado final de desgaste del cojinete luego de sacar la broca. Integrando la ecuación (3.20):

$$t_b = J_3 \tau_B b_f \quad \dots (3.21)$$

Despejando la fórmula del cojinete  $\tau_B$

$$\tau_B = \frac{t_b}{J_3 b_f} \quad \dots (3.22)$$

Ejemplo ilustrativo 3.2:

Calcule la constante del cojinete para

la broca del ejemplo anterior y el tiempo requerido para su desgaste total ( $bf = 1.0$ ).

Solucion: De la tabla 5,  $B_1 = 1.6$ ,  $B_2 = 100$ , usando la ecuación (3.19) obtenemos:

$$J_3 = \left[ \frac{60}{90} \right]^{1.6} \left[ \frac{4 (7.875)}{20} \right]^{1.0} = 0.823$$

Resolviendo la ecuación (3.22), si

$$bf = 4/8 = 0.5$$

$$\tau_B = \frac{13}{0.823 (0.5)} = 31.6 \text{ horas.}$$

Calculando el tiempo requerido para el desgaste total del cojinete, de la ecuación (3.21).

$$t_b = 0.823 (31.6) (1.0) = 26 \text{ horas}$$

**3.1.1.7 Análisis de los resultados obtenidos en los ejemplos ilustrativos 3.1 y 3.2.**

Sumarizando los resultados en la tabla 6:

TABLA 6.- Sumario de resultados de los ejemplos ilustrativos 3.1 y 3.2.

Condición Operativa : (W = 20,000 lb-f, 90 rpm)

Condición de

Salida	:	T-6	T-8	B-4	B-8
$t_b$ , horas	:	13	21.3	13	26

Condición operativa : (W = 31,500, 60 RPM)

Estandar

Condición de

Salida	:	T-8	G-8
$\tau_H$ , horas	:	32.9	-
$\tau_B$ , horas	:	-	31.6

Dependiendo de la confiabilidad de los registros de brocas se puede enunciar lo siguiente:

a.- La velocidad de enromamiento del diente a las condiciones actuales de operación es mayor, que en las condiciones estandar.

b.- Esto no denota que las condiciones estandar son las más óptimas, pues una mayor o menor velocidad de enromamiento de la estructura cortante no significa un menor costo por pie perforado; esto es explicable porque se debe tener en cuenta dos factores: La velocidad de penetración y sobre todo la cantidad de pies perforados.

c.- Solo se ha utilizado el 61% de la vida total de la estructura cortante y el 50% de la vida útil del cojinete. Esto nos puede indicar que puede suceder lo si-

guiente:

Primero, la no confiabilidad de los datos recopilados. Segundo, la posible existencia de problemas en el pozo por los cuáles se sacó la broca antes de tiempo, tales como: insuficiencia hidráulica, lo que posibilitó un empaquetamiento de la broca y en consecuencia disminuyó la velocidad de penetración; un cambio en la formación, de una función geológica blanda a otra mucho más dura; lo que incremento el torque; u otros problemas.

Tercero: Ineficiencia del personal, debido al cuál se sacó la broca antes de tiempo lo que significa que se ha gastado innecesariamente tiempo de operación del equipo en cambiar la broca.

d.- Siempre existe una incertidumbre en saber cuál es el mejor tiempo para sacar la broca. El uso de las ecuaciones de desgaste del cojinete y de la estructura cortante nos proporciona un método aproximado para conocer cuándo la broca se desgastará completamente y también es aconsejable monitoriar el torque de la mesa rotatoria.

Cuando la velocidad de penetración decrece rápidamente con el desgaste de la broca es sugerible sacar la broca antes que se desgaste completamente. Si la litología es uniforme, el mejor método para conocer el tiempo óptimo para sacar la broca es mediante el análisis del costo por pie perforado, asumiendo que la

broca puede ser sacada a la profundidad del estudio. Si la litología no es uniforme este proceso no siempre resulta satisfactorio .

### Ejemplo Ilustrativo 3.3.

Determinar el tiempo óptimo para sacar la broca suponiendo que los datos de la siguiente tabla son verdaderos. Además suponer que la litología es uniforme en el área. El costo del equipo es 249.042 \$/hr. el costo de la broca es 1,059.27 \$. La cuadrilla se demora en conectar un tubo de perforar aproximadamente 8 minutos y en conectar una barra de perforar en 3 minutos. Además el equipo jala barras de a 2 tubos. Todos los datos del ejemplo ilustrativo 3.1 son válidos para este ejemplo:

Datos del avance de la broca:

AF (pies)	$t_b$ (horas)	PROFUNDIDAD (pies)
0	0	255
103	2	358
191	4	446
271	6	526
343	8	598
409	10	664
463	12	718
489	13	744



Solución:

El costo por pie perforado (CPF) esta dado por la ecuación siguiente:

$$CPF = \frac{CB + CR (t_b + TT + TC)}{\Delta F} \quad \dots (3.23)$$

Donde CPF : el costo por pie perforado en, \$/pie  
 CR : costo de la operacion a perforar, \$/hr.  
 $t_b$  : vida de la broca, horas  
 TT : tiempo de viaje, horas  
 TC : tiempo de conexion, horas  
 $\Delta F$  : intervalo perforado, pies = D

El calculo del tiempo de viaje esta establecido por:

$$TT = 2 \left\{ \frac{t.s.}{60} \right\} \cdot D + \left\{ \frac{t.s.}{60} \right\} \Delta F$$

$$TT = (t.s./60 /L.S) (2D + \Delta F) \quad \dots (3.24)$$

t.s. : tiempo que se demora la cuadrilla en conectar o desconectar una barra de perforar, minutos.

L.S. : longitud de la barra de perforar, pies

D : profundidad al cual se cambio la ultima broca.

El calculo del tiempo de conexion se contabiliza por:

$$TC = \left\{ \frac{\Delta F}{30} \right\} \left\{ \frac{t.c.}{60} \right\} \quad \dots (3.25)$$

tc : tiempo que se demora la cuadrilla en conectar un

tubo de perforar de 30 pies, minutos.

Desarrollo: como ejemplo calcularemos el CPF a la profundidad de 526 pies.

Cálculo de TC: con la ecuación (3.25).

$$TC = \left\{ \frac{271}{30} \right\} \left\{ \frac{8}{60} \right\} = 1.2 \text{ horas}$$

Cálculo de TT con la ecuación (3.24).

$$TT = 2 \left\{ \frac{\frac{3}{60}}{60} \right\} \cdot 255 + \left\{ \frac{\frac{3}{60}}{60} \right\} 271 = 0.651$$

Cálculo de CPF con la ecuación (3.23)

$$CPF = \frac{1059.27 + 249.042 (6 + 0.651 + 1.2)}{271}$$

$$CPF = 11.12 \text{ \$/pie}$$

TABLA 7.- Resultados del ejemplo ilustrativo 3.3

$\Delta F$ (pies)	$t_b$ (BL) (horas)	Profundidad (D) (pies)	Costo (RCPF) (\$/pie)
0	0	255	-
103	2	358	17.46
191	4	446	12.63
271	6	526	11.13
343	8	598	10.52
409	10	664	10.25
463	12	718	10.29
489	13	744	10.32

El menor costo por pie perforado resultaría si la broca fuera sacada después de 10 horas, aún si le quedara a la broca considerable duración, id. est.,  $21.3 - 10 = 11.3$  horas.

La solución del ejemplo ilustrativo 3.3 mediante un algoritmo es presentado en el anexo, además se muestra el programa desarrollado RCPF.

#### 3.1.1.8 Modelo semiempírico de la vida del cojinete a fricción de las brocas a insertos.<sup>22</sup>

Los últimos avances en la tecnología de brocas a insertos de carburo de tungsteno en cojinetes a fricción, han producido una gran variedad de brocas que pueden ser operados en forma efectiva, con pesos sobre la broca y velocidades de rotación que exceden las recomendaciones de los catálogos del fabricante. Para calcular los pesos y velocidades de rotación óptimas es necesario pronosticar la vida de la broca en base a la durabilidad del cojinete.

El principal problema pertinente a altos niveles de energía mecánica, es la rotura de los insertos en vez del enroscamiento del diente de acero.

<sup>22</sup> H.H. Doiron, L.S., L.B. Tompkins y T.Watts.: "Optimizing Journal Bearing insert Bit Runs Using a Bearing Life Model" Artículo SFE 16697 presentado en la conferencia SFE, Dallas, sept. 1987.

A través de los datos producidos en la experimentación llevados a cabo en el campo se puede determinar una serie de parámetros mecánicos admisibles para evitar la rotura del inserto.

Debajo de estas restricciones el desgastamiento del inserto es negligible, luego lo que limita la vida de la broca es el desgaste del cojinete.

Las brocas a insertos con cojinetes a fricción sin excesiva rotura de insertos o desgaste del calibre, falla típicamente debido al desgaste del sello del cojinete.

No todas las causas de la falla del cojinete son entendidas; en general, el desgaste del sello conduce a una situación crítica donde el sello comienza a permitir el ingreso del fluido de perforación hacia los cojinetes a fricción originando un desgaste rápido y destructivo del cojinete.

Doiron, Tompkins y Watts seleccionaron una ecuación<sup>23</sup> apropiada que caracterizará el desgaste en los cojinetes a fricción :

$$V = \frac{C.L.X}{P} \quad \dots (3.26)$$

donde:

V : Volumen de sello desgastado.

<sup>23</sup> E. Rabinowicz.: Friction and Wear of Materials, John Wiley e hijos, New York (1965) 137

- C : Coeficiente de desgaste.  
 L : Carga sobre la superficie móvil.  
 X : Distancia recorrida.  
 F : Dureza del material.

Al usar la ecuación (3.26) se asume que el cojinete fallará cuando un volumen crítico de material es removido.

Convirtiendo la ecuación (3.26) a unidades de campo tenemos que reemplazar: la carga L por el peso sobre la broca dividido entre tres (para los 3 conos de la broca),  $WOB/3$ , y a X por una distancia lineal recorrida por la superficie deslizable en el cojinete a fricción:

$$V = \frac{C \cdot WOB \cdot KI \cdot RPM \cdot Horas \cdot 60}{3 p} \quad \dots (3.27)$$

donde:

KI : Constante, distancia deslizable por la superficie del cojinete en una revolución de la broca, (pulgadas /rev)

Ordenando la ecuación (3.27) de la siguiente forma:

$$\frac{V \cdot 3p}{C \cdot KI} = WOB \cdot RPM \cdot Horas \cdot 60$$

$$K = WOB \cdot RPM \cdot Horas \cdot 60 \quad \dots (3.28)$$

donde K es una constante combinada del desgaste del coji-

nete, como K está en el orden de varios miles de millones, entonces se debe adecuar la ecuación (3.28) de tal forma que WOB este en miles de libras - f.

Dividiendo ambos miembros de la ecuación (3.28) por 60 para obtener:

$$KB = WOB \cdot RPM \cdot \text{Horas} \quad \dots (3.29)$$

KB es una constante combinada del desgaste del cojinete que puede ser determinada de los registros de brocas de un área particular y para un tamaño y tipo específico de broca.

La ecuación (3.29) sugiere que el desgaste crítico sello - cojinete y en consecuencia la falla del cojinete ocurrirá a valores constantes de KB.

Despejando el tiempo de vida del cojinete, horas, de la ecuación (3.29).

$$\text{Horas} = \frac{KB}{WOB \cdot RPM} \quad \dots (3.30)$$

Para poder pronosticar las horas de vida del cojinete en la ecuación (3.30) es necesario conocer la constante KB, para lo cual se procede de la siguiente forma:

- 1.- Recolectar un grupo de registros de brocas de un mismo área de perforación similar.
- 2.- Para una mejor evaluación de KB, la broca debe ser de un mismo tamaño, tipo y para un intervalo de profundi-

dad de operación común. Esto permite la eliminación de ciertas variables tales como abrasividad de la formación, temperatura y otros factores de perforabilidad que afectan la vida del cojinete a fricción y no son bien conocidos.

- 3.- Es preferible elegir brocas que hayan fallado debido al cojinete y que no hayan tenido una rotura excesiva de los insertos o un demasiado desgaste del calibre, así como problemas mecánicos del equipo durante la perforación.
- 4.- Es recomendable no escoger brocas con desgaste mínimo en los cojinetes pues no reflejan la capacidad total del cojinete.
- 5.- Calcular el KB para cada corrida seleccionada.
- 6.- Promediar el KB individual para obtener el KB promedio del área para utilizarlo en la ecuación (3.30).
- 7.- Para encontrar el valor de KB de una misma broca usada previamente, i.e., una broca que se ha usado en varios pozos, calcular primero el valor de KB de una broca que no haya sido usada en otros pozos luego restarle el valor del producto de WOB, RPM y horas con que ha rotado en el pozo anterior.

Este método es quizás uno de los más apropiados, pues se tiene que lidiar con la confiabilidad cuestionable de los datos de los registros de brocas.

Ejemplo Ilustrativo 3.4

Para demostrar el uso de este método y compararlo con el método de Bourgoyne y Young se seleccionó un grupo de pozos del área de carrizo de los campos del Noroeste del Perú. El tamaño de la broca es de 7 7/8 y de código IADC 4-3-7, osea una broca con insertos para formaciones blandas, equipada con cojinete a fricción.

El rango de las profundidades seleccionadas fueron de 3,255 a 3,952 pies entre las formaciones Chira, Talara, y Hélico.

Se calculó el valor de  $K_B$  promedio con la ecuación (3.29) lo que resultó de un valor de 127,800, así mismo se computó el valor promedio de  $\tau_B$  igual a 163.46 con la ecuación (3.22).

Usando el  $K_B$  promedio en la ecuación (3.30) pronosticamos las horas de vida del cojinete en función del peso y la velocidad rotatoria; del mismo modo con la ecuación (3.21) predecimos la vida del cojinete. El pronóstico más acertado es trazado en el gráfico 3.1 y los valores comparativos se hallan en las tablas 8 y 9.



TABLA No. 8 DATOS DE LOS REGISTROS DE BROCAS DE UNA SERIE DE PÓZOS DEL AREA DE CARRIZO PARA UN IN-

TERVALO COMUN Y UN DETERMINADO TIPO DE BROCA (\*)

\* BROCA 7 7/8 CODIGO IADC 4 - 3 - 7

POZO	ESPESOR DE LAS FORMACIONES (PIES)	ESPESOR (PIES)	PROF. DE SALIDA (PIES)	TBG	HORAS	ROF	WOB	RPM
6762	CHIRA 403, TALARA 1,224	1,627	3,524	4-4-0	86 1/4	18.9	20	80
6729	TALARA	995	3,255	4-4-0	68 3/4	14.5	20	80
6732	TALARA 687, HELICO 494	1,181	3,837	----	74	16	25	80
6674	TALARA 746, HELICO 352	1,098	3,952	----	76	14.5	20	80
6673	CHIRA 651, TALARA 1,028	1,679	3,428	5-4-I	94	17.9	20	80
6589	CHIRA 270, TALARA 1,310	1,580	3,460	----	73	21.6	18	70
6596	CHIRA 558, TALARA 1,483	2,041	3,283	----	76	26.9	15	80
6682	TALARA - ECHINO	1,996	3,928	7-1-I	68 1/2	29.1	25	100

TABLA No. 9 - COMPARACION DE LOS PRONOSTICOS DE LA VIDA DEL COJINETE

POZO	WOB (MILES DE LIBRAS)	RPM	$\sqrt{3}$ (EC. 3.19)	WOB. RPM	T <sub>B</sub> (HORAS)	KB	EC (3.21) (HORAS)	/AE/	HORAS	EC (3.30) (HORAS)	/AE/
6762	20	80	0.994	1,600	173.54	138,000	81.2	5.1	86 1/4	79.9	6.4
6729	20	80	0.994	1,600	138.33	110,000	81.2	12.5	68 3/4	79.9	11.2
6732	25	80	0.795	2,000	186.12	148,000	65	9	74	63.9	10.1
6674	20	80	0.994	1,600	152.92	121,600	81.2	5.2	76	79.9	3.9
6673	20	80	0.994	1,600	189.135	150,400	81.2	12.8	94	79.9	14.1
6589	18	70	1.367	1,260	106.765	91,980	111.7	38.7	73	101.4	28.4
6596	15	80	1.325	1,200	114.69	91,200	108.3	32.3	76	106.5	30.5
6682	25	100	0.556	2,500	246.21	171,250	45.4	23.1	68 1/2	51.1	17.4

T<sub>B</sub> PROMEDIO = 163.464, KB PROMEDIO = 127,800

De la tabla No.9 concluimos que la ecuación (3.30) pronostica más acertadamente que la ecuación (3.21) siendo los errores relativos 20.24% y 23.24% respectivamente.

En la figura 3.1 podemos observar una dispersión considerable de los fallamientos reales versus el teórico, pero el modelo de la EC. 3.30 pronostica la tendencia general.

Este modelo será de gran utilidad pues proporcionará junto a la ecuación de predicción de la velocidad de penetración una herramienta fundamental para encontrar los parámetros mecánicos óptimos.

#### 3.1.1.9 Selección y Evaluación de brocas.

Como se mencionó a comienzos del capítulo la selección y evaluación tiene un gran efecto sobre la velocidad de penetración, pero también se citó en el capítulo anterior (2.2) que los alcances de la presente investigación no comprendían tales fines; con respecto a la evaluación de la condición de salida de las brocas es un tema de importancia básica para optimizar los parámetros mecánicos, más aún cuando la evaluación de una broca con insertos difiere a una con dientes de acero, e.g., como se sabe los insertos tienen un mínimo desgaste en comparación con los dientes de acero, los insertos se rompen o pierden, los dientes se desgastan, cuando una broca con insertos ha roto o perdido la mitad de sus estructuras cortan-

tes debe ser evaluada T-4, id. est, 4/8 de los insertos han sido rotos o perdidos; mientras una evaluación T-4 en una broca con dientes de acero significa que la mitad de la altura de la mayoría de los dientes han sido desgastados.

### 3.1.2 Peso sobre la broca y velocidad de rotación.

La segunda variable mecánica que afecta la velocidad de penetración es el producto de la interacción del peso sobre la broca y la velocidad de rotación.

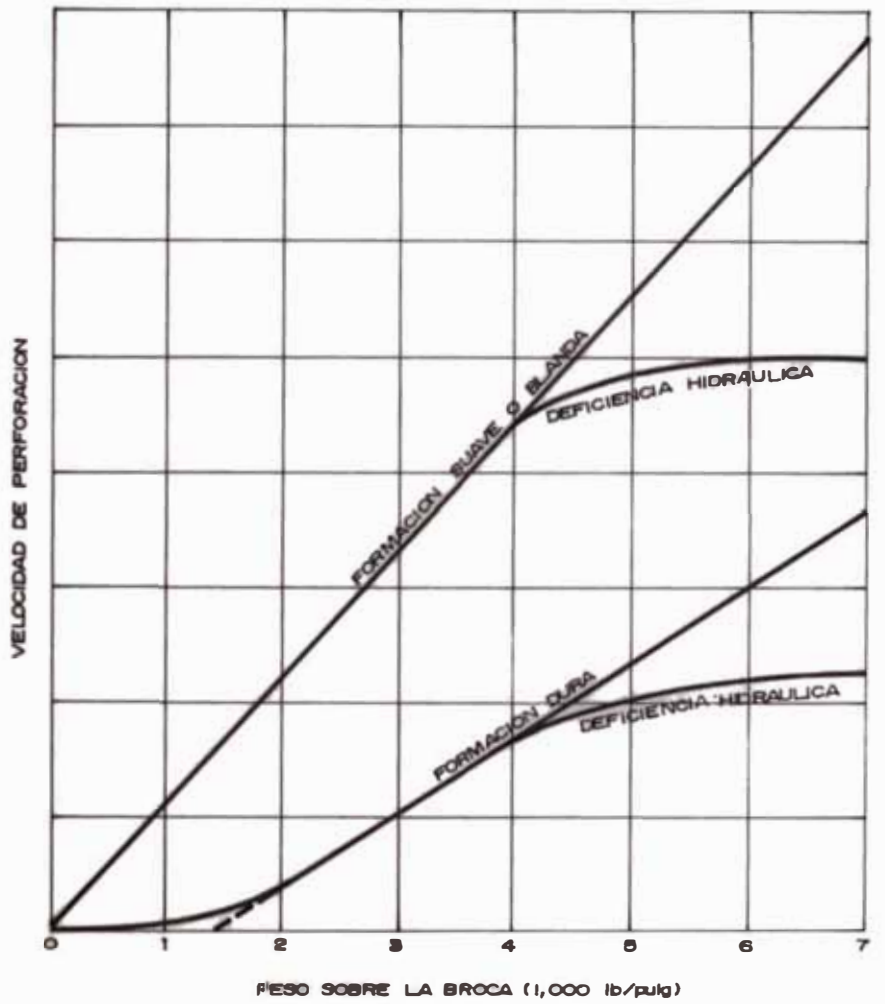
#### 3.1.2.1 Análisis del Sistema.

Analizaremos al peso sobre la broca y la velocidad de rotación como un recurso para incrementar o disminuir la velocidad de penetración dependiendo de la necesidad del sistema global.

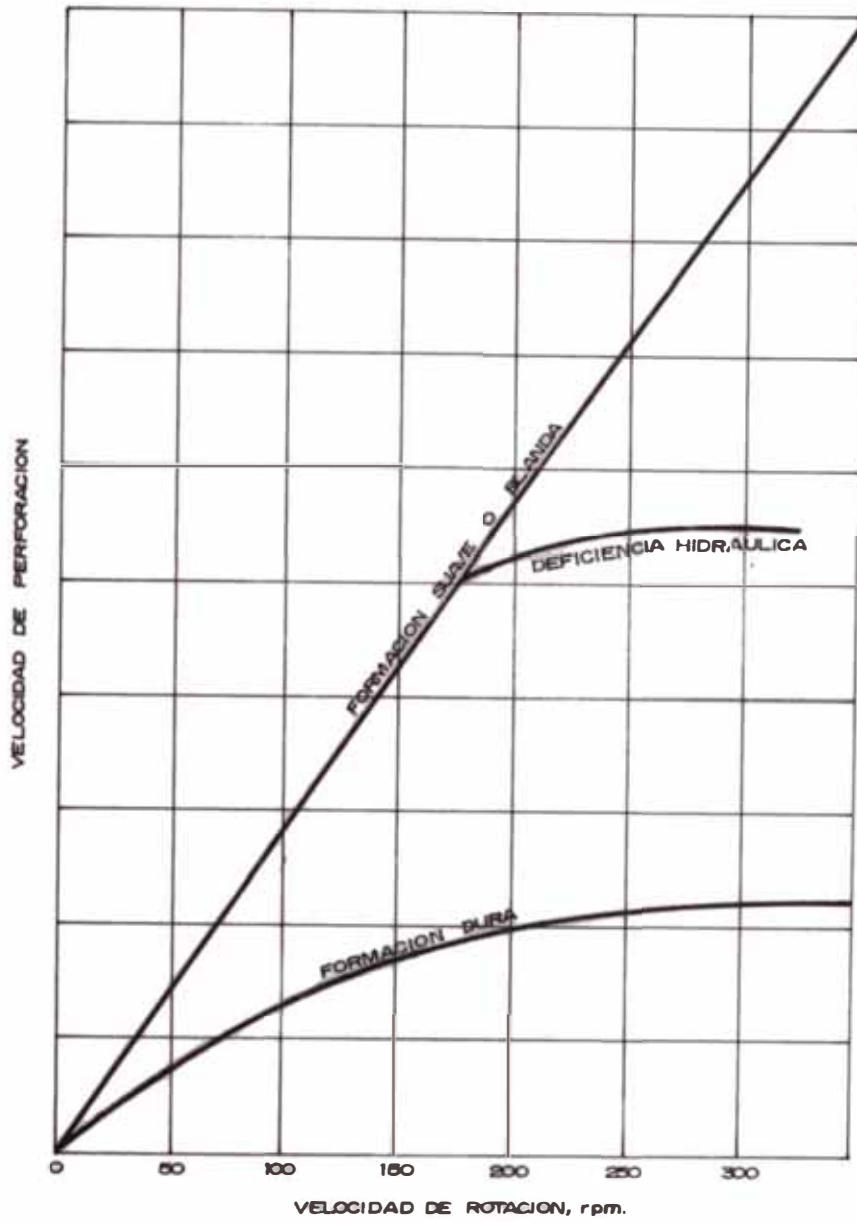
La velocidad de penetración aumenta con el incremento del nivel de la energía mecánica, id.est., incremento del peso y velocidad de rotación, a condición de que exista suficiente energía hidráulica\* disponible en el fondo del pozo.

La interacción de esta variable mecánica con la velocidad de penetración varia dependiendo del tipo de formación atravezada, en formaciones blandas con una baja resistencia a la compresión el peso sobre la broca es directamente proporcional a la velocidad de penetración como se muestra en el gráfico No. 3.2.

-----  
Velocidad de circulación y caída de presión



GRAF. 3,2 ; VELOCIDAD DE PENETRACION VS PESO SOBRE LA BROCA.



**GRAF. 3.3** : VELOCIDAD DE PENETRACION VS. VELOCIDAD DE ROTACION.

En cambio en formaciones duras es necesario primero vencer la resistencia a la compresión de la roca para que luego la velocidad de penetración se incremente con el peso sobre la broca.

Con respecto a la velocidad de rotación, su comportamiento frente a la velocidad de penetración en formaciones blandas o suaves con baja resistencia a la compresión es directamente proporcional, como se ilustra el gráfico No. 3.3.

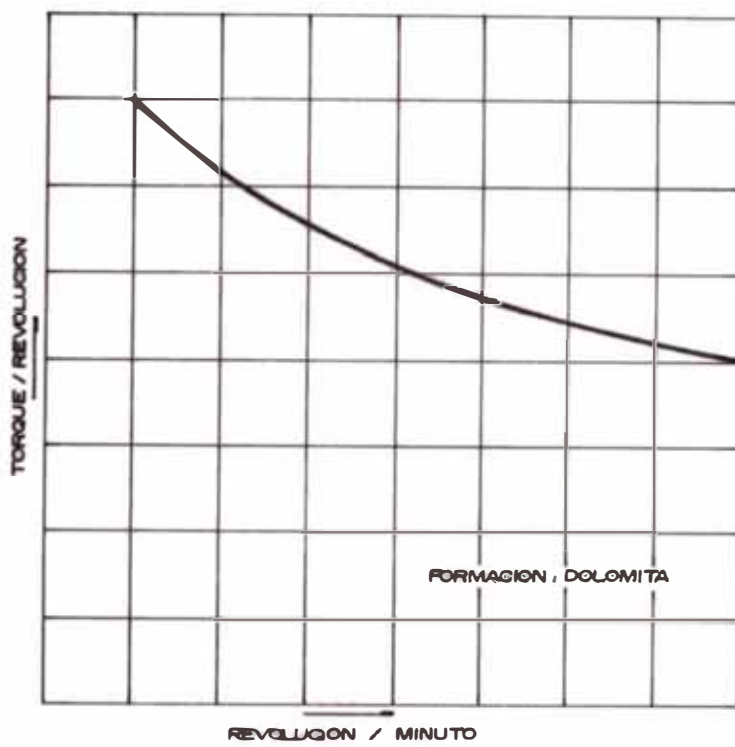
En formaciones duras con alta resistencia a la compresión, la velocidad de penetración no es linealmente proporcional a la velocidad de rotación debido a varios factores, entre los cuáles tenemos que:

- a.- Para fracturar la roca es requerido un tiempo finito determinado.
- b.- Mientras el torque total se incrementa con el aumento de la velocidad de incremento del torque por revolución disminuye<sup>24</sup>. El torque es definido como una medida del trabajo realizado por la broca o como la energía que es transmitida por la broca a la formación.

Esta reducción de torque indica una reducción por revolución del trabajo de perforar con el incremento de la velocidad rotaria. Este mecanismo se expone en la gráfica No. 3.4.

---

<sup>24</sup> P.L. Moore y F.W. Cole.: Drilling Operations Manual, The Petroleum Publishing Co. Oklahoma (1965) 7 - 8.



GRAF. 3.4, TORQUE / REVOLUCION VS. RPM.



### 3.1.2.2 Restricciones del sistema.

Las principales restricciones del sistema son:

- a.- Longitud mínima requerida de los lastrabarrenas para evitar el pandeo de la tubería de perforación.
- b.- El máximo producto permisible de paso sobre la broca por la velocidad de rotación, para evitar el fallamiento instantáneo del cojinete a fricción.
- c.- El máximo producto permisible de peso sobre la broca por la velocidad de rotación, compatible con el cableado hidráulico disponible en la broca para evitar la remolienda.
- d.- Velocidades de rotación críticas que causen vibración, pandeo en la tubería de perforar, desgaste excesivo rápido deterioro y falla por fatiga.

#### 3.1.2.2.1 Longitud mínima requerida de Lastrabarrenas para evitar el pandeo de la tubería de perforación

Las columnas largas y delgadas como la tubería de perforación tienen una baja resistencia a cualquier momento de flexión y tienden a fallar por pandeo cuando son sometidos a esfuerzos verticales de compresión. Como se visualiza en la figura No. 5 - a, la tubería de perforar confinada por las paredes del pozo o la tubería de revestimiento está sujeta a una carga de

compresión en el fondo del pozo que, es menor que la carga que soporta el gancho, luego un pandeo espiral puede suceder en la parte inferior de la tubería, Las fuerzas de pandeo son resistidas por el momento de inercia de la tubería. Para las lastrabarrenas los momentos de inercia son grandes y se asume generalmente de ser suficientemente fuertes para prevenir el pandeo. Sin embargo los momentos de inercia de la tubería de perforar son pequeños y se asume que son negligibles, luego existe la tendencia de pandeo encima de las lastrabarrenas como se ilustra en la figura No. 5 - b.

Si la tubería de perforar es rotada en la condición de pandeo, la unión de herramienta rápido se fatigará y fallará.

Es una práctica común usar suficientes lastrabarrenas en la sección inferior de la sarta de perforación para así aplicar el peso adecuado sobre la broca sin crear la tendencia al pandeo en la tubería de perforar.

El punto por encima del cual no hay tendencia al pandeo algunas veces es referido como el punto neutro. En el punto neutro, el esfuerzo axial es igual al promedio de los esfuerzos tangencial y radial (Fig. No.6). Un diseño práctico generalizado es mantener el punto neutral debajo de la tubería de perforar durante las operaciones de perforación. Luego, la longitud apropiada de lastrabarrenas,  $L_{min}$ , requeridas para eliminar

la tendencia de pandeo de la tubería de perforar es:

$$L_{\min} = \frac{F_b}{W_{dc} \left( 1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)} \quad \dots (3.31)$$

Donde:

$F_b$  : Es la máxima fuerza que se aplicará a la broca durante las operaciones de perforación.

$W_{dc}$  : Es el peso por pie de las lastrabarrenas, lb-f.

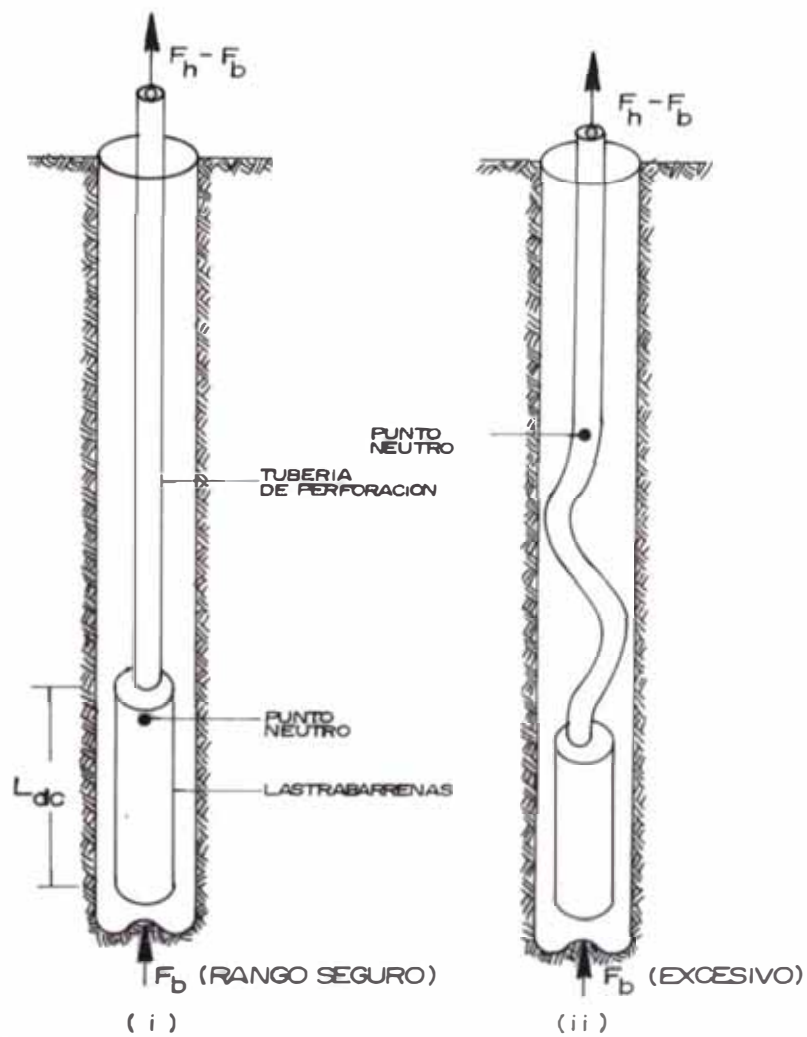
$\rho_f$  : Peso específico del fluido de perforación, lb/gal.

$\rho_s$  : Peso específico del acero, lb/gal.

Para el uso de la ecuación (3.31) debe tomarse en cuenta que sólo se ha considerado las presiones hidrostáticas y se han despreciado las presiones debidas a la circulación del fluido de perforación. También se han desdeñado los efectos debidos al torque para la rotación de la tubería de perforar.

Estos dos factores pueden tener un efecto significativo sobre los esfuerzos radial, tangencial y axial en la pared del tubo y puede causar un cambio significativo en el punto neutro.

También la fricción con las paredes del pozo o tubería de revestimiento hace dificultoso determinar el peso sobre la broca,  $F_b$ , desde el peso observado en el gancho. Entonces cuando se use la ecuación (3.31) es aconsejable incluir un factor de seguridad de

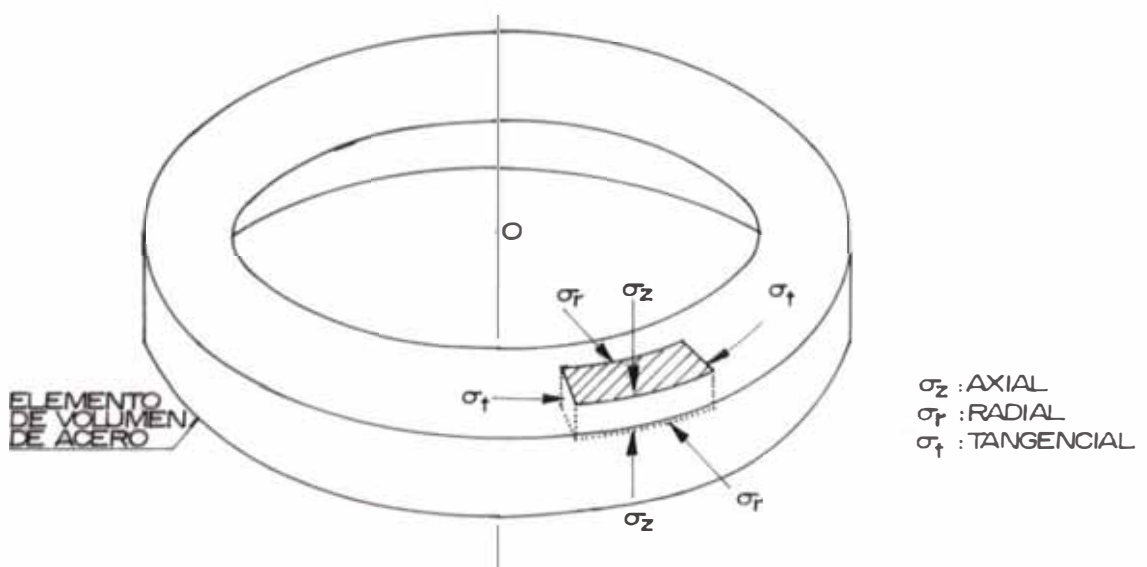


**FIG. 5-b**

PANDEO HELICOIDAL DE LA TUBERIA DE PERFORACION. POR ENCIMA DE LAS LASTRABARRENAS.

(i) CONDICION OPTIMA.

(ii) CONDICION INEFICIENTE DE PANDEO.



**FIG. 6**

ESTADO DE LOS ESFUERZOS EN EL PUNTO NEUTRO DE LA TUBERIA DE PERFORACION.

por lo menos de 1.3.

### Ejemplo ilustrativo 3.5

Se está perforando el pozo 7368 Cuesta a una profundidad de 1,480 pies con una longitud de lastrabarrenas de 462 pies, las características físicas de la lastrabarrena son las siguientes:

diámetro externo = 6 1/4, diámetro interno = 2 13/16; el peso específico del fluido de perforación es de 9.6 libras/galón.

- a) Calcular el máximo peso sobre la broca que se puede aplicar sin que se produzca el pandeo en la tubería de perforación.
- b) Calcular la mínima longitud de lastrabarrenas para prevenir la tendencia al pandeo en la tubería de perforar.

Solución :

a) Cálculo del máximo peso sobre la broca que se puede aplicar sin que se produzca el pandeo:

Calculamos primero el peso por pie de las lastrabarrenas en el aire:

$$W_{dc} = \frac{\pi [(6 \frac{1}{4})^2 - (2 \frac{13}{16})^2] \cdot (490)}{4 (144)} = 83.256$$

$$W_{dc} = 83.256 \text{ lb-f/pie}$$

De la ecuación (3.31),  $F_b = F_b \text{ max}$  y  $L_{min} = L_{dc}$ , despejando  $F_b \text{ max}$

$$F_b \text{ max} = (L_{dc}) W_{dc} (1 - \rho_f/\rho_s)$$

Usando un factor de seguridad de 1.3 ==>

$$F_b \text{ max} = \frac{(Ldc)}{1.3} Wdc (1 - PF/PS) \quad \dots (3.32)$$

Reemplazando los valores del ejemplo ilustrativo 3.5 en la ecuación (3.32) tenemos:

$$F_b \text{ max} = \frac{462}{1.3} (83.256) (1 - 9.6/65.5)$$

$$F_b \text{ max} = 25,000 \text{ libras-f}$$

b) Cálculo de la mínima longitud de las lastrabarrenas para prevenir el pandeo si se perforó con un peso máximo de 20,000 libras-fuerza.

Reemplazando los valores pertinentes en la ecuación (3.31):

$$L \text{ min} = \frac{20,000}{(83.256) (1 - 9.6/65.5)} (1.3) = 366 \text{ pies}$$

Un resumen de los resultados del presente ejemplo y su comparación con las condiciones de operación son presentadas en la tabla No. 10.

TABLA No. 10.- Resultados del ejemplo 3.5 y su comparación con condiciones de Operación.

Pozo 7368 - Cuesta, Equipo No. 8 PETROPERU

	Peso máximo sobre la broca	L. min Lastrabarrenas
Condiciones de Operación	20,000 lb-f	462 pies
Condiciones para prevenir el pandeo en la tubería de perforar	25,000 lb-f	366 pies

Los resultados de la tabla No. 10, bajo las condiciones de operación enunciadas, podría concluirse que fueron dentro de los rangos suficientes para que no exista el peligro de pandeo por efecto del peso máximo sobre la broca o la longitud mínima necesaria de las lastrabarrenas.

El ejemplo ilustrativo 3.5 también es solucionado por medio de un algoritmo que es presentado en el anexo, además se muestra el programa MLDC.

3.1.2.2.2 El máximo producto permisible de peso sobre la broca por la velocidad de rotación para evitar el fallamiento instantáneo del cojinete a fricción. Uno de los métodos para medir

la capacidad del cojinete son los números WN, los cuales han sido determinados para cada tipo de cojinete. El número WN consiste en el producto de peso sobre la broca, W, en 1,000 libras, por la velocidad de rotación, N, en revoluciones por minuto que puede ser operado con seguridad el cojinete. Los WN son números aproximados y están basados en datos experimentales. Dentro de los WN podemos diferenciar 3 rangos:

- a.- El número WN de falla catastrófica
- b.- El número WN de trabamiento inicial
- c.- El número WN promedio.

El número WN de falla catastrófica representa a las combinaciones de peso y velocidad de rotación por encima de los cuáles la vida del cojinete resultará muy breve.

El número WN de trabamiento inicial representa a las combinaciones de peso y velocidad de rotación por debajo de las cuáles el desgaste del cojinete es mínimo, sólo otros factores pueden terminar la corrida de la broca, tal como, falla del sello o roturas del inserto.

El número WN de trabamiento inicial no representa necesariamente las combinaciones óptimas de peso sobre la broca y velocidad de rotación, sólo proporciona una base de donde empezar a buscar la combinación de peso y velocidad de rotación.



El número WN promedio es la media aritmética de los dos números anteriores. Los análisis de los datos de rendimientos de muchas áreas diferentes han mostrado que en muchos casos es económicamente atractivo operar entre el número WN de falla catastrófica y el de trabamiento inicial.

Los valores de los números WN han ido modificándose según el avance de la tecnología, es así, que en 1979 Howell Word y Marvin Fisbeck de la Hughes Tool Co. presentaron los WN para cada tipo y diámetro de broca, ver tabla No. 11.

En los años 1986 y 1987 esta misma compañía introduce una nueva gama de avances importantes tanto en la forma de la estructura cortante de las brocas para formaciones blandas y sobre todo en la metalurgia, sistemas lubricación y el cojinete.

La tabla No. 12\* ilustra los nuevos números WN para las series ATJ. El gráfico 3.5 da una mejor idea de los 3 diferentes rangos de WN.

Tabla No. 11.- Valores de los Números WN de trabamiento inicial

Tamaño/tipo	J-11 (4-3-7)	J-22 (5-1-7)	J-33 (5-3-7)
7 7/8	3,450	3,450	3,450
8 1/2	3,550	3,650	3,650

-----  
Fina cortesía del Sr. Edward M. Galle, Hughes Tool Co,  
Houston, Texas

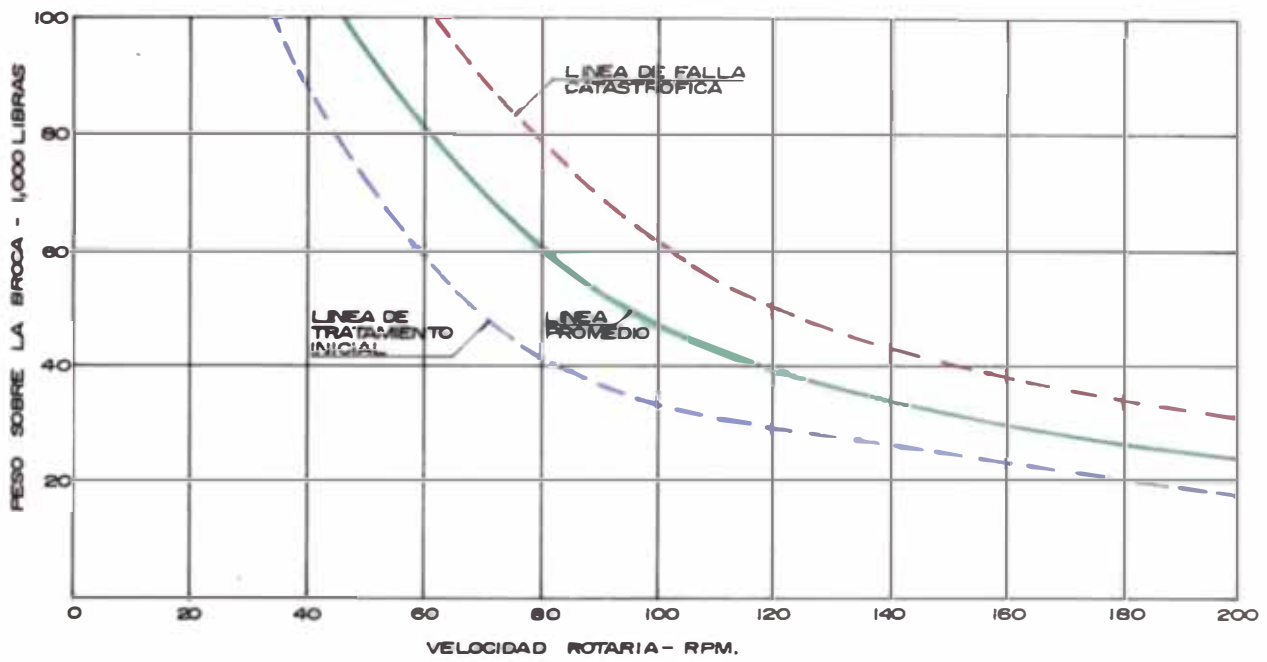
Tabla No. 12.- Valores de los números WN de trabamiento inicial, para la serie ATJ.<sup>25</sup>

Tamaño/ Tipo	ATJ-05(4-1-7)	ATJ-11(4-3-7)	ATJ-11C(4-4-7)	ATJ-22(5-1-7)
7 7/8	3,650	3,650	3,650	3,650
8 1/2	3,650	3,650	3,650	4,300
	ATJ-22C(5-2-7)	ATJ-33(5-3-7)	ATJ-33C(5-4-7)	ATJ-44(6-1-7)
7 7/8	3,650	3,650	3,650	3,500
8 1/2	4,300	4,300	4,300	4,600
	ATJ-44C(6-2-7)	ATJ-55R(6-2-7)	ATJ-55(6-3-7)	ATJ-77(7-3-7)
7 7/8	3,500	3,500	3,500	3,500
8 1/2	4,600	4,600	4,600	4,600

Los valores aproximados de los números WN de falla catastrófica y promedio para las brocas de códigos 4-1-7 hasta 5-4-7 son respectivamente: 6,240 y 4,880.

Las tablas No. 11 y 12 solo se ha considerado la capacidad del cojinete mas no se ha considerado la falla del sello y la rotura de los insertos los cuáles pueden limitar el rendimiento de las brocas.

<sup>25</sup>-----  
 Datos proporcionados por el Sr. Edward M. Galle, Hughes Tool Co, Houston, Texas, 1<sup>o</sup> de Agosto de 1988.



**GRAF 3.5**  
**BROCA ATV - 22**  
 CARACTERISTICAS DE LA CAPACIDAD DEL COJINETE A FRICCIÓN

3.1.2.2.3 El máximo producto permisible de peso sobre la broca por la velocidad de rotación, compatible con el caballaje hidráulico disponible en la broca, para evitar la remolienda.<sup>26</sup>

Antes de mostrar los efectos entre la energía mecánica y la energía hidráulica, es conveniente exponer la forma como afecta el caballaje hidráulico al rendimiento de la broca.

La velocidad de circulación no destruye la roca a excepción en las formaciones blandas o suaves y no consolidadas donde el fluido de circulación erosiona el fondo del pozo, más aún cuando se usa boquillas extendidas. Las funciones del fluido de perforación en relación al rendimiento de la broca son las siguientes:

- a.- Remover rápidamente los recortes del fondo del pozo para evitar la remolienda.
- b.- Limpiar las estructuras cortantes para que los dientes o insertos limpios estén aptos para penetrar la roca.
- c.- Transportar los recortes hacia arriba y fuera de la broca.

La velocidad de penetración se incrementa con el grado de energía mecánica, si la limpie-

---

<sup>26</sup> H.B. Fullerton.: "Constant Energy Drilling System for well programing," Sii Smith Tool, Irvine, California (Agosto - 1973), No pub.

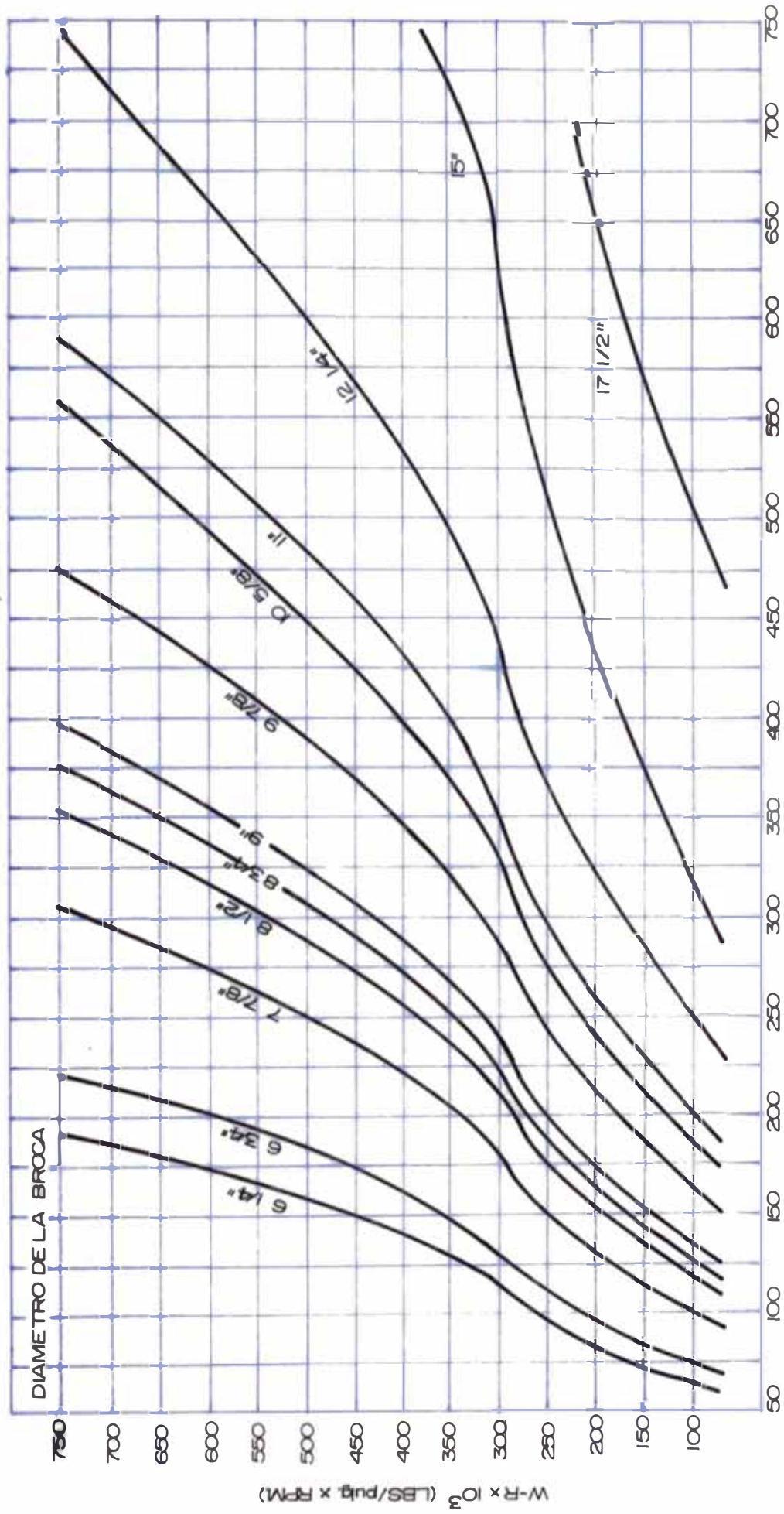
za del fondo del pozo es deficiente, un mayor incremento de peso sobre la broca y de velocidad de rotación no causa un aumento lineal de la velocidad de penetración.

Para una velocidad de producción de recortes debido a una energía mecánica, se requiere una capacidad hidráulica de remoción para la limpieza del fondo del pozo. Si el fondo del pozo no es mantenido limpio, ocurrirá la remolienda de los recortes, este fenómeno es llamado deficiencia hidráulica. Esta condición fue estudiada por Fullerton quien estableció las relaciones entre la energía mecánica y la energía hidráulica tal como se muestran en el gráfico 3.6.

Entonces, cuando se perfora a una determinada energía mecánica y tamaño del hueco, existe un caballaje hidráulico en la broca suficiente para producir una limpieza perfecta del hueco. Si se usa un menor caballaje la velocidad de penetración no se incrementará linealmente debido a la remolienda producida. Si por caso contrario se usa un mayor caballaje hidráulico en la broca y la formación perforada es dura o consolidada entonces se está gastando inútilmente el caballaje hidráulico y el equipo no está trabajando eficientemente.

Conceptualmente se puede expresar que la deficiencia hidráulica es un fenómeno transicional que empieza primero cuando los recortes son re-perforados o remolidos y termina cuando hay muchos recortes que están empaquetando la broca de tal forma que nin-

CABALLAJE HIDRAULICO MINIMO DISPONIBLE EN LA BROCA  
 VS.  
 W-R PARA PREVENIR LA DEFICIENCIA HIDRAULICA.



CABALLAJE HIDRAULICO TOTAL EN LA BROCA  
 GRAF. 3.6

gún incremento en la energía mecánica (WR) incrementará la velocidad de penetración.

Si existe un caballaje hidráulico disponible en la broca le corresponderá un nivel de energía mecánica, id.est.), un máximo producto permisible de peso sobre la broca por la velocidad de rotación (WR), de tal forma que exista un balance entre el caballaje hidráulico en la broca y el WR. De igual forma para un determinado nivel de energía mecánica, existirá una energía hidráulica mínima para evitar la deficiencia hidráulica.

En base al gráfico 3.6 y con referencia al diámetro de la broca de 7 7/8 se construyó el gráfico 3.7 de tal forma que la curva representativa al diámetro de 7 7/8 de la figura 3.6 sea desdoblada en 5 rectas en un papel logarítmico. Esto nos permitió obtener valores numéricos más exactos a través de las cinco curvas potenciales y sus respectivas fórmulas empíricas. La tabla No. 13 muestra los cinco tramos con sus respectivos valores de las constantes y su coeficiente de determinación calculados a base de los puntos expuestos en la tabla No. 13.

Tabla No. 13.- Tabla de valores, constantes y coeficientes de determinación de las cinco curvas potenciales que relacionan el caballaje hidráulico mínimo disponible en la broca y la energía mecánica (W-R) para prevenir la deficiencia hidráulica en brocas de diámetro de 7 7/8.

TRAMO	W-R	BHHP	u	K	R <sup>2</sup>
A-B	100	100	2.794423	0.00025445	0.993781
	125	110			
	150	115.6			
	185	125			
B-C	185	125	1.668288	0.058852	0.995845
	200	131.25			
	220	137.5			
	250	150			
C-D	250	150	0.897710	2.807582	0.982329
	275	162.5			
	290	175			
	300	183.3			
D-E	300	183.3	1.597333	0.071774	0.997678
	337.5	200			
	350	205			
	400	222.5			
	410	225			
	450	237.5			



	490	250			
	500	255			
E-F	500	255	2.55018	0.0033067	0.994418
	550	262.5			
	600	275			
	650	287.5			
	700	295			
	720	300			
	750	306			

Mediante el programa AJT se calculó las constantes y coeficientes respectivos, en el anexo se presenta el respectivo algoritmo

Es importante hacer resaltar que la mejor determinación de los puntos de deficiencia hidráulica son aquellos que se realizan in situ por medio de las pruebas de perforación.

Estas pruebas consisten en incrementar paulatinamente el peso sobre la broca pero manteniendo constante la velocidad de rotación y el cabalaje hidráulico en la broca. La velocidad de penetración es registrada y graficada versus el peso sobre la broca diferentes profundidades; luego el punto de deficiencia hidráulica es definido como el punto donde un incremento del peso sobre la broca o velocidad de rotación o ambas no causarán un incremento lineal en la velocidad de penetración. Se debe notar que el peso sobre la broca y velocidad de rotación óptimas a una condición hidráulica específica

está generalmente en o ligeramente por encima del nivel de energía del punto de deficiencia hidráulica. Estas pruebas son y deberían ser operaciones ordinarias en cada corrida de las brocas, pues toma algunos minutos y los intervalos perforados durante estas pruebas son de 4 a 6 pies.

3.1.2.2.4 Velocidades de rotación críticas que causen vibración, pandeo en la tubería de perforar, desgaste excesivo, rápido deterioro y falla por fatiga.

27

Las velocidades de rotación críticas en las sartas de tuberías de perforación son generalmente la causa del pandeo, desgaste excesivo, rápido deterioro y falla por fatiga de la tubería de perforar. Estas velocidades críticas varían con la longitud, tamaño de las sartas de perforar, las lastrabarrenas y tamaño del hueco del pozo.

Se han encontrado evidencias en pruebas de campo recientes, que a condiciones críticas se requiere una potencia excesiva para mantener constante la velocidad de rotación. Esta indicación de exceso de potencia más los indicios de vibración en la superficie debe ser la señal de alerta para el personal de que se

---

<sup>27</sup> A.P.I.: "Recommended practice for Drill Stem Design and Operating Limits", API RP 7B, Edición onceava, (Mayo 28, 1984). pag. 66-70.

está en el rango crítico.

Existen dos tipos de vibración:

a.- Vibración tipo nodal.- Se llama tipo nodal a esta vibración, debido a que las uniones de herramienta de los tubos de perforar se comportan como nudos rígidos, esto admite que la sección de tubo de perforar que se halla entre las uniones de herramientas vibre como una cuerda de violín.

Esta velocidad crítica de rotación puede aproximadamente pronosticarse mediante la siguiente fórmula:

$$\text{RPM} = \frac{4'760,000}{L_p^2} (OD^2 + d^2)^{1/2} \quad \dots (3.33)$$

RPM: Velocidad de rotación crítica, revoluciones por min.

LP : longitud del tubo de perforar, pulgadas.

OD : Diámetro externo del tubo, pulgadas.

d : Diámetro interno del tubo, pulgadas.

Según el presente boletín del API la fórmula 3.33 tiene un grado de exactitud de un 15%, luego en base a esto debe evitarse las velocidades en un rango de 15% por encima o debajo de lo calculado por la formula 3.33. La tabla 14 muestra la velocidad crítica de rotación aproximada para cada uno de los tamaños de diámetro de tuberías de perforar; Se debe notar que estas velocidades corresponden al menor peso por pie de cada

tamaño de tubería.

TABLA No. 14.- Diámetro de la tubería de perforar vs. Velocidad rotaria crítica.

Diámetro (pulg.)	velocidad rotaria crítica aproximada (RPM)
2 3/8	110
2 7/8	130
3 1/2	160
4	185
4 1/2	210
5	235
5 1/2	260

#### Ejemplo ilustrativo 3.6

Se desea investigar el rango de velocidades de rotación críticas del tipo nodal para la tubería de perforar de 4 1/2 de 16.60 lb/pie.

Para la solución se considerará lo siguiente:

OD = 4.5 pulg., d = 3.826 pulg., Lp = 30 pies

Aplicando la ecuación 3.33

$$\text{RPM} = \frac{4'760,000}{(30)^2 \times 144} (4.5^2 + 3.826^2)^{1/2} = 217 \text{ RPM}$$

Calculando el Rango:

$$\frac{85 \times 217}{100} = 185 \text{ RPM}$$

$$\frac{115 \times 217}{100} = 250 \text{ RPM}$$

El rango de velocidades críticas que debe evitarse son: 185 - 250 RPM. en la tubería de 4 1/2 pulg. de 16.60 lb/pie.

b.- Vibración ondulatoria - pendular.- Este tipo de vibración compuesta de un movimiento oscilatorio típico del resorte y del péndulo ejercen sus efectos sobre toda la sarta de perforar.

Este tipo de vibración es probablemente menos significativo que el tipo nodal.

Pueden ocurrir vibraciones armónicas secundarias o más altas a 4, 9, 16, 25, 36 etc, veces la profundidad a la cual sucede la vibración primaria. Esta vibración primaria puede calcularse por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{RPM} = \frac{258,000}{\text{DPL}} \quad \dots (3.34)$$

donde:

RPM = Velocidad crítica, revoluciones por minuto

DPL = Longitud total de la sarta, pies.

Debe tomarse un cuidado particular en evitar operar bajo aquellas condiciones donde los dos tipos de vibraciones ocurran simultáneamente, pues la combinación de los dos tipos de vibración es especialmente peligroso para el equipo. Tomando como base la tabla No. 14 y la ecuación (3.34) desarrollamos la Tabla No. 15 para

los dos tipos de vibración que coinciden a una misma profundidad y velocidad rotaria. Se presenta el gráfico 3.8 que es un desarrollo de la tabla No.15.

Tabla No. 15.- Coincidencia de profundidad y velocidad rotaria para los dos tipos de vibración.

Diámetro Ext. (pulg.)	RPM	Profundidades de Coincidencia de Vibración (pies)			
2 3/8	110	2,300	9,400	21,000	
2 7/8	130	1,960	8,000	18,000	32,000
1 1/2	160	1,600	6,600	14,800	26,000
4	185	1,390	5,600	12,700	22,000
4 1/2	210	1,200	5,000	11,200	19,700
5	235	1,100	4,500	10,000	17,500
5 1/2	260	980	4,000	9,000	15,900

#### Ejemplo ilustrativo 3.7

Se desea saber con un mayor grado de exactitud las profundidades de coincidencia de los dos tipos de vibraciones para la tubería de 4 1/2 pulgadas, 16.60 lb/pie.

En base al rango de velocidades de rotación críticas de vibración del tipo nodal calculados en el ejemplo anterior, calculamos con la ecuación 3.34 las profundidades de coincidencia de los dos tipos de vibración.

Cálculo del rango de profundidades:

$$DpL = \frac{258,000}{185} = 1,395; \quad DpL = \frac{258,000}{250} = 1,032$$

$$DpL = [ 1,032 \quad , \quad 1,395 ]$$

Como las vibraciones armónicas suceden a 4, 9, 16, 25 ... veces la profundidad DpL entonces tenemos la siguiente tabla.

TABLA No. 16.- Coincidencias de profundidades y velocidades de rotación para los dos tipos de vibración en un determinado rango de velocidad de rotación : 185 - 250 RPM para la tubería de perforar de 4 1/2 pulg., 16.60 lb/pie.

Rango de velocidades de Rotación Críticas (RPM)		Rango de profundidades de coincidencia de vibraciones. (pies)		
250	1,032	4,100	9,200	16,500
185	1,395	5,500	12,500	22,300

En base a la tabla No. 16 trazamos el gráfico 3.9 donde se muestra el rango de velocidades críticas y el rango de profundidades de coincidencias de los dos tipos de vibraciones estudiadas.

### 3.1.3 Resumen.

El mayor énfasis del estudio de las variables mecánicas reside en el análisis del desgaste de las dife-

rentes estructuras de la broca, tales como, dientes, insertos y cojinetes, así como su efecto directo en la velocidad de penetración considerando las restricciones del sistema. Se estudia también como el peso sobre la broca y la velocidad de rotación se hallan relacionados con el desgaste de las estructuras de la broca y por lo tanto afectando la velocidad de penetración.

El objetivo global de nuestro sistema no sólo comprende el estudio de la variación de la velocidad de penetración frente a factores mecánicos, si no también fundamentalmente debido a los factores hidráulicos que serán observados seguidamente.

### 3.2 Variable hidráulica.

#### 3.2.1 **Análisis del Sistema.**

La optimación de la hidráulica es el balance apropiado de ciertos recursos del subsistema que satisfacen cierto criterio de estimación llamado Objetivo Global del sistema. Estos recursos del subsistema que fueron citados en el capítulo I, deben ejecutarse en rangos de operación apropiadas.

##### 3.2.1.1 **Objetivo del Subsistema.**

El objetivo de la hidráulica óptima debe ser compatible con el Objetivo Global del sistema el cual es la optimación de la perforación.

El objetivo del subsistema consiste en los siguientes criterios:



- a) Maximizar la limpieza del fondo del pozo basada en la potencia hidráulica disponible en superficie.
- b) Determinar cuanta limpieza del fondo del pozo se requiere hacer o el caballaje hidráulico en la broca para equilibrar el nivel de energía mecánica de peso sobre la broca y velocidad de rotación con el fin de maximizar adecuadamente la velocidad de penetración.
- c) Determinar la respuesta de la velocidad de penetración al incremento del caballaje hidráulico en la broca para comparar la minimización de los costos de perforación versus el incremento de los costos operativos debidos al requerimiento de aumento de caballaje hidráulico.

### 3.2.2 Teoría básica para una hidráulica óptima

La teoría básica para una hidráulica óptima se halla resumida en los tres criterios expuestos anteriormente, sin embargo un parámetro que debe establecerse previamente a una optimación de la hidráulica es la velocidad anular mínima de circulación para levantar los recortes; este parámetro es determinado por las características de la formación atravezada y por las propiedades del fluido de perforación, por lo tanto es recomendable que en la optimación del fluido de perforación se establezca el caudal mínimo apropiado para levantar los recortes de la perforación.

Fullerton<sup>28</sup> estableció una relación empírica

---

<sup>28</sup> H.B. Fullerton.: "Constant Energy Drilling System for well programing", cit., pag. 14

entre el peso específico del fluido de perforación y el diámetro del hueco del pozo para establecer una velocidad anular óptima práctica que permitiese remover adecuadamente los recortes de perforación. Esta relación está dada por la siguiente ecuación:

$$AV = \frac{11,800}{(MDWT) \cdot (d_b)} \quad \dots (3.35)$$

Donde:

AV = Velocidad anular práctica recomendada por Fullerton para la remoción de los recortes, pies/-minuto.

MDWT = Peso específico del fluido de perforación, libras/-galon.

$d_b$  = Diámetro de la broca o del hueco del pozo, pulgadas.

Se debe observar que la ecuación 3.35 es sólo una ecuación empírica, una relación de mayor exactitud se debe desarrollar a partir de las características propias de la formación atravezada y de las propiedades R.heológicas del tipo de fluido de perforación que se disponga.

#### 3.2.2.1 Tipo de Métodos de programas hidráulicos óptimos.

Según los criterios que encausan al objetivo del subsistema, los métodos para programas hidráulicos óptimos se pueden dividir en tres grupos:

- a.- Métodos que dependen de la determinación de cuanta limpieza del fondo del pozo se requiere, basados generalmente en el balance entre la energía hidráulica, i.e., caballaje hidráulico en la broca, y el nivel de energía mecánica.
- b.- Métodos que asumen la maximización de cierto criterio arbitrariamente establecido para estimar la limpieza del fondo del pozo.
- c.- Métodos basados en la maximización de la velocidad de perforación fundamentados en la determinación del rango óptimo de operación de la bomba de fluido de perforación.

Los métodos del primer grupo deben ser aplicados en forma conjunta con la selección óptima de las variables mecánicas, i.e., peso sobre la broca y la velocidad de rotación; requieren de pruebas de campo para localizar los puntos donde empieza la deficiencia hidráulica, su aplicación se restringe generalmente a ser un factor limitante de la optimación de las variables mecánicas.

Kendall y Goins<sup>29</sup> desarrollaron los diferentes criterios del segundo grupo de métodos de optimación de la hidráulica, tales como: Máximo caballaje hidráulico en la broca, máxima fuerza de impacto y máxima velocidad en las

---

<sup>29</sup> H.A. Kendall y W.C. Goins.: "Design and Operation of Jet-Bit Programs for Maximum Hydraulic Horsepower, Impact force or Jet velocity, "J. Pet. Tech. (oct. 1960) 238-250. Trans., AIME, 219.

boquillas. El máximo número de Reynolds<sup>30</sup> fue desarrollado posteriormente el cual genera iguales resultados que el método de máxima velocidad en las boquillas. Todos los métodos de este grupo se caracterizan por establecer previamente en forma arbitraria el rango máximo de operación de la presión de la bomba o el máximo caballaje hidráulico, para posteriormente calcular la velocidad de circulación óptima y el diámetro equivalente de las boquillas.

Entre los métodos del tercer grupo podemos mencionar:

Al que considera los efectos de la presión diferencial, i.e, la diferencia de presiones entre el fondo del pozo y la presión de la formación, y los efectos de las restricciones de las bombas en la maximización efectiva de la velocidad de penetración, incluyendo pérdida de tiempo de perforación debido a fallas en las bombas causadas por altas presiones de descarga<sup>31</sup>.

El segundo método de este tercer grupo señala los efectos de la restricciones de la presión de la bomba en el análisis económico, considerando la comparación del incremento de los costos operativos de mantenimiento y combustible de la bomba versus la minimización de los costos de perforación debido al incremento de la velocidad

-----  
<sup>30</sup> M. Bizanti, U.F. Makki, L.G. Jackson y R.M. Caruthers.: "Bit Hydraulics Optimization Using Reynolds Number Criteria", SPE 16465, 1985, No publicado

<sup>31</sup> Stefan Miska y Pal Skalle.: "Theoretical Description of a New Method of Optimal Program Design", Soc. Pet. Eng. J. (Agosto, 1981) 425-434.

de perforación<sup>32</sup>. Estos dos métodos citados anteriormente difieren de los métodos tradicionales en que las condiciones operativas óptimas de la bomba son determinadas antes que sean dispuestas en forma arbitraria, como una restricción al sistema. De estos dos métodos mencionados se desarrollará solamente la teoría expuesta por Doiron y Deane debido a su menor grado de complejidad, y mayor aplicabilidad en el campo.

Los métodos del primer grupo ya han sido expuestos anteriormente y su aplicabilidad se explicará cuando se desarrolla la selección del peso sobre la broca y velocidad de rotación óptimos.

Los métodos del segundo y tercer grupo son complementarios pues tienen dos finalidades respectivamente, la primera es maximizar la limpieza del fondo del pozo y la segunda es, maximizar la velocidad de perforación dependiendo de la respuesta entre la velocidad de penetración y el incremento del caballaje hidráulico en la broca, subordinando a un tipo de formación geológica adecuada.

### 3.2.2.2 Métodos que asumen la maximización de cierto criterio arbitrariamente establecido para estimar la limpieza del fondo del pozo.

#### 3.2.2.2.1 Restricciones del subsistema<sup>33</sup>.

<sup>32</sup> H.H. Doiron y J.D. Deane.: "A New Approach for Optimizing Bit Hydraulics", 1983 cit.

<sup>33</sup> Morten Saebo.: "Bit Hydraulics Optimization", Artículo presentado al Coloquio de Perforación, Stavanger, (Abril, 1984)

a.- Máxima presión disponible en la superficie en la cual el sistema puede operar con seguridad, depende de:

Especificaciones de fábrica de la camisa, generalmente se recomienda no exceder al 90% de la capacidad de la camisa.

- Rango de capacidad de presión del equipo de superficie, generalmente la mayoría de los equipos son diseñados para operar hasta 5,000 lbs/pulgada<sup>2</sup>, pero se debe considerar el estado de mantenimiento del equipo de superficie en particular.

Especificaciones del operador, comúnmente se elije 3000 lbs/pulgada<sup>2</sup> para prevenir un desgaste excesivo de las partes intercambiables de la bomba, esta presión puede disminuir según el estado del equipo en uso.

Los tamaños óptimos de la camisa deben ser definidos antes de iniciar la perforación. Una regla práctica es que las camisas sean lo suficientemente capaces de limpiar un hueco de 26 - 17 1/2 pulgadas con ambas bombas en operación y que sea suficientemente potente en proporcionar la velocidad anular mínima en un hueco de 12 1/4 pulgadas con una sola bomba en operación.

b.- Máxima velocidad de circulación.

- La máxima velocidad de circulación debe mantenerse por debajo del flujo crítico donde el flujo turbulento empieza a producirse. El flujo turbulento

debilita a las formaciones deleznablees lo cual debe evitarse, el flujo turbulento también incrementa la pérdida de presión en la zona anular en el punto donde existe pérdida de circulación. Las velocidades anulares altas pueden ser más tolerados normalmente en huecos pequeños a través de formaciones duras que en huecos grandes y a través de formaciones blandas. Máxima velocidad de circulación física dependiente de las especificaciones de fábrica.

c.- Velocidad de circulación mínima de transporte y remoción efectiva de los recortes.

La velocidad de circulación mínima debe ser la suficientemente alta para limpiar el hueco, evitando el empaquetamiento de la broca y por lo tanto un agarre de la sarta de perforar.

d.- Tipo de Métodos de programa hidráulico óptimos a emplear.

El tipo de método depende del número de bombas, rangos de caballaje, tamaños de las camisas y el rango de operación sin restricción.

Tipo de formación atravezada.

e.- Máximo caballaje hidráulico.

- Generalmente debe tomarse esta restricción en equipos pequeños.

f.- Máxima corriente transversal de 50 g.p.m. por pulgada para evitar daño a la broca y evitar erosión y altas presiones en el espacio anular.

### 3.2.2.2.2 Máximo caballaje hidráulico en la broca.

El máximo caballaje hidráulico en la broca está basado en la teoría en que los recortes son óptimamente removidos debajo de la broca por medio del máximo caballaje hidráulico en el fondo del pozo.

El caballaje en la broca no es necesariamente maximizado operando la bomba al máximo caballaje. Esto puede demostrarse a través de la siguiente explicación.

La presión de la bomba es utilizada en vencer las siguientes pérdidas de presión por fricción en:

- El equipo de superficie,  $\Delta P_{SUR C.}$ , lb/pulg<sup>2</sup>.

La tubería de perforar,  $\Delta P_{D.P.}$ , lb/pulg<sup>2</sup>.

Las Lastrabarreras,  $\Delta P_{DC}$ , lb/pulg<sup>2</sup>

En las boquillas de la broca,  $\Delta P_{BIT}$ , lb/pulg<sup>2</sup>.

En la zona anular entre las lastrabarreras y la pared del pozo,  $\Delta P_{H - DC}$ , lb/pulg<sup>2</sup>.

En la zona anular entre la tubería de perforar y la pared del pozo,  $\Delta P_{H - D.P.}$ , lb/pulg<sup>2</sup>.

En la zona anular entre la tubería de perforar y la pared de la tubería de revestimiento,  $\Delta P_{CSG - D.P.}$ , lb/pulg<sup>2</sup>.

Lo dicho anteriormente se puede expresar matemáticamente por la siguiente ecuación.



$$\begin{aligned} \text{SPP} = \Delta P_s + \Delta P_{dp} + \Delta P_{dc} + \Delta P_b + \Delta P_{H-DC} + \Delta P_{H-DP} + \\ + \Delta P_{csg-DP} \quad \dots (3.36) \end{aligned}$$

Si llamamos presión parásita o presión de circulación a:

$$\Delta PC = \Delta P_s + \Delta P_{dp} + \Delta P_{dc} + \Delta P_{H-DC} + \Delta P_{H-DP} + \Delta P_{csg-DP} \quad \dots (3.37)$$

luego:

$$\text{SPP} = \Delta PC + \Delta P_b \quad \dots (3.38)$$

La caída de presión de circulación es directamente proporcional al caudal elevado a un determinado exponente que varía entre uno y dos, uno para flujo laminar y dos para flujo turbulento. Este exponente depende de:

- a.- Propiedades del fluido de perforación
- b.- Temperatura del fondo del pozo
- c.- Discontinuidades en la tubería de perforar
- d.- Irregularidades del tamaño y calidad del hueco del pozo.
- e.- Patrón de flujo del fluido de perforación

Dependiendo de lo expresado anteriormente cada pozo o área tiene su propio exponente, el cual puede variar entre uno y dos. La ecuación siguiente expresa la relación entre la presión de circulación y el caudal o velocidad de circulación.

$$\Delta P_c = K Q^u \quad \dots (3.39)$$

donde K = constante de proporcionalidad

Q = velocidad de circulación, GPM

Reemplazando la ecuación 3.39 en 3.38 y despejando  $\Delta P_b$

$$\Delta P_b = SPP - K Q^u \quad \dots (3.40)$$

Se considerará solamente el caso cuando se limita la presión de la bomba; el caballaje hidráulico en la broca está expresado por:

$$BHHP = \frac{\Delta P_b Q}{1,714} \quad \dots (3.41)$$

Donde:

BHHP = Caballaje hidráulico en la broca

De la ecuación 3.40 y 3.41, entonces:

$$BHHP = \frac{SPP Q - K Q^{u+1}}{1,714} \quad \dots (3.42)$$

derivando la ec. 3.42 con respecto a la velocidad de circulación e igualando a cero, tenemos:

$$\frac{d BHHP}{d Q} = \frac{SPP - (u + 1) K Q^u}{1,714} = 0 \quad \dots (3.43)$$

Resolviendo la ecuación 3.43 y utilizando la ec. 3.39

$$SPP = (u + 1) K Q^u = (u + 1) \Delta P_c \quad \dots (3.44)$$

Despejando  $\Delta P_c$  de ecuación 3.44

$$\Delta P_c = \left\{ \frac{1}{U + 1} \right\} SPP \quad \dots (3.45)$$

Si  $SPP = \Delta P_c + \Delta P_b$  reemplazando en 3.45

Tenemos:

$$SPP = \frac{SPP}{U + 1} + \Delta P_b \quad \text{despejando } \Delta P_b$$

$$\Delta P_b = \left\{ \frac{U}{U + 1} \right\} SPP \quad \dots (3.46)$$

Desde que  $\frac{d^2 BHP}{d^2 Q}$  es menor que cero luego el cabalaje hidráulico en la broca será máximo cuando la caída de presión en el sistema de circulación,  $\Delta P_c$ , sea  $1/(U+1)$  veces la presión de la bomba del fluido de perforación; así mismo el máximo cabalaje hidráulico en la broca se establecerá cuando  $\Delta P_b$ , sea  $U/(U+1)$  veces la presión de la bomba del fluido de perforación.

Desde un punto de vista práctico, es conveniente seleccionar un tamaño de la camisa de la bomba que sea adecuada para perforar todo el pozo, en vez de, reducir periódicamente el tamaño de la camisa tan pronto se profundize el pozo para mantener el valor teó-

rico máximo del caballaje en la broca. Luego en la parte somera del pozo, generalmente la velocidad de circulación se mantiene constante a la máxima capacidad de la camisa seleccionada. Este caudal,  $Q_{max}$ , es usado hasta una cierta profundidad en la cual  $\Delta P_c/P_p$  es el valor óptimo,  $1/(U+1)$ , luego la velocidad de circulación es reducida paulatinamente con el incremento de la profundidad para mantener el valor óptimo de  $\Delta P_c/P_p$ , sin embargo el caudal nunca debe ser menor de la velocidad de circulación mínima para levantar o remover los recortes producidos.

#### 3.2.2.2.3 Máxima fuerza de impacto hidráulico.

La teoría de la máxima fuerza de impacto hidráulico, está fundamentado en que la mejor forma de remover la formación debajo de la broca es cuando la fuerza del fluido de perforación que sale de los orificios de las boquillas es máxima al golpear el fondo del pozo.

Cuando se consigue el máximo caballaje hidráulico en la broca la fuerza de impacto hidráulico calculada está muy cercana a su valor máximo, esto a diferencia cuando la fuerza de impacto hidráulico es maximizada y el caballaje hidráulico en la broca calculada no está tan cercano a su valor máximo, por esta razón y además para conseguir el máximo caballaje hidráulico en la broca se utiliza una velocidad de circulación menor que el presente método estudiado, todo esto puede ser un indi-

cativo que el método de máximo caballaje sea más ventajoso que el de máximo impacto; pero si consideramos a la variable del tipo de formación atravezada se puede concluir que el método de máximo impacto hidráulico se adecua más formaciones duras a medias duras, y en cambio el método de máximo caballaje hidráulico en la broca se utiliza en formaciones blandas a muy blandas.

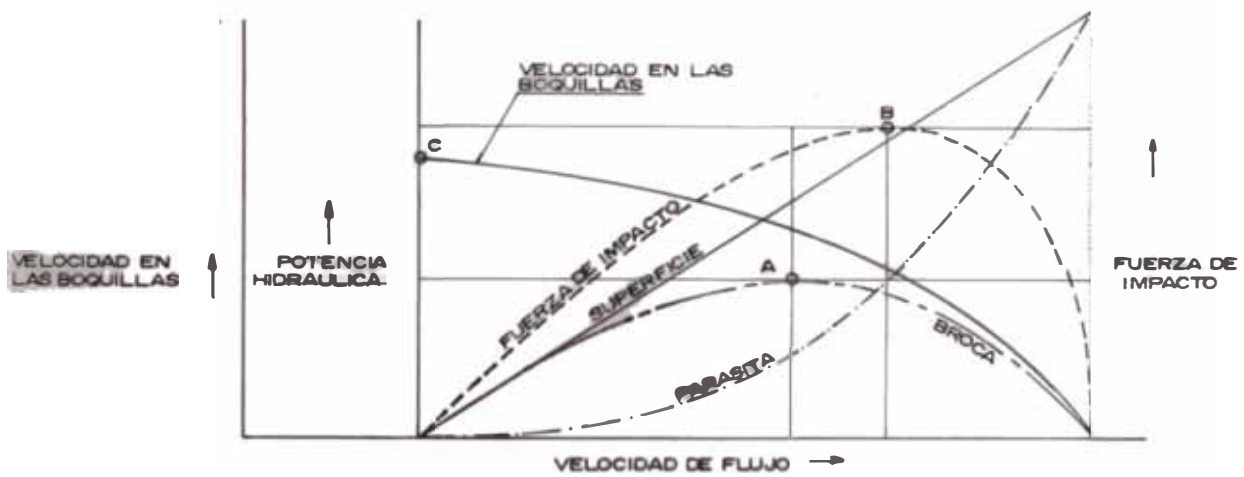
El gráfico 3.10 explica lo expuesto anteriormente, donde al maximizar el caballaje hidráulico en la broca la fuerza de impacto está en un 92% del valor máximo que podría alcanzar, así mismo al maximizar la fuerza de impacto el caballaje hidráulico en la broca tiene un valor del 88% del total que podría alcanzar. El gráfico 3.10 también nos muestra que se necesita una menor velocidad de flujo para maximizar el caballaje hidráulico en la broca en comparación con la maximización de la fuerza de impacto.

El gráfico en referencia ilustra la relación que existe entre el caballaje hidráulico debido a la caída de presión por fricción en el sistema de circulación versus la velocidad de flujo del fluido de perforación, relación que pertenece a un comportamiento graficado por una curva potencial lo que es ratificado por medio de la ecuación 3.39,

$$\Delta P_c = K Q^u$$

multiplicando a ambos miembros por  $Q$ , tenemos

$$\Delta P_c (Q) = HHPC = K Q^{u+1} \text{ curva que sigue la ley de po-}$$



- A.- BHP OPTIMO.
- B.- IMPACTO HIDRAULICO OPTIMO.
- C.- VELOCIDAD EN LAS BOQUILLAS OPTIMA.

GRAFICO 3.10

ALGORITMO DE OPTIMACION DE LA HIDRAULICA

tencias.

Para obtener el máximo impacto hidráulico del fluido de perforación la fuerza de impacto debe ser maximizada matemáticamente, esto significa que la primera derivada de la fuerza (F) con respecto a la velocidad de circulación (Q) debe ser cero. Esta relación debe derivarse de la Segunda Ley de Newton.

$$F = m.a \quad \dots (3.47)$$

De la ecuación 3.47

$$F = \frac{MV_1 - MV_2}{t} \quad \dots (3.48)$$

Assumiendo que el fluido se mueve hacia abajo y cambia de dirección para dirigirse hacia arriba cuando golpea el fondo del pozo, luego a cierta velocidad instantánea  $V_2 = 0$ . La velocidad de flujo de la masa, (M/t), puede expresarse por medio del producto de la densidad del fluido ( $\rho$ ) y del caudal (Q), luego reemplazando en ecuación 3.48.

$$F = \rho.Q.V \quad \dots (3.49)$$

donde:

V = velocidad

La caída de presión a través de las boquillas de la broca en flujo turbulento puede

expresarse mediante la siguiente ecuación

$$\Delta P_b = \frac{\rho \cdot Q^2}{C_1 \cdot A^2} \quad \dots (3.50)$$

donde:

$C_1$  = constante y  $A$  = área de la boquilla

Luego:  $\frac{Q}{A} = V$  reemplazando en ecuación 3.50

$$\Delta P_b = \frac{\rho \cdot v^2}{C_1} \quad \dots (3.51)$$

despejando  $v$ ,

$$v = \left[ \frac{C_1 \cdot \Delta P_b}{\rho} \right]^{0.5} \quad \dots (3.52)$$

De la ecuación 3.52 y 3.49 tenemos:

$$F = \rho \cdot Q \cdot \left[ \frac{C_1 \cdot \Delta P_b}{\rho} \right]^{0.5}$$

$$F = Q \cdot (C_1 \cdot \rho \cdot \Delta P_b)^{0.5} \quad \dots (3.53)$$

Si  $(C_1 \cdot \rho)^{0.5} = C$  entonces reemplazando en 3.53

$$F = Q \cdot C \cdot \Delta P_b^{0.5} \quad \dots (3.54)$$

La caída de presión a través de todo el sistema puede ser leído en el manómetro del tubo parado, SPP, del equipo de superficie. Esta presión está compuesta de la suma de las caídas de presión en la broca,  $\Delta P_b$ , y en el sistema de circulación,  $\Delta P_c$ ,



$$\Delta P_b = SPP - \Delta PC \quad \dots (3.55)$$

donde:

$$\Delta P_p \approx SPP$$

Al iniciar la perforación, en las partes someras del pozo el caballaje hidráulico limita la limpieza y, la caída de presión a través del sistema no es aún significativo a altas velocidades de flujo. En cambio cuando se profundiza el pozo, los caudales altos producen altas caídas de presión a través de la tubería de perforar, las lastrabarrenas y la zona anular. Esto requerirá de presiones más altas que la permisible del equipo de perforación. De lo expresado se debe considerar estas dos limitaciones a la presión en superficie.

Primer caso.- Presión de superficie sin límite.

El caballaje hidráulico limitado puede expresarse matemáticamente como:

$$SPP \cdot Q = HHP = \text{constante} \quad \dots (3.56)$$

De ecuación 3.56 y 3.55

$$\Delta P_b = \frac{HHP}{Q} - \Delta PC \quad \dots (3.57)$$

De ecuación 3.39 en 3.57

$$\Delta P_b = \frac{HHP}{Q} - KQ^U \quad \dots (3.58)$$

De la ecuación 3.54 y 3.58

$$F = C \cdot Q \cdot \left( \frac{HHP}{Q} - KQ^U \right)^{0.5}$$

$$F = C \cdot (HHP \cdot Q - KQ^{U+2})^{0.5} \quad \dots (3.59)$$

Derivando la ecuación 3.59 con respecto a Q e igualando a cero:

$$\frac{dF}{dQ} = \frac{C (HHP - K(U+2) Q^{U+1})}{(HHP \cdot Q - KQ^{U+2})^{0.5}} = 0 \quad \dots (3.60)$$

luego la ecuación 3.60 será cero si el numerador es igual a cero.

$$HHP = K (U+2) Q^{U+1} \quad \dots (3.61)$$

De la ecuación 3.61 y 3.56

$$\begin{aligned} SPP \cdot Q &= K (U+2) Q^{U+1} \\ SPP &= K (U+2) Q^U \quad \dots (3.62) \end{aligned}$$

De la ecuación 3.62 y 3.39

$$SPP = (U+2) \Delta PC \quad \dots (3.63)$$

Despejando  $\Delta PC$  de la ecuación 3.63

$$\Delta PC = \left\{ \frac{1}{U+2} \right\} SPP \quad \dots (3.64)$$

Si  $SPP = \Delta PC + \Delta P_b$  luego

$$SPP = \left\{ \frac{1}{U+2} \right\} SPP + \Delta P_b \quad \dots (3.65)$$

Despejando  $\Delta P_b$  de la ecuación (3.65)

$$\Delta P_b = \left\{ \frac{U + 1}{U + 2} \right\} \text{SPP} \quad \dots (3.66)$$

Como  $d^2F/d^2Q$  es menor que cero, luego el máximo impacto hidráulico en la broca se obtendrá cuando la caída de presión en el sistema de circulación sea  $1/(U+2)$  veces la presión del tubo parado o presión de la bomba, SPP; así mismo el máximo impacto hidráulico en la broca se obtendrá cuando la caída de presión en la broca sea  $(U+1)/(U+2)$  veces la presión de la bomba.

Segundo caso.- Presión de superficie limitada.

Al ir aumentando la profundidad del pozo, se llegará a un punto en que no se podrá seguir incrementando la presión de superficie para obtener toda la capacidad de cabalaje hidráulico. Entonces la presión de superficie se convertirá en una condición limitante. luego la ecuación 3.55 se podrá expresar de la siguiente forma:

$$\Delta P_b = \text{SPP max} - \Delta PC \quad \dots (3.67)$$

donde: SPP max = es la máxima presión disponible en la bomba.

La caída de presión a través del sistema excluyendo a la broca esta expresada por la ecuación 3.39; incorporando este valor a la ecuación 3.67 y luego reemplazamos los respectivos términos en la ecua-

ción 3.54 obtenemos lo siguiente:

$$F_{broca} = C \cdot Q \cdot (SPP_{max} - K \cdot Q^U)^{0.5} \quad \dots (3.68)$$

$$F_{broca} = C \cdot (Q^2 \cdot SPP_{max} - K \cdot Q^{U+2})^{0.5} \quad \dots (3.69)$$

Derivando la ecuación 3.69 con respecto a Q

$$\frac{dF}{dQ} = \frac{C (2Q \cdot SPP_{max} - K \cdot (U+2) \cdot Q^{U+1})}{(Q^2 \cdot SPP_{max} - K \cdot Q^{U+2})^{0.5}} \quad \dots (3.70)$$

igualando la ecuación 3.70 a cero, de tal forma que la fuerza de impacto hidráulica en la broca sea máxima, entonces el numerador de la Ec. 3.70 se iguala a cero:

$$2Q \cdot SPP_{max} - K \cdot (U+2) \cdot Q^{U+1} = 0 \quad \dots (3.71)$$

Despejando SPP<sub>max</sub>

$$SPP_{max} = \frac{(U+2)}{2} \cdot K \cdot Q^U \quad \dots (3.72)$$

como  $K \cdot Q^U$  es igual a la caída de presión por fricción en el sistema excluyendo a la broca,  $\Delta PC$ .

$$SPP_{max} = \frac{(U+2)}{2} \cdot \Delta PC \quad \dots (3.73)$$

despejando PC en la ecuación 3.73

$$\Delta PC = \left( \frac{2}{U+2} \right) \cdot SPP_{max} \quad \dots (3.74)$$

De la ecuación 3.55 y 3.74, despejando  $F_b$

$$\Delta P_b = SPP_{max} - \left( \frac{2}{U+2} \right) SPP_{max}$$

$$\Delta P_b = \left( \frac{U}{U + 2} \right) SPP_{max} \quad \dots (3.75)$$

Luego como  $d^2F/d^2Q$  es menor que cero, el máximo impacto hidráulico en la broca con presión limitada se obtendrá cuando la caída de presión en el sistema de circulación sea  $2/U+2$  veces la presión máxima en el tubo parado o presión máxima en el tubo parado o presión máxima disponible en la bomba; de igual forma, se obtiene la máxima fuerza de impacto hidráulico en la broca cuando la caída de presión en la broca sea  $u/u + 2$  veces la presión de la bomba del fluido de perforación.

#### 3.2.2.2.4 Máxima velocidad en las boquillas de la broca.

La máxima velocidad en las boquillas supone que si maximizamos la velocidad de salida en los chorros de la broca, se podría optimar el levantamiento de los recortes de la perforación; esto admite que a un determinado tamaño de las boquillas, a la máxima presión disponible en superficie y bajo un caudal específico la velocidad del fluido de perforación en las boquillas alcanzaría su valor máximo.

Para demostrar la existencia de una relación directamente proporcional entre la velocidad en las boquillas y la caída de presión en la broca con el fin de explicar la dependencia entre la velocidad de

circulación y la maximización de la velocidad en las boquillas, ver grafico 3 - 10, se desarrolla lo siguiente:

Consideramos un sistema conformado por el punto 1 que es la entrada de la bomba, la sarta de perforación y el punto 2 que indica a la broca en la figura No 5 C.

La ley de la conservación de la energía establece que la cantidad de energía neta que sale del sistema es igual al trabajo hecho dentro del sistema en la misma tasa de tiempo.

Luego la energía que entra al sistema, punto 1, es la suma de:

$E_1 + P_1 \bar{V}_1$  = Entalpía por unidad de masa del fluido entrante al sistema en el punto 1

$- g D_1$  = Energía potencial por unidad de masa del fluido entrante al sistema en el Punto 1 .

$- \bar{V}_1^2/2$  = Energía cinética por unidad de masa del fluido entrante en el punto 1

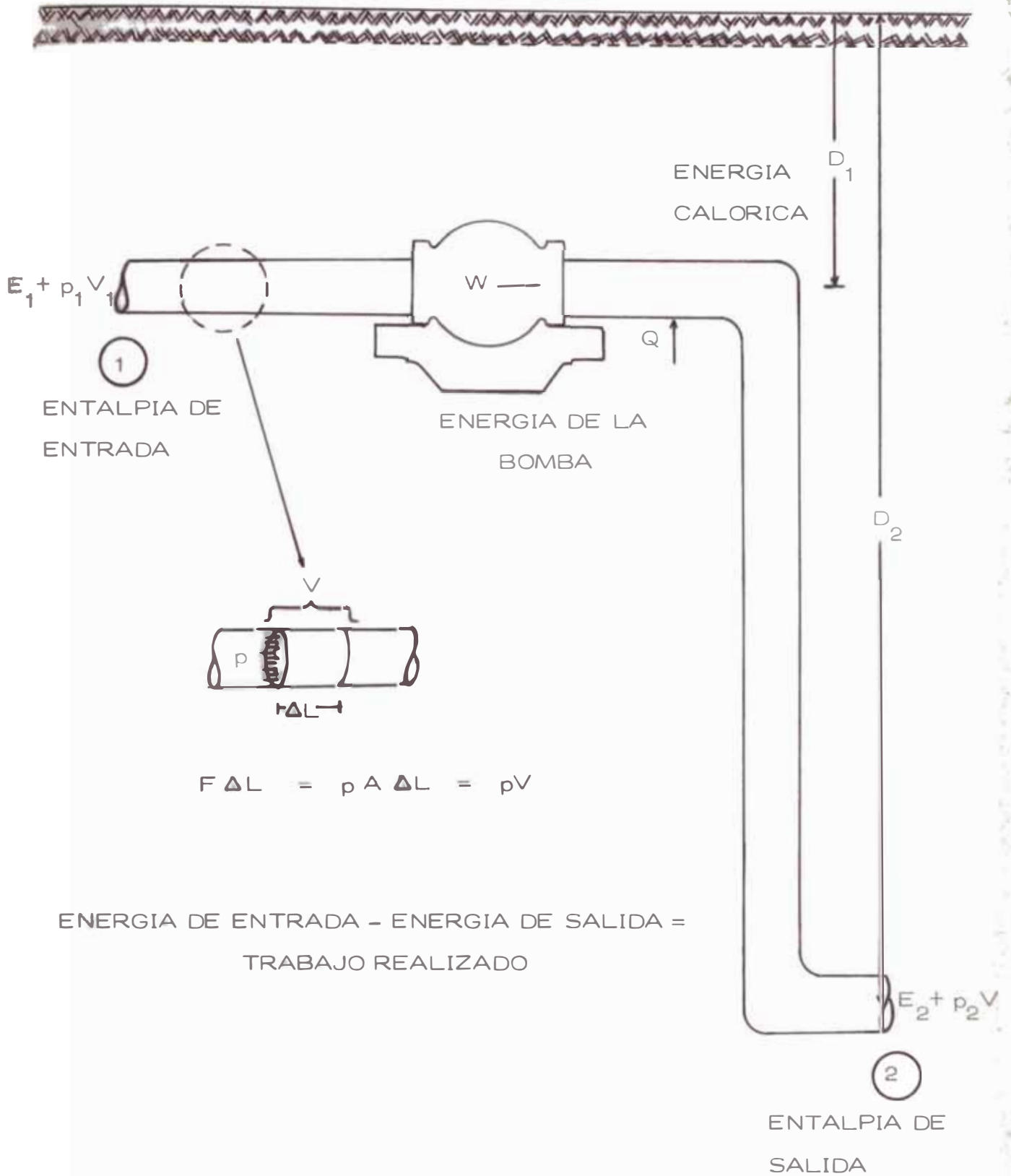
$q$  = Calor por unidad de masa del fluido entrante al sistema.

La energía que sale del sistema es la suma de:

$E_2 + P_2 \bar{V}_2$  = Entalpía por unidad de masa del fluido saliente del sistema en el punto 2

$- g D_2$  = Energía potencial por unidad de masa del

FIG. N° 5-c SISTEMA DE FLUJO GENERALIZADO



fluido saliente del sistema en el punto 2.

$$\frac{\bar{V}_2^2}{2} = \text{Energía cinética por unidad de masa del fluido saliente del sistema en el punto 2.}$$

El trabajo hecho por el fluido es igual a la energía por unidad de masa del fluido, dado al fluido por una fuerza motriz, o es igual a menos el trabajo hecho por la bomba sobre el fluido. Luego, según la ley de la conservación de la Energía:

$$(E_2 - E_1) + (P_2 \bar{V}_2 - P_1 \bar{V}_1) - g (D_2 - D_1) + \frac{1}{2} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2) = W + q \quad \dots (3.76)$$

Simplificando la ecuación 3.76 y usando notaciones diferenciales, se tiene:

$$\Delta E - g \Delta D + \frac{\Delta \bar{V}^2}{2} + \Delta (P\bar{V}) = W + q \quad \dots (3.77)$$

La ecuación 3.77 es la primera ley de la Termodinámica aplicada a un proceso de Flujo estable. Esta ecuación es la más adecuada para sistemas de flujo que implican, ya sea un proceso adiabático o de transferencia de calor que comprometan las propiedades de los fluidos que hayan sido previamente tabuladas, sin embargo esta forma de la ecuación raramente ha sido aplicada por los ingenieros de perforación. Generalmente al cambio de energía interna y al calor ganado por el fluido se le considera como la pérdida por fricción el cual puede ser definido en términos de la ecuación 3.77 como:



$$F = \Delta E + \int_1^2 p dV - q \quad \dots (3.78)$$

El término de pérdida por fricción puede ser usado convenientemente para contabilizar la pérdida de trabajo o la energía gastada por las fuerzas viscosas dentro del flujo del fluido. Sustituyendo la ecuación 3.78 en la ecuación 3.77, se tiene:

$$\int_1^2 \bar{v} dp - g \Delta D + \frac{\Delta \bar{v}^2}{2} = W - F \quad \dots (3.79)$$

$$\text{Si: } \Delta (F\bar{v}) = \int_1^2 P dV + \int_1^2 \bar{v} dP$$

La ecuación 3.79 es llamada generalmente la ecuación de balance de energía mecánica. Esta ecuación estuvo en uso aún antes que fuera reconocida el flujo de calor como una forma de transferencia de energía por Carnot y Joule; la ecuación 3.79 es una expresión completamente generalizada, que no contiene otras asunciones que lo limitan que los efectos magnéticos, eléctricos, químicos y de fase frontera. El efecto de flujo de calor es incluido en el sistema en el término F de pérdida por fricción.

El primer término de la ecuación 3.79 :

$\int_1^2 \bar{v} dP$  es difícil de evaluar si es que el fluido es comprensible, a menos que se conozca el patrón exacto de compresión y expansión, sin embargo en la ingeniería de perforación usualmente se

trata con flúidos esencialmente incomprensibles los cuales tienen un volúmen específico  $\bar{V}$  constante.

Luego para flúidos incomprensibles el término

$$\int_1^2 \bar{V} dP \text{ está dado por } \int_1^2 \bar{V} dP = \frac{\Delta P}{\rho}$$

Entonces la ecuación 3.79 puede ser expresada de la siguiente forma.

$$\Delta P - \rho g \Delta D + \rho \frac{\Delta \bar{V}^2}{2} = \rho W - \rho F \quad \dots (3.80)$$

Expresando la ecuación 3.80 en unidades prácticas de campo de libras/pulg<sup>2</sup>, libras/galón, pies/seg. y pies:

$$P_1 + 0.052 \cdot \rho \cdot (D_2 - D_1) - 8.074 \times 10^{-4} \cdot \rho \cdot (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2) + P_p - \Delta P_f = P_2 \quad \dots (3.81)$$

En el caso particular de un flujo de un flúido incomprensible a través de una restricción corta, tal como una boquilla de la broca, se asume.

- a.- El cambio de presión debido a la diferencia de elevación es negligible.
- b.- La velocidad,  $\bar{V}_1$ , anterior a la salida, comparada con la velocidad en la boquilla,  $\bar{V}_2$  es despreciable.
- c.- La caída de presión por fricción a través de la boquilla es inocua, luego la ecuación 3.81 se reduce a:

$$P_1 - 8.074 \times 10^{-4} \cdot \rho \cdot \bar{V}_2^2 = P_2$$

$$\text{Si } P_1 - P_2 = \Delta P_b \quad \text{y } \bar{V}_2 = \bar{V}_n$$

Despejando  $\bar{v}_n$

$$\bar{v}_n = \sqrt{\frac{\Delta P_b}{8.074 \times 10^{-4} \cdot \rho}} \quad \dots (3.82)$$

Como se ha asumido la no existencia de fricción debido al flujo a través de la boquilla se introduce el coeficiente de descarga  $C_d$  como un factor de corrección para compensar esta asunción; entonces:

$$\bar{v}_n = C_d \sqrt{\frac{\Delta P_b}{8.074 \times 10^{-4} \cdot \rho}} \quad \dots (3.83)$$

Como podemos demostrar por medio de la ecuación 3.83, la velocidad en la boquilla de la broca es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la caída de presión a través de la broca;

$$\bar{v}_n \propto \sqrt{\Delta P_b}$$

Entonces la velocidad en la boquilla es máxima cuando la caída de presión disponible en la broca es la máxima. La caída de presión disponible en la broca es máxima cuando la presión de la bomba es máxima y la caída de presión por fricción en la sarta de perforar y en la zona anular es mínima y esto sucede cuando la velocidad de circulación o flujo es mínima, como se observa en el gráfico 3-10.

Esta última teoría de optimización de la hidráulica es usada cuando las restricciones prácticas impiden la ejecución óptima de los programas de máximo caballaje en la broca y máxima fuerza de impacto hidráulico.

Este tipo de programa es más compatible en pozos profundos donde existen altas caídas de presión por fricción.

### 3.2.2.2.5 Número de Reynolds<sup>34</sup>

El criterio del número de Reynolds consiste en maximizar este número para optimizar la hidráulica. Al desarrollar este criterio se encontró que daba idénticos resultados que el método de la máxima velocidad en las boquillas de la broca.

El número Reynolds, NRE, es adimensional y es definido de la siguiente manera:

$$NRe = \frac{\rho \cdot \bar{V} \cdot ID}{\mu} \quad \dots (3.84)$$

Donde:

- $\rho$  = Peso específico del fluido.
- ID = Diámetro de la boquillas
- $\bar{V}$  = Velocidad a la salida de la boquilla.
- $\mu$  = Viscosidad del fluido en la broca.

<sup>34</sup> M Bizanti, J.K. Makki, L.G. Jackson y R.M. Caruthers.: "Bit Hydraulics Optimization using Reynolds Number Criteria", cit.

Si de la ecuación 3.83, llamamos a  
 $C_D^2 / 8.074 \times 10^{-4} = K'$  luego:

$$\bar{v}_n = \left\{ K' \cdot \frac{\Delta P_b}{\rho} \right\}^{0.5} \quad \dots (3.85)$$

Sustituyendo la ecuación 3.85 en la ecuación 3.84

$$NRe = \frac{ID}{\mu} \cdot (K' \cdot \rho \cdot \Delta P_b)^{0.5} \quad \dots (3.86)$$

De acuerdo a la ecuación 3.55

$$\Delta P_b = SFP - \Delta PC$$

sustituyendola en la ecuación 3.86

$$NRe = \frac{ID}{\mu} \cdot (K' \cdot \rho)^{0.5} \cdot (SFP - \Delta PC)^{0.5} \quad \dots (3.87)$$

Reemplazando la ecuación 3.39  $\Delta PC = K Q^U$  en la  
 ecuación 3.87

$$NRe = \frac{ID}{\mu} \cdot (K' \cdot \rho)^{0.5} \cdot (SFP - KQ^U)^{0.5} \quad \dots (3.88)$$

$$\text{Si } Q = A \cdot \bar{v} \text{ y } A = \frac{\pi \cdot ID^2}{4}$$

donde A = Area de la boquilla, entonces

$$ID = 1.1284 \cdot \left\{ \frac{Q}{\bar{v}} \right\}^{0.5}$$

reemplazando en la ecuación 3.88, entonces:

$$NRe = \left\{ \frac{1.1284}{\mu} \right\} \cdot (K' \cdot \rho)^{0.5} \cdot \left\{ \frac{Q}{V} \right\}^{0.5} \cdot \left\{ SPP - KQ^U \right\}^{0.5}$$

$$NRe = \left\{ \frac{1.1284}{\mu} \right\} \cdot \left[ (K' \cdot \rho)^{0.5} \cdot (SPP \cdot \frac{Q}{V})^{0.5} - (K' \cdot \rho)^{0.5} \cdot \left( \frac{KQ^{U+1}}{V} \right)^{0.5} \right]$$

... (3.89)

Se considerará dos casos.

Primer Caso.- Sin limitación en la presión de superficie.

La presión de superficie o en la bomba puede ser relacionada con el caballaje hidráulico y la velocidad de flujo de la siguiente forma:

$$SPP = K'' \frac{HHP}{Q} \quad \dots (3.90)$$

Si  $K' \cdot K'' = m$  entonces la ecuación 3.89 puede ser simplificada de la siguiente manera:

$$NRe = \left\{ \frac{1.1284}{\mu} \right\} \cdot \left[ (m \cdot \rho)^{0.5} \cdot \left( \frac{HHP}{V} \right)^{0.5} - (K' \cdot \rho)^{0.5} \cdot \left( \frac{KQ^{U+1}}{V} \right)^{0.5} \right]$$

... (3.91)

El número Reynolds es máximo cuando la derivada de la ecuación 3.91 con respecto a  $Q$  es máximo:

$$\frac{dNRe}{dQ} = \frac{-0.5642 (K)^{0.5}}{\mu} \cdot \left\{ \frac{K' \cdot \rho}{V} \right\}^{0.5} \cdot \left\{ \frac{(U+1) Q^U}{(Q^{U+1})^{0.5}} \right\} = 0$$

luego el número de Reynolds es máximo cuando  $Q = 0$

Segundo caso.- Con presión de superficie limitada. La presión de la bomba no puede exceder la presión máxima,

SPPmax, luego; sustituyendo:

SPP = SPPmax en la ecuación 3.89

$$NRe = \left\{ \frac{1.1284}{\mu} \right\} \cdot (K' \cdot f)^{0.5} \left\{ \left( SPP_{max} \cdot \frac{Q}{v} \right)^{0.5} - \left\{ \frac{KQ^{U+1}}{v} \right\}^{0.5} \right\} \dots (3.92)$$

Derivando la ecuación 3.92 con respecto a Q e igualando a cero:

$$\frac{dNRe}{dQ} = \left\{ \frac{1.1284}{\mu} \right\} \cdot \left\{ \frac{K' f}{v} \right\}^{0.5} \left\{ \frac{(0.5) \cdot (SPP_{max})^{0.5}}{Q^{0.5}} - \left\{ \frac{(K)^{0.5} \cdot (U+1) Q^U}{(Q^{U+1})^{0.5}} \right\} \right\} = 0 \dots (3.93)$$

luego:  $(SPP_{max})^{0.5} = (U+1) \cdot K^{0.5} \cdot (Q^U)^{0.5}$ , entonces:

$$SPP_{max} = (U+1)^2 \cdot KQ^U \dots (3.94)$$

de la ecuación 3.39 en 3.94

$$SPP_{max} = (U+1)^2 \Delta PC \dots (3.95)$$

entonces, despejando  $\Delta PC$

$$\Delta PC = \left\{ \frac{1}{(U+1)^2} \right\} SPP_{max} \dots (3.96)$$

de la ecuación 3.67 y 3.96 tenemos.

$$\Delta P_b = SPP_{max} - \left\{ \frac{1}{(U+1)^2} \right\} SPP_{max}$$

$$\Delta P_b = \left\{ \frac{U(U+2)}{(U+1)^2} \right\} SPP_{max} \dots (3.97)$$

luego como  $d^2NRe/d^2Q$  es menor

que cero, el máximo número de Reynolds a presión limitada se obtendrá cuando la caída de presión en la broca sea  $u(u+2)/(u+1)^2$  veces la presión máxima en superficie, de igual forma se obtiene el máximo número de Reynolds si la caída de presión en el sistema de circulación exceptuando a la broca sea  $1/(U+1)^2$  veces la presión máxima disponible en la superficie.

### 3.2.3 Procedimiento para calcular una hidráulica óptima teórica.

Antes de aplicar a tiempo real los métodos anteriormente descritos, se procede a exponer el procedimiento de cálculo teórico de la hidráulica óptima.

Este cálculo se realiza generalmente para estimar las pérdidas de presión por fricción en las secciones tubulares y en la zona anular; luego con la pérdida total de presión por fricción se estima el caudal óptimo pero asumiendo que las irregularidades del tamaño y calidad del hueco del pozo, propiedades del fluido de perforación y el patrón de flujo son las ideales, lo que, conlleva a concluir que no necesariamente al utilizar este método se está trabajando con el verdadero valor de  $U$ .

Aún con la limitación anteriormente anunciada este diseño tiene mucha utilidad en el cálculo de las caídas de presión por fricción en las secciones tubulares de



la sarta de perforación, el resultado de estos cálculos son los primeros pasos para encontrar los valores adecuados de la presión de la bomba, peso específico del fluido de perforación, y el caudal máximo para evitar la pérdida de circulación.

### 3.2.3.1 Datos de entrada.

Del fluido de perforación.

Peso específico del fluido de perforación, (MDWT).

Punto de cedencia de Bingham, (YB), lbs/100 pies<sup>2</sup>.

Viscosidad plástica, (PV), cps.

De la sarta de perforación:

- Longitud de la tubería de perforar, (LENGTH DP).

- Longitud de las lastrabarrenas, (LENGTH DC).

Longitud de la tubería de revestimiento, (LENGTH CSG).

- Diámetro interno de la tubería de perforar, (DP-ID).

- Diámetro externo de la tubería de perforar, (DP-ED).

Diámetro interno de las lastrabarrenas, (DC-ID).

- Diámetro externo de las lastrabarrenas, (DC-ED).

Diámetro interno de la tubería de revestimiento, (CSG-ID).

Datos operacionales:

- Velocidad de circulación, (Q), G.P.M.

- Diámetro de la broca, (BIT DI), pulgadas.

- Caída de presión óptima por fricción en el sistema de circulación, ( $\Delta PC$  OPT), lbs/pulgada<sup>2</sup>, o presión de circulación óptima.

- Caída de presión por fricción en el equipo de superfi-

cie, ( $\Delta P$  SUR C.), lbs/pulgadas<sup>2</sup>,  $\Delta P_s$ .

Exponente hidráulico que depende de las propiedades del fluido de perforación, temperatura del fondo del pozo, discontinuidades en la tubería de perforar, irregularidades del tamaño y calidad del hueco del pozo y patrón del flujo del fluido de perforación; (U).

### 3.2.3.2 Procedimiento.

De la ecuación 3.37 y de la ecuación 3.39 podemos calcular la velocidad de circulación óptima, asumiendo que se conoce U y calculando previamente las caídas de presión por fricción en todo el sistema de circulación; la constante de proporcionalidad, K, de la ecuación 3.39 se determina relacionando la velocidad de circulación máxima debido a la geometría del hueco y su respectiva caída de presión por fricción en el sistema de circulación.

Esta velocidad de circulación máxima debido a la geometría de hueco se calcula a partir de la ecuación siguiente:

$$Q = AVM \cdot A \quad \dots (3.98)$$

donde Q = circulación, GPM, velocidad de.

AVM = velocidad anular máxima entre las paredes del hueco del pozo y la tubería de perforar, pies/minuto.<sup>35</sup>

A = Area transversal de flujo, pozo - tubería de perforar, pies<sup>2</sup>.

<sup>35</sup> M. Brouse.: "Practical Hydraulics: A Key to efficient drilling", World Oil (Oct, 1982).

Luego:

$$Q = \text{AVM} \cdot \left\{ \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \times \frac{1}{144} \right\} \times \frac{1}{1.337 \times 10^{-1}}$$

$$Q = 0.040794 (D^2 - d^2) \times \text{AVM} \quad \dots (3.99)$$

Donde:

D = diámetro del pozo o de la broca

d = diámetro interno de la tubería de perforar.

La AVM esta basado en el flujo transversal, el cual es una medida de la eficiencia de limpieza del fondo del pozo usado para prevenir la remolienda, se debe tener en consideracion que el AVM no considera restricciones de capacidad de volumen de las bombas de fluido de perforación usada. Los AVM recomendados son mostrados en la tabla No. 17.

Tabla No. 17.- Velocidades de circulación y velocidad anulares máximas recomendadas basadas en el flujo transversal.<sup>36</sup>

Broca (pulg)	D.E D.P. (pulg)	Q (GPM)	AVM (pies/min.)
4 3/4	2 7/8	175	300
6	3 1/2	237	244
7 7/8	4 1/2	339	199
8 1/2	4 1/2	376	177
9 7/8	4 1/2	458	145
12 1/4	4 1/2	613	116

<sup>36</sup> Ibidem

La relación entre tamaño del hueco del pozo o broca utilizada y la máxima velocidad de circulación, debida a la utilización del AVM, puede establecerse mediante la fórmula empírica<sup>37</sup> siguiente:

$$Q = 10D ( \sqrt{D} + 1.5 ) \quad \dots (3.100)$$

donde  $Q = Q$  máximo.

Con el caudal máximo o velocidad de circulación máxima obtenida en la ecuación 3.100 se calcula la pérdida de presión por fricción en el sistema de circulación, luego el siguiente paso es calcular la constante de proporcionalidad,  $K$ , con la ecuación 3.39.

Dependiendo del programa hidráulico a emplear y la presión máxima disponible en superficie se calcula la caída de presión por fricción óptima en el sistema de circulación, luego conociendo  $K$ , podemos calcular la velocidad de circulación óptima con la ecuación 3.39. Resumiendo lo dicho anteriormente por medio del siguiente ejemplo ilustrativo.

#### Ejemplo ilustrativo 3.8

Se perfora el pozo 6327 - Zapotal a una profundidad de 7,722 pies, se desea calcular la velocidad de circulación óptima.

Datos del fluido de perforación:

Peso específico, MDWT = 10.4 lb/gal.

---

<sup>37</sup> Ibidem

Punto de Cedencia Bingham,  $Y_b = 21 \text{ lbs}/100 \text{ pies}^2$

Viscosidad plástica,  $p_v = 32 \text{ cps}$ .

Datos de la sarta de perforación:

longitud de la tubería de perforar,  $\text{LENGTH DP} = 6887 \text{ pies}$

longitud de la tastrabarrenas,  $\text{LENGTH DC} = 835 \text{ pies}$

longitud de la tubería de revestimiento,  $\text{LENGTH CSG} = 417$   
pies

DP - ID = 3.826 pulgadas, F.H.

DP - ED = 4.5 pulgadas

DC - ID = 2.8125 pulgadas

DC - ED = 6.25 pulgadas

CSG - ID = 9.001 pulgadas

Datos operacionales:

velocidad de circulación máxima,  $Q = 339 \text{ GPM}$ .

Diámetro de la broca = 7.875 pulgadas.

Caída de presión óptima en el sistema de circulación,  $\Delta P_C$

$\text{OPT} = 728 \text{ lbs}/\text{pulg}^2$

Caída de presión en las conecciones de superficie,  $\Delta P_{\text{SUR}}$

$C = 31 \text{ lbs}/\text{pulg}^2$

Exponente hidráulico,  $U = 1.846$

Datos Generales:

Programa Hidráulico a emplear = Máximo impacto hidráulico con límite.

Presión limitada en supeficie =  $1,400 \text{ lbs}/\text{pulg}^2$

a.- Cálculo de las caídas de presión por fricción en el

sistema de circulación:Caída de Presión en la tubería de perforación.

velocidad del fluido en la tubería de perforar:

$$\bar{V} = q / 2.45 d^2 \quad \dots (3.101)$$

$$\bar{V} = 339 / 2.45 (3.826)^2 = 9.452 \text{ pies/seg.}$$

Cálculo de la velocidad crítica

$$V_c = \frac{1.078 PV + 1.078 \sqrt{(PV)^2 + 12.34 (MWT) (d)^2 (YB)}}{(MDWT) (d)} \quad \dots (3.102)$$

$$V_c = \frac{1.078(32) + 1.078 \sqrt{(32)^2 + 12.34(10.4)(3.826)^2(21)}}{(10.4)(3.826)}$$

$$V_c = 6.317 \text{ pies/segundo, } Q_c = 227 \text{ GPM}$$

luego como  $\bar{V} > V_c$ , entonces tenemos flujo turbulento:

Cálculo del número de Reynolds.

$$Re = \frac{2970 (MDWT) (\bar{V}) (d)}{FV} \quad \dots (3.103)$$

$$Re = \frac{2970 (10.4) (9.452) (3.826)}{32} =$$

$Re = 34,908$ , del gráfico 3.11 con la recta No. III que corresponde a una tubería de perforar con uniones de herramienta F.H., el factor de fricción,  $f$  es :  $0.0073$ , entonces la caída de presión en la tubería de perforar es:

$$\Delta P \text{ D.P.} = \frac{f \text{ (MDWT) (L) } (\bar{V})^2}{25.8 \text{ (d)}} \quad \dots \text{ (3.104)}$$

$$\Delta P \text{ D.P.} = \frac{0.0073 \text{ (10.4) (6,887) (9.452)}^2}{25.8 \text{ (3.826)}}$$

$$\Delta P \text{ D.P.} = 473.2 \text{ lbs/pulg}^2$$

Caída de presión en las lastrabarrenas.

Velocidad en las lastrabarrenas, de la Ec. 3.101

$$\bar{V} = 339/2.45 \text{ (2.8125)}^2 = 17.492 \text{ pies/seg.}$$

Velocidad crítica en las lastrabarrenas, Ec. 3.102

$$V_c = \frac{1.078(32) + 1.078 \sqrt{(32)^2 + 12.34(10.4)(2.8125)^2(21)}}{(10.4)(2.8125)}$$

$$V_c = 6.688 \text{ pies/segundo, luego como:}$$

$$\bar{V} > V_c \text{ entonces tenemos flujo turbulento.}$$

Calculo del número de Reynolds, de Ec. 3.103.

$$Re = \frac{2970 \text{ (10.4) (17.492) (2.8125)}}{32} =$$

$$Re = 47,487, \text{ luego } f = 0.0068$$

La caída de presión según Ec. 3.104

$$\Delta P \text{ D.C.} = \frac{0.0068 (10.4) (835) (17.492)^2}{25.8 (2.8125)}$$

$$\Delta P \text{ D.C.} = 249 \text{ libras/pulg}^2$$

Caída de presión en el espacio Anular cuellos lastra-  
barrenas = hueco abierto del pozo.

Cálculo de la velocidad en el espacio anular H - DC.

$$\bar{V} = q / 2.45 (D^2 - d^2) \quad \dots (3.105)$$

$$\bar{V} = 339 / 2.45 \{ (7.875)^2 - (6.25)^2 \} =$$

$$\bar{V} = 6.028 \text{ pies/segundo.}$$

Cálculo de la velocidad crítica en el espacio anular

$$V_{ca} = \frac{1.078 PV + 1.078 \sqrt{(PV)^2 + 9.256 (-d)^2 (MDWT) (YB)}}{(MDWT) (D - d)} \quad \dots (3.106)$$

$$V_{ca} = \frac{1.078 (32) + 1.078 \sqrt{(32)^2 + 9.256 (1.625)^2 (10.4) (21)}}{(10.4) (1.625)}$$

$V_{ca} = 7.129$  pies/segundo, como  $V_{ca} > \bar{V}$ , luego estamos en flujo laminar.

Calculamos la caída de presión en la zona anular con la siguiente ecuación:

$$\Delta P \text{ H - DC} = \frac{(PV) (L) (\bar{V})}{1000 (D-d)^2} + \frac{(YB) (L)}{200 (D-d)} \quad \dots (3.107)$$



$$\Delta P_{H-DC} = \frac{(32)(835)(6.028)}{1000(1.625)^2} + \frac{21(835)}{200(1.625)}$$

$$\Delta P_{H-DC} = 115 \text{ libras/pulg}^2$$

Caída de presión en el espacio anular hueco Abierto -  
tubería de perforación

Cálculo de la velocidad de circulación en el espacio anular H- DP de la ecuación 3.105

$$\bar{V} = 339 / 2.45 \{ (7.875)^2 - (4.5)^2 \} =$$

$$\bar{V} = 3.313 \text{ pies/segundo}$$

cálculo de la velocidad crítica en el espacio anular,  
de la E. 3.106

$$V_{ca} = \frac{1.078(32) + 1.078 \sqrt{(32)^2 + 9.256(3.375)^2(10.4)(21)}}{(10.4)(3.375)}$$

$V_{ca} = 5.746$  pies/segundo, como  $V_{ca} > \bar{V}$ , luego estamos en flujo laminar, calculamos la caída de presión en la zona anular con la ecuación 3.107.

$$\Delta P_{H-DP} = \frac{(32)(6887-417)(3.313)}{1000(3.375)^2} + \frac{(6470)21}{(200)(3.375)}$$

$$\Delta P_{H-DP} = 261.5 \text{ libras/pulg}^2$$

Caída de presión en el espacio anular hueco revestido  
- tubería de perforación

Cálculo de la velocidad en el espacio anular CSG - DP,  
 de la ecuación 3.105

$$\bar{v} = 3.339 / 2.45 \{ (9.001)^2 - (4.5)^2 \}$$

$$\bar{v} = 2.277 \text{ pies/segundo}$$

cálculo de la velocidad crítica en el espacio anular,  
 de la Ec. 3.106

$$V_{ca} = \frac{1.078(32) + 1.078 \sqrt{(32)^2 + 9.256(4.501)^2(10.4)(21)}}{(10.4)(4.501)}$$

$V_{ca} = 5.455$  pies/segundo, como  $V_{ca} > \bar{v}$ , tenemos flujo laminar en el espacio anular, procedemos a calcular la caída de presión con la Ec. 3.107

$$\Delta P_{CSG- DP} = \frac{(32)(417)(2.277)}{1000(4.501)^2} + \frac{21(417)}{(200)(4.501)}$$

$$\Delta P_{CSG - DP} = 11.2 \text{ libras/pulgada}^2$$

luego resumiendo, las caídas de presión en el sistema de circulación son:

$\Delta P$ SUR C	=	31.0
$\Delta P$ D.P.	=	473.2
$\Delta P$ D.C.	=	249.0
$\Delta P$ H - DC	=	115.0

$$\Delta P_H - DP = 261.5$$

$$\Delta P_{CSG} - DP = 11.2$$

$$\Delta PC = 1140.9 \text{ libras/pulg.}^2$$

b.- Cálculo de la constante de proporcionalidad, K.

De la ecuación 3.39:

$$1140.9 = K (339)^{1.846}$$

$$K = 0.02435$$

c.- Cálculo de la caída de presión óptima en el sistema de circulación.

Presión máxima de operación en superficie = 1400 lbs/pulg<sup>2</sup>. Aplicando la regla práctica para encontrar la caída de presión óptima en el sistema de circulación a partir del programa de máximo impacto hidráulico con límite tenemos:

$$\Delta PC_{OPT} = 0.52 \Delta P_p \quad \dots (3.108)$$

$$\text{luego: } \Delta PC_{OPT} = 0.52 (1400) =$$

$$\Delta PC_{OPT} = 728 \text{ libras/pulg}^2$$

con este dato obtenido y el valor de K obtenemos el caudal óptimo o velocidad de circulación óptima aproximada con la ecuación 3.39.

d.- Cálculo de la velocidad de circulación óptima aproximada.

$$728 = 0.02435 (Q_{OPT})^{1.846}$$

$$Q_{OPT} = 266 \text{ GPM} \sim 270 \text{ GPM}$$

Con el valor del caudal óptimo aproximado obtenido en el paso "d" calculamos las caídas de presión en el sistema de circulación de tal forma que resulte 728 libras/pulg<sup>2</sup>, por lo general no resulta, entonces se tiene que encontrar otro valor de K para la nueva magnitud de la caída de presión en el sistema de circulación con el caudal de 266 GPM.

Con el nuevo valor de K se encuentra la velocidad de circulación óptima más aproximada, este proceso interactivo se puede resumir por medio de una computadora de mano.

#### e.- Análisis de los resultados

Luego de cinco iteraciones para calcular el caudal óptimo, Q OPT, para una determinada caída de presión por fricción óptima en el sistema de circulación para un programa hidráulico de máximo impacto hidráulico con límite, se puede decir que:

Resultados de los cálculos realizados:

$$Q \text{ OPT} = 230 \text{ GPM}$$

$$\Delta P_C \text{ OPT} = 733 \quad 728 \text{ libras/pulg}^2$$

$$K = 0.031898$$

Datos de campo de la operación realizada:

$$Q = 336 \text{ GPM}$$

$$\text{Profundidad} = 7,722 \text{ pies.}$$

al analizar los datos de campo vemos que se ha perforado bajo un régimen de circulación máxima, si nos remitimos al gráfico 3-10, esta velocidad de circulación máxima

no necesariamente es la más adecuada para optimar la hidráulica, pues la fuerza de impacto disminuye cuando el caudal usado es mayor o menor que el caudal óptimo.

El algoritmo del programa utilizado así como la solución del problema se presenta en el anexo correspondiente.

#### 3.2.4 Procedimiento para calcular la hidráulica óptima a tiempo real.

Se denomina hidráulica óptima real, a aquella que es calculada por medio de procedimientos de medición efectuados durante las operaciones de perforación; esta técnica permite calcular previamente el valor del exponente hidráulico,  $U$ , para luego deducir la velocidad de circulación óptima y el diseño adecuado de las boquillas de la broca.<sup>38</sup>

Es importante señalar que por medio de este método se calcula el verdadero valor de  $u$ , los valores asumidos, ver tabla No. 18, por diferentes compañías e instituciones, son valores teóricos que varían entre 1.7 y 1.9 que no reflejan la verdadera magnitud de:

---

<sup>38</sup> Scott, K.F.: "A new approach to Drilling hydraulics", Pet. Eng. Int. (Set. 1972) 50-61

Tabla No. 18.- Valores asumidos para el exponente hidráulico U.

Compañía	valor de U
Prentice y Records	1.75
IMCO	1.78
Preston Moore	1.80
REED	1.82
SMITH	1.83
Hughes	1.84
Security	1.86
Kendall y Goins	1.90

- a.- Las propiedades del fluido de perforación
- b.- Temperatura del fondo del pozo
- c.- Discontinuidades en la tubería de perforar.
- d.- Irregularidades del tamaño y calidad del hueco del pozo.
- e.- Patrón de flujo del fluido de perforación

#### 3.2.4.1 Método de Selección.<sup>39</sup>

El método de selección de las boquillas de la broca así como de la velocidad de circulación exponer, son métodos netamente operativos, lo que implica que se deben desarrollar en el campo durante las operaciones de perforación. Los pasos a seguir son los siguientes:

<sup>39</sup> L. Robinson.: "Optimizing bit hydraulics increases penetration rate", World Oil (Julio 1982)

- a.- Calibrar el medidor de presión de la bomba de fluido de perforación, o calibrar el medidor de la presión del tubo vertical.
- b.- Calibrar las carreras de la bomba para el caudal obtenido versus las presiones usadas en el tubo vertical.
- c.- Graficar la presión máxima de operación y el máximo caballaje hidráulico en un papel logarítmico, ( $\log P$  versus  $\log Q$ ).
- d.- Medir la presión en el tubo vertical a tres o cuatro diferentes carreras de la bomba, esta operación se realiza justo antes de sacar la broca para su cambio.
- e.- Calcular el caudal o velocidad de circulación para cada carrera efectuada de la bomba del fluido de perforación.
- f.- Calcular la caída de presión a través de los orificios de la broca, para cada velocidad de circulación medida.
- g.- Restar cada caída de presión en la broca de su presión correspondiente en el tubo vertical, denominando a esta presión resultante, presión de circulación, PC.
- h.- Plotear los diferentes  $\Delta PC$  con sus respectivos caudales en un papel log-log y medir el exponente hidráulico, U.
- i.- Calcular la caída de presión óptima a través de los orificios de la broca:
  - Máximo caballaje hidráulico en la broca con presión

limitada, ecuación 3.46.

$$\Delta P_b \text{ OPT} = \left\{ \frac{U}{U + 1} \right\} \text{ SPP}$$

- Máxima fuerza de impacto hidráulico con presión sin límite, ecuación 3.66.

$$\Delta P_b \text{ OPT} = \left\{ \frac{U + 1}{U + 2} \right\} \text{ SPP}$$

- Máxima fuerza de impacto hidráulico con presión limitada, ecuación 3.75.

$$\Delta P_b \text{ OPT} = \left\{ \frac{U}{U + 2} \right\} \text{ SPP}$$

- Máximo número de Reynolds o máxima velocidad en las boquillas de la broca con presión limitada, ecuación 3.97

$$\Delta P_b \text{ OPT} = \left\{ \frac{U (U+2)}{(U + 1)^2} \right\} \text{ SPP}$$

j.- Grafique  $\Delta P_b \text{ OPT}$  calculado en el gráfico log-log,  $\Delta P_C$  versus  $Q$  a partir del SPP MAX.

k.- La intersección de la recta, de los puntos ( $\Delta P_C$ ,  $Q$ ) tomados en las pruebas, con el  $\Delta P_b \text{ OPT}$  especifica el  $Q \text{ OPT}$ .

l.- Con  $\Delta P_b \text{ OPT}$  y  $Q \text{ OPT}$  se determina los orificios de las boquillas de la broca.

m.- En vez de calcular las caídas de presión óptima a través de los orificios de la broca como se realiza en



el paso "i", se puede directamente calcular la caída de presión de circulación optima  $\Delta PC$  OPT:

- Máximo caballaje hidráulico en la broca con presión limitada, ecuación 3.44

$$\Delta PC \text{ OPT} = \left\{ \frac{1}{U + 1} \right\} \text{ SPP}$$

- Máxima fuerza de impacto hidráulico con presión sin límite, ecuación 3.64

$$\Delta PC \text{ OPT} = \left\{ \frac{1}{U + 2} \right\} \text{ SPP}$$

- Máxima fuerza de impacto hidráulico con presión limitada, ecuación 3.7

$$\Delta PC \text{ OPT} = \left\{ \frac{2}{U + 2} \right\} \text{ SPP}$$

- Máximo número de Reynolds o máxima velocidad en las boquillas de la broca con presión limitada, ecuación 3.96

$$\Delta PC \text{ OPT} = \left\{ \frac{1}{(U + 1)^2} \right\} \text{ SPP}$$

n.- Se grafica este  $\Delta PC$  OPT calculado a partir del origen de coordenadas y se interseca con la recta de los puntos ( $\Delta PC$ , Q) esta intersección determina el Q OPT, luego se realiza el paso "1".

Ejemplo ilustrativo 3.9<sup>40</sup>

Se perfora el pozo 7348 LEONES a una profundidad de 3664 pies con el equipo No. 2

Datos de entrada:

De Restricción Operacional:

Caudal máximo físico, Q MAX, : 310 GPM

Velocidad anular mínima, A.V. MIN, : 150 pies/minuto

Número de pruebas, N. TEST, : 1.00301

Diámetro de la broca, BIT DI, : 7.875 pulgadas

Diámetro exterior de la tubería de perforar, D. PIPE ED, : 4.5 pulgadas.

De Datos hidráulicos previos:

peso específico del fluido de perforar, MDWT, : 10.1 libras/galón.

Tamaño de los orificios de las boquillas de la broca, NOZ 1, : 11/32 pulg; NOZ 2, : 11/32 pulg; NOZ 3, : 11/32 pulg.

Del programa hidráulico a emplear

Método, METHOD, : ●.5

presión máxima disponible en superficie, SPP MAX, : 1,800 libras/pulg<sup>2</sup>

Datos de la bomba de fluidos de perforación

longitud de la carrera, LENGTH S., : 9.5 pulg.

Diámetro de la camisa, DI. LINER, : 6 pulg.

Eficiencia volumétrica, E.V., : 0.9

Tipo de Bomba: W - 850, Triplex.

---

<sup>40</sup> A. Agurto S.: "Informe técnico sobre optimización de la hidráulica de perforación", PETROPERU, ONO, Dep. de Perforación (Junio 1988)

Datos de la toma de pruebas de presiones y carreras por minuto de la bomba:

Presión No. 1 en el tubo vertical, SPP I, : 1,400 libras/-  
pulg<sup>2</sup>

Carreras por minuto No. 1, SPM I, : 87 CPM.

Presión No. 2 en el tubo vertical, SPP I, : 1,200 libras/-  
pulg<sup>2</sup>

Carreras por minuto No. 2, SPM I, : 80 CPM

Presión No. 3 en el tubo vertical, SPP I, : 1000 libras/-  
pulg<sup>2</sup>

Carreras por minuto No. 3, SPM I, : 71 CPM.

Notas:

- Tipo de Broca ATJ-11, código IADC: 4-3-7

- Programas hidráulicos código

Máximo caballaje con límite, HHP, : 0.1

Máximo impacto con límite, IF L, : 0.2

Máximo impacto sin límite, IF. F, : 0.3

Máximo número de Reynolds, RYN, : 0.4

Cálculo de todos los métodos, ALL, : 0.5

a.- Cálculo de los caudales, de las caídas de presión de circulación de las pruebas tomadas:

Fórmula para el cálculo del galonaje por carrera de las bombas de doble y simple desplazamiento respectivamente:

$$Q_d = \frac{L_s (2d_1^2 - d_2^2) E.V.}{147} \dots (3.108)$$

$$Q_t = \frac{L_s (d_1^2) E.V.}{98} \quad \dots (3.109)$$

donde:  $Q_d$  = gal/carrera bomba doble actuante  
 $Q_t$  = gal/carrera, bomba triplex  
 $L_s$  = LENGTH S., longitud de la carrera, pulg.  
 $d_1$  = DI. LINER, diámetro de la camisa, pulg.  
 $d_2$  = DI. ROD, diámetro de la varilla del piston,  
 pulg.

E.V. = eficiencia volumetrica de la bomba.

La bomba W - 850, es triplex, luego aplicamos la ecuación 3.109.

Prueba #	gal/carrera	velocidad de circulación (GPM)
1	3.141	273
2	3.141	251
3	3.141	223

b.- Cálculo de las caídas de presión en el sistema de circulación

De la ecuación 3.110 calculamos la caída de presión en la broca según el caudal utilizado, y luego lo restamos a la presión registrada en el tubo vertical, SPP.

$$\Delta P_b = \frac{Q^2 \cdot MDWT}{7430 \cdot C^2 \cdot d_3^4} \quad \dots (3.110)$$

C = coeficiente igual a 0.95

$$d_3 = \sqrt{n d_n^2} = \sqrt{a d_a^2 + b d_b^2 + c d_c^2} \dots \dots (3.111)$$

donde:

$Q$  = velocidad de circulación, GPM

MDWT = peso específico del fluido de perforación, libras/galón.

$d_3$  = diámetro equivalente

$d_n, d_a, d_b, d_c$  = diámetro de los orificios utilizados en

$n, a, b, c, \dots$  = cantidad de orificios del tamaño utilizado.

según datos del ejemplo ilustrativo:

$n = 3, d_n = NOZ1 = NOZ2 = NOZ3 = 11/32$  pulg.

MDWT = 10.1 libras/galón.

Prueba #	Caudal (GPM)	$\Delta P_b$ (1ppc)	SFP (1ppc)	$\Delta PC$ (1ppc)
1	273	893	1,400	506
2	251	755	1,200	444
3	223	596	1,000	404

c.- Cálculo del exponente hidráulico  $U$ , y el índice de consistencia  $K$  o de proporcionalidad.

Según el paso "h" del método de selección, podríamos plotear los diferentes caídas de presión en el sistema de circulación,  $\Delta PC$ , versus las respectivas velocidades de circulación,  $Q$ , en un papel log-log; este método puede ser ajustado por medio de los mínimos cuadrados, para  $n$  ecuaciones.

Sea la ecuación 3.39

$\Delta PC = K Q^U$ , tomando logaritmos a ambos miembros de la ecuación.

$$\sum \log \Delta PC = n \log K + U \sum \log Q \quad \dots (3.112)$$

multiplicando ambos miembros por  $\sum \log Q$  para  $n=1$

$$\sum \log \Delta PC \log Q = \log K \sum \log Q + U \sum (\log Q)^2 \dots (3.113)$$

De la ecuación 3.112 despejamos  $\log K$

$$\frac{\sum \log \Delta PC - U \sum \log Q}{n} = \log K \quad \dots (3.114)$$

reemplazemos 3.114 en 3.113

$$\sum \log \Delta PC \log Q = \left\{ \frac{\sum \log \Delta PC - U \sum \log Q}{n} \right\} \left\{ \sum \log Q \right\} + U \sum (\log Q)^2 \quad \dots (3.115), \text{ despejando } U.$$

$$\sum \log \Delta PC \log Q = \left\{ \frac{\sum \log \Delta PC}{n} \right\} \sum \log Q - \frac{U (\sum \log Q)^2}{n} +$$

$U \sum (\log Q)^2$  luego:

$$\sum \log \Delta PC \log Q = \left\{ \frac{\sum \log \Delta PC}{n} \right\} \sum \log Q - U \left\{ \frac{(\sum \log Q)^2}{n} - \sum (\log Q)^2 \right\} \quad \dots (3.116)$$

De la ecuación 3.116 tenemos

$$U = \frac{\frac{\sum \log \Delta PC \sum \log Q}{n} - \sum \log \Delta PC \cdot \log Q}{\frac{(\sum \log Q)^2}{n} - \sum (\log Q)^2} \dots (3.117)$$

El coeficiente de determinación será:

$$R^2 = \frac{\log K \sum \log \Delta PC + U \sum \log Q \cdot \log \Delta PC - \frac{1}{n} (\sum \log \Delta PC)^2}{\sum (\log \Delta PC)^2 - \frac{1}{n} (\sum \log \Delta PC)^2} \dots (3.118)$$

Del ejemplo ilustrativo, desarrollando por el método de los mínimos cuadrados para ajustar los datos encontrados en la prueba.

<u>APC</u>	<u>Q</u>	<u>log ΔPC</u>	<u>log Q</u>	<u>log ΔPC log Q</u>	<u>log Q<sup>2</sup></u>	<u>log ΔPC<sup>2</sup></u>
506	273	2.70415	2.43616	6.58774	5.93488	7.31243
444	251	2.64738	2.39967	6.35284	5.75842	7.00862
404	223	2.60638	2.34830	6.12056	5.51451	6.79322
		-----	-----	-----	-----	-----
		7.95791	7.18413	19.06114	17.20781	21.11427

Calculamos U con la ecuación 3.117

$$U = \frac{\frac{(7.95791)(7.18413)}{3} - 19.06114}{\frac{(7.18413)^2}{3} - 17.20781}$$

$$U = \frac{-0.00425}{-0.00390} = 1.08974$$

Calculamos K con la ecuación 3.118

$$\log K = \frac{7.95791 - (1.08974) 7.18413}{3}$$

$$\log K = 0.04302$$

$$K = 1.10412$$

Calculamos  $R^2$

$$R^2 = \frac{0.04233(7.95791) + 1.09003(19.06114) - \frac{(7.95791)^2}{3}}{21.11427 - \frac{(7.95791)^2}{3}}$$

$$R^2 = \frac{0.00463}{0.00483} = 0.95913$$

$$\text{Luego: } \Delta PC = K Q^U$$

$$\Delta PC = 1.104 Q^{1.089}$$

para valores más ajustados por medio del programa OJBHY, ver anexo,:

$$U = 1.078$$

$$K = 1.1759$$

$$R^2 = 0.962$$

d.- Calculamos la caída de presión óptima,  $\Delta PC_{OPT}$ , en el sistema de circulación de acuerdo al paso "m".

Calculamos  $\Delta PC_{OPT}$  para cada programa hidráulico ele-



gido, por ejemplo en el caso del máximo caballaje hidráulico en la broca con presión limitada:

$$\Delta P C \text{ OPT} = \left\{ \frac{1}{1.078 + 1} \right\} 1,800$$

$$\Delta P C \text{ OPT} = 866 \text{ PPC}$$

$$\Delta P \text{ BIT OPT} = 934 \text{ PPC}$$

e.- Cálculo del caudal óptimo

$$\Delta P C \text{ OPT} = K (Q \text{ OPT})^U$$

$$866 = 1.1759 (Q \text{ OPT})^{1.078}$$

$$Q \text{ OPT} = 456 \text{ GPM}$$

f.- Cálculo del área total de las boquillas, A.NOZ,

con la ecuación siguiente<sup>41</sup>

$$A. \text{ NOZZ} = \sqrt{\frac{(Q \text{ OPT})^2; \text{MDWT}}{10,860 (\Delta P \text{ BIT OPT})}} \quad \dots (3.119)$$

$$A. \text{ NOZZ} = \sqrt{\frac{(456)^2 (10.1)}{10,860 (934)}}$$

$$A. \text{ NOZZ} = 0.455$$

g.- Determinación del tamaño de las boquillas de la broca

Para calcular el tamaño de las boquillas,  $d_a$ ,  $d_b$ ,  $d_c$ ,  $d_n$  utilizaremos la ecuación 3.111, o puede utilizarse tablas a partir de A.NOZZ.

<sup>41</sup> Morten Saebo Cit.

Caso 1<sup>o</sup>: 3 boquillas simétricas, 3 NOZZ-SIM a partir de la ecuación 3.110 calculamos el diámetro equivalente de la boquilla  $d^3$ ,

$$d^3 = 0.76097, \text{ luego de 3.111}$$

$$0.76097 = \sqrt[3]{3 d_n^2}, \quad d_n = 14/32 \text{ pulg.}$$

boquillas : 3 X 14

Calculamos el error relativo entre el tamaño de boquilla de 14/32 pulgada y el diámetro equivalente de las 3 boquillas,  $d_3$ , de la ecuación 3.111

$$\sqrt[3]{3 \times \left\{ \frac{14}{32} \right\}^2} = 0.75777$$

$$E = 0.75777 - 0.76097 = -0.0032$$

Para el programa empleado OJBHY el error es  $E = -0.0034$ , que es más exacto.

Caso 2<sup>o</sup>: 3 boquillas asimétricas, 3 NOZZ-ASIM

Para calcular 3 boquillas asimétricas, hacemos el siguiente artificio:

- Sumamos o restamos 1/32 pulg. al  $d_n$  encontrado en el cálculo para las 3 boquillas simétricas, este valor encontrado puede ser el valor de dos boquillas y se procederá a calcular la tercera boquilla; otra variante puede ser la siguiente:

al valor encontrado de sumar o restar 1/32 pulg. del valor de  $d_n$  se le asume que es una de las boquillas,

luego se procede a calcular las dos boquillas restantes; en consecuencia tenemos 4 variantes a los cuales se calculará el error, el menor error relativo calculado de estas cuatro variantes nos producirá un indicativo de la combinación más óptima del tamaño de las boquillas.

Primera variante: Restamos  $1/32$  pulg. al  $d_n$  y asumimos que este valor es el de dos boquillas y calculamos la tercera boquilla:

Del caso 1<sup>o</sup>,  $d_n = 14/32$  pulg.

luego:  $\frac{14}{32} - \frac{1}{32} = \frac{13}{32}$ , de la ecuación 3.111

calculamos el valor de la tercera boquilla.

$$0.76097 = \sqrt{2 \left\{ \frac{13}{32} \right\}^2 + (d_a)^2}$$

$$d_a = 16/32,$$

las boquillas serán: 2 x 13, 1 x 16

$E = 0.76163 - 0.76097 = 0.00066$ , pero para el programa empleado DJBHY el error es  $E = 0.0004$ , que es más exacto.

Segunda Variante: Sumamos  $1/32$  pulg. al  $d_n$  y asumimos que este valor es el de dos boquillas y calculamos la tercera boquilla.

Del caso 1<sup>o</sup>,  $d_n = 14/32$  pulg.

luego :  $\frac{14}{32} + \frac{1}{32} = \frac{15}{32}$  , de la ecuación 3.111

calculamos el valor de la tercera boquilla.

$$0.76097 = \sqrt{2 \left\{ \frac{15}{32} \right\}^2 + (d_b)^2}$$

$$d_a = 12/32 \text{ pulg.}$$

Tamaño de las boquillas:  $2 \times 15$  ,  $1 \times 12$

$E = 0.76163 - 0.76097 = 0.00066$ , pero para el programa empleado OJBHY el error es  $E = 0.0004$ , que es más exacto.

Tercera variante: Restamos  $1/32$  pulg. al  $d_n$  y asumimos que este valor es el tamaño de una boquilla y calculamos el valor de las otras dos boquillas.

Del caso 1<sup>o</sup>,  $d_n = \frac{14}{32}$  pulg.

luego:  $\frac{14}{32} - \frac{1}{32} = \frac{13}{32}$ , de la ecuación 3.111

calculamos el valor de las otras 2 boquillas

$$0.76097 = \sqrt{\left\{ \frac{13}{32} \right\}^2 + 2 (d_c)^2}$$

$d_c = 15/32$  pulg., el tamaño de las boquillas serán:  
 $2 \times 15$  ,  $1 \times 13$

$E = 0.77749 - 0.76097 = 0.01652$ , pero para el programa empleado OJBHY el error es  $E = 0.0163$ , que es más exacto.

Cuarta Variante: Sumamos  $1/32$  pulg. al  $d_n$  y asumimos que este valor es el tamaño de una boquilla y calculamos el valor de las otras dos boquillas.

Del caso 1<sup>o</sup>,  $d_n = \frac{14}{32}$  pulg.

luego  $\frac{14}{32} + \frac{1}{32} = \frac{15}{32}$ , de la ecuación 3.111

calculamos el valor de las otras dos boquillas.

$$0.76097 = \sqrt{\left\{\frac{15}{32}\right\}^2 + 2(d_d)^2}$$

$d_d = 14/32$ , el tamaño de las boquillas serán: 2 x 14, 1 x 15

$E = 0.77623 - 0.76097 = 0.01526$ , pero para el programa OJBHY el error es  $E = 0.0150$

Caso 3<sup>o</sup>: 2 boquillas simétricas, 2 NOZZ a partir de la ecuación 3.111

$$0.76097 = \sqrt{2 d^2}, \quad d = 17/32 \text{ pulg.}$$

boquillas : 2 x 17

$E = 0.75130 - 0.76097 = -0.00967$ , pero para el programa empleado OJBHY el error es  $E = 0.0099$ , que es más exacto.

Si se desea otras clases de combinación de boquillas puede hacerse uso las tablas en las cuales a una determinada área total de las boquillas corresponde una

combinación de boquillas. Ver anexo.

h.- Cálculo del caballaje hidráulico en superficie, P<sub>HHP</sub>; caballaje hidráulico en la broca, B<sub>HHP</sub>; el caballaje hidráulico por pulgada cuadrada de la broca, B<sub>HHP</sub>/-SQIN; la velocidad en las boquillas, V<sub>NOZ</sub>; la fuerza de impacto hidráulico, JIF.

- Cálculo del Caballaje hidráulico en Superficie.

Máxima presión limitada en superficie, SPP MAX =  
1,800 LPPC.

Caudal Optimo, Q OPT = 456 G.F.M

$$P_{HHP} = \frac{(SPP \text{ MAX}) (Q \text{ OPT})}{1,714} \quad \dots (3.120)$$

$$P_{HHP} = \frac{(1,800) (456)}{1,714} = 479 \text{ C.F.H.}$$

- Cálculo del caballaje hidráulico en la broca.

$$B_{HHP} = \frac{(\Delta P \text{ Bit OPT}) (Q \text{ OPT})}{1,714} \quad \dots (3.121)$$

$$B_{HHP} = \frac{(934) (456)}{1,714} = 249 \text{ C.F.H.}$$

- Relación caballaje hidráulico en la broca - caballaje hidráulico en superficie, KI,

$$KI = \frac{B_{HHP}}{P_{HHP}} \quad \dots (3.122)$$

$$KI = \frac{249}{479} = 0.520$$

- Caballaje hidráulico en la broca por pulgada cuadrada.

$$BHHP = 249$$

$$\text{Area} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (7.875)^2}{4} = 48.707$$

$$BHHP/SQIN = 5.112 \quad \text{HHF/pulg}^2$$

- Velocidad de salida en las boquillas de la broca, V NOZ

$$V \text{ NOZ} = \sqrt{\frac{(\Delta P \text{ Bit } OPT) (1120)}{MDWT}} \quad \dots (3.123)$$

$$V \text{ NOZ} = \sqrt{\frac{(934) (1120)}{10.1}}$$

$$V \text{ NOZ} = 321.8 \text{ pies/segundo}$$

- Fuerza de Impacto hidráulico, JIF

$$JIF = 0.000516 (MDWT) (Q \text{ OPT}) (V \text{ NOZ}) \quad \dots (3.124)$$

$$JIF = 0.000516 (10.1) (456) (321.8)$$

$$JIF = 764.8 \text{ libras}$$

i.- Cálculo del caudal mínimo recomendado para levantar los detritus cortados por la broca

El estudio principal de las propiedades del fluido de

perforación que consiste en mantener la estabilidad del hueco perforado, comprende también el calcular la velocidad mínima del levantamiento de los recortes. Esta velocidad mínima en el espacio anular pared del pozo - tubo de perforación, es calculada en base al peso específico promedio del material cortada así como de su diámetro y forma; este estudio está más allá de los objetivos de la presente Tesis, pero es preciso resaltar que el análisis concienzudo del caudal mínimo necesario para levantar los detritus cortados es de vital importancia previa, a un estudio de la optimización de la hidráulica, luego es necesario por lo menos dar algunas pautas sobre el cálculo del caudal mínimo recomendado para levantar estos recortes. Algunos autores<sup>42,43,44</sup> recomiendan algunos mínimos valores para la velocidad anular o en todo caso para el caudal mínimo recomendado, estos valores se muestran en la tabla No. 19, otros autores<sup>45</sup> muestran valores más conservadores, ver tabla No. 20, pero en ambos casos se deben tomar con precaución estas pautas; Fullerton<sup>46</sup> nos muestra como calcular a partir de no solo el diámetro del pozo, sino del peso específico del fluido de perforación empleado, ver ecuación 3.35:

---

42 L. Robinson. Cit

43 Mageebar.: "Drilling Fluid Engineering manual", (Enero-1977)

44 IMCO.: "Applied Mud Technology", (1978)

45 Morten Saebo. Cit

46 H.B. Fullerton. Cit.



$$A. V. \text{ MIN} = \frac{11,800}{(\text{MDWT}) (\text{BIT DI})} \dots (3.35)$$

Donde: BIT DI: Diámetro de la broca

MDWT : Peso específico del fluido de perforación

Randal<sup>47</sup> nos proporciona la ecuación empírica 3.125 para calcular la velocidad mínima de circulación que permite levantar los recortes y limpiar adecuadamente el pozo.

$$Q \text{ MIN} = 30 (\text{BIT DI}) \dots (3.125)$$

Mr. Brouse<sup>48</sup> nos muestra la ecuación empírica 3.126 que calcula el caudal mínimo para levantar los detritus.

$$Q \text{ MIN} = 10 (\text{BIT DI}) \sqrt{\text{BIT DI}} \dots (3.126)$$

La Tabla 21 compara los valores de las velocidades anulares y sus respectivos caudales mínimos de los distintos autores, si se desea usar algunos de estos valores o ecuaciones se deben hacerlo con las reservas del caso, pues son ecuaciones empíricas que solo tienen respaldo experimental singulares.

<sup>47</sup> B.V. Randall.: "Optimum Hydraulics in the Oil Patch", Pet. Eng. J. (Sept. 1975) 36-52

<sup>48</sup> M. Brouse. Cit.

TABLA No. 19.- Velocidades anulares mínimas, para levantar los recortes,

Tubería de perforar de 4 1/2 pulg - pared del pozo.

con sus respectivos caudales. 42,43,44

DIAMETRO <u>DEL</u> POZO (BIT DI), pulg.	A.V. MIN (pies/min)	Q MIN (G.P.M.)
26	55	1,472
18 1/2	67	880
17 1/2	70	817
15	80	668
12 1/4	90	477
10 5/8	110	416
9 7/8	115	363
8 3/4	120	276
7 7/8	130	222
6	140	90

TABLA No. 20.- Velocidades Anulares mínimas, para levantar los recortes, D.P. de 4 1/2 pulg. pared del pozo, con sus respectivos caudales<sup>45</sup>

<u>Diametro del Pozo</u> (Bit DI), pulg.	<u>A.V. MIN</u> (pies/min)	<u>Q MIN</u> (GPM)
26	lo maximo posible	lo maximo posible
17 1/2	90	1,050
12 1/4	120	636
8 1/2	140	297
7 7/8	150	256

TABLA No. 21.- Comparación de valores de velocidades anulares mínimas para levantar los detritus, entre los diferentes autores, MDWT = 10.0 lb/gal. D.P. = 4.5 pulg.

DI	<u>Robinson</u>	<u>SAEBO</u>	<u>Fullerton</u>	<u>Randall</u>	<u>Brouse</u>
pulg	AV - Q	AV - Q	AV - Q	AV - Q	AV - Q
26	55-1472		45-1204	29-780	50-1326
18 1/2	67- 880	-----	64- 841	42-555	61- 796
17 1/2	70- 817	90-1050	67- 782	45-525	63- 732
15	80- 668		79- 660	54-450	70- 581
12 1/4	90- 477	120- 636	96- 508	69-368	81- 429
10 5/8	110- 416	-----	111- 420	84-319	92- 346
9 7/8	115- 363	-----	119- 375	94-296	98- 310
8 3/4	120- 276	-----	135- 310	114-263	113- 259
7 7/8	130- 222	150- 256	150- 256	138-236	130- 221
6	140- 90	-----	197- 180	280-180	229- 147

La forma más apropiada de calcular la velocidad anular mínima para levantar los recortes producidos por el avance de la perforación a tiempo real de la operación de perforación es ilustrada por el siguiente ejemplo ilustrativo 3.10:

Se está perforando a 560 pies, varios pozos de la misma área han experimentado problemas de pérdida de circulación que fueron atribuidas a una pobre limpieza del hueco del pozo. Si se establece que la mínima velocidad anular aceptable es 130 pies/minuto, ¿la limpieza del pozo será la adecuada?

Datos del Pozo:

Diámetro del Pozo: 7 7/8 pulg.

Diámetro Externo D.P.: 4 1/2 pulg.

- MDWT: 9.0 lb/galón

Cortes:

Diámetro: 0.25 pulg.

peso específico: 21.0 lb/galón

Caudal: 310 GPM

Lecturas del viscosímetro Fann

$$\theta_{600} = 52$$

$$\theta_{300} = 31$$

Metodología: correlación Moore<sup>49</sup>

para  $Re_p > 300$  ;  $c_d = 1.5$

<sup>49</sup> Moore, P.L.: Drilling Practices Manual, Petroleum Publishing Co., Tulsa (1974)

$$\bar{V}_s = 1.54 \sqrt{d_s \left\{ \frac{\text{SWT} - \text{MDWT}}{\text{MDWT}} \right\}} \quad \dots (3.127)$$

donde:

$\bar{V}_s$  = velocidad de deslizamiento del recorte, pies/seg.

$d_s$  = diámetro de la partícula o recorte, pulg.

SWT = peso específico del recorte, lb/gal.

MDWT = peso específico del fluido de perforación, lb/gal.

$$\text{Para } Re_p \leq 3 ; cd = \frac{40}{Re_p}$$

$$\bar{V}_s = \frac{82.87 (d_s)^2}{\mu_a} \{\text{SWT} - \text{MDWT}\} \quad \dots (3.128)$$

donde:

$\mu_a$  = viscosidad aparente

$$\text{Para } Re_p \text{ entre 3 y 300, } cd = \frac{22}{\sqrt{Re_p}}$$

$$\bar{V}_s = \frac{2.90 (d_s) \{\text{SWT} - \text{MDWT}\}^{0.667}}{(\text{MDWT})^{0.333} (\mu_a)^{0.333}} \quad \dots (3.129)$$

donde:

$Re_p$  = Número de Reynolds para la partícula.

$$Re_p = \frac{928 (\text{MDWT}) (\bar{V}_s) (d_s)}{\mu_a} \quad \dots (3.130)$$

Solución

- a) Cálculo del índice del comportamiento de flujo,  $n$ ,  
y el índice de consistencia,  $K$ .

$$n = 3.32 \log \left\{ \frac{6600}{6300} \right\} \quad \dots (3.131)$$

$$n = 3.32 \log(52/31) = 0.746$$

$$n = 0.746$$

$$K = \frac{510 (6300)}{(511)^n} \quad \dots (3.132)$$

$$K = \frac{510 (31)}{(511)^{0.746}} = 150.995 \quad \text{eq. cp.}$$

- b) Cálculo de la velocidad anular,

De la ecuación 3.99, despejamos AV

$$\text{luego AV} = \frac{Q}{0.040794(D^2 - d^2)}$$

$$AV = \frac{310}{0.040794 \{ (7.875)^2 - (4.5)^2 \}}$$

$$AV = 181.95 \text{ pies/minuto, } 3.032 \text{ pies/seg.}$$

- c) Cálculo de la viscosidad aparente

$$\mu_a = \frac{K}{144} \left\{ \frac{d_h - d_p}{AV} \right\}^{1-n} \left\{ \frac{2 + \frac{1}{n}}{0.0208} \right\}^n \quad \dots (1.133)$$

donde:

$K$  = índice de consistencia, eq. cp.

$n$  = índice del comportamiento de flujo

$AV$  = velocidad anular, pies/seg.

$d_n$  = diámetro del pozo, pulg.

$d_p$  = diámetro externo de la tubería de perforar, pulg.

con la ecuación 3.133

$$\mu_a = \left\{ \frac{150.995}{144} \right\} \left\{ \frac{7.875 - 4.5}{3.032} \right\}^{1-0.746} \left\{ \frac{2 + \frac{1}{0.746}}{0.0208} \right\}^{0.746}$$

$$\mu_a = 47.59 \text{ cp}$$

d) Cálculo de la velocidad de deslizamiento de la partícula.

primero: Asumimos que  $Re_p > 300$ , entonces aplicamos la ecuación 3.127

$$\bar{V}_s = 1.54 \sqrt{0.25 \left\{ \frac{21 - 9.0}{9.0} \right\}} = 0.889$$

$$\bar{V}_s = 0.889 \text{ pies/seg.}$$

Calculamos su respectivo  $Re_p$  con la ecuación 3.130

$$Re_p = \frac{928 (9.0) (0.889) (0.25)}{47.59} = 39$$

Como  $Re_p = 39$  y no es mayor que 300, luego esta primera iteración es inválida.

Segundo: Asumimos que  $Re_p$  es menor o igual a 3; aplicamos la ecuación 3.128

$$\bar{V}_s = \frac{82.87 (0.25)^2}{47.49} \{21.0 - 9.0\}$$

$$\bar{V}_s = 1.306 \text{ pies/seg.}$$

calculamos su respectivo  $Re_p$  con la ecuación 3.130

$$Re_p = \frac{928 (9.0) (1.306) (0.25)}{47.59} = 57.3$$

Como  $Re_p = 57.3$  y no es menor o igual a 3, luego esta segunda iteración es inválida también.

Tercero: Asumimos que  $Re_p$  se encuentra entre 3 y 300, luego aplicamos la ecuación 3.129

$$\bar{V}_s = \frac{2.90 (0.25) \{21.0 - 9.0\}^{0.667}}{(9.0)^{0.333} (47.59)^{0.333}} =$$

$$\bar{V}_s = 0.506 \text{ pies/segundo.}$$

Calculamos  $Re_p$

$$Re_p = \frac{928 (9.0) (0.506) (0.25)}{47.59} = 22$$

como  $Re_p = 22$  y se encuentra entre 3 y 300 luego es válida la tercera iteración.

e) Análisis del resultado.

$$\bar{V}_s = 0.506 \text{ pies/seg., } 29 \text{ pies/minuto.}$$



AV = 3.032 pies/seg., 182 pies/minuto.

AVM = 2.167 pies/seg., 130 pies/minuto

La razón o relación de transporte de la velocidad anular, AV, de 3.032 con la velocidad de deslizamiento de las partículas,  $\bar{V}_s$ , 0.506 pies/segundo está establecida por:

$$F_t = \frac{3.032 - 0.506}{3.032} = 0.833 \text{ ó } 83.3\%$$

La razón o relación de transporte de la velocidad anular mínima, AVM, de 2.167 pies/seg. con la velocidad de deslizamiento de las partículas,  $\bar{V}_s$ , 0.506 pies/segundo está establecido por:

$$F_t = \frac{2.167 - 0.506}{2.167} = 0.766 \text{ ó } 76.6\%$$

f) Conclusión:

- La relación, razón o tasa de transporte de los detritus tanto para con la velocidad anular usada como para la velocidad anular mínima, AVM, es de 83.3% y 76.6%, lo cual nos podría indicar que la pérdida de circulación no se debería a una mala limpieza del fondo del pozo.
- La experiencia de campo<sup>50</sup> indica que se requiere que la velocidad anular exceda en o más de 200 pies/min.

<sup>50</sup> Hopkim, E.A.: "Factors affecting Cuttings Removal during Rotary drilling", J. Pet. Tech. (Junio 1967) 814.

a la velocidad máxima de deslizamiento de los recortes para manter la limpieza del hueco del pozo; prevenir agarres de tubería durante la perforación muy rápidas en las zonas someras del pozo.

En cambio se requiere que la velocidad anular exceda de 20 a 30 pies/minuto a la velocidad de máximo deslizamiento de los recortes para mantener la limpieza del hueco durante la perforación lenta de una roca dura, abrasiva y bien consolidada.

Analizando los datos del pozo, la profundidad a que se perfora y se ha presentado los problemas de pérdidas de circulación, podemos concluir:

$$\bar{V}_s + 200 \text{ pies/minuto} = 229 \text{ pies/min.}$$

$$AV = 182 \text{ pies/minuto}$$

$$229 - 182 = 47 \text{ pies/minuto}$$

Se requiere aumentar por lo menos 47 pies/min. a la velocidad anular del fluído de perforación para evitar problemas de pérdida de circulación y de posible agarres de cañería de perforar.

- Comparando los resultados con la tabla No. 21, si se perforaba en una formación dura y a una velocidad de perforación adecuada, la velocidad anular mínima de 130 pies/minuto sería más que suficiente para limpiar los recortes del hueco del pozo; pero para usar la tabla No. 21 se debe tomar en consideración la

velocidad de penetración o de perforación, la formación atravezada, y la profundidad de la operación. Los valores de la tabla No. 21 son aparentemente no para ser usadas en profundidades someras y formaciones no consolidadas que se perforan a un ritmo de perforación muy rápida. La siguiente ecuación ayuda a calcular la máxima tasa de velocidad de perforación, MVP,<sup>51</sup>

$$MVP = \frac{67 (AM\ WT - M\ WT)}{(D_h)^2} Q \quad \dots (3.134)$$

Donde:

AMDWT = peso específico del fluido en el espacio anular, a la salida, lb/gal.

MDWT = peso específico del fluido a la entrada

Q = caudal, GPM

D<sub>h</sub> = diámetro del hueco del pozo, pulg.

MVP = máxima velocidad de perforación, pies/hr.

Esta ecuación, es válida para rangos de peso específico de fluido de perforación de entre 8.4 y 11.5 lb/gal.

Se debe hacer notar que esta ecuación, 3.134, deben ser prioritarias en huecos de 14 3/4 pulgadas o más.

El cálculo del peso específico del fluido de perforación en el espacio anular al retorno o salida debe

<sup>51</sup> M. Brouse cit. pag. 82

incluir el peso de los detritus o recortes.

Para cálculos iniciales del peso específico del fluido de perforación en el espacio anular no debe exceder en 0.5 lb/gal. por encima del peso específico del fluido que ingresa al pozo.

j.- Cálculos y tablas del ejemplo Ilustrativo 3.9 por medio del programa PRGHYD

Los cálculos efectuados para el programa de máximo caballaje hidráulico, "MAXBHHP", se procederán de igual forma con los programas de: máxima fuerza de impacto hidráulico con o sin presión limitada, "MAXJIF-L", "MAXIF-F"; máximo número de Reynolds, "Reynolds", y el programa llamado "ESP" en el cual se utiliza el máximo o mínimo caudal físico que se dispone, así mismo se muestra el gráfico 3.12.

La siguiente tabla muestra los resultados encontrados al efectuar el método 0.5; si se hubiese deseado sólo efectuar un método en especial como por ejemplo el máximo número de Reynolds, "Reynolds", entonces en Datos del programa hidráulico se procede:

Método = Method = 0.4; al efectuarse con el código 0.5 el programa calcula todos los métodos, incluyendo el llamado Especial, "ESP", que calcula la hidráulica cuando el caudal óptimo es mayor que el caudal máximo, entonces el caudal empleado es la velocidad de circulación máxima de superficie para los cálculos respec-

tivos de la hidráulica; cuando el caudal óptimo calculado es menor que el caudal mínimo para levantar los detritus, entonces el caudal empleado es la velocidad de circulación mínima para los cálculos respectivos.

K.- Análisis de los Resultados

El tipo de bomba: Ellis - Williams, W-850

características:

Longitud de carrera = 9.5 pulg.

MAX CPM : 115                      MAX HPI : 850

MIN CPM : 45                        MIN HPI : 333

Q, gal/c		4.09	3.49	2.93
camisa		6 1/2	6	5 1/2
MAX P. Descarga		2,789	3,269	3,890
CPM	HPI	B P M		
105	776	429	366	307
95	702	388	331	278
85	628	348	296	249

Aplicando la ecuación 3.109,  $Q_t = 3.141$  gal/c.

$Q_{MAX} = 3.141$  gal/c. X 105 = 330 g.p.m.

factor de seguridad = 0.94

$330 \times 0.94 = 310$  g.p.m., luego  $Q_{MAX} = 310$  gpm

La presión máxima de superficie que generalmente es establecida arbitrariamente por el operador, debido a especificaciones de la camisa usada y a la presión de estallamiento del equipo de superficie; pero en realidad esta presión máxima, SFP MAX, es dispuesta muy por debajo de las consideraciones enunciadas anteriormente

SPP MAX = 1,800 l.p.p.c., de la ecuación 3.41 modificada:

$$P_{HHP\ MAX} = \frac{(SPP\ MAX)(Q\ MAX)}{1714} \quad \dots (3.135)$$

donde

P<sub>HHP</sub> MAX : máximo caballaje hidráulico en superficie.

SPP MAX : máxima presión en el tubo vertical

Q MAX : máxima caudal físico.

luego aplicando 3.135

$$P_{HHP\ MAX} = \frac{(1,800)(310)}{1714} = 326\ HHP$$

La recta del P<sub>HHP</sub> MAX es graficada en la ilustración 3.12; sin embargo en las características de la bomba W-850 el P<sub>HHP</sub> MAX es:

$$HP_i = \frac{P_{HHP}}{(E.V)(E.M)} \quad \dots (3.136)$$

donde:

HP<sub>i</sub> = caballaje de entrada

E.V = eficiencia volumétrica

E.M = eficiencia mecánica

Las especificaciones de la bomba utiliza.

E.V = 1.0

E.M = 0.9

Pero debido a su estado de mantenimiento:

$$E.V = 0.9$$

$$E.M = 0.85$$

De la ecuación 3.136

$$HP_i = \frac{326}{(0.9)(0.85)} = 426 \text{ HP}$$

Es importante señalar que debido al estado de mantenimiento de la bomba se fije las restricciones del sistema a su estado real:

$$HP_i = 426 \text{ HP}$$

$$FHHP = 326 \text{ HHP}$$

$$SPP \text{ MAX} = 1,800 \text{ lppc.}$$

$$Q \text{ MAX} = 310 \text{ g.p.m.}$$

Estas restricciones del sistema se encuentran diagramados en el gráfico 3.12

El Tipo de Flujo en la tubería de perforar y en el espacio anular hueco del pozo - tubería de perforar. El flujo en la tubería de perforar debe ser constantemente turbulento, luego es necesario calcular el caudal crítico con la ecuación 3.102 y luego con la 3.101

$$Q \text{ crit. D.P.} = 208 \text{ g.p.m.}$$

El caudal crítico en el espacio anular hueco del pozo-tubería de perforar es calculada por la ecuación 3.106 y 3.105.



$Q_{crit} \text{ H - DP} = 533 \text{ g.p.m.}$

Estos caudales críticos limitan al sistema lo cual se visualiza mejor en el gráfico 3.12.

Para este caso particular del ejemplo ilustrativo 3.9 la ventana de operación se encuentra entre el  $Q_{min}$ ; 256 gpm.

y el caudal o velocidad de circulación máxima;

ventana de operación quiere decir el rango de operación que disponemos para aplicar cualquier programa hidráulico adecuado a las circunstancias.

De acuerdo a la Tabla No. 22 y al gráfico 3.12 deducimos lo siguiente:

El programa MAXJIF-L, su  $Q_{OPT}$  es mayor que el  $Q_{MAX}$  y el  $Q_{crit} \text{ H - DP}$ , luego no se puede aplicar.

El programa MAXBHHP, su  $Q_{OPT}$  es mayor que el  $Q_{MAX}$  pero menor al  $Q_{crit} \text{ H - DP}$ , luego aún así no se puede aplicar.

El programa MAXJIF-F, su  $Q_{OPT}$  es ligeramente mayor al  $Q_{MAX}$  y menor que el  $Q_{crit} \text{ H - F}$ , luego su aplicación es posible.

El programa MAX REYNOLDS, su  $Q_{OPT}$  es menor que el  $Q_{MIN}$  pero mayor que el  $Q_{crit} \text{ DP}$  luego no es aplicable.

Para este caso particular del ejemplo ilustrativo 3.9 no hay ningún programa hidráulico cuyo  $Q_{OPT}$  se encuentre entre el  $Q_{MAX}$  y el  $Q_{MIN}$ , luego lo más apropiado es trabajar con el  $Q_{MAX}$  en el programa ESP1.

Si hipotéticamente todos los programas mencionados se

encuentran dentro del rango de operación o ventana, entonces se debe hacer el siguiente análisis:

- De acuerdo a la formación que se atravieza
  - Formación dura: Máximo impacto hidráulico
  - Formación suave: Máximo caballaje hidráulico y máximo número de Reynolds.
- De acuerdo a la profundidad de operación
  - operación Someras: Máximo impacto hidráulico sin límite, máximo número de Reynolds.
  - Operación profunda: máximo impacto hidráulico con límite y máximo caballaje hidráulico con límite.

En conclusión, el escoger máximo impacto con o sin límite, máximo caballaje hidráulico o máximo número de Reynolds depende del:

- Tipo de formación
- La profundidad de operación
- El número de bombas disponibles
- Los Rangos de caballajes.

- Los tamaños de las camisas disponibles
  - El Rango operacional o ventana de Operación

Generalmente la ventana de operación es el factor limitante ordinario en función del cual escogemos el programa más adecuado y por lo tanto el tamaño óptimo de las boquillas de la broca.

Para nuestro ejemplo ilustrativo 3.9 se escogió trabajar con el Q MAX, lo cual es una decisión lógica pues:

si el  $Q_{OPT}$  es mayor que el  $Q_{MAX}$  se debe trabajar con el  $Q_{MAX}$ , si el  $Q_{OPT}$  es menor que el  $Q_{MIN}$  se debe trabajar con el  $Q_{MIN}$ .

De la Tabla No. 22 y para "ESF 1" que se refiere al  $Q_{OPT} = 310$  gpm; la combinación más exacta de boquillas está establecida por el menor "E", absoluto, el cual es  $E = 0.0005$

boquillas: 2 x 12 , 1 x 8

El programa "PRGHYD" también calcula el PHHP, BHHP, BHHP/SQIN, V NOZ, JIF.

donde:

PHHP = caballaje hidráulico en superficie

BHHP = caballaje hidráulico en la broca

BHHP

---- - caballaje hidráulico en la broca por pulgada

SQIN

cuadrada del área transversal de la broca o energía específica.

V NOZ = velocidad en las boquillas, pies/seg.

Si hipotéticamente la profundidad de operación fuera 5,664 en vez de 3,664 pies para el ejemplo ilustrativo 3.9; la tabla No. 23 mostraría la variación de las  $Q_{OPT}$  para los diferentes programas hidráulicos, también es importante comparar la tabla No. 22 y la No. 23 en las diferentes variables llámese JIF, BHHP, V NOZ etc, esta comparación es resumida en la tabla No. 24 donde es evidente que la profundidad juega un importante papel para seleccionar el tipo de programa.

La tabla No. 24 revela lo siguiente:

- A mayor profundidad mayor  $\Delta PC$ , pero si el hueco del pozo y el tipo de flujo fueran iguales esto quiere decir igual  $U$  y  $K$ , luego el  $\Delta PC$  OPT sería igual aunque la profundidad fuese mayor y el  $Q$  OPT iría disminuyendo manteniendo el SPF MAX constante, este razonamiento se deriva de las ecuaciones 3.62 para el programa de máxima fuerza de Impacto hidráulico sin límite de presión de superficie, 3.72 para máxima fuerza de impacto hidráulico con límite, 3.44 para máximo caballaje hidráulico en la broca con límite, 3.94 para máximo número de Reynolds a presión limitada.

La tabla 23 esta hecha en base a:

$U = 0.982$  y  $K = 2.8956$ , luego no tienen igual  $U$  y  $K$  que a la profundidad de 3,664; pero la variación de las diferentes factores tales como  $\Delta P$  BIT,  $\Delta PC$ ,  $Q$ , PHHP, BHHP expuestos en la tabla 24 nos muestra que para mantener un  $Q$  OPT a través de 1,000 o 2,000 pies de perforación, sólo se debe tratar de mantener constante el SPF MAX y esto se ejecuta disminuyendo gradualmente el  $Q$  OPT.

Es preciso hacer notar que las pruebas hidráulicas, cuyo número mínimo deben ser tres, deben realizarse por encima de la velocidad crítica de flujo en la tubería de perforación, en este caso el  $Q$  crítico fue

208 g.p.m., para llevar a cabo estas pruebas se debe primero evaluar cual es la eficiencia volumétrica de las bombas de fluido de perforación, esta evaluación que se lleva a cabo en el campo es descrita por Ben Siegel<sup>52</sup> en forma detallada.

Diversos autores dan referencias sobre los rangos de BHHP/SQIN = <3, 5>, V NOZ = <300, 500>

La variación de U afecta ostensiblemente la distribución óptima de presión de superficie en la broca, ver Tabla No. 25, es por esta razón que el cálculo de la hidráulica por este método es más exacto que con aquellos que se asume un U arbitrario.

---

<sup>52</sup> Ben Siegel.: "How to calculate pump output and efficiency", Pet. Eng. (Marzo 1981) 82-90

TABLA No. 25.- Porcentaje óptimo de la presión de superficie, SPP, utilizado en la broca.

U	MAXBHHP	MAXJIF-F	MAXJIF-L	REYNOLDS
1.9	65.5	74.4	48.7	88.1
1.86	65.0	74.1	48.2	87.8
1.82	64.5	73.8	47.6	87.4
1.8	64.3	73.7	47.4	87.2
1.6	61.5	72.2	44.4	85.2
1.4	58.3	70.6	41.2	82.6
1.2	54.5	68.8	37.5	79.3
1.078	51.9	67.5	35.0	76.8
1	50.0	66.7	33.3	75.0
0.982	49.5	66.5	32.9	74.5

La caída de presión en el espacio anular es calculada más adecuadamente si: primero se calcula el  $\Delta PC$  por medio de la ecuación 3.55 donde  $\Delta P$  Bit es calculada por la ecuación 3.110, entonces  $\Delta PC = SPP - \Delta P$  Bit

Segundo: Calculamos las caídas de presión a través de la tubería de perforar y los cuellos lastrabarrenas por medio de la ecuación 3.104 según el método teórico de cálculo de la hidráulica, este resultado lo restamos de  $\Delta PC$ , luego obtenemos la caída de presión real en el espacio anular:

$$Q = 310 \text{ gpm}$$

$$\Delta P \text{ DP} = 163.7$$

$$\Delta P_{DC} = \frac{131.0}{294.7}$$

de la ecuación 3.37

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{anular}} &= \Delta P_C - \{ \Delta P_{DP} + \Delta P_{DC} \} \\ &= 571 - 294.7 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{\text{anular}} = \underline{276.3} \text{ (ppc valor real)}$$

Si calculamos la caída de presión en el espacio anular por el método tradicional teórico tenemos:

$$\Delta P_{\text{Hole}} - DC = 57.8$$

$$\Delta P_{\text{Hole}} - DP = 94.4$$

$$\Delta P_{\text{CSG}} - DP = \frac{7.0}{159.2} \text{ (ppc valor teórico)}$$

El valor teórico es obtenido aplicando el programa "PDC" al ejemplo ilustrativo 3.9, ver anexo.

El error de cálculo de la caída de presión anular que para este ejemplo es del orden del 42.4%, implica un gran riesgo al calcular el peso específico efectivo de circulación del fluido de perforación,  $ECD_c$ , para evitar problemas de pérdida de circulación.

$$ECD_c = \frac{\text{Presión hidrostática} + \Delta P_{\text{anular}} + \Delta P_D}{(0.052)(h)} \dots (3.137)$$

$$\text{donde } \Delta P_{\text{detritus}} = h (0.052) \{ \text{SWT} - \text{MDWT} \} \times C_a \dots (3.138)$$

$$\text{donde } C_a = \frac{\text{ROP} (\pi) (D. \text{Bit})^2}{4 (Q) * (F_t)} \quad \dots (3.139)$$

donde :

ROP = velocidad de perforación, pies hora.

D Bit = diámetro de la broca

Q = Caudal

$\Delta P_d$  = caída de presión debido a los detritus

$F_t$  = tasa de transporte de los detritus

$C_a$  = Concentración de los detritus en el fluido de perforación <0, 1.0>, generalmente una máxima concentración es de 0.05.

h = profundidad vertical, pies.

SWT = peso específico de los detritus.

Si del ejemplo ilustrativo 3.10, la velocidad de perforación es de 57 pies/hora y la gradiente de presión del poro de la perforación es de 9.7 lb/gal:

Calculo de  $C_a$  : de la ecuación 3.139

$$C_a = \frac{57 (\pi) (7.875)^2}{4 (310) (83.3)}$$

$$C_a = 0.108$$

Cálculo de  $\Delta P$  Detritus

$$\Delta P \text{ Detritus} = 560 (0.052) [21 - 9.0] \times 0.108$$

$$\Delta P \text{ Detritus} = 38 \text{ lppc.}$$

Si  $\Delta P$  anular es de 110 lppc, luego calculamos la  $ECD_c$



con la ecuación 3.137.

$$ECD_c = \frac{9(560)(0.052) + 110 + 38}{(0.052)(560)} = 14 \text{ lb/gal.}$$

lo cual induce a una pérdida de circulación.

## CAPITULO IV

### ECUACION DE LA VELOCIDAD DE PENETRACION. MODELOS MATEMATICOS

La forma como los componentes del Sistema o las más importantes variables de perforación afectan a la velocidad de penetración, ROP, es compleja y parcialmente comprendida, luego entonces el desarrollo de un modelo matemático preciso que abarque el proceso de perforación rotatoria no es posible todavía.

Sin embargo se han desarrollado varios modelos matemáticos que tratan de combinar las interrelaciones conocidas entre los diferentes componentes del Sistema.

Estos modelos hacen posible la aplicación de métodos formales de optimización para seleccionar el mejor peso sobre la broca, WOB y la velocidad de rotación, N, para obtener el mínimo costo de pie perforado.

Se presentará dos modelos matemáticos, uno especialmente aplicable a brocas con insertos de carburo de tung-

teno y el otro método para brocas con dientes de acero pero que también se puede aplicar a las brocas con insertos pero con cierto grado de éxito.

#### 4.1 MODELOS MATEMATICOS

##### 4.1.1 Método de Regresión Múltiple de Bourgoyne y Young<sup>53</sup>

Este método se realiza por medio de un análisis de regresión múltiple de los datos detallados tomados a cortos intervalos de la perforación. Estos datos son:

Resistencia de la formación

Profundidad de la formación

Compactación de la formación

Presión diferencial a través del fondo del pozo

Diámetro y peso sobre la broca

Velocidad rotatoria de la broca

Desgaste de la broca

Hidráulica

Es preciso hacer notar que este modelo matemático se desarrollo básicamente bajo el estudio del desgaste o enromamiento del diente de acero, en vez de la pérdida o rotura del inserto de carburo de tungsteno, a consecuencia de esto es aconsejable el uso de este método para brocas tricónicas de dientes de acero; también se puede este método aplicar a brocas con insertos pero con cierto grado

<sup>53</sup> A.T. Bourgoyne, Jr. y F.S. Young, Jr., cit

de confiabilidad.

La ecuación siguiente resume lo dicho anteriormente:

$$ROP = (F1) (F2) (F3) (F4) (F5) \dots (Fn) \quad \dots (4.1)$$

donde:

ROP: velocidad de penetración, pies/hr

F1, F2, ...Fn = Componentes o variables relacionadas con la velocidad de penetración o en función de la velocidad de penetración

luego:

$$F1 = e^{2.303 a_1} = C \quad \dots (4.2)$$

$$F2 = e^{2.303 a_2} (10,000 - D) \quad \dots (4.3)$$

$$F3 = e^{2.303 a_3} D^{0.69} (GP - 9.0) \quad \dots (4.4)$$

$$F4 = e^{2.303 a_4} D (GP - ECD) \quad \dots (4.5)$$

$$F5 = \left[ \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{c} W \\ d_b \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} W \\ d_b \end{array} \right]_t \\ \hline 4 - \left[ \begin{array}{c} W \\ d_b \end{array} \right]_t \end{array} \right]^{a_5} \quad \dots (4.6)$$

$$F6 = \left[ \begin{array}{c} N \\ 60 \end{array} \right]^{a_6} \quad \dots (4.7)$$

$$F7 = e^{-a_7 h} \quad \dots (4.8)$$

$$FB = \left\{ \frac{F_j}{1,000} \right\}^{a_B} \dots (4.9)$$

donde:

$a_1, a_2, a_3 \dots a_B = A_1, A_2, \dots A_B$  son constantes producto del análisis de regresión múltiple que deben ser registradas en base a las condiciones locales de perforación.

F<sub>j</sub>: Fuerza de impacto hidráulico debajo de la broca, libras-fuerza.

GP: Gradiente de presión del poro, lb/gal

ECD: Peso específico equivalente de circulación del fluido de perforación, lb/gal.

$$\left\{ \frac{W}{d_b} \right\} t$$

Peso inicial sobre la broca por pulgada del diámetro de la broca, al cual se comienza a perforar, 1,000 lbf/pulg.

D : Profundidad vertical verdadera, pies.

h : Fracción de la estructura cortante, diente de acero enromada.

N : Velocidad rotatoria de la broca

ROP:  $dD/dt$ , pies/hora.

La función F<sub>1</sub> representa primariamente los efectos de

la resistencia de la formación y el tipo de broca sobre la velocidad de penetración; sin embargo también incluye los efectos de otros componentes o variables de perforación tales como: tipo de fluido de perforación, contenido de sólidos, etc., los cuales no están incluidos en el modelo.

La constante o parámetro  $a_1$  o  $A_1$  es inversamente proporcional al logaritmo natural del cuadrado de la consistencia de la perforabilidad. En otras palabras a menor consistencia de la perforabilidad mayor resistencia de la formación, o a mayor consistencia de la perforabilidad menor resistencia de la formación.

Las funciones  $F_2$  y  $F_3$  modelan el efecto de la compactación sobre la velocidad de penetración. La función  $F_2$  asume un decremento exponencial en la velocidad de penetración con la profundidad en una formación normalmente compactada, esto significa que  $F_2$  contabiliza el incremento de la resistencia de la roca debido a la compactación normal con la profundidad.

La función  $F_3$  modela el efecto de subcompactación que es experimentada en formaciones de presiones anormales. La función  $F_3$  asume un incremento exponencial en la velocidad de penetración con la gradiente de presión del poro. Nótese que el producto  $(F_2)(F_3)$  es igual a 1.0 para una gradiente de presión del poro de 9.0 lb/gal y una profundidad de 10,000 pies.

La función  $F_4$  modela el efecto del sobrebalance, i.e., la presión diferencial a través del fondo del pozo sobre

la velocidad de penetración; esto significa que se asume un decremento exponencial en la velocidad de penetración con un exceso en la presión del fondo del pozo. La función  $F_4$  tiene un valor de 1.0 para un sobrealance de cero, i.e., cuando la presión de la formación o del poro es igual a la presión del fondo del pozo.

Las funciones  $F_5$  y  $F_6$  modelan el efecto del peso sobre la broca y la velocidad de rotación respectivamente sobre la velocidad de penetración. La función  $F_5$  modela también el efecto del diámetro de la broca sobre la velocidad de penetración, esta función asume que la velocidad de penetración es directamente proporcional a

$$\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}^{a_5}$$

Debe observarse que  $F_5$  tiene un valor de 1.0 cuando  $(W/d_b)$  tiene un valor de 4,000 lb/pulg. del diámetro de la broca. El peso inicial o  $(W/d_b)_t$  es siempre un valor pequeño que podría ser despreciado donde las formaciones son relativamente suaves.

En formaciones más duras este peso inicial puede ser estimado desde las pruebas de perforación, DOT, que terminan con un peso sobre la broca muy baja.

La función  $F_5$  tiene un límite superior que corresponde al punto de deficiencia hidráulica el cual debe ser establecido por pruebas de perforación, DOT.

La función  $F_6$  asume que la velocidad de penetración es

directamente proporcional a  $N^{0.6}$ ,  $F_6$  es normalizado a 1.0 para  $N = 60$  RPM. Los valores de  $A_6$  y  $A_5$  pueden ser determinados por medio de los DOT, como se verá en el ejemplo ilustrativo 5.1  $A_5$  varía entre 0.5 y 2.0 y  $A_6$  entre 0.4 para formaciones muy duras y 0.9 para formaciones muy suaves.

La función  $F_7$  modela el efecto del enroscamiento del diente de acero sobre la velocidad de penetración. El valor del parámetro  $A_7$  puede ser estimado de la medición de la velocidad de penetración tomados en formaciones similares a las mismas condiciones de operación de la broca, estas condiciones deben ser constantes desde el inicio hasta el final de la corrida de la broca como se muestra en el ejemplo ilustrativo 5.2. La fracción de la altura del diente que ha sido gastada,  $h$ , es cero cuando se asume que no ha variado la altura del diente. El valor de  $A_7$  depende primariamente del tipo de broca y en forma menor del tipo de formación que atravieza.

El término  $F_7$  tiene valor 1.0 cuando  $h = 0$ , i.e., cuando no hay desgaste del diente o estructura cortante. En el caso de brocas con insertos de carburo de tungsteno que son operados a moderados pesos y velocidades rotatorias, generalmente el desgaste del inserto es insignificante, luego  $A_7$  es cero. Los valores típicos de  $A_7$  para brocas de dientes de acero son desde 0.3 a 1.5



La función  $F_B$  modela el efecto de la hidráulica de la broca sobre la velocidad de penetración. Generalmente se puede escoger el tipo de programa, en este caso particular se escoge fuerza de impacto hidráulico que se normaliza igual a 1.0 cuando  $F_j = 1,000$  lbf. Los valores típicos para  $A_B$  varían entre 0.3 y 0.6.

En la práctica, es prudente seleccionar los mejores valores promedios de  $A_2$  hasta  $A_B$  para los tipos de formación en el intervalo de profundidad de interés.

Es importante poner énfasis que el valor de  $F_1$  varía con la resistencia de la formación que ha sido perforado. El término  $F_1$  es expresado en las mismas unidades que la velocidad de penetración y comunmente se le denomina perforabilidad de la formación. La perforabilidad es numericamente igual a la velocidad de penetración. La perforabilidad de varias formaciones pueden ser observadas usando los datos de perforación obtenidos de los pozos del área previamente perforados.

#### 4.1.1.1 La técnica de la Regresión Múltiple.

Las ecuaciones 4.1 hasta 4.9 define las relaciones funcionales entre la velocidad de penetración y los otros componentes o variables de perforación, pero las constantes  $A_2$  hasta  $A_B$  deben ser determinadas antes que estas ecuaciones puedan ser aplicadas. Estos parámetros,  $A_2$  hasta  $A_B$  son determinados a través de un análisis de regresión múltiple de los datos detallados sobre cortos intervalos de profundidad como se dijo anteriormente.

La idea de usar análisis de regresión para evaluar las constantes de datos tomados de pozos perforados no es nueva; por ejemplo, el trabajo de Graham y Muench<sup>54</sup> en 1959 fue uno de los primeros artículos de la optimización de la perforación.

Teóricamente, sólo se necesitan ocho puntos como datos para resolver las ocho incógnitas  $A_1$  hasta  $A_8$ , sin embargo esto en la práctica sólo es válido si la ecuación 4.1 modela el proceso de perforación rotaria con una exactitud del 100 por ciento. No es necesario decir que esto nunca sucede. Cuando solamente pocos puntos son usados en el análisis de los datos del campo, aún valores negativos son calculados algunas veces para uno o más de las constantes de regresión.

Un estudio escrupuloso del procedimiento del análisis de regresión múltiple indica que el número requerido de número de datos para producir resultados significativos, que dependan no solo de la exactitud de la ecuación 4.1 si no también del rango de los valores de los parámetros  $X_2$  hasta  $X_8$  está dado por la tabla 26 que sumarisa los rangos mínimos recomendados para cada uno de los parámetros de la perforación y el número mínimo de datos estimados para ser usados en el análisis.

---

<sup>54</sup> Graham, J.W., y Muench, N.L.: "Analytical Determination of Optimum Bit Weight and Rotary speed Combinations", Artículo SPE 1349-G, Dallas (Oct. 1959)

Llamese

$$X_2 = 10,000 - D \quad \dots (4.10)$$

$$X_3 = D^{0.69} (GP - 9.0) \quad \dots (4.11)$$

$$X_4 = D (GP - ECD) \quad \dots (4.12)$$

$$X_5 = \ln \left( \frac{\left\{ \frac{W}{d_b} \right\} - \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_t}{4.0 - \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_t} \right) \quad \dots (4.13)$$

$$X_6 = \ln \left( \frac{N}{60} \right) \quad \dots (4.14)$$

$$X_7 = -h$$

$$X_8 = \ln \left( \frac{F_j}{1,000} \right) \quad \dots (4.15)$$

Tabla No. 26.- Rangos mínimos de los datos Recomendados para el Análisis de Regresión

Parámetro	Rango Mínimo	Número de Parámetros	Número mínimo de Puntos
X 2	2,000	8	30
X 3	5,000	7	25
X 4	15,000	6	20
X 5	0.40	5	15
X 6	0.50	4	10
X 7	0.20	3	7
X 8	0.50	2	4

El rango mínimo se halla diferenciando el máximo valor observado menos el mínimo valor observado. Cuando cualquier parámetro  $X_i$  ha llegado a ser constante a través del intervalo analizado, el valor para la correspondiente constante de regresión,  $a_i$ , debe ser estimado de estudios anteriores y el análisis de regresión debe llevarse a cabo para las constantes de regresión remanentes.

Así como el número de parámetros incluidos en el análisis decrecen, el número mínimo requeridos de puntos para calcular las constantes de regresión remanentes también decrecen, ver Tabla No. 26. Es importante recalcar que en muchas aplicaciones se tienen que combinar los datos de más de un pozo en el propósito de calcular las ocho constantes de Regresión.

La velocidad de penetración, peso sobre la broca y la velocidad de rotación deben ser monitoreados sobre intervalos cortos de profundidades para asegurar que la mayoría de la información registrada es representativa de un tipo de formación.

La ecuación 4.1 puede expresarse en términos de la ecuación siguiente:

$$\frac{dD}{dt} = \text{Exp} \left\{ a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j x_j \right\} \dots (4.16)$$

Debe recordarse que:

$$e^{a \ln U} = U^a$$

El término 2.303 para efecto de la regresión lo consideramos parte de  $a_1$ .

Los términos  $x_j$  de la ecuación 4.16 son los reemplazados por las ecuaciones 4.10 hasta 4.15 en la 4.2 hasta la 4.9 respectivamente para luego reemplazarlo en la ecuación 4.1 donde resumiendo nos proporciona la ecuación 4.16.

Tomando logaritmos a ambos miembros de la Ec. 4.16.

$$\ln \left\{ \frac{dD}{dt} \right\} = a_1 + \sum_{j=2}^B a_j x_j \quad \dots (4.17)$$

La ecuación 4.17 puede ser verificada por validez en un tipo de formación y a cada profundidad al cual los datos han sido recolectados, si definimos al error residual del  $i$  décimo punto dato por  $r_i$ , luego:

$$r_i = a_1 + \sum_{j=2}^B a_j x_j - \ln \left\{ \frac{dD}{dt} \right\} \quad \dots (4.18)$$

Entonces el problema es seleccionar  $A_1$  hasta  $A_B$  para  $n$  puntos datos, donde  $n$  es cualquier número más alto que  $B$  luego la suma de los cuadrados de los residuos,  $\sum_{i=1}^n r_i^2$  es mínima.

Usando Cálculo; derivando la expresión

anterior e igualando a cero

$$\frac{d \sum_{i=1}^n r_i^2}{d a_j} = \sum_{i=1}^n 2 r_i \frac{d r_i}{d a_j} = 0 \quad \dots (4.19)$$

Para  $j = 1, 2, \dots, 8$  Luego las constantes  $A_1$  hasta  $A_8$  pueden ser obtenidas por solución simultánea del Sistema de ecuaciones obtenida por la expansión de

$$\sum_{i=1}^n r_i x_j \quad \text{para } j = 1, 2, 3, 4, \dots, 8$$

La expansión de:  $\sum_{i=1}^n r_i x_j$  produce:

$$nA_1 + A_2 \sum x_2 + A_3 \sum x_3 + A_4 \sum x_4 + A_5 \sum x_5 + A_6 \sum x_6 + A_7 \sum x_7 + A_8 \sum x_8 = \sum 1n (dD/dt) \quad \dots (4.20)$$

$$A_1 \sum x_2 + A_2 \sum x_2^2 + A_3 \sum x_2 x_3 + A_4 \sum x_2 x_4 + A_5 \sum x_2 x_5 + A_6 \sum x_2 x_6 + A_7 \sum x_2 x_7 + A_8 \sum x_2 x_8 = \sum x_2 1n (dD/dt) \dots (4.21)$$

$$A_1 \sum x_3 + A_2 \sum x_3 x_2 + A_3 \sum x_3^2 + A_4 \sum x_3 x_4 + A_5 \sum x_3 x_5 + A_6 \sum x_3 x_6 + A_7 \sum x_3 x_7 + A_8 \sum x_3 x_8 = \sum x_3 1n (dD/dt) \dots (4.22)$$

$$A_1 \sum x_4 + A_2 \sum x_4 x_2 + A_3 \sum x_4 x_3 + A_4 \sum x_4^2 + A_5 \sum x_4 x_5 + A_6 \sum x_4 x_6 + A_7 \sum x_4 x_7 + A_8 \sum x_4 x_8 = \sum x_4 1n (dD/dt) \dots (4.23)$$

$$A_1 \sum x_5 + A_2 \sum x_5 x_2 + A_3 \sum x_5 x_3 + A_4 \sum x_5 x_4 + A_5 \sum x_5^2$$

$$A_6 \sum X_5 X_6 + A_7 \sum X_5 X_7 + A_8 \sum X_5 X_8 = \sum X_5 \ln (dD/dt) \dots (4.24)$$

$$\begin{aligned} & A_1 \sum X_6 + A_2 \sum X_6 X_2 + A_3 \sum X_6 X_3 + A_4 \sum X_6 X_4 + A_5 \sum X_6 X_5 \\ & A_6 \sum X_6^2 + A_7 \sum X_6 X_7 + A_8 \sum X_6 X_8 = \sum X_6 \ln (dD/dt) \dots (4.25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & A_1 \sum X_7 + A_2 \sum X_7 X_2 + A_3 \sum X_7 X_3 + A_4 \sum X_7 X_4 + A_5 \sum X_7 X_5 \\ & A_6 \sum X_7 X_6 + A_7 \sum X_7^2 + A_8 \sum X_7 X_8 = \sum X_7 \ln (dD/dt) \dots (4.26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & A_1 \sum X_8 + A_2 \sum X_8 X_2 + A_3 \sum X_8 X_3 + A_4 \sum X_8 X_4 + A_5 \sum X_8 X_5 \\ & A_6 \sum X_8 X_6 + A_7 \sum X_8 X_7 + A_8 \sum X_8^2 = \sum X_8 \ln (dD/dt) \dots (4.27) \end{aligned}$$

Los coeficientes de regresión  $A_1, A_2, \dots, A_8$  son calculados usando el siguiente sistema de ecuaciones por el método de eliminación de Gauss con pivote parcial.

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_2 & \sum X_3 & \sum X_4 & \sum X_5 & \sum X_6 & \sum X_7 & \sum X_8 \\ \sum X_2 & \sum X_2^2 & \sum X_2 X_3 & \sum X_2 X_4 & \sum X_2 X_5 & \sum X_2 X_6 & \sum X_2 X_7 & \sum X_2 X_8 \\ \sum X_3 & \sum X_3 X_2 & \sum X_3^2 & \sum X_3 X_4 & \sum X_3 X_5 & \sum X_3 X_6 & \sum X_3 X_7 & \sum X_3 X_8 \\ \sum X_4 & \sum X_4 X_2 & \sum X_4 X_3 & \sum X_4^2 & \sum X_4 X_5 & \sum X_4 X_6 & \sum X_4 X_7 & \sum X_4 X_8 \\ \sum X_5 & \sum X_5 X_2 & \sum X_5 X_3 & \sum X_5 X_4 & \sum X_5^2 & \sum X_5 X_6 & \sum X_5 X_7 & \sum X_5 X_8 \\ \sum X_6 & \sum X_6 X_2 & \sum X_6 X_3 & \sum X_6 X_4 & \sum X_6 X_5 & \sum X_6^2 & \sum X_6 X_7 & \sum X_6 X_8 \\ \sum X_7 & \sum X_7 X_2 & \sum X_7 X_3 & \sum X_7 X_4 & \sum X_7 X_5 & \sum X_7 X_6 & \sum X_7^2 & \sum X_7 X_8 \\ \sum X_8 & \sum X_8 X_2 & \sum X_8 X_3 & \sum X_8 X_4 & \sum X_8 X_5 & \sum X_8 X_6 & \sum X_8 X_7 & \sum X_8^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum P \\ \sum X_2 P \\ \sum X_3 P \\ \sum X_4 P \\ \sum X_5 P \\ \sum X_6 P \\ \sum X_7 P \\ \sum X_8 P \end{bmatrix} \dots (4.28)$$

donde  $\ln (dD/dt) = P = T$

Ejemplo ilustrativo 4.1<sup>55</sup>

Los datos tomados de un pozo costa-Afuera en una formación de lutita son mostradas en la tabla 27. Se debe calcular los mejores valores de los parámetros A1, A2, A3...A8 usando análisis de regresión múltiple.

Solución:

Primero.- Verificamos los rangos mínimos de los datos de la tabla No. 27

Parámetro X2 : Rango mínimo : 2,000

máximo valor :  $10,000 - 9515 = 485$

mínimo valor :  $10,000 - 20,265 = - 10,265$

máximo valor - mínimo valor =  $10,750 > 2000$ , luego está conforme.

Parámetro X3 : Rango mínimo: 5,000

máximo valor :  $(20,265)^{0.69} (16.6 - 9.0) = 7,120$

mínimo valor :  $(9,515)^{0.69} (9.0 - 9.0) = 0$

$7120 - 0 = 7120 > 5,000$  luego, conforme:

<sup>55</sup> A.T. Bourgoyne, Jr y F.S. Young, Jr., Cit.



TABLA No. 27 DATOS DEL EJEMPLO ILUSTRATIVO 4.1

PARA EL ANALISIS DE REGRESION MULTIPLE (Tomados en Luta)

Dato	Prof	No. Broca	(dD/dt)	(W/d)	N	h	Fj/1000	ECD	GP
1	9,515	7	23.0	2.58	113	0.77	0.964	9.5	9.0
2	9,830	8	22.0	1.15	126	0.38	0.964	9.5	9.0
3	10,130	9	14.0	0.81	129	0.74	0.827	9.6	9.0
4	10,250	11	10.0	0.95	87	0.15	0.976	9.7	9.0
5	10,390	12	16.0	1.02	78	0.24	0.984	9.7	9.0
6	10,500		19.0	1.69	81	0.61	0.984	9.7	9.1
7	10,575		13.0	1.56	81	0.73	0.984	9.7	9.2
8	10,840	13	16.6	1.63	67	0.38	0.932	9.8	9.3
9	10,960		15.9	1.83	65	0.57	0.878	9.8	9.4
10	11,060		15.7	2.03	69	0.72	0.878	9.8	9.5
11	11,475	15	14.0	1.69	77	0.20	0.887	10.3	9.5
12	11,775	18	13.5	2.31	58	0.12	0.852	11.8	10.1
13	11,940	21	6.2	2.26	67	0.20	0.976	15.3	12.4
14	12,070	22	9.6	2.07	84	0.08	0.993	15.7	13.0
15	12,315		15.5	3.11	69	0.40	1.185	16.3	14.4
16	12,900	23	31.4	2.82	85	0.42	1.150	16.7	15.9
17	12,975	24	42.7	3.48	77	0.17	1.221	16.7	16.1
18	13,055		38.6	3.29	75	0.29	1.161	16.8	16.2
19	13,250		43.4	2.82	76	0.43	1.161	16.8	16.2
20	13,795	25	12.5	1.60	81	0.56	0.272	16.8	16.2
21	14,010	26	21.1	1.04	75	0.46	0.201	16.8	16.2
22	14,455	28	19.0	1.76	64	0.16	0.748	16.9	16.2
23	14,695		18.7	2.00	76	0.27	0.819	17.1	16.2
24	14,905	29	20.2	2.35	75	0.33	0.419	17.2	16.4
25	15,350	30	27.1	2.12	85	0.31	1.29	17.0	16.5
26	15,740		14.8	2.35	78	0.81	0.802	17.3	16.5
27	16,155	32	12.6	2.47	80	0.12	0.67	17.9	16.5
28	16,325		14.9	3.76	81	0.50	0.532	17.5	16.6
29	17,060	34	13.8	3.76	65	0.91	0.748	17.6	16.6
30	20,265	40	9.0	3.41	60	0.01	0.512	17.7	16.6

Parámetro X4 : Rango mínimo : 15,000

mínimo valor : 20,265 (16.6 17.7) = 22,291.5

máximo valor : 11,060 ( 9.5 9.8) = - 3,318

$-3,318 - (-22,291.5) = 18,973.5 > 15,000$ , Luego está conforme

Parámetro X5 : Rango mínimo : 0.40,  $s_1 (W/d)_t = 0$

máximo valor : 0.062 , (w/d) = 3.76

mínimo valor : 1.597 , (w/d) = 0.81

$-0.062 - (-1.597) = 1.535 > 0.4$ , luego es conforme

Parámetro X6 : Rango mínimo : 0.50

máximo valor : 0.765 , N = 129

mínimo valor : -0.034 , N = 58

$0.765 - (-0.034) = 0.799 > 0.5$ , luego es conforme.

Parámetro X7 : Rango mínimo : 0.20

máximo valor : -0.01

mínimo valor : -0.91

$-0.01 - (-0.91) = 0.9 > 0.2$  luego es conforme.

Parámetro X8 : Rango mínimo : 0.50

máximo valor : 0.255 , (Fj/1000) = 1.29

mínimo valor : -1.604 , (Fj/1000) = 0.201

$0.255 - (-1.604) = 1.859 > 0.5$  luego es conforme.

Segundo.- Para cada serie de datos (según la tabla No. 27, tenemos 30 series de datos) debemos encontrar el valor de X2, X3, X4... X8 con las ecuaciones 4.10, 4.11, 4.12 ... 4.15, luego debemos hallar la sumatorias de los respectivos parámetros,  $\Sigma X_2, \Sigma X_3, \Sigma X_4, \dots \Sigma X_8$  de tal forma

que se estructure la ecuación 4.20

Tercero.- La formación de la ecuación 4.22, 4.23, 4.24...- 4.27 que en síntesis es la estructuración de la matriz 4.28. Este paso se ha realizado por medio del programa "ECUAC".

Cuarto.- Para hallar el vector solución (A1, A2, A3,..A8) debemos resolver el sistema de ecuaciones dado por la matriz aumentada 4.28, éste proceso se realiza por medio del método de eliminación de Gauss con pivotación parcial, éste cálculo se lleva a cabo por medio del programa, "MATRIX"<sup>56</sup>. Ejecutado primero "ECUAC" para el ejemplo ilustrativo 4.1, se muestra los valores de cada  $a_{ij}$  de la matriz  $8 \times 8$ , así como los valores  $b_1, b_2, b_3...b_8$ , para completar la matriz aumentada de la ecuación 4.28, la entrada y salida de datos se muestra en el anexo respectivo. Efectuado "MATRIX" en segundo paso, el conjunto solución es:

$$X_1 = 3.672$$

$$X_2 = 1.755 \times 10^{-4}$$

$$X_3 = 1.995 \times 10^{-4}$$

$$X_4 = 4.283 \times 10^{-5}$$

$$X_5 = 0.418$$

$$X_6 = 0.180$$

$$X_7 = 0.411$$

$$X_8 = 0.163$$

<sup>56</sup> Hewlett-Packard Software, módulo de Matemáticas

Debemos considerar el factor 2.303 para encontrar el verdadero vector solución, pues dicho factor no ha sido considerado dentro del programa "ECUAC". El factor 2.303 solo afecta a los cuatro primeros parámetros solución del análisis de regresión múltiple como veremos en las siguientes ecuaciones:

$$X_1 = 2.303 A_1 \quad \dots (4.29)$$

$$X_2 = 2.303 A_2 \quad \dots (4.30)$$

$$X_3 = 2.303 A_3 \quad \dots (4.31)$$

$$X_4 = 2.303 A_4 \quad \dots (4.32)$$

$$X_5 = A_5 \quad \dots (4.33)$$

$$X_6 = A_6 \quad \dots (4.34)$$

$$X_7 = A_7 \quad \dots (4.35)$$

$$X_8 = A_8 \quad \dots (4.36)$$

Luego entonces el verdadero vector solución es:

$$A_1 = 1.594$$

$$A_2 = 7.620 \times 10^{-5}$$

$$A_3 = 8.663 \times 10^{-5}$$

$$A_4 = 1.860 \times 10^{-5}$$

$$A_5 = 0.418$$

$$A_6 = 0.180$$

$$A_7 = 0.411$$

$$A_8 = 0.163$$

Quinto.- Es importante analizar el rango de precisión, y esta medición de la exactitud del análisis de la regresión

múltiple se realiza por medio del coeficiente de determinación  $R^2$  que se encuentra definido por la siguiente ecuación.

$$R^2 = \frac{a_1 \sum T + a_2 \sum X_2 T + a_3 \sum X_3 T + a_4 \sum X_4 T + a_5 \sum X_5 T}{\sum (T^2) - \frac{1}{n} (\sum T)^2} + \frac{a_6 \sum X_6 T + a_7 \sum X_7 T + a_8 \sum X_8 T - \frac{1}{n} (\sum T)^2}{\sum (T^2) - \frac{1}{n} (\sum T)^2} \dots (4.37)$$

Donde:

$a_1, a_2, a_3 \dots a_8 = X_1, X_2, \dots X_8$

$T = P = \ln (dD/dt)$ .

$n =$  número de serie de datos

Luego aplicando la ecuación 4.37 a nuestro ejemplo ilustrativo 4.1 tenemos:

$$R^2 = 0.852$$

que es un valor aceptable con un error de aproximadamente del 17%.

#### 4.1.2 Método de Regresión lineal múltiple de Doiron, Tompkins y Watts.<sup>57</sup>

Galle y Woods<sup>58</sup> establecieron la ecuación que pronostica la velocidad de penetración, esta ecuación fue dispuesta y primariamente desarrollada para formaciones duras y medias duras usando brocas con estructuras cortan-

<sup>57</sup> H.H. Doiron, L.B. Tompkins y T. Watts, 435, cit.

<sup>58</sup> Woods H.B. y E.M. Galle.: "Effect of weight on penetration Rate", Pet. Eng. (Enero, 1958) B-42

tes de acero luego no fueron desarrollados para brocas a insertos para perforar formaciones blandas a medias blandas.

$$ROP = K_f WOB^{1.2} N^{0.5} \quad \dots (4.38)$$

Donde  $K_f$  = la constante de perforabilidad de la formación

Cunningham<sup>59</sup> desarrollo la siguiente ecuación:

$$ROP = K_f WOB^a N \quad \dots (4.39)$$

Donde  $K_f$  y  $a$  son constantes que deben encontrarse por medio de 2 pruebas de perforación, DOT.

Estas pruebas deben ser ejecutadas en una misma formación, a una misma velocidad de rotación,  $N$ , y a dos diferentes pesos, luego se tiene dos incognitas,  $a$ ,  $K_f$ , y dos ecuaciones. Una vez encontrados  $K_f$  y  $a$ , la velocidad de penetración puede ser calculada para cualquier otro peso y velocidad rotaria.

Una ecuación más generalizada es la presentada por Doiron, Tompkins y Watts.

$$ROP = R_1 WOB^{R_2} N^{R_3} \quad \dots (4.40)$$

donde  $R_1 = K_f$  = constante de perforabilidad de la formación.

$R_2$  y  $R_3$  son exponentes del  $WOB$  y  $N$ .

$WOB$  : peso sobre la broca, 1,000 lbs.

$N$  : velocidad rotatoria de la mesa rotaria, r.p.m.

<sup>59</sup> R.A. Cunningham.: "An Empirical Approach for Relating Drilling Parameters", J.P.T. (Julio 1978) 987-991

Este modelo por sus características propias es más generalizado que las ecuaciones de Galle y Woods, Cunningham y otros autores.

Las constantes R1, R2 y R3 son encontradas usando el método de los mínimos cuadrados de los datos recolectados mientras se perfora.

Mediante un programa de regresión lineal múltiple podemos hallar R1, R2, y R3.

De la ecuación 4.40 tenemos:

$$\ln ROP = \ln R1 + R2 \ln WOB + R3 \ln N \quad \dots (4.41)$$

donde  $\ln ROP = t$

$$\ln R1 = a$$

$$R2 = b$$

$$R3 = c$$

$$\ln WOB = x$$

$$\ln N = y$$

Luego la ecuación 4.41 puede ser expresado también por:

$$t = a + bx + cy \quad \dots (4.42)$$

Por el método del mínimo cuadrado, y resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones por medio del método de eliminación de Gauss con pivotación parcial.

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_i & \sum Y_i \\ \sum X_i & \sum (X_i)^2 & \sum X_i Y_i \\ \sum Y_i & \sum Y_i X_i & \sum (Y_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum t_i \\ \sum X_i t_i \\ \sum Y_i t_i \end{bmatrix} \quad \dots (4.43)$$

El coeficiente de determinación  $R^2$  está definido por:

$$R^2 = \frac{a \sum t_i + b \sum X_i t_i + c \sum Y_i t_i - \frac{1}{n} (\sum t_i)^2}{\sum (t_i^2) - \frac{1}{n} (\sum t_i)^2} \dots (4.44)$$

Donde para encontrar los coeficientes de regresión a, b y c con mayor exactitud,  $n \geq 7$

El modelo desarrollado por Doiron, Tompkins y Watts es básicamente un método empírico - científico, donde la inexactitud de los datos respuesta WOB y N, no justifican el uso de un modelo más complejo. este modelo no debe ser usado fuera del rango de los valores de las pruebas de perforación debido a los efectos de limpieza hidráulica.



## CAPITULO V

### PARAMETROS OPTIMOS PARA UN MINIMO COSTO DEL PIE PERFORADO

#### 5.1 Selección del peso sobre la broca y la velocidad de rotación optimos.

Los modelos matemáticos descritos en el capítulo anterior servirán de base para encontrar los parámetros mecánicos óptimos, previamente se realizará un estudio de las pruebas de perforación o de penetrabilidad, DOT.

##### 5.1.1 Pruebas de perforación o de penetrabilidad, DOT.

Las pruebas de penetrabilidad consisten en aplicar un peso considerablemente elevado a la broca y luego asegurar el freno, y entonces monitorear el decremento del peso sobre la broca con el tiempo, manteniendo constante la velocidad de rotación.

La ley de elasticidad de Hook es aplicado para calcular la cantidad de longitud de la sarta de perforación que se ha elongado con el decremento del peso sobre la broca y el incremento de la carga sobre el gancho. De

esta forma la respuesta de la velocidad de penetración la variación del peso sobre la broca puede ser determinada sobre intervalos muy cortos de profundidad. Este método<sup>60</sup> reduce el intervalo de pruebas de 12 pies a 3 pies solamente.

Como se sabe el tipo de geología de los campos petrolíferos del NOR-OESTE del Perú son multifallados, luego la intercalación y las potencias de las distintas formaciones hacen que se necesite un intervalo pequeño de profundidad par asegurar que la prueba se hizo en una formación geológica homogénea.

La ley de Hook establece que el cambio de Tensión es directamente proporcional al cambio de deformación.

$$\Delta \text{Tensión} = E \Delta e \quad \dots (5.1)$$

donde E = módulo de elasticidad de Young

e = deformación axial o elongación

Para el caso específico de tensión axial en sartas de perforación, el cambio de Tensión es igual al cambio de peso sobre la broca (Tensión axial), dividido entre el área transversal del tubo de perforación. El cambio en tensión es igual al cambio de longitud de la tubería de perforación por unidad de longitud, luego de 5.1, tenemos:

<sup>60</sup> Arthur Lubinski.: "Proposal for Future Test", Pet. Eng. (Enero 1958) B-50

$$\frac{\Delta W}{A_s} = E \frac{\Delta L}{L} \quad \dots (5.2)$$

$A_s$  = Area transversal de la tubería de perforación despejando  $\Delta L$  de la ecuación 5.2

$$\Delta L = \frac{L}{E A_s} \Delta W \quad \dots (5.3)$$

El promedio observado de la velocidad de penetración para la variación de peso sobre la broca,  $\Delta W$ , puede ser deducida de la ecuación 5.3, dividiendo esta ecuación entre el intervalo de tiempo  $\Delta t$  requerido para perforar a  $\Delta W$ , luego:

$$ROP = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{L}{E A_s} \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad \dots (5.4)$$

#### Consideraciones

- La tubería de perforación de rango # 2 tiene las uniones de herramienta que representan el 5% de la longitud total del tubo de perforación, las cuales poseen una sección de área transversal mucho más grande que la sección de Area transversal del cuerpo del tubo luego se considera que no contribuye en la elongación.

Luego la ecuación 5.4 debe modificarse, reemplazando  $L$  por  $0.95L$ , entonces

$$ROP = \frac{0.95 L}{E A_s} \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad \dots (5.5)$$

- La Elongación de las Lastrabarreras es mínima y por lo

tanto puede ser ignorada.

- Para ROP en pies / hora, de 5.5:

$$\text{ROP} = \frac{0.95 L}{E A_s} \cdot \frac{(W_i - W_j)}{\Delta t} \times \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ hora}} \quad \dots (5.6)$$

Donde  $\Delta t$  = intervalo de tiempo, segundos

W = peso sobre la broca, libras

E =  $30 \times 10^6$ , lppc

$A_s$  = Area transversal, pulgadas<sup>2</sup>

L = Longitud de la tubería de perforación, pies

ROP = Velocidad de penetración, pies/hora.

#### 5.1.1.1 Procedimiento práctico para tomar pruebas de penetrabilidad.<sup>61</sup>

Este procedimiento práctico pone énfasis en establecer el comportamiento de la broca pozo abajo, al peso inicial de la prueba, antes que se inicie la ejecución de las pruebas de penetrabilidad.

- a.- Seleccionar la profundidad para operar los DOT, donde se espera una formación litológica uniforme, generalmente Lutita.
- b.- Efectuar el procedimiento de asentamiento de la broca en el fondo.
- c.- Mientras se perfora con el peso sobre la broca usual de la zona, asegure el freno y determine el tiempo

<sup>61</sup> Vidder, A.: "Chevron Drill-off Test (DOT)", CHEVRON Oil Co., Nueva Orleans.

- requerido en perforar el 10% de este peso. Este es llamado el tiempo característico de la formación.
- d.- Incremente el peso sobre la broca al valor inicial de la prueba de penetrabilidad. Este valor inicial debe ser por lo menos un 20% mayor que el peso sobre la broca usual con que se perfora la zona.
- e.- Perfore a este peso sobre la broca inicial lo suficiente para establecer el nuevo patrón de la broca pozo abajo. Este tiempo de perforación a este peso inicial, debe ser deducido del tiempo característico de la siguiente forma: El tiempo permitido generalmente es un tiempo característico por 10% del incremento del peso, e.g., para un incremento del 20% en el peso se usará un tiempo de dos veces el tiempo característico.
- f.- Asegure el freno y trate de mantener constante la velocidad rotatoria. Registre el tiempo al cual cada peso sobre la broca baje en 4,000 libras. Si la aguja del indicador de peso fluctua, use el punto medio de la fluctuación como el peso sobre la broca. Continúe con la prueba hasta que se haya perforado por lo menos el 50% del peso inicial sobre la broca.
- g.- Diagrame  $\Delta t$  vs.  $W$  ó  $N$  vs.  $W$  usando un papel logarítmico. Debe resultar una línea recta cuya pendiente sea igual al exponente del peso sobre la broca. Existirá un comportamiento contrario a una recta cuando se ha usado pesos sobre la broca muy altos y/o la deficien-

cia hidráulica está presente también.

h.- Si el tiempo lo permite, repita la prueba a una velocidad de rotación diferente. Si la deficiencia hidráulica (Comportamiento no lineal a pesos sobre la broca altos) es observada en la prueba inicial, use una velocidad de rotación más baja en la segunda prueba. Si no ocurre deficiencia hidráulica en la primera prueba, use una velocidad rotatoria más alta en la segunda prueba.

El exponente de la velocidad rotatoria, puede ser obtenida usando velocidad de penetración conseguidas a dos velocidades de rotación diferentes pero a un mismo peso sobre la broca.

#### Ejemplo ilustrativo 5.1

Se ha tomado pruebas de penetrabilidad con el Equipo No. 8 de PETROPERU, durante la perforación del pozo 7368 CUESTA. Hallar los exponentes del peso sobre la broca y de la velocidad de rotación.

Datos:

Longitud de la tubería de perforación : 1,018 pies

Longitud de las Lastrabarrena : 462 pies

Formación geológica Paríñas Inferior

$$A_s = 4.4074 \text{ pulg.}^2$$

Max. peso sobre la broca, deducido

del ejemplo ilustrativo 3.5 : 25,000 lbs-f

Considerar los datos más adecuados, pues el motor de la mesa rotaria tenía problemas para mantener constantes los R.P.M.

Código IADC, Broca : 4-3-7

Pruebas de penetrabilidad : Valor tabla No. 28

TABLA No. 28.- Pruebas de Penetrabilidad, Equipo No. 8, 7368 CUESTA, PARIKAS INFERIOR, prof: 1,480 pies.

WOB (1,000 lbf)	N = 190	N = 170	N = 160
	T (segs)	T (segs)	T (segs)
20	0	0	0
175	2	4	2
15	6	8	5
10	18	18	19

donde

T = tiempo transcurrido : segundos

a.- Calculo de ROP, de la ecuación 5.6

$$ROP = \frac{0.95 (1018)}{(30 \times 10^6) (4.4074)} \frac{W_i - W_j}{\Delta t} \times 3,600$$

Si  $W_i = 20,000$ ,  $W_j = 17,500$ ,  $\Delta t = 2$

luego  $ROP = 32.914 \approx 32.9$  pies / hora.

Los resultados de los ROP son mostrados en la TABLA No. 29.

TABLA No. 29.- Pruebas de Penetrabilidad, Resultados, pozo: 7368 CUESTA

WOB		N = 190			N = 170			N = 160		
W	$\bar{W}$	T	$\Delta T$	ROP	T	$\Delta T$	ROP	T	$\Delta T$	ROP
20		0			0			0		
17.5	18.75	2	2	32.9	4	4	16.5	2	2	32.9
15	16.25	6	4	16.5	8	4	16.5	5	3	21.9
10	12.5	18	12	10.9	18	10	13.2	19	14	9.4

b.- Graficar ROP vs. WOB promedio ó  $\bar{W}$  en una hoja logarítmica, ver gráfico 3.13

Los puntos graficados a 170 RPM registran una deficiencia hidráulica, pues ésta prueba fue la última en efectuarse.

Los puntos de la recta a 160 RPM registran un comportamiento lineal con una pendiente de 3 que está por encima de 2 que es normalmente lo máximo en el concepto tradicional.

Los puntos graficados para el N = 190



RPM registran un comportamiento casi lineal pero no homogéneo, solamente el pto. a 12,500 lbs registra un mayor ROP que el pto. a  $N = 160$  RPM al mismo peso sobre la broca mencionado, luego para encontrar el exponente de  $N$  sólo consideraremos este punto; de la ecuación 4.40, tenemos:

$$ROP = R_1 WOB^{R_2} N^{R_3}$$

$$\text{entonces: } 9.404 = R_1 (12.5)^3 (160)^{R_3} \quad \dots (a)$$

$$10.971 = R_1 (12.5)^3 (190)^{R_3} \quad \dots (b)$$

De a y b:

$$\frac{10.971}{9.404} = \left[ \frac{190}{160} \right]^{R_3}$$

$$R_3 = 0.897$$

$$\text{luego: } R_2 = A_5 = 3$$

$$R_3 = A_6 = 0.9$$

Ejemplo ilustrativo 5.2 para una broca a dientes de acero la velocidad de penetración inicial fue de 34 pies/hora, y supongamos que la broca anterior fue del mismo tipo que la presente y fue operada bajo las mismas condiciones de peso sobre la broca, velocidad de rotación, peso específico del fluido de perforación, etc; sin embargo se observó una velocidad de penetración final, antes de sacar la broca, de 15 pies/hora en la misma formación geológica que la presente broca. Se desea calcular el valor de  $A_7$ , si la broca previa fue evaluada con T-6.

Solución

Broca anterior  $h = 6/8$  ó  $0.75$

Broca nueva  $h = 0$

Si se sabe que  $RDP = K e^{-A7(h)}$

luego:

$$34 = K e^{-A7(0)} \quad \dots (a)$$

$$15 = K e^{-A7(0.75)} \quad \dots (b)$$

entonces 
$$\frac{34}{15} = e^{A7(0.75)}$$

$$A7 = 1.09$$

Los cálculos hechos en el ejemplo ilustrativo 5.2 se basan en que se supone que la broca estudiada es de una estructura cortante de acero y no insertos.

La finalidad de estas pruebas de penetrabilidades es pues registrar una cantidad de datos a tiempo real o in situ para encontrar los parámetros óptimos, llámese peso sobre la broca y velocidad de rotación, la utilidad inmediata de estas pruebas son mostradas en los siguientes acápites.

#### 5.1.2 Cálculo de los parámetros mecánicos óptimos para una broca con estructura cortante de acero.

El cálculo de los parámetros óptimos mecánicos a tiempo real o in situ constituye uno de los actos rutinarios del ingeniero de perforación. Particularmente si se

desea calcular el peso sobre la broca y la velocidad de rotación óptimas de una broca a dientes de acero podemos hacer uso de la teoría de Bourgoyne y Young expuesta en el capítulo anterior, esto origina que primero debemos deducir las constantes de regresión lineal múltiple,  $A_1, A_2, \dots, A_8$ . Antes de desarrollar los cálculos debidos se debe considerar lo siguiente:

- a.- Considerar el efecto de los parámetros mecánicos sobre el costo por pie perforado para la broca en cuestión.
- b.- El efecto del peso sobre la broca y la velocidad de rotación sobre los problemas de desviación del pozo.
- c.- La máxima velocidad de penetración deseada para un caudal o velocidad de circulación del fluido de perforación disponible para evitar remolienda, pérdida de circulación y problemas de reventazón.
- d.- Limitaciones físicas del equipo al peso sobre la broca y velocidad rotaria, para evitar vibraciones críticas y pando de la tubería de perforar.

Luego de las consideraciones anunciadas es importante recalcar sobre los métodos para combinar los parámetros mecánicos óptimos para un costo mínimo por pie perforado; entre estas combinaciones tenemos:

Peso sobre la broca y velocidad de rotación óptimos variables.

Peso sobre la broca y velocidad de rotación óptimos constantes para toda la corrida de la broca.

Galle y Woods<sup>62</sup> han reportado que el método simple de peso sobre la broca y velocidad de rotación constantes ha resultado en costos ligeramente altos en comparación al método de peso y velocidad de rotación variables. Reed<sup>63</sup> ha indicado que la diferencia se estima en menos del 3% en el costo por pie perforado entre los métodos de parámetros mecánicos óptimos variables y constantes.

Generalmente el método de peso sobre la broca y velocidad de rotación variables se utiliza para brocas con estructuras cortantes que se van enromando con el tiempo y el intervalo perforado.

En este método se va incrementando tanto la velocidad de rotación de la mesa como el peso sobre la broca.

El procedimiento del mejor peso sobre la broca y velocidad de rotación constantes generalmente se aplica a brocas con insertos de carburo de tungsteno los cuales por línea general no se enroman, o su enromamiento es muy pequeña. Este método tiene dos variantes. El primero es el uso del peso óptimo sobre la broca constante para una determinada velocidad rotatoria, que comúnmente sucede cuando la velocidad de rotación es limitada por el

---

<sup>62</sup> Galle, E.M. y Woods, H.B.: "Best Constant Weight and Rotary speed for Rotary Rock Bits", Drill and Prod. Prac., API (1963) 48-73.

<sup>63</sup> Reed, R.L.: "A Monte Carlo Approach to Optimal Drilling", Soc. Pet. Eng. J. (Oct.1972) 423-438.

sistema de Fuerza de transmisión a la mesa rotaria. La segunda variante es escoger la velocidad de rotación óptima constante para un determinado peso sobre la broca que generalmente está limitado por problemas de desviación del pozo.

#### 5.1.2.1 Procedimiento del método de Bourgoyne y Young. Para generar una tabla de costo por pie perforado.

Si definimos a  $J_1$  como:

$$J_1 = (F1) (F2) (F3) (F4) (F5) (F6) (F8) \dots (5.7)$$

La ecuación 5.7 puede ser expresada en base a la ecuación 4.1:

$$ROP = J_1 (F7) \dots (5.8)$$

La ecuación anterior en función de la ecuación 4.8

$$ROP = \frac{dD}{dt} J_1 e^{-A7(h)} \dots (5.9)$$

Separando variables:

$$dD = J_1 e^{-A7(h)} dt \dots (5.10)$$

Para evaluar la ecuación 5.10 se necesita la relación entre el tiempo,  $t$ , y el desgaste del diente,  $h$ .

Luego de las ecuaciones 3.13 y 3.14 tenemos:

$$dt = J_2 \tau_H (1 + H_2 h) dh \dots (5.11)$$

Sustituyendo la ecuación 5.11 en la ecuación 5.10

obtenemos lo siguiente:

$$dD = J_1 J_2 \tau_H e^{-A7(h)} (1 + H_2 h) dh \quad \dots (5.12)$$

Integrando la ecuación 5.12 tenemos la siguiente expresión en términos del intervalo perforado por la broca,  $\Delta D$ , y del enromamiento final del cliente de acero,  $h_f$ .

$$\Delta D = J_1 J_2 \tau_H \left\{ \frac{1 - e^{-A7(h_f)}}{A7} + \frac{H_2 (1 - e^{-A7(h_f)} - A7(h_f) e^{-A7(h_f)})}{(A7)^2} \right\} \quad \dots (5.13)$$

La ecuación 5.13 se usa para:

- a.- Determinar que cantidad de pies o intervalo de profundidad corresponde a un enromamiento,  $h_f$ , y un  $J_1$  dado.
- b.- Recíprocamente puede ser usado para calcular el valor aparente o promedio de  $J_1$  para un determinado,  $\Delta D$  y  $h_f$  observado, luego la perforabilidad de la formación puede ser computada de  $J_1$  usando la ecuación 5.7.

En algunos casos, se desea deducir el intervalo perforado luego de un intervalo de tiempo  $t_b$  de operación de la broca; para usar la ecuación 5.13 para este propósito, es necesario conocer el enromamiento del diente después de que haya transcurrido el intervalo de tiempo particular  $t_b$  o en otras palabras conocer el grado de desgaste o enromamiento de la estructura cortante de acero al intervalo de tiempo  $t_b$ .

La ecuación que relaciona el tiempo  $t_b$  requerido para un desgaste determinado  $h_f$  está establecido por la ecuación 3.16, si expresamos esta ecuación en tér-

menos de  $h_f$ , obtenemos:

$$\left\{ \frac{J_2 \tau_H H_2}{2} \right\} h_f^2 + \left\{ J_2 \tau_H \right\} h_f - t_b = 0 \quad \dots (5.14)$$

Resolviendo esta ecuación cuadrática para  $h_f$  tenemos:

$$h_f = \sqrt{\left\{ \frac{1}{H_2} \right\}^2 + \left\{ \frac{2 t_b}{H_2 J_2 \tau_H} \right\}} - \left\{ \frac{1}{H_2} \right\} \quad \dots (5.15)$$

Luego el procedimiento es el siguiente:

Primero.- Asumir un peso sobre la broca y una velocidad de rotación.

Segundo.- Calcular el tiempo requerido para desgastar o enromar completamente la estructura cortante de acero para el peso sobre la broca y velocidad de rotación asumidas. Para este cálculo se utiliza las ecuaciones 3.14 y 3.16

Tercero.- Calcular el tiempo requerido para desgastar completamente los cojinetes para el peso sobre la broca y velocidad de rotación asumidas. Utilice las ecuaciones 3.19 y 3.21.

Cuarto.- Con el menor de los dos tiempos deducidos, calcular el intervalo que podría perforarse,  $\Delta D$ , usando las ecuaciones 5.7 y 5.13.

Quinto.- Calcúlese el costo por pie perforado utilizando la ecuación 3.23

El procedimiento que ha sido descrito nos proporcionará el costo por pie perforado asociado a un

desgaste completo de la broca para un determinado peso sobre la broca y velocidad de rotación. Para los pocos casos donde la velocidad de penetración o de perforación decrece rápidamente con el enroscamiento del diente de acero, el costo mínimo por pie perforado puede ocurrir antes de que la broca haya sido completamente desgastado. Para esta situación particular se determinará el costo por pie perforado repitiendo los pasos cuarto y quinto usando un tiempo de perforación de  $t_p$  ligeramente menor que la vida de la broca; si el resultado produce un costo por pie menor, se deberá asumir tiempos de perforación menores hasta obtener el tiempo óptimo de perforación. Este proceso puede ser completado con la sugerencia anunciada en el ejemplo ilustrativo 3.3

#### 5.1.2.2 Procedimiento Analítico de Bourgoyne y Young para calcular el peso sobre la broca y velocidad de rotación óptimos.

El procedimiento analítico que dedujeron Bourgoyne y Young está basado en que el factor que limita la vida de la broca es el desgaste de la estructura cortante de acero o diente de acero; es pues preciso recordar que lo dicho anteriormente es una de las principales razones de porque este método de optimización no es recomendable para brocas con insertos de carburo de tungsteno.

El desgaste de los insertos es insignificante frente al enroscamiento de los dientes de acero,



el factor limitante de la vida de una broca con insertos es fundamentalmente la durabilidad del cojinete.

La Ecuación 3.23 puede ser reordenada de la siguiente forma:

$$CPF = \frac{CR}{\Delta D} \left( \frac{CB}{CR} + t_b + TT + TC \right) \dots (5.16)$$

Si sustituimos la ecuación 3.15 para  $t_b$  y la ecuación 5.12 para  $\Delta D$  en la ecuación 5.16:

$$CPF = \frac{CR}{\int_0^{h_f} e^{-A_7(h)} (1 + H_2 h) dh} \left\{ \frac{CB}{CR} + TT + TC \right\} + \frac{\int_0^{h_f} (1 + H_2 h) dh}{J_1} \dots (5.17)$$

Luego tomando:  $(\int CPF) / [\int (W/d)] = 0$

y resolviendo tenemos:

$$\left\{ \frac{CB}{CR} + TT + TC \right\} \left\{ AS - \left[ \frac{W}{d_b} - \frac{W}{d_b} \right] t \right\} + ASJ_2 T_H \int (1 + H_2 h) dh = 0 \dots (5.18)$$

Tomando  $(\int CPF) / (dN)$  se produce:

$$\left\{ \frac{CB}{CR} + TT + TC \right\} \left\{ 1 - \frac{H_1}{A_6} \right\} + J_2 \tau_H \int (1 + H_2 h) dh = 0 \quad \dots (5.19)$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones 5.18 y 5.19 para  $(W/d_b)$  obtenemos la expresión siguiente del peso óptimo sobre la broca:

$$\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_{opt} = \frac{A_5 H_1 \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m + A_6 \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_t}{A_5 H_1 + A_6} \quad \dots (5.20)$$

Si el peso sobre la broca pronosticada por la ecuación 5.20 es mayor que el peso donde sucede deficiencia hidráulica, entonces se deberá utilizar el peso sobre la broca donde comienza a existir deficiencia hidráulica.

El tiempo de vida óptimo de la broca puede deducirse resolviendo la ecuación 5.18 ó 5.19 para  $J_2 \tau_H \int (1 + H_2 h) dh$ , luego:

$$\left\{ t_b \right\}_{opt} = \left\{ \frac{H_1}{A_6} - 1 \right\} \left\{ \frac{CB}{CR} + TT + TC \right\} \quad \dots (5.21)$$

Para deducir la fórmula, con el fin de encontrar la velocidad de rotación óptimo, se usa el valor conocido de  $t_b$  en la ecuación 3.16 y se despeja  $J_2$ , entonces la velocidad de rotación óptima puede ser inferida de  $J_2$  usando la ecuación 3.14, desarrollando:  
despejamos  $J_2$  de 3.16,  $h_f = 1$

$$J_2 = \frac{t_b}{\tau_H \left( 1 + \frac{H_2}{2} \right)} \quad \dots (5.22)$$

reemplazamos la ecuación 5.22 en 3.14 donde

$$\frac{W}{d_b} = \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_{opt} \quad \text{y despejamos N:}$$

$$N_{opt} = 60 \left\{ \frac{\tau_H}{t_b} \left[ \frac{\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m - \left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_{opt}}{\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_m - 4} \right] \right\}^{\frac{1}{H_1}} \quad \dots (5.23)$$

Para los casos donde la vida de la broca es limitada por la durabilidad del cojinete o la velocidad de penetración se debe hacer uso de la construcción de una tabla de costo por pie perforado como se ha mostrado en el acápite 5.1.2.1, pues no se han desarrollado fórmulas simples tales como la 5.20, 5.21 y 5.23

### 5.1.2.3 Aplicación del método de Bourgoyne y Young

#### Ejemplo ilustrativo 5.3

a.- Encuentre los parámetros mecánicos óptimos para la formación geológica CHIRA y Lutitas Talara

del Area de Carrizo de los campos petroleros del NOR OESTE del Perú, esto significa calcular los parámetros óptimos para la primera broca de 7 7/8 que se baja al pozo perforado del Area de Carrizo.

b.- Encuentre los parámetros mecánicos óptimos al pozo del ejemplo ilustrativo 3.1, pozo 6762 Carrizo.

i) Metodología de la solución: La primera parte consta de un estudio estadístico en base del cual se realizarán los cálculos

#### Análisis Estadístico:

Primero.- Seleccionar un grupo de pozos perforados en el área de Carrizo, que hayan sido perforados preferentemente por un tipo de equipo de perforación y diámetro de broca; estos pozos no deben haber tenido ningún problema mecánico, o de operación, tales como: desviación, pérdida circulación, derrumbes, golpes de gas ,etc.

Segundo.- A cada pozo seleccionado se le registra:

- Tipo de broca
  - Profundidad de salida
  - Espesor o intervalo perforado
- Tiempo rotando
  - Velocidad de penetración
  - Peso sobre la broca
  - Desviación
  - Velocidad de la mesa rotatoria
  - Estado o condición de salida de la broca

Peso específico del fluido de perforación

Costo por pie perforado

- Presión de la bomba

Fuerza de impacto

Formación geológica

Tercero.- Recolectar y clasificar los topos de las formaciones geológicas en los pozos seleccionados, agrupar las brocas por formación geológica pero señalando de qué pozo proviene. Al agrupar las brocas por formación geológica perforada; señalar todos los parámetros enunciados en el paso anterior.

Cuarto.- Calcular los promedios aritméticos y ponderados por tipo de broca para la formación geológica en estudio. Se calcula el promedio ponderado de la velocidad de penetración y el costo por pie perforado, en los demás registros sólo se calcula el promedio aritmético. En el caso para la condición de salida de la broca se toma la evaluación más frecuente. Se debe anotar, en términos estadísticos el número de muestras para cada tipo de broca.

Quinto.- Luego de tomar los promedios por tipo de broca para cada una de las formaciones geológicas se procede a construir el pozo promedio, llámese pozo promedio a aquel que está conformado por las medias aritméticas y ponderadas de los registros del paso anterior; se construye también el pozo óptimo que está constituido por los costos más bajos por pie perforado.

Sexto.— El pozo promedio es un recurso para encontrar los parámetros mecánicos óptimos por medio del método analítico ya sea el de Bourgoyne y Young o el de Doiron, Tompkins y Watts.

ii) Desarrollo:

Equipo PETROPERU : 8  
 Formación geológica : Chira y Lutitas Talara  
 Área : Carrizo  
 Diámetro de la broca : 7.875 pulgadas  
 Código IADC de la broca : 1-3-6  
 Pozos seleccionados : 6759, 6762, 6761, 6729  
 6732, 6674, 6673, 6592  
 6568, 6589, 6594, 6596  
 6591.

Rendimiento óptimo y  
 promedio de la broca<sup>63</sup>

IADC 1-3-6 : Ver tabla No.30

Datos de entrada para  
 calcular los parámetros  
 de regresión lineal

múltiple : Ver tabla No.31

Listado de salida, previa  
 ejecución de los pro-

---

<sup>63</sup> Morales Pinto, J.: "Evaluación de brocas del Área de Carrizo", Frácticas pre-profesionales, PETROPERU (Mayo 1985)

gramas "ECUAC" Y "MATRIX",  
para calcular los pará-  
metros de regresión

lineal múltiple : Ver tabla No.32

TABLA No. 30 : Rendimiento Optimo y Promedio de la broca, Código IADC  
 1-3-6, Area: Carrizo, Equipo No.8, Diámetro de la broca: 7 7/8

RENDIMIENTO OPTIMA

PROFUNDIDAD DE SALIDA	ESPESOR (Pies)	HORAS	dd / dt (pies/hr)	WOB (lbs)	N	MAWT	\$ / PIE	CONDICION	FORMACION
1074	820	19.25	42.6	10,000	70	9.2	8.58	T 2 G	CHIRA

RENDIMIENTO PROMEDIA

PROFUNDIDAD DE SALIDA	ESFESOR	HORAS	dd / dt	WOB	N	MAWT	\$ / PIE	CONDICION	FORMACION
995	719	18.5	38.86	15,000	100	9.1-10.1	9.35	6 4 I	CHIRA



iii) Desarrollo Analítico.-

Para dar solución a la parte "a" del ejemplo ilustrativo 5.3 procedemos a calcular los parámetros necesarios en base al performance promedio de la broca de código IADC 1-3-6 en la formación geológica de CHIRA.

De la tabla No.4 :  $H_1 = 1.84$

$$H_2 = 6$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W \\ d_b \end{array} \right\}_m = 8.0$$

De la ecuación 3.14

$$J_2 = \left\{ \frac{8.0 - 1.905}{8.0 - 4} \right\} \left( \frac{60^{1.84}}{100} \right) \left\{ \frac{1}{1 + 6/2} \right\} = 0.149$$

De la ecuación 3.17 ,  $h_f = 6/8 = T - 6$

$$\tau_H = \frac{18.5}{0.149 \left( 0.75 + 6 \frac{(0.75)^2}{2} \right)} = 50.9 \text{ horas}$$

Calculamos la constante del cojinete, de la tabla No.5:

$$B_1 = 1.6$$

$$B_2 = 1.0$$

De la ecuación 3.19 :

$$J_3 = \left( \frac{60^{1.6}}{100} \right) \left\{ \frac{4 (7.875)^{1.0}}{15} \right\} = 0.927$$

Resolviendo la ecuación 3.22 si  $b_f = 4/8 = 0.5$

$$\tau_B = \frac{18.5}{(0.927)(0.5)} = 39.9 \text{ horas}$$

El siguiente paso es construir una tabla del costo por pie perforado WOB Y N; calcularemos como ejemplo el costo por pie perforado para un WOB = 15,750 libras y N = 100 rpm, sabiendo que:

- Parámetros de Regresión Lineal Múltiple para las formaciones CHIRA y Lutitas Talara, ver tabla No.32.

$$A1 = 0.993$$

$$A2 = 5.05 \times 10^{-5}$$

$$A3 = - 4.342 \times 10^{-4}$$

$$A4 = 1.827 \times 10^{-5}$$

$$A5 = 0.035$$

$$A6 = 0.466$$

$$A7 = - 0.021$$

$$AB = - 0.070$$

- Datos del tipo de formación

Profundidad = 276 pies

$$\tau_H = 50.9 \text{ horas}$$

$$GP = 8.2 \text{ lb /gal}$$

- Datos referentes al Equipo de perforación.

Costo de Operación del equipo = 249.042 \$/hora

Tiempo para conectar una barra = 3 minutos

Tiempo para conectar un tubo = 8 minutos

Longitud de la barra = 60 pies

ECD = 9.6 lb/gal

- Datos referentes a la broca

Fuerza de impacto hidráulico = 686 libras

Tamaño de la broca = 7.875 pulg

$\tau_B$  = 39.9 horas

Costo de la broca (Incluido

las boquillas) = 1059.27 \$

Max. (W/d) = 8.0

(W/d)<sub>t</sub> = 0.5

Código IADC = 1-3-6

iv) Cálculos:

- Cálculo del tiempo requerido para enromar completamente el diente de la broca,  $h_f = 1.0$ :

De la ecuación 3.14 calculamos  $J_2$

$$J_2 = \left\{ \frac{8.0 - \frac{15.75}{7.875}}{8.0 - 4} \right\} \left( \frac{60}{100} \right)^{1.84} \left\{ \frac{1}{1 + 6/2} \right\} = 0.1465$$

De la ecuación 3.16 si  $h_f = 1.0$

$$t_b = (0.1465) (50.9) \left\{ 1 + 6 \frac{(1)^2}{2} \right\} = 29.8 \text{ horas}$$

- Cálculo del tiempo requerido para desgastar completamente los cojinetes  $b_f = 1.0$ , de la ecuación 3.19 tenemos:

$$J_3 = \left( \frac{60}{100} \right)^{1.6} \left\{ \frac{4 (7.875)^{1.0}}{15.75} \right\} = 0.883$$

De la ecuación 3.21:

$$t_b = (0.883) (39.9) (1.0) = 35.2 \text{ horas}$$

Luego se toma el menor  $t_b$  pronosticado para un WOB = 15,750 lbs y  $N = 100$  rpm, entonces  $t_b = 29.8$  horas que corresponde a un  $h_f = 1.0$

- Cálculo del intervalo perforado  $\Delta D$ , de la ecuación 5.7:

$$J_1 = (F1) (F2) (F3) (F4) (F5) (F6) (F8)$$

$$F1 = e^{2.303 (0.993)} = 9.844 \text{ pies / hr}$$

$$F2 = e^{2.303 (5.05 \times 10^{-5}) (10,000 - 276)} = 3.098$$

$$F3 = e^{2.303 (-4.342 \times 10^{-4}) (276)^{0.69} (8.2 - 9.0)} = 1.039$$

$$F4 = e^{2.303 (1.827 \times 10^{-5}) (276) (8.2 - 9.6)} = 0.984$$

$$F5 = \left\{ \begin{array}{c} 15.75 \\ \hline 7.875 \\ \hline 4 - 0.5 \end{array} \right\} \begin{array}{c} 0.035 \\ - 0.5 \end{array} = 0.971$$

$$F6 = \left\{ \begin{array}{c} 100 \\ \hline 60 \end{array} \right\} \begin{array}{c} 0.466 \\ - 0.5 \end{array} = 1.269$$

$$F8 = \left\{ \begin{array}{c} 686 \\ \hline 1,000 \end{array} \right\} \begin{array}{c} -0.070 \\ - 0.5 \end{array} = 1.027$$

Luego :

$$J_1 = (9.844) (3.098) (1.039) (0.984) (0.971) (1.269) (1.027) =$$

$$J_1 = 39.456$$

Reemplazando el resultado anterior en la ecuación 5.13

$$\Delta D = (39.456) (0.1465) (50.9) \left\{ \begin{array}{c} 1 - e^{-(-0.021)(1.0)} \\ \hline -0.021 \end{array} \right\} +$$

$$+ \left\{ \frac{6 \left( 1 - e^{-(-0.021)(1.0)} - (-0.021)(1.0) e^{-(-0.021)(1.0)} \right)}{(-0.021)^2} \right\}$$

$$\Delta D = 1,192.4 \text{ pies}$$

- Cálculo del costo por pie perforado

De la ecuación 3.23

$$TT = \left\{ \frac{3}{60} \right\} \left\{ 2(276) + 1192.4 \right\} = 1.45 \text{ horas}$$

$$TC = \left\{ \frac{1192.4}{30} \right\} \left\{ \frac{8}{60} \right\} = 5.30 \text{ horas}$$

$$CPF = \frac{1,059.27 + 249.042(29.8 + 1.45 + 5.30)}{1,192.4} =$$

$$CPF = \$ 8.52 / \text{pie}$$

Este es el costo por pie perforado pronosticado que corresponde a un desgaste completo de la broca ya sea por la estructura cortante o por causa del cojinete; generalmente este costo, para el peso sobre la broca y velocidad de rotación asumidos, es el mínimo.

Si asumimos otro peso sobre la broca y otra velocidad de rotación y calculamos:

$J_2$ ,  $t_b$  mínimo,  $J_1$ ,  $\Delta D$  y CPF, obtendremos otro costo por pie perforado, y de este modo asumimos varios pesos y velocidades y hacemos iterativo las operaciones para encontrar el mínimo costo por pie perforado que corresponde al peso sobre la broca y velocidad de rotación óptimas. Este proceso nos lleva a construir una tabla de costo por pie perforado. Ver Tabla No.33

De la tabla No.33 podemos deducir que el costo mínimo para los rangos de peso sobre la broca y velocidad de rotación establecidos corresponde al costo por pie perforado de 8.18 \$/pie que pertenece a un peso sobre la broca de 11,813 libras y una velocidad de rotación de 140 rpm. Podemos afirmar que estos parámetros mecánicos encontrados son los óptimos para el rango establecido.

Analíticamente podemos deducir el peso sobre la broca y la velocidad de rotación óptimas.

De la ecuación 5.20

$$\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_{opt} = \frac{0.035 (1.84) (8.0) + 0.466 (0.5)}{0.035 (1.84) + 0.466} =$$

$$\left\{ \frac{W}{d_b} \right\}_{opt} = 1.411 \text{ entonces } WOB = 11,109 \text{ libras}$$

WOB óptimo = 11,000 libras

De la ecuación 5.21 , asumimos que TT y TC es igual a 1.4 horas, luego :

$$(t_b)_{opt} = \left\{ \frac{1.84}{0.466} - 1 \right\} \left\{ \frac{1059.27}{249.042} + 1.4 \right\} =$$

$$(t_b)_{opt} = 16.67 \text{ horas}$$

Calculamos la velocidad de rotación óptima de la ecuación 5.23

$$N_{opt} = 60 \left\{ \frac{50.9}{16.67} \left[ \frac{8.0 - 1.411}{8.0 - 4.0} \right] \right\}^{1/1.84} = 144$$

$$(N)_{opt} = 144 \text{ r.p.m.}$$

En el anexo respectivo se desarrolla la tabla No. 33 por medio del programa "FANNY" para controlar el número de iteraciones del peso sobre la broca se realiza el siguiente algoritmo

$$\left\{ \frac{(W/d) \text{ IFC}}{2} + 0.5 \right\} \times db \times 1,000 = \text{peso en lib.}$$

El Número IFC es un contador acumulador en el cual i.fff cc es:

i = el número inicial

fff = el número final

cc = el contador

En el caso para el número de iteraciones de la velocidad de rotación se realiza el siguiente algoritmo:

$$N \text{ IFC} \times 10 = \text{revoluciones por minuto}$$

Ejemplo:



Si  $W / d \text{ IFC} = 1.01102$  luego :

peso sobre la broca inicial:

$$( 1 / 2 + 0.5 ) \times 7.875 \times 1000 = 7,875 \text{ libras}$$

peso sobre la broca final:

$$( 11 / 2 + 0.5 ) \times 7.875 \times 1000 = 47,250 \text{ libras}$$

El contador es 02 y el lazo para el peso sobre la broca variará desde 1 hasta 011 de 2 en 2; en el caso de N, variará desde 6 hasta 014 de 2 en 2 también.

El programa "FANNY" posee un contador interno de N que se encuentra dentro del programa en el paso número 185, este debe variarse o cambiarse para los fines que se persiga.

El programa "FANNY" trabaja junto al programa "IADC" que es en resumidas cuenta las tablas 4 y 5.

El programa "OPT" calcula directamente los parámetros mecánicos óptimos.

v) Desarrollo de la parte "b" del ejemplo ilustrativo 5.3

- Los parámetros de Regresión lineal múltiple son los registrados para las formaciones Chira y Lutitas Talara, ver Tabla No.32

- Datos del tipo de formación

profundidad = 255 pies

$\tau_H$  = 32.9 horas

GF = 8.2 lb/gal

- Datos referentes al equipo de perforación

Costo operativo = 249.042 \$/hora

Tiempo para conectar una barra = 3 minutos

Tiempo para conectar un tubo = 8 minutos

Longitud de la barra = 60 pies

ECD = 9.3 lb/gal

- Datos referentes a la broca

Fuerza de impacto hidráulico = 686 libras

Tamaño de la broca = 7.875 pulgadas

$T_B$  = 31.6 horas

Costo de la broca (con boquillas) = 1059.27 \$

MAX (W/d) = 8.0

(W/d)t = 0.5

Código IADC = 1-3-6

Desarrollaremos una tabla del costo por pie perforado; Ver

Tabla No. 34

#### 5.1.2.4 Análisis y Resumen de los resultados de la aplicación de la Teoría de Bourgoyne y Young a la formación Chira del Area de Carrizo.

Varias observaciones se pueden realizar por medio del análisis a los cálculos realizados en el acápite anterior.

Primero.- La optimización de los parámetros mecánicos está en función inversamente proporcional al costo por pie perforado; dependiendo la magnitud del costo mínimo por pie perforado y por lo tanto del sistema de optimización de los límites y restricciones del Sistema. Esta afirmación implica que es erróneo tratar de buscar una velocidad mayor de penetración, o una cantidad mayor de pies perforados por broca, o una cantidad mayor de horas de duración de la vida de la broca. La solución en encontrar el mínimo costo está en la interacción de estas tres variables que son:

- Velocidad de perforación o penetración.
- Intervalo perforado.
- Tiempo de duración de la broca.

La maximización de alguna de ellas no conduce a la optimización efectiva de los parámetros mecánicos de la perforación rotativa, estas aseveraciones se realizan dentro de los límites de un subsistema, id. est., para un determinado equipo de perforación, costo de la

broca, cuadrilla, tiempo de conexión de una barra de perforar y de un tubo de perforar, formación, área, etc.

Con el fin de demostrar lo dicho anteriormente se construyeron los siguientes gráficos:

- Costo por pie perforado vs. velocidad de penetración, ver gráfico 3.14.

Costo por pie perforado vs. durabilidad de la broca, ver gráfico 3.15.

Costo por pie perforado vs. intervalo perforado, ver gráfico 3.16.

Se construyeron estos gráficos de tal forma que se puede analizar la relación costo por pie perforado vs. velocidad de penetración, de tal forma que para un peso sobre la broca constante se hace variar la velocidad rotatoria y para una velocidad rotatoria constante.

Se varía el peso sobre la broca.

Del gráfico 3.14. se corrobora que si maximizamos la velocidad de penetración no necesariamente obtenemos un costo mínimo, e.g., para un peso constante sobre la broca de 39,400 libras la máxima tasa de velocidad de penetración se obtiene a una velocidad rotativa de 140 R.P.M. pero el costo por pie perforado es menor a una velocidad rotativa de 120 R.P.M. donde la velocidad de penetración es sensiblemente menor, como otro ejemplo podemos citar el siguiente: para una velocidad de rotación constante de 100 RPM la máxima velocidad de penetración se

obtiene a un peso sobre la broca de 47,250 libras pero el costo por pie perforado es mínimo a un peso sobre la broca de 15,750 libras donde la velocidad de penetración es menor.

Del gráfico 3.14 se observa que los parámetros mecánicos óptimos, para el rango establecido de  $N$  [140,60] RPM y WOB = [47,250, 7,900] libras, es el siguiente.

WOB óptimo = 11,100 libras

$N$  óptimo = 140 rpm.

Costo Mínimo = 8.17 \$/pie

ROP óptima = 46.3 pies/hora

Del gráfico 3.15 se comprueba que si maximizamos la durabilidad o vida de la broca no necesariamente obtenemos un costo mínimo por pie perforado, e.g., para un peso constante sobre la broca de 19,700 libras la durabilidad máxima de la broca se obtiene a una velocidad de rotación de 60 RPM pero el costo por pie perforado es menor a una velocidad rotativa de 140 rpm; también podemos citar el siguiente ejemplo: para una velocidad de rotación constante de 80 RPM. la máxima durabilidad de la broca se obtiene a un peso sobre la broca de 7,900 libras pero el costo por pie perforado es mínimo un peso sobre la broca de 19,700 libras donde la durabilidad de la broca es menor.

Del citado gráfico 3.15 observamos lo

siguiente:

WOB óptimo = 11,100 libras.

N óptimo = 140 RPM.

Costo mínimo = 8.17 \$/pie

Durabilidad óptima = 16.7 horas.

Del gráfico 3.16 se demuestra que si maximizamos el intervalo perforado o la cantidad de pies perforados por la broca no necesariamente obtenemos un costo mínimo o una condición óptima, e.g., para un peso constante sobre la broca de 7,900 libras el máximo intervalo perforado se obtiene a una velocidad rotativa de 60 RPM. pero el costo por pie perforado es menor a una velocidad rotativa de 80 RPM donde el intervalo perforado es menor, como un segundo ejemplo podemos decir que para una velocidad de rotación constante de 120 rpm el máximo intervalo perforado se observa a un peso sobre la broca de 7,900 libras pero el costo por pie perforado es mínimo a un peso sobre la broca de 11,800 libras donde el intervalo perforado es menor.

El gráfico 3.16 nos muestra los parámetros óptimos para el rango de estudio.

WOB óptimo : 11,100 libras

N óptimo 140 RPM

Costo mínimo : 8.17 \$/pie

Intervalo perforado óptimo : 820 pies.

Segundo.- Es importante observar la interrelación de la

velocidad de rotación con:

- La velocidad de penetración

El intervalo perforado

La durabilidad de la broca.

Esta interrelación es el resultado del efecto de la respuesta de la formación geológica a los parámetros mecánicos efectuados, con el fin de este estudio se trazaron los siguientes gráficos:

Velocidad de Rotación vs. Durabilidad de la broca, gráfico No. 3.17.

Intervalo perforado vs. Velocidad de Rotación, gráfico No. 3.18.

Velocidad de penetración vs. velocidad de rotación, gráfico No. 3.19.

De los resultados de observar estos gráficos se resumió que:

A una mayor velocidad de rotación la durabilidad de la broca disminuye considerablemente, ver gráfico 3.17.

A una velocidad de rotación constante la durabilidad de la broca disminuye inversamente proporcional al peso sobre la broca, ver gráfico 3.17 - A una mayor velocidad de rotación el intervalo perforado por la broca disminuye sensiblemente, ver gráfico 3.18

A una velocidad rotatoria constante el intervalo perforado por la broca disminuye inversamente proporcional al peso sobre la broca, ver gráfico 3.18

- A una mayor velocidad de rotación la velocidad de pene-

tración aumenta casi linealmente, ver gráfico 3.19

- A una velocidad rotatoria constante la velocidad de penetración aumenta directamente proporcional al peso sobre la broca, ver gráfico 3.19.

De la tabla 3.3 y del gráfico 3.19 y 3.14 podemos concluir que la formación Chira es más sensible a un aumento de la velocidad de rotación que frente a un aumento del peso sobre la broca.

Tercero.- La necesidad de una hidráulica óptima, previa a la optimación de los parámetros mecánicos para mantener la linealidad de la respuesta de la velocidad de penetración frente a un aumento de la velocidad de rotación, ver gráfico 3.19. Esta linealidad es producto de equilibrar el nivel de energía mecánica con la energía hidráulica disponible.

$$W \times R = \frac{WOB}{7.875} \times N = \frac{11.8}{7.875} \times 140 =$$

$$W \times R = 210 \text{ lbs/pulg} \times \text{R.P.M.}$$

Del gráfico 3.7 tenemos que  $W \times R$  pertenece al tramo. BC, luego:

$$W \times R = K (B H H P)^U$$

$$U = 1.668288$$

$$K = 0.058852$$

entonces los BHHP necesarios para equilibrar la energía



mecánica para el WOB óptimo y el N óptimo es: 135 BHHP.

Cuarto.- El uso de altos pesos sobre la broca y de bajas velocidades de rotación producen altos costos por pie perforado en la formación Chira del área de Carrizo, mientras si se perfora a bajos pesos sobre la broca en conjunción con altas velocidades de rotación se obtiene bajos costos de perforación, ver gráficos 3.20 y 3.21.

Es importante resaltar que la formación geológica Chira es lutitas mientras Verdún es arenisca con intercalaciones de lentes de lutita.

Para obtener los parámetros de regresión lineal múltiple con el fin de generar la tabla de costos por pie perforado se escogieron las muestras de datos que pertenecen a las formaciones Chira y Talara, de tal forma que los datos de la formación Verdun se omiten. El objetivo de esta omisión era encontrar parámetros para una columna litológica homogénea. Ver tabla No.32 y figura No.7.

64

Quinto .- De los pasos anteriormente establecidos podemos afirmar que los parámetros mecánicos óptimos recomendados para la formación Chira del yacimiento Carrizo, sin restricción en la velocidad de rotación de la broca, son los siguientes:

Peso óptimo sobre la broca	:	11,000 libras
Velocidad de rotación		140 R.F.M.

<sup>64</sup> PETROPERU, Departamento de Geología, Dir. Exploración y Desarrollo Nor oeste, (abril 1989)

La discrepancia entre las predicciones de los valores óptimos del costo por pie perforado y de los valores reales obtenidos deben ser discutidos si esto se produce. Se debe determinar si esta discrepancia es resultado de los datos no verídicos tomados como base de los cálculos para obtener los parámetros óptimos de la formación en estudio, o si los parámetros usados en los cálculos deben ser modificados para perfeccionar la optimización con el fin de que el modelo pronostique debidamente los valores óptimos del costo por pie perforado.

Para que el proceso de optimización resulte más práctico se debe recomendar un rango de operación óptima basado en que el peso óptimo sobre la broca varía entre 11,000 y 15,000 libras, ver tabla No. 33 y No. 34. y la velocidad de rotación óptima de la broca varía entre 100 y 140 R.F.M., ver gráfico No.3.22.

Del gráfico 3.22 podemos deducir lo siguiente:

La reducción en el intervalo perforado por broca puede producir más viajes por pozo con el consecuente efecto de originar riesgos en la seguridad y problemas en el hueco asociados con los viajes.

Luego el Rango recomendado corregido sería el siguiente

Iniciar con:

Peso sobre la broca : 11,000 libras

Velocidad de rotación : 140 R.F.M.

Finalizar con :

FIGURA Nº 7  
 COLUMNA ESTRATIGRAFICA  
 YACIMIENTOS MERINA LA TUNA CARRIZO

SISTEMA	SERIE	EDAD	GRUPO	FORMACION	MIEMBRO	LITOLOGIA	ESPESOR			
Terciario	Eoceno	Cenozoico	Cenozoico	Tablazo			200'			
				Mirador			1,100'			
				Chira			1,400'			
				Verdun			1,300'			
				Talara	Monte			3,800'		
					Helico			1,300'		
					Lositos			700'		
				Echino	Somatito			350'		
					Verde			150'		
					Cabo Blanco			190'		
				Clavel			100'			
				Ostrea	Lagoon			550'		
					Peñanegra			1,000'		
					C			700'		
					D			950'		
					E			250'		
				Mogollon	Superior			1,200'		
					Medio			650'		
					Inferior			800'		
				San Cristobal			1,500'			
				Salina Salina			300'			
				Paleoceno	Daniano	Mal Paso	Balcones			900'
							Monte Grande			500'
				Paleogeno	Cenozoico	Cenozoico	Redondo			200'
										+ 550'

Peso sobre la broca : 15,000 libras

Velocidad de rotación : 100 - 120 R.P.M.

El gráfico 3.22 nos muestra como varía el rendimiento promedio de los parámetros: velocidad de penetración, intervalo perforado, durabilidad de la broca y costo por pie perforado vs. la velocidad de rotación. En líneas generales para el peso sobre la broca óptimo al **incrementarse** la velocidad de rotación se incrementa la velocidad de penetración y disminuye la durabilidad, el intervalo perforado así como también el costo por pie perforado decrece hasta un mínimo para luego incrementarse.

### 5.1.3 Cálculo de los parámetros mecánicos óptimos para una broca con estructura cortante de insertos de carburo de tungsteno.

Como se mencionó en el Capítulo IV, el desgaste de una broca a insertos tiene un comportamiento diferente que una broca con estructura cortante de acero, luego es necesario hallar un método aparente para optimizar los parámetros mecánicos de una broca a insertos. Doiron, Tompkins y Watts propusieron un método de optimización basado en un modelo matemático sobre la durabilidad del cojinete "journal" de las brocas a insertos.

#### 5.1.3.1 Procedimiento del método de Doiron, Tompkins y Watts.

Primero. - Evaluar la constante KB que representa la capa-

idad de durabilidad del cojinete; la forma del cálculo de esta constante es detallada en un Capítulo III, acápite 3.1.1.8.

Segundo.- Estimar los parámetros de Regresión lineal múltiple,  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ , de las pruebas de penetrabilidad, DOT.

Tercero.- Asumir un peso sobre la broca y una velocidad de rotación y de calcular el BHHP disponible.

Cuarto.- Calcular el tiempo requerido para desgastar el cojinete en función del peso sobre la broca y velocidad de rotación asumidos. Para este cálculo se utiliza la ecuación 3.30.

Quinto.- Deducir el intervalo que podría perforarse,  $\Delta D$ , usando la ecuación 4.40 en conjunto con la ecuación 3.30, tenemos:

$$ROP \times \text{Horas} = \Delta D \quad \dots (5.24)$$

Sexto.- Computar el costo por pie perforado utilizando las ecuaciones 3.25, 3.24, y 3.23

El procedimiento que ha sido descrito nos proporciona el costo por pie perforado asociado a un desgaste completo de la broca para un determinado peso sobre la broca y una velocidad de rotación. Un proceso iterativo, asumiendo diferentes pesos sobre la broca y velocidades de rotación, producirá una tabla de costos por pie perforado donde por medio de una ligera observación se determina los parámetros mecánicos óptimos.

#### 5.1.3.2 Aplicación del método de Doiron, Tomp-

## kins y Watts

## Ejemplo ilustrativo 5.4

Calcule los parámetros mecánicos óptimos promedio para la formación Paríftas inferior del pozo 7368 cuesta, Profundidad: 1,480 pies.

Solución:

Datos requeridos para el cálculo:

- KB

R1

R2

Peso sobre la broca asumida, WOB

Velocidad de rotación asumida, N

Costo de la broca, CB = 2,996.27\$

Costo de operación del equipo, CR = 249.042 \$/hora

Longitud de la barra de perforar, L.S. = 60 pies

Tiempo de conección de un tubo, T.C. = 8 min.

Tiempo de conexión de una barra, T.S. = 3 min

Profundidad inicial, D = 1480 pies

Caballaje hidráulico en la broca, BHHP

Diámetro de la broca, BIT DI = 7.875 pulg.

Primero: Evaluación de la constante KB

- Se recolectó un grupo de pozos que se perforaron en una zona geológicamente similar, ver tabla No. 35; Luego se procedió a calcular la constante KB para cada pozo perforado. No considerar el 7374 ME.

Se seleccionó los valores de KB que pertenecen a un área

similar tales como: Leones y Cuesta.

Se descartó los valores de KB que pertenecen a brocas usadas anteriormente.

Se procedió a promediar los valores seleccionados de KB luego del proceso anteriormente descrito, ver tabla No.36

TABLA No.36: Valores Seleccionados de KB

POZO	AREA	KB	FORMACIONES
7339	Leones	376, 200	LT, FI, P, Mo
7348	Leones	169, 222	LT, FI, P, Mo

KB promedio = 272,711

La broca que se corrió en el pozo 7368 CUESTA, era una broca usada anteriormente luego debemos calcular el verdadero valor de KB para el intervalo en estudio a partir de la profundidad de 1,480 pies.

Del historial de la broca de serie 516XA se observó que fue usada previamente en el pozo 7363 LOBITOS y luego en el intervalo perforado de 1272-1480 pies en el 7368 CUESTA, ver tabla No. 35 y los siguientes datos:

Pozo 7368 CUESTA, intervalo: 1272-1480 pies, tiempo:  
5.9 horas, 18,000 libras, 100 R.F.M., KB = 10,620

La constante KB será:

$$272,711 - 116,550 - 10,620 = 145,541$$

Segundo: Cálculo de los parámetros de regresión lineal múltiple, R1, R2 y R3.

- Se tomó varias pruebas de penetrabilidad, ver ejemplo ilustrativo 5.1

De la Tabla No.29 y el gráfico 3.13 se determina que los mejores puntos corresponden a las velocidades de rotación de 160 y 190 R.F.M., esto debido a la linealidad registrada en el gráfico 3.13

- Se elabora la Tabla No.37 de los datos seleccionados.



TABLA No. 37.- Resultados de las pruebas de penetrabilidad, programa "DOT", pozo 7368 CUESTA.

W	Ln W	N = 190		N = 160	
		Ln N = 5.247		Ln N = 5.075	
		ROP	LnROP	ROP	LnROP
18.75	2.931	32.914	3.494	32.914	3.494
16.25	2.788	16.457	2.801	21.943	3.088
12.50	2.526	10.971	2.395	9.404	2.241

- De la Tabla No. 37 y de las ecuaciones 4.41, 4.42 y 4.43 tenemos:

$$\begin{bmatrix} 6 & 16.4900 & 30.9660 \\ 16.4900 & 45.4888 & 85.1049 \\ 30.9660 & 85.1049 & 159.8599 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln R1 \\ R2 \\ R3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17.5130 \\ 48.6109 \\ 90.3732 \end{bmatrix}$$

donde :

$$\begin{aligned} \ln R1 &= -3.5578 \\ R2 &= 2.8406 \\ R3 &= -0.2578 \end{aligned}$$

entonces :

$$\begin{aligned} R1 &= 0.02850 \\ R2 &= 2.84060 \\ R3 &= -0.25780 \end{aligned}$$

Para una aplicación rápida y precisa se utiliza el programa "ΣMLRXY" del módulo de estadística No. 1 de la Hewlett-Packard<sup>65</sup>, los datos que se ingresan a

<sup>65</sup> Hewlett-Packard, módulo de estadística

este programa provienen de la ejecución del programa "DOT" y de la selección de puntos en el gráfico 3.13 dependiendo de su linealidad.

Tercero: Asumir un peso sobre la broca y una velocidad de rotación y calcular el BHHP disponible.

- Asumir un peso de 18,000 libras y una velocidad de 100 RPM.
- Calculamos el caballeje hidráulico en la broca, BHHP, de la ecuación 3.111 y 3.110 tenemos.

$$d_3 = \sqrt{3 \left\{ \frac{12}{32} \right\}^2} = 0.6495$$

$$\Delta P_b = \frac{(310)^2 (9.6)}{(7430) (0.95)^2 (0.6495)^4} = 773$$

De la ecuación 3.121

$$\text{BHHP} = \frac{(773) (310)}{1714} = 140$$

Cuarto: Cálculo del tiempo requerido para desgastar completamente el cojinete en función de WOB = 18 miles de libras y N = 100 RPM.

- De la ecuación 3.30

$$\text{Horas} = \frac{145,541}{18 \times 100} = 80.86 \text{ horas}$$

Quinto: Computo del intervalo perforado, AD.

- De la ecuación 4.40 y 5.24

$$ROP = 0.0285 (18)^{2.8406} (100)^{-0.2578} =$$

$$ROP = 31.99 \text{ PIES/HORA}$$

$$31.99 \times 80.86 = 2,586 \text{ PIES} = AD$$

Sexto: Costo por pie perforado.

- De la ecuación 3.24:

$$TT = \left\{ \frac{3}{60} / 60 \right\} \left\{ 2(1480) + 2586 \right\} =$$

$$TT = 4.63 \text{ horas}$$

- De la ecuación 3.25

$$TC = \left\{ \frac{2586}{30} \right\} \left\{ \frac{8}{60} \right\} = 11.49 \text{ horas}$$

- De la ecuación 3.23 :

$$CPF = \frac{2996.27 + 249.042 (80.86 + 4.62 + 11.49)}{2586}$$

$$CPF = 10.50 \text{ \$/pie}$$

Mediante un proceso iterativo, que consiste en asumir diferentes valores de pesos sobre la broca y velocidades de rotación, construimos una tabla de costos por pie perforado, ver tabla No. 38. La construcción de esta tabla se hace con ayuda del programa "OJBIB" este proceso demora aproximadamente 5 minutos. Si se desea

solamente el peso sobre la broca y la velocidad de rotación óptimas se aplicará el programa "OPJOBIB" el cual se demorará aproximadamente 3.5 minutos.

El control del tamaño del bucle o lazo tanto para el peso sobre la broca y la velocidad de rotación están dados por: WOB IFC y RPM IFC, donde WOB IFC peso sobre la broca en miles de libras RPM, IFC - R.P.M., donde:

IFC es el contador = ii.fff cc

ii = valor inicial, fff = valor final,

cc = contador.

TABLA No. 38.-- Costo por pie perforado, \$/pie, pozo 7368  
 Cuesta Profundidad = 1,480 pies, codigo  
 IADC = 4-3-7, FORMACION: Pariñas Inferior  
 Programa "OJBIB"

N (RPM)	PESO SOBRE LA BROCA (LIBRAS)					
	10,000	12,000	14,000	16,000	18,000	20,000
80	43.46	26.79	18.00	12.90	9.72	7.63
100	46.78	28.89	19.43	13.93	10.50	8.24
120	49.83	30.84	20.77	14.90	11.23	8.81
140	52.69	32.67	22.04	15.83	11.94	9.37
160	55.42	34.44	23.26	16.73	12.62	9.91
180	58.05	36.14	24.46	17.61	13.30	10.44
200	60.60	37.81	25.62	18.47	13.96	10.97

5.1.3.3 Análisis y Resumen de los resultados de la aplicación de la Teoría de Doiron, Tompkins y Watts al pozo 7368 CUESTA, formación Paríftas Inferior.

Primero.— La formación geológica Paríftas Inferior que está básicamente constituida de areniscas e intercalaciones delgadas de lutitas responde mejor al peso sobre la broca que a la velocidad de rotación a pesar que esta formación es blanda y somera.

Como sabemos las formaciones que están constituidas por lutitas por lo general responden más a la velocidad de rotación que al peso sobre la broca<sup>66</sup>, como ejemplo podemos citar al ejemplo ilustrativo 5.3 donde se encontró que los parámetros mecánicos óptimos para la formación Chira y Lutitas Talara es un peso sobre la broca reducido y una velocidad de rotación alta.

Como una ayuda visual de las afirmaciones hechas se diagramó los gráficos 3.23 y 3.24.

Cuando se explica que uno u otro tipo de formaciones responden más al peso sobre la broca o a la velocidad de rotación se está hablando que al aumentar el parámetro mecánico debido se aumenta la velocidad de penetración hasta cierto punto donde la hidráulica óptima permita un peso sobre la broca y una velocidad de rotación económicas.

---

<sup>66</sup> G.V. Chilingarian, P. VORABUTA y J.H. ALLEN.: Drilling and Drilling fluids, ELSEVIER, Nueva York 1981, P. 97

Segundo.— Según la ecuación de H.B Fullerton para modelar la velocidad de penetración para formaciones blandas, el nivel de energía significa que el peso sobre la broca y la velocidad de rotación pueden variar considerablemente sin cambiar el promedio de la velocidad de penetración con tal que el producto de las dos variables (Peso y R.P.M.) permanezcan constantes. Esto se da para un determinado intervalo de profundidad. La ecuación siguiente ilustra lo mencionado anteriormente:

$$ROP = K_f \text{ WOB} \cdot N \quad \dots (5.25)$$

Comparando la ecuación anterior con la ecuación 4.40 de Doiron, Tompkins y Watts se deduce que el nivel de energía para la ecuación 4.40 no cumple con el mismo concepto que para Fullerton, esto debido a que los componentes mecánicos de la velocidad de penetración se hallan elevados exponentes diferentes de uno. Esquemáticamente se comprueba con el gráfico 3.25 donde para un mismo número WN o nivel de energía de 1600 encontramos dos velocidades de penetración diferentes.

Luego concluimos que la optimización no debe realizarse en base a un número WN o nivel de energía para una ecuación más generalizada de la velocidad de penetración, si no en base un peso sobre la broca y velocidad de rotación particulares para la formación, determinados por las pruebas de penetrabilidad.

Tercero.- De la evaluación de la condición de salida de la broca estimamos el grado de exactitud del KB establecido para el proceso de optimización, y por lo tanto de los resultados obtenidos también. De la condición de salida de la broca:

$$T = 4, B = 5, I$$

Luego  $B = 8 \rightarrow 100\%$  desgaste

$B = 5 \rightarrow X\%$  desgaste

Luego  $B = 5 \rightarrow 62.5\%$  desgaste

Luego de la tabla 35 para la broca de serial 516XA:

$KB = 181,500 \rightarrow 62.5\%$

$X \rightarrow 100.0\%$

Luego: El KB real para la broca nueva = 290,400

El KB usado para la optimización = 272,711

Entonces:

$$100 - \frac{272,711 \times 100}{290,400} = 93.9\%$$

Grado de exactitud de la estimación de KB para una nueva broca = 93.9%

Se puede observar en el gráfico 3.26 los diferentes KB y los rangos de operación de las brocas incluidas en el estudio. El punto óptimo de operación nos brinda un nivel de energía que depende de la respuesta de la formación al peso sobre la broca.



## CAPITULO VI

### GENERACION DEL MODELO PARA UNA PERFORACION OPTIMA A TIEMPO REAL.

#### 6.1 Determinación del objetivo del modelo.

El objetivo global del modelo se sustenta en la filosofía de la perforación óptima a tiempo real, el cual es reducir al mínimo el costo por pie perforado por medio de métodos que se llevan a cabo en el momento de la ejecución de la operación de perforación.

#### 6.2 Construcción del Modelo.

El modelo consta de tres etapas, las cuales son:

- Recopilación de la información estadística.
- Recopilación de la información de las pruebas tomadas en el pozo.
- Cálculos de los parámetros óptimos en base a la correlación de los datos tomados en las pruebas.

Estas tres etapas se aplican respectivamente a la optimización hidráulica y mecánica.

### 6.2.1 Optimización Hidráulica.

#### 6.2.1.1 Recopilación de la Información Estadística.

Se debe recabar información estadística previa como:

Eficiencia volumétrica.

Zonas geológicas como posibles problemas de pérdidas de circulación.

#### 6.2.1.2 Recopilación de la Información de las pruebas hidráulicas.

Las pruebas hidráulicas de presión de superficie o tubo parado (SPP) versus carreras por minuto de la bomba de fluidos de perforación deben ser registradas minutos antes de iniciar el viaje para cambio de broca, luego durante estas pruebas no deben adicionarse ningún aditivo químico o físico al fluido de perforación para obtener datos verídicos aplicables a la optimación de la hidráulica.

Luego de la obtención de por lo menos 3 puntos de presión versus caudal se procede al cálculo del caudal y boquillas óptimas, lo cual puede llevarse a cabo por medio de un algoritmo y una computadora de mano en el pozo que se perfora.

### 6.2.2 Optimación Mecánica.

#### 6.2.2.1 Recopilación de la Información Estadística.

tica.

- Valores promedios de KB.
- Valores promedios de  $\tau_H$  y  $\tau_B$  basados en las recolecciones estadísticas de la zona en estudio.
- Recolectar y evaluar los parámetros para la correlación lineal múltiple.

#### 6.2.2.2 Recolección de los datos de las pruebas de penetrabilidad.

Recolectar las respuestas de la formación a la variación del peso sobre la broca y la velocidad de rotación.

De los datos de las pruebas de penetrabilidad evaluar los parámetros de correlación lineal múltiple para la optimización de las variables mecánicas.

### 6.3 Recopilación de la Información de pruebas.

Para recopilar en forma completa la información requerida para la optimización hidráulica y mecánica se hace uso del siguiente esquema propuesto, el cual facilita el manejo de datos recabados de las pruebas de penetrabilidad e hidráulica como también los datos referentes a la formación geológica y los resultados obtenidos.

DATOS PARA LA OPTIMACION DE LA PERFORACION

EQ: \_\_\_\_\_ POZO: \_\_\_\_\_ YACIMIENTO: \_\_\_\_\_

PRUEBA No. 1

BROCA:	PRUEBAS DE HIDRAULICA		
	PRESION	BOMBA No. 1	BOMBA No. 2
Tipo: _____	l.p.p.c	C P M	C P M
Serial: _____			
Boquillas: _____	SPP1: _____	CPM 1: _____	CPM 1: _____
Pref: _____	SPP2: _____	CPM 2: _____	CPM 2: _____
MDWT: _____	SPP3: _____	CPM 3: _____	CPM 3: _____
Formación: _____		E.U.: _____	E.U.: _____
Formación Tope: _____		E.N.: _____	E.N.: _____

PRUEBA No. 2

Broca Tipo: _____	PRUEBAS DE PENETRABILIDAD					
	R		P		M	
	WOB	t	WOB	t	WOB	t
Serial: _____						
Boquillas: _____						
Profundidad: _____						
MDWT: _____						
Formación: _____						
Tope de Formación: _____						

CPM: \_\_\_\_\_ BOMBA: \_\_\_\_\_ SPP: \_\_\_\_\_

MDWT a la salida: \_\_\_\_\_ MDWT a la entrada: \_\_\_\_\_

Viscosidad del Fluido: \_\_\_\_\_

Punto de cedencia de Bingham: \_\_\_\_\_

Longitud de lastrabarreras: \_\_\_\_\_

Diametro de la T.P.: \_\_\_\_\_

Diametro de la L.B.: \_\_\_\_\_

peso/pie de L.B.: \_\_\_\_\_

---

## RESULTADOS

pies perforados: \_\_\_\_\_

Bomba: \_\_\_\_\_

ROP: \_\_\_\_\_

CPM: \_\_\_\_\_

MOB: \_\_\_\_\_

SPP: \_\_\_\_\_

RPM: \_\_\_\_\_

Horas: \_\_\_\_\_

Profundidad de Salida: \_\_\_\_\_

Costo: \_\_\_\_\_

T.C. de un tubo: \_\_\_\_\_

T.S. de una barra: \_\_\_\_\_

L.S. de una barra: \_\_\_\_\_

Condicion de Salida

Broca

Insertos perdidos : \_\_\_\_\_

Condicion Cojinete: \_\_\_\_\_

Calibre : \_\_\_\_\_

Para ayudar a comprender los cálculos de costo por pie perforado se presentan los siguientes cuadros:

TABLA No. 39

Tiempos de conexión de un tubo, una barra por equipo y costos diarios y por hora de la operaciones de los equipos PETROPERU, MAYO 1989

EQUIPO	Tiempo de conexión de un tubo, minutos	LS	Tiempo de conec., barra, minuto
4	8	60	5.5
8	8	60	3
2-6-9-10	3	90	4.5

LS: Longitud de la barras, pies.

## COSTOS DE LA OPERACION

EQUIPO	2...	4...	6...	8...	9...	10.	
DIARIO	6094	5006	6161	5977	5386	6451	\$
HORARIO	253.92	208.58	256.71	249.042	224.42	268.79	\$/hr

## COSTO DE BROCAS

DIAMETRO	TIPO	COSTO	CON BOQUILLAS
7 7/8	JOURNAL	2930.69 \$	2996.27 \$
7 7/8	X - LINE	993.69 \$	1059.27 \$
7 7/8	DIENTES	754.42 \$	820.00 \$

#### 6.4 Balance entre la Energía Mecánica e Hidráulica.

Luego de hallar el nivel de energía hidráulica óptima se procede a encontrar los parámetros mecánicos óptimos que produzcan un nivel de energía mecánica compatible con la energía hidráulica disponible. Luego al encontrar por medio de cálculos la tabla de costos por pie perforado se procede a revisar si los niveles de energía mecánica de los pesos de la broca y velocidades de rotación económicos son los adecuados a la hidráulica óptima disponible, ver gráfico 3.6 y 3.7.

## CAPITULO VII

### ANALISIS ECONOMICO COMPARATIVO

7.1 Análisis Económico Comparativo con respecto a la broca de estructura cortante de acero, código IADC: 1-3-6, yacimiento: Carrizo, formación geológica: Chira.

De las Tablas No.30 y No.33 obtenemos los costos por pie perforado reales y el producto del proceso de optimización, resumiendo:

TABLA No. 40 Costos por pie perforado promedio real, óptima real y óptimo.

RENDIMIENTO	COSTO \$/PIE
Rendimiento promedio Real (7 brocas)	9.35
Rendimiento optimo Real (1 broca)	8.58
optimo	8.18

El rendimiento promedio Real se obtuvo de 7 brocas con código 1-3-6, este tipo de broca tuvo el más bajo costo en



la formación Chira.

El rendimiento óptimo Real proviene de la broca de código IADC 1-3-6 del pozo 6732

El rendimiento óptimo teórico proviene de los cálculos realizados para encontrar los parámetros mecánicos óptimos.

Luego comparamos el costo para un rendimiento promedio real y el costo para un rendimiento óptimo teórico en términos de porcentaje:

$$\frac{.8.18}{9.35} \times 100 = 87.49\%$$

Entonces el ahorro en términos de porcentaje es:

$$100 - 87.49 = 12.51\%$$

7.2 Análisis Económico Comparativo con respecto a la broca de estructura cortante de insertos de carburo de tungsteno, código IADC: 4-3-7, YACIMIENTO: LEONES Y CUESTA, formación geológica: Pirafñas Inferior.

En base a la Tabla No. 35 se toma el promedio ponderado del intervalo de profundidad perforado, así como el costo por pie perforado.

$$\text{Espesor promedio} = \frac{\sum \text{Costo} \times \text{Espesor}}{\sum \text{Costo}}$$

Tomando los pozos: 7344 LEONES, 7371, 7369, 7366, 7367 y 7368 CUESTA y obtenemos.

$$\text{Espesor promedio} = \frac{63,085.32}{123.63} = 510.28$$

$$\text{Costo Promedio} = \frac{\sum \text{Costo} \times \text{Espesor}}{\sum \text{Espesor}}$$

$$\text{Costo Promedio} = \frac{63,085.32}{3,808.0} = 16.57 \text{ \$/pie}$$

En base a la Tabla No.38 se ubica los parámetros óptimos adecuados, WOB = 20, N = 80 para los cuales al ROP = 45.7 pies/hora

$$\text{TR} = \frac{510.28}{45.7} = 11.17 \text{ horas.}$$

Profundidad promedio de inicio de la corrida = 1913 pies

De la ecuación 3.25:

$$\text{TC} = \left\{ \frac{510}{30} \right\} \left\{ \frac{8}{60} \right\} = 2.27 \text{ horas}$$

De la ecuación 3.24:

$$\text{TT} = \left\{ \frac{3}{60} \right\} \left\{ 2(1913) + 510 \right\} = 3.61 \text{ horas}$$

De la ecuación 3.23

$$\text{CPF} = \frac{2996.27 + 249.042 (11.17+2.27+3.61)}{510}$$

CPF = 14.20 \$/pie

Donde costo de la broca = 2,996.27 \$

costo del Equipo = 249.042 \$/hora

TABLA No. 41 COSTOS POR PIE PERFORADO PROMEDIO REAL Y OPTIMO.

RENDIMIENTO	COSTO \$/PIE
Rendimiento promedio Real (6 brocas)	16.57
Optimo	14.20

Luego comparamos el costo para un rendimiento promedio real y el costo para un rendimiento óptimo teórico en términos de porcentaje:

$$\frac{14.20}{16.57} \times 100 = 85.70\%$$

Entonces el ahorro en términos de porcentaje es:

$$100 - 85.7 = 14.30\%$$

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

Primero.- La definición del Sistema depende de la realidad nacional actual, por lo tanto varios recursos pueden ser considerados como contornos del Sistema.

Segundo.- El proceso de optimización por medio de un modelo matemático permite encontrar con mayor precisión los parámetros óptimos que con estudios meramente estadísticos.

Tercero.- Los estudios estadísticos junto a la pruebas de penetrabilidad e hidráulica son base para la optimización de la perforación.

Cuarto.- La evaluación y operación de brocas con estructuras cortantes de acero y a insertos de carburo de Tungsteno varía notablemente uno con respecto a la otra.

Quinto.- El máximo producto permisible de peso sobre la broca por la velocidad de rotación para evitar el fallamiento instantáneo del cojinete a fricción o número WN es sólo una medida de la capacidad del cojinete.

Sexto.- La aplicación de los programas hidráulicos depende básicamente de la ventana de operación o rango de operación que se dispone.

Sétimo.- El cálculo de la caída de presión por fricción en el espacio anular por el método teórico tradicional en comparación con el método propuesto produce un error relativo del 42.4%.

Octavo.- El modelo desarrollado por Doiron, Tompkins y Watts es un método empírico-científico desde que la inexactitud de los datos respuesta peso sobre la broca y velocidad de rotación no justifican el uso de un modelo más complejo para evaluar la durabilidad del cojinete a fricción de las brocas a insertos de Carburo de tungsteno. Por lo tanto este modelo es el adecuado para optimizar la operación económica de las brocas con estructura cortante insertos de carburo de tungsteno en los campos del Noroeste del País.

Noveno.- Los yacimientos del Noroeste del País son multifallados, luego la intercalación de distintas formaciones hacen que se necesite un intervalo de profundidad pequeño para realizar las pruebas de penetrabilidad.

Décimo.- El modelo matemático de Bourgoyne y Young es un método desarrollado primariamente para brocas con estructuras cortantes de acero.

Décimo Primero.- La optimización de los parámetros mecánicos está en función inversamente proporcional al costo por pie perforado; dependiendo la magnitud del costo mínimo por pie perforado y por lo tanto del Sistema de Optimización de los límites y restricciones del Sistema. Esta afirmación implica que es erróneo tratar de buscar una velocidad mayor de penetración, o una cantidad mayor de pies perforados por broca, o una cantidad mayor de horas

de duración de la vida de la broca.

Décimo Segundo.- Si se produce la discrepancia entre las predicciones de los valores óptimos del costo por pie perforado y de los valores reales obtenidos, se debe determinar si esta discrepancia es resultado de los datos no verídicos tomados como base de los cálculos para obtener los parámetros óptimos de la formación en estudio, o si los parámetros utilizados en los cálculos deben ser modificados para perfeccionar la optimización con el fin de que el modelo pronostique debidamente los valores óptimos del costo por pie perforado.

Décimo Tercero.- El desgaste de una broca con insertos de carburo de tungsteno varía con respecto a una broca con estructura cortante de acero.

Décimo Cuarto.- La elaboración de una tabla de costos por pie perforado permite un estudio más objetivo y detallado en la búsqueda de los parámetros mecánicos óptimos en comparación de la aplicación directa de una fórmula para encontrar el peso de la broca y/o la velocidad de rotación óptima.

Décimo Quinto.- La optimización mecánica no debe realizarse en base a un número WN o nivel de energía, sino en función a un peso sobre la broca y velocidad de rotación particulares al tipo de formación geológica en estudio determinados por las pruebas de penetrabilidad.

Décimo Sexto.— El balance entre las energías mecánica e hidráulica es factor primordial para evitar la deficiencia hidráulica y más aún la remolienda.

Décimo Séptimo.— La generación del modelo propuesto nos permite un ahorro en el costo por pie perforado de aproximadamente un 12 y 14 por ciento en las brocas de estructura cortante de acero y a insertos de carburo de Tungsteno respectivamente.



## CAPITULO IX

### RECOMENDACIONES

Primero.- Aplíquese el método de K.F.Scott para optimar debidamente la hidráulica.

Segundo.- Las pruebas de penetrabilidad e hidráulica deben ser técnicas rutinarias para optimar la perforación a tiempo real.

Tercero.- La autenticidad de los datos previos para la optimación de la perforación debe corroborarse.

Cuarto.- La calificación de la condición de salida de una broca debe realizarlo el Ingeniero de Petróleo, así como todo el proceso de optimación de la perforación .

Quinto.- Aplíquese los modelos matemáticos de Bourgoyne y Young y de Doiron, Tompkins y Watts para la optimación mecánica de las brocas con estructuras cortantes de acero e insertos de carburo de Tungsteno respectivamente.

Sexto.— Se recomienda la aplicación de técnicas de optimización para reducir el costo del pie perforado en aproximadamente un 14%.

Séptimo.— Se recomienda el uso de una computadora de mano para los cálculos de optimación a tiempo real durante la perforación.

## CAPITULO X

### BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

#### LIBROS

1. A.F.I. Recommended practice for Drill Stem Design and Operating Limits, API RP 76, Edición onceara. Mayo 28, 1984.
2. Bourgoyne, A.T. Jr; Chenevert, M.E.; Millheim, K.K. y Young, F.S. Jr.: Applied Drilling Engineering, SPE TEXTBOOK Series, ed. 1986.
3. Chilingarian, G.V.; Vorabutr, P. y Allen, J.H.: Drilling and Drilling Fluids, ELSEVIER, Nueva York 1981.
4. IMCO.: Applied mud Technology, Howco, 1978.
5. Magcobar.: Drilling Fluid Engineering manual, Enero 1977.
6. Moore, P.L.: Drilling Practices Manual; Petroleum Publishing Co. Tulsa 1974, 1o. Edición.
7. Moore, P.L y Cole, F.W.; Drilling Operations Manual, The Petroleum Publishing Co. Oklahoma 1965.
8. Patton, L.Douglas y Abbott, W.A.: Well Completions and Workovers, H.B.J. 1985.
9. Rabinowicz, E.: Friction and Wear of Materials, John Wiley e Hijos, Nueva York 1965.

## ARTICULOS E INFORMES

10. Agurto S.A.: "Informe Técnico sobre optimización de la hidráulica de perforación", PETROPERU ONO, Talara (Junio 1988).
11. Bizanti, M.; Makki, J.F.; Jackson, L.G. y Caruti R.M.: "Bit Hydraulics Optimization Using Reynold number Criteria", SPE 16465, 1985 No publicado.
12. Bourgoyne, Jr. A.T. y Young, Jr. F.S.: "A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection", Soc. Pet. Eng. J. (Agosto 1974)
13. Brouse, M: "Practical Hydraulics: A key to efficient drilling", World Oil (Octubre 1982).
14. Campbell, J.M. y Mitchell, B.J.: "Effect of Tooth Geometry on Tooth Wear rate of Rotary Rock Bits", Artículo presentado a la Conferencia A.F.I. Mid-Continent Dist. (Marzo 1959).
15. Cunningham, R.A.: "An Empirical Approach for Relating Drilling parameters", J.P.T. (Julio 1978).
16. Dernbach, L.A.: "Proper bit selection through sonic-Gamma Ray Log Analysis", Conferencia de Tecnología de perforación de la I.A.D.C., Houston Marzo 9-11, 1982.
17. Doiron, H.H. y Deane, J.D.: "A new approach for optimizing bit hydraulics", SPE-11677, Congreso Regional de California, Ventura, Marzo 23-25, 1983.
18. Doiron, H.H.; Tompkins, L.B. y Watts, T.: "Optimizing Journal Bearing insert Bit Runs Using a Bearing Life Model", SPE-16697, Dallas, Septiembre 1987.
19. Fullerton, H.B.: "Constant Energy Drilling System for well programing", sii Smith Tool Service, Irvine, California, Agosto 1973. No publicado.
20. Galle, E.M.: Comunicación personal, Hughes Tool Co., Houston, Texas, Agosto 1988.
21. Galle, E.M. y Woods, H.B.: "Effect of Weight on penetration rate", Pet.Eng. (Enero 1958)
22. : "Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits", Drill and Prod. Frac. A.F.I. 1963.
23. Graham, J.W. y Muench, N.L.: "Analytical Determination of Optimun Bit Weight and Rotary Speed Combinations",

- SPE 1349-G, DALLAS, (Oct.1959).
24. Hewlett-Packard, : Módulo de Matemáticas.
  25. : Módulo de Estadística I.
  26. Hopkin, E.A.: "Factors affecting Cuttings Removal during Rotary Drilling", J. Pet. Tech. (Junio 1967)
  27. Kendall, H.A. y Goins, W.C.: "Desing andf Operations of Jet-Bit Programs for Maximun Hydraulic Horsepower, Impact Force on Jet Velocity", J. Pet. Tech (Oct.1960), Trans. AIME 219.
  28. Korry, D.E.: "Optimized Deep Drilling Programs", World Oil (Septiembre 1977).
  29. Lubinski, A : "Proposal for future test", Pet. Eng. (Enero 1958).
  30. Lummuns, J.L.: "Drilling Optimization", J. Pet. Eng. (Noviembre.1970).
  31. : "Analysis of mud Hidraulics Interactions", Pet. Eng. (Febrero 1974).
  32. Maurer, W.C.: "Bit-Tooth penetration Under Simulated Borehole Conditions", J. Pet. Tech. (Diciembre 1965).
  33. Miska, S. y Skalle, F.: "Theoretical Description of a New Method of Optimal Program Design", Soc. Pet. Eng. J. (Agosto 1981).
  34. Morales P.J.: "Evaluación de brocas del Area de Carrizo", Prácticas pre-profesionales, PETROPERU (Mayo 1985).
  35. Mc. Daniel, K.W. y Lummus, J.L.: "Herés how to Apply Optimized Drilling Techniques", Oil and Gas J. (Junio 14, 1971)
  36. Randall, B.V.: "Optimum Hydraulics in the Oil Patch", Pet. Eng. J. (Septiembre 1975).
  37. Robinson, L.: "Optimizing bit Hydraulics increases penetration rate", World Oil (Julio 1982).
  38. Rabia Hussain: "Specific Energy as a Criterion for bit Selección", J. Pet. Tech. (Julio 1985).
  39. Saebo, M.: "Bit Hydraulics Optimization", Coloquio en Stavanger, Noruega (Abril 1984).
  40. Scott, K.F.: "A new Approach to Drilling Hydraulics",

Pet. Eng. Int. (Septiembre 1972).

41. Siegel, B.: "How to calculate pump output and efficiency", Pet. Eng. (Marzo 1981).
42. Vidder, A.: "Chevron Drill-off Test (DOT)", Chevron Oil Co., Nueva Orleans.