



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"MODELOS MATEMATICOS DE PERFORACION"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

JORGE ALBERTO OSORNO MANZO

MEXICO, D. F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	PAGINA
CAPITULO I	
Introducción	1
CAPITULO II	
Modelos y Simulación	3
II.1 Generalidades	3
II.2 Principales Tipos de Modelos	3
II.2.1 Modelos Físicos	3
II.2.2 Modelos Gráficos	3
II.2.3 Modelos Esquemáticos	5
II.2.4 Modelos Matemáticos	5
II.3 Simulación	6
II.4 Utilidad de los Modelos y de la Simulación	7
II.5 Modelos Matemáticos de Perforación	8
II.5.1 Principios de Similitud	8
II.5.2 Programación Geométrica	11
CAPITULO III	
Aspectos Generales Sobre la Perforación de Pozos Petroleros	13
III.1 Objetivo de la perforación	13
III.2 Equipo de perforación rotatorio	13
III.2.1 Torre o mástil y otras estructuras de soporte	14
III.2.2 Planta de energía	14
III.2.3 Aparejo Elevador	15
III.2.4 Aparejo de Perforación	16
III.2.5 Sistema Circulatorio	18
CAPITULO IV	
Desarrollo de la Perforación Rotatoria	21
IV.1 Desarrollo Histórico de los Principales Modelos de Perforación	22

CAPITULO V

Principales Variables que Intervienen en los Modelos Matemáticos de Perforación	27
V.1 Lodo	29
V.2 Hidráulica	29
V.3 Selección de la Barrena	35
V.4 Relación Peso-Velocidad de Rotación	36
V.4.1 Peso sobre Barrena	36
V.4.2 Velocidad de rotación	40

CAPITULO VI

Optimización de la Perforación	43
VI.1 Análisis Dimensional	45
VI.2 Explicación Física de las Condiciones de la Perforación	49
VI.3 Relaciones Lineales	50
VI.4 Optimización a Bajo Costo	51
VI.4.1 Costo de la Optimización	54
VI.4.2 Cálculos de la Optimización	55

CAPITULO VII

Adquisición y Análisis de Datos	62
VII.1 Datos de Entrada para Preparar Programas de Optimización de la Perforación	62
VII.1.1 Lodo	65
VII.1.2 Hidráulica	66
VII.1.3 Selección de la Barrena y Condiciones de la Corrida	66
VII.2 Datos para Actualizar los Programas de Optimización	66
VII.2.1 Evaluación de los Datos de la Perforación	67

CAPITULO VIII	
Automatización de la Perforación	68
VIII.1 Descripción del Equipo	68
VIII.2 Telemetría en el Fondo del Agujero	71
VIII.3 Control Automático	73
CAPITULO IX.	
Conclusiones y Recomendaciones	75
Referencias	77

CAPITULO I

INTRODUCCION

De las erogaciones destinadas a la explotación de hidrocarburos las correspondientes a la perforación de pozos constituyen uno de los porcentajes más elevados, por este motivo las investigaciones sobre esta actividad están encaminadas a reducir los costos por metro perforado.

La tecnología de perforación en la última década ha logrado establecer diversas relaciones significativas entre las principales variables que afectan la perforación, la expresión matemática de éstas relaciones constituyen los modelos de perforación. El establecimiento de expresiones matemáticas que representan en forma confiable el proceso, ha permitido aplicar técnicas estadísticas y de optimización para mejorar costos y tiempos en la perforación de pozos.

Un análisis realista de la perforación pone de manifiesto que hay muchas variables involucradas, por ello, la validez de los modelos al simular las condiciones subsuperficiales es sólo aproximada.

Actualmente, el progreso tecnológico en esta área, ha permitido a la industria desarrollar métodos e instrumentos que han hecho posible conducir exitosamente las operaciones de perforación, dependiendo cada vez menos de las habilidades personales y más de los progresos logrados con los sistemas para detectar las principales variables de perforación.

Pero, tal vez el aspecto medular del cambio deba acreditarse a los modelos de simulación que permiten procesar en los sistemas de cómputo la información captada, representar en forma confiable la perforación de pozos y preveer, mediante las técnicas de optimización los ajustes o modificaciones que conviene introducir para evitar problemas y obtener el mayor ritmo de penetración al menor costo.

El objetivo principal de esta tesis es introducir al lector a los modelos matemáticos de perforación, haciendo notar la importancia que tienen en la perforación de pozos petroleros.

CAPITULO II

MODELOS Y SIMULACION

II.1 GENERALIDADES

El concepto de modelo es muy amplio, se puede definir como una representación que describe la naturaleza o comportamiento de un objeto real. Tal descripción se puede efectuar por medio de palabras, números, símbolos, esquemas, gráficas y diagramas etc., o bien similar al objeto representado o comportándose como él. Cabe señalar que siempre hay diferencias entre el modelo y el objeto real, es decir, que no todas las características coinciden completamente en ambos, ya que no todas las variables intervienen en el modelo debido a que harían a éste más complicado y costoso, y el pequeño aumento en exactitud no justificaría esas desventajas.

II.2 PRINCIPALES TIPOS DE MODELOS (Fig. 1).

II.2.1 Modelos Físicos. Son representaciones que guardan una semejanza física con los objetos de la vida real. La representación puede presentarse tridimensionalmente como en el caso de un globo terráqueo, una maqueta a escala, una estatua etc., y bidimensionalmente como en el caso de una fotografía, un croquis o una copia heliográfica.

II.2.2 Modelos Gráficos. Se le designa así a una gráfica o representación geométrica que sirve para ilustrar una ley de variación, demostrar una proposición o para obtener determinados valores numéricos de las relaciones entre variables. Por ejemplo, un diagrama presión-volumen, diagrama de fases (presión-temperatura), etc.

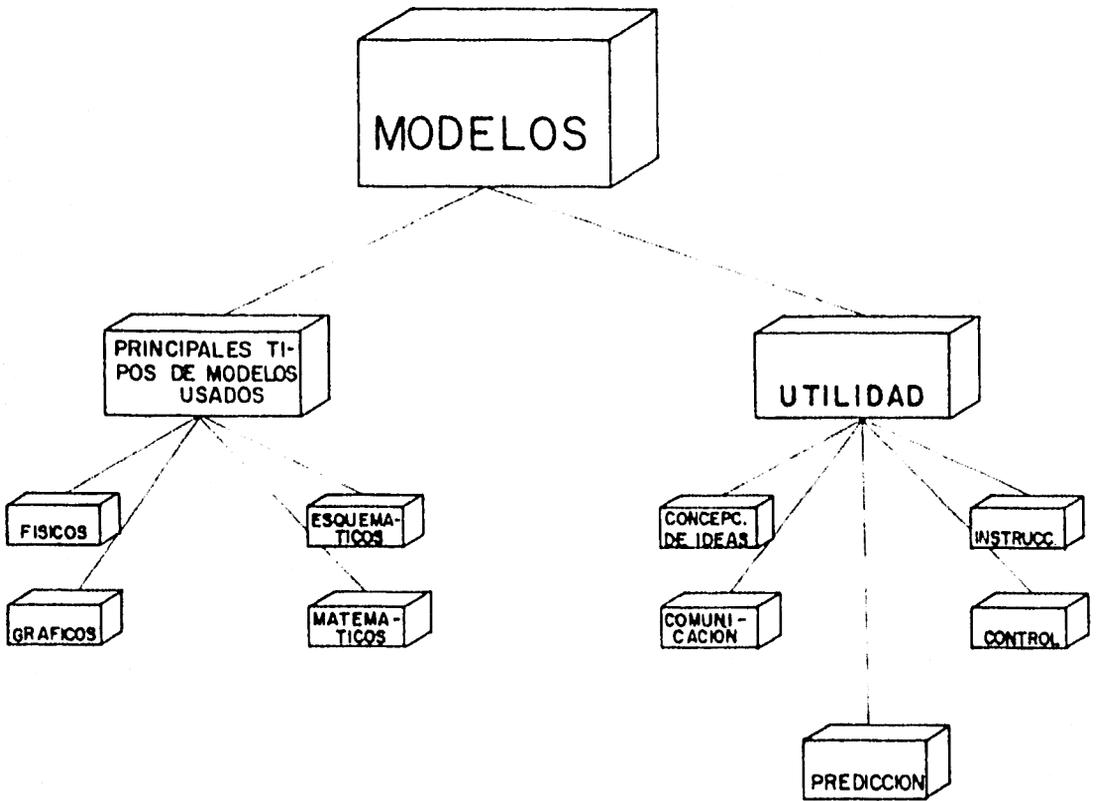


FIG. 1 PRINCIPALES TIPOS DE MODELOS Y UTILIDAD

II.2.3 Modelos Esquemáticos. Es la configuración de líneas y símbolos que representan la disposición estructural o el comportamiento de un objeto real. Como ejemplos se tienen los esquemas de circuitos electrónicos o el esquema de un sistema recolector de gas.

II.2.4 Modelos Matemáticos. Basan su representación en expresiones matemáticas, por lo que resultan un medio eficaz para la predicción y un lenguaje conciso y universal fácilmente comprensible.

Por medio del empleo de las matemáticas pueden realizarse predicciones de muchos fenómenos naturales, así como también del comportamiento de dispositivos, estructuras y procesos construídos por el hombre.

Utilizando el sistema de reglas y convenciones prescritas por las matemáticas y asignando símbolos para representar las propiedades importantes del objeto real, las expresiones matemáticas pueden manipularse hasta obtener predicciones útiles de lo que debe esperarse según determinadas condiciones.

En vista de la utilidad de las matemáticas como un medio para predecir, comunicar y razonar resulta comprensible la gran importancia que representa su uso en los modelos y la utilización de éstos en los proyectos de ingeniería.

Un ejemplo de una expresión matemática es la ecuación de estado de un gas ideal.

$$V = \frac{m K T}{P}$$

donde:

m : representa la masa de cierto gas

T : temperatura del gas

V : volumen que ocupa el gas

K : constante cuyo valor debe ser conocido
P : presión que ejerce el gas.

II.3 SIMULACION

Es el proceso de experimentación en el que se utiliza un modelo de un objeto real. Es un medio para sintetizar experiencia operando el modelo durante un cierto tiempo, a fin de saber como funcionará el objeto real. La Fig. 2 muestra las formas de simulación. Cuando los experimentos se realizan con modelos físicos el proceso se llama simulación física. Como ejemplo se tiene el modelo de una aeronave que se somete a la acción de corrientes de aire de alta velocidad en un túnel de viento, a fin de predecir el comportamiento de un aeroplano de ese diseño en un vuelo real.

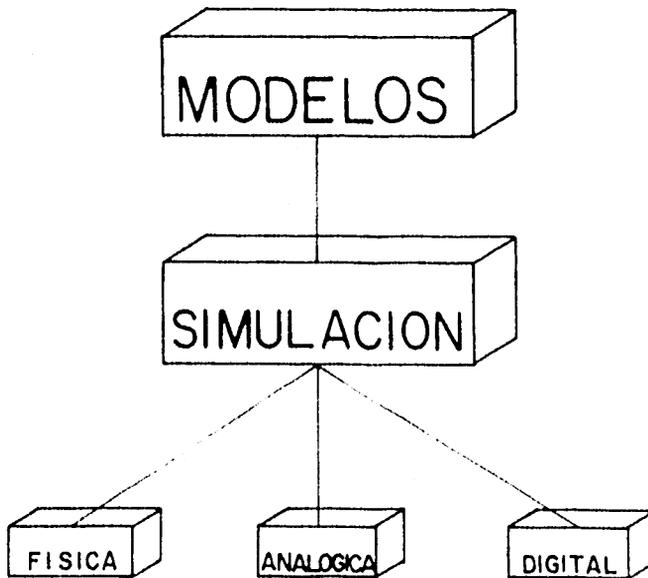


FIG. 2 TIPOS DE SIMULACION

En la simulación analógica y en la simulación digital los modelos sobre los que se realizan los experimentos tienen sólo semejanza funcional o de comportamiento, en vez de física como con los objetos reales.

En la simulación analógica, se emplea un medio que se comporta análogamente al fenómeno real, como vehículo para experimentación. La electricidad es el medio más frecuentemente usado. Por ejemplo el voltaje podría representar la presión del vapor en un simulador analógico eléctrico de una planta de energía de vapor.

La simulación digital emplea en la experimentación un modelo matemático. Consiste en una serie de operaciones numéricas ejecutadas paso a paso e iterativamente por medio de una computadora, con el fin de predecir el comportamiento de un fenómeno, sistema o la evaluación de un proyecto minimizando el tiempo y costo.

II.4 UTILIDAD DE LOS MODELOS Y DE LA SIMULACION

Los modelos son una valiosa ayuda cuando se trata de visualizar la naturaleza o comportamiento de un sistema o de un fenómeno que es difícil de captar; son las representaciones de fenómenos físicos en términos de abstracciones útiles.

Se utilizan como un medio de comunicación para expresar fenómenos y sistemas complejos, así como también permiten hacer las predicciones requeridas del funcionamiento de la solución sin tener que crearlas físicamente.

Mediante el manejo de los modelos matemáticos y de la simulación es posible evaluar soluciones en menos tiempo, costo y riesgo que los que requiere normalmente la experimentación con un objeto real.

Cuando se desarrolla un modelo para fines de predicción, se desea que las predicciones del modelo concuerden lo más posible con lo que -

ocurra finalmente. Sin embargo, en algunos casos ocurre lo contrario; se desarrolla un modelo y se obliga a que la situación representada se adapte a él. Por ejemplo los planos de un edificio constituyen un modelo, y por supuesto el edificio se construye de acuerdo con el modelo.

Otra de las utilidades de los modelos es con el propósito de instruir. Como un ejemplo de lo último está el adiestramiento a pilotos al simular en el laboratorio las condiciones que imperan en un vuelo espacial.

La Fig. 3 muestra un esquema de un modelo para predecir un fenómeno o el comportamiento de un determinado sistema.

II.5 MODELOS MATEMATICOS DE PERFORACION

Son expresiones matemáticas basadas en relaciones empíricas obtenidas en pruebas de laboratorio o experiencias de campo. Sólo un número limitado de las variables de perforación pueden ser manejadas matemáticamente en los modelos de perforación debido a lo complejo de los efectos interactivos entre estas variables.

Los principios básicos que se usan para el desarrollo de los diferentes modelos matemáticos de perforación que tienen como fin optimizar ésta, son: el principio de conservación de la energía, el principio de similitud (análisis dimensional), mecánica de rocas y el desarrollo contínuo de los procesos de optimización.

II.5.1 Principio de Similitud. Es el uso de argumentos dimensionales para establecer relaciones entre las magnitudes físicas. También es referido algunas veces como análisis dimensional.

Como un ejemplo, se toman las relaciones establecidas entre la fuerza ejercida sobre un fluido que se mueve a través de un cilindro, F , y los parámetros apropiados ρ , V , D y μ que describen la densidad del líquido, velocidad, diámetro del cilindro y viscosidad respectivamente.

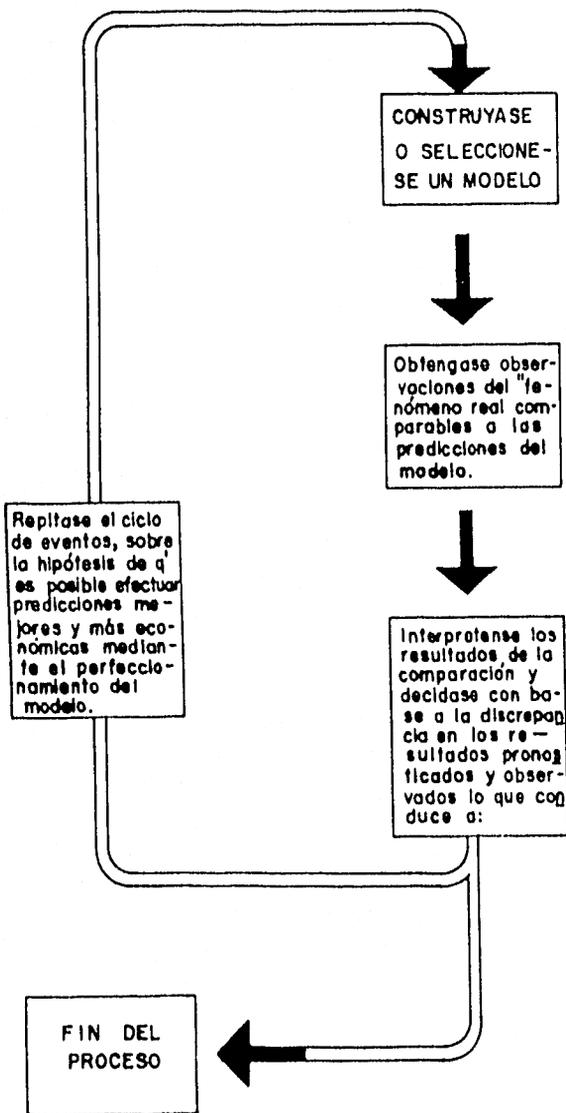


FIG. 3 ESQUEMA DE UN MODELO PARA PREDECIR UN FENOMENO O EL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA.

Asumiendo una relación general, ésta la expresamos:

$$F = f(\rho, V, D, \mu) \quad (1)$$

Expresando cada parámetro en términos de sus dimensiones M, L, T que se refieren a la masa, longitud y tiempo.

$$F : \left| \frac{ML}{T^2} \right| ;$$

$$\rho : \left| \frac{M}{L^3} \right|$$

$$V : \left| \frac{L}{T} \right|$$

$$D : \left| L \right|$$

$$\mu : \left| \frac{M}{LT} \right|$$

Dividiendo F, μ y ρ entre ρ en la ecuación (1) eliminamos todos los términos que contengan la dimensión M.

$$\frac{F}{\rho} = f\left(V, D, \frac{\mu}{\rho}\right) \quad (2)$$

Usando ahora V para eliminar la dimensión del tiempo:

$$\frac{F}{\rho V^2} = f\left(D, \frac{\mu}{\rho V}\right)$$

Y finalmente usando D para eliminar la dimensión de longitud,

$$\frac{F}{\rho V^2 D^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho V D}\right)$$

Ahora todos los términos son adimensionales. Para mayor claridad paso por paso ver referencia 2. La ventaja de este procedimiento es reducir de 4 parámetros independientes en sólo uno. Buckingham demostró que en general, el número de parámetros independientes pueden reducirse para el número de dimensiones independientes, en este caso, masa, longitud y tiempo, por el uso de ésta técnica. (Este es el llamado teorema Pi de Buckingham).

En 1958 Somerton³ usó grupos adimensionales para representar la velocidad de perforación en función de las revoluciones de la barrena, y carga sobre la barrena por unidad de resistencia de la roca a la perforación, los dos grupos fueron relacionados en pruebas de laboratorio. Simon⁴, combinó estos dos grupos en un solo parámetro adimensional.

Lo poderoso de este método, y el uso de datos más confiables recomiendan su uso en el problema de la perforación.

II.5.2 Programación Geométrica. La programación geométrica es nueva, que su potencialidad aún no es alcanzada plenamente. Poco se ha sabido con respecto a este tipo de programación⁵. Más conocida, sin embargo, es el método de programación lineal el cual fué establecido como un método práctico y poderoso para resolver diversos problemas⁶.

La programación lineal está afectada con problemas de maximización o minimización; generalmente maximización de utilidades y minimización de costos, y sujetos a una o más restricciones.

La programación lineal puede ser aplicada sólo cuando la función objetivo y las restricciones pueden ser expresadas como funciones lineales de los parámetros involucrados. La programación geométrica, por otro lado, puede ser usada en un campo muy amplio, y sólo designa a la función objetivo y a las restricciones expresándolos en términos de exponentes positivos y/o negativos de los parámetros. De este modo la programación lineal cae, en un sentido en un caso especial en el amplio campo de los problemas que pueden ser resueltos por los métodos de programación geométrica.

La programación geométrica ha sido descrita como la explotación inexorable de las propiedades matemáticas de las desigualdades, principalmente está pretendiendo relacionar la aritmética y la geometría, he de aquí su nombre.

Es común encontrar problemas de optimización que envuelven a las funciones objetivo expresadas en términos de exponentes para diversos parámetros medibles. Tradicionalmente, si solo un parámetro independiente está involucrado, uno puede esperar la optimización de la función objetivo en un punto en donde su derivada con respecto a aquel parámetro desaparece. Así mismo, si aparece más de un parámetro, las derivadas parciales respectivas pueden ser igualadas a cero y buscar su solución através de ecuaciones simultáneas. Problemas similares a estos pueden ser manejados de una manera conveniente por programación geométrica. Sin embargo, el hecho de que los problemas se han complicado involucrando también a una o más restricciones, en adición con la función objetivo, es por lo que aumentan los alcances de la programación geométrica de un ardid matemático a el de una disciplina regular aplicable a un rango muy grande de problemas⁷. Por fortuna se tiene a la mano una disciplina como la anterior para solucionar los problemas del costo de la optimización en el campo de la perforación rotatoria.

CAPITULO III
ASPECTOS GENERALES SOBRE LA
PERFORACION DE POZOS PETROLEROS

III.1 OBJETIVO DE LA PERFORACION

El objetivo principal que se persigue al perforar un pozo de gas o aceite es suministrar un conducto del yacimiento a la superficie que permita la extracción de los fluidos del yacimiento.

Por otra parte, los pozos proporcionan durante la perforación información geológica que permite si es debidamente aprovechada, explotar racionalmente al yacimiento, evaluar y descubrir nuevos recursos. El diámetro del pozo, el equipo usado para perforarlo y producirlo se determinan por medio de estudios técnico-económicos.

Las diferentes consideraciones económicas que generalmente se toman en cuenta para la programación y desarrollo de la perforación del pozo, están subordinadas al objetivo principal: perforar el pozo con el menor costo posible. El costo total por metro depende entre otras cosas, de la velocidad promedio de la perforación y del total de metros perforados por la barrena.

III.2 EQUIPO DE PERFORACION ROTATORIO. (Fig. 1)

El equipo de perforación rotatorio se puede clasificar de acuerdo a sus funciones, en:

- a) Torre o mástil y otras estructuras de soporte
- b) Planta de energía
- c) Aparejo elevador
- d) Aparejo de perforación

e) Sistema circulatorio.

III.2.1. Torre o mástil y otras estructuras de soporte. Durante los primeros años de la perforación se utilizó la torre para sostener el equipo de perforación en posición de trabajo y suministrar el espacio necesario - para el manejo del aparejo elevador con el que se levantan las pesadas herramientas de perforación y las columnas de tuberías de revestimiento. Sin embargo, debido a las dificultades para transportarla y a que el montaje - era muy lento, se comenzó a utilizar el mástil de perforación, el cual facilita el desarme o plegado de las partes componentes suficientemente pequeñas y ligeras para transportarse en camiones y tractores. El mástil puede moverse a una nueva localización y montarse en sólo una fracción del tiempo necesario para erigir una torre.

Otro elemento de soporte importante es la subestructura, la - cual se utiliza con el objeto de distribuir la carga correctamente y proporcionar el espacio suficiente para instalar las válvulas de seguridad - (preventores). Las subestructuras están diseñadas de tal modo que pueden fácilmente desmantelarse y transportarse de una localización a otra como una unidad con el equipo de perforación. Son adaptables a una gran variedad de condiciones topográficas y del suelo, y en muchas ocasiones, pueden erigirse directamente sobre la superficie natural del suelo sin la necesidad de colocar soportes complicados de madera o concreto.

III.2.2. Plantas de energía. La planta de energía es el corazón de la torre de perforación. La energía producida por la planta del equipo de perforación rotatorio se utiliza principalmente en tres operaciones:

- 1) Girar la columna de perforación
- 2) Operar las bombas de lodos
- 3) Sacar la columna de perforación

Las dos primeras operaciones consumen simultáneamente la mayor parte de la energía producida por el generador. Cuando se está sacando la

columna de perforación las otras operaciones están suspendidas.

Históricamente las fuentes de energía han variado en forma significativa desde la utilización de equipos de vapor, pasando por los equipos de combustión interna hasta los actuales motores eléctricos. Las máquinas de pistón libre y las turbinas de gas pueden tener aplicación en los equipos de perforación pero no han sido muy utilizados.

III.2.3. Aparejo Elevador. Los elementos del equipo de perforación rotatorio utilizados para soportar la columna de perforación, manejar la tubería de perforación y otras cargas pesadas son:

- El malacate
- El sistema de aparejo de poleas (incluye la corona, polea viajera y cable de perforación).
- Equipo de elevación de misceláneos como ganchos, elevadores, etc.

Estos elementos deben seleccionarse cuidadosamente para que tengan la misma capacidad de carga de modo que funcionen conjuntamente durante el levantamiento en condiciones extremas de esfuerzo.

El malacate. Es una de las partes principales del equipo de perforación; desempeña las siguientes funciones: a) es el centro de control desde donde el perforador opera el equipo; b) contiene los embragues, cadenas, engranes, aceleradores de las máquinas y otros mecanismos que permiten dirigir la potencia de los motores a la operación particular que desarrolla.

La corona está colocada en la parte más alta de la torre o mástil, debe ser capaz de soportar la carga máxima que pueda suspenderse de la polea viajera (elevadora) así como el peso muerto del aparejo.

Las funciones que desempeña la polea viajera son: soportar la columna de perforación, sacar y meter la tubería de perforación, así como armar y bajar la columna de tubería de revestimiento dentro del pozo.

El cable elevador proporciona el medio para aplicar el momento de torsión del tambor del malacate para proveer una fuerza elevadora en el gancho de la polea viajera.

El gancho, suministra una conexión flexible con la unión giratoria y la soporta a la vez, así como a los elevadores usados para manejar la tubería de perforación y de revestimiento.

III.2.4. Aparejo de perforación. Los elementos del aparejo de perforación son:

- La unión giratoria (swivel)
- La flecha o vástago de transmisión (kelly)
- La mesa rotatoria
- La columna de perforación incluye a la tubería de perforación, lastrabarreras (drill collars) y la barrena.

La unión giratoria. Desempeña principalmente tres funciones:

- 1). Soportar a la flecha y tubería de perforación
- 2). Permitir la rotación libre de la flecha y de la tubería de perforación y
- 3). Suministrar una conexión para la manguera que inyectará el lodo al fondo del pozo a través de la tubería de perforación.

La unión giratoria está suspendida de su asa del gancho de la polea viajera. La entrada de fluido en la parte superior de ésta es un tubo curvado al que se le denomina "cuello de ganso", que proporciona una conexión dirigida hacia abajo para la manguera.

La flecha o vástago de transmisión. Está conectada en su parte superior a la unión giratoria y en su parte inferior a la tubería de perforación. Es hueca y el lodo circula a través de ésta para después pasar a la tubería de perforación y llegar al fondo del agujero. La flecha puede ser de sección cuadrada, hexagonal o estriada, con objeto de transmitir el momento de torsión de la mesa rotatoria a la tubería de perforación. Está diseñada para

montarse en una abertura cuadrada o hexagonal que tiene la mesa rotatoria, en una pieza llamada buje de transmisión que va sentada dentro del buje maestro o buje de rotación de la mesa. Al girar el buje maestro, el buje de transmisión gira con él, dándole así, rotación a la sarta de perforación. Se usa entre la flecha y la unión superior de la tubería de perforación un sustituto que protege a la flecha. El uso de este sustituto elimina la necesidad de desenroscar el extremo inferior de la flecha durante las operaciones de perforación y así evita el desgaste de la rosca en su unión.

La principal función de la mesa rotatoria es la de transmitir el momento de torsión (torque) e impartir el movimiento giratorio a la flecha y a la tubería de perforación. También se utiliza para soportar la columna de perforación en el pozo cuando está suspendida en posición estacionaria colocando cuñas en las boquillas de la mesa y para soportar la columna de tubería de revestimiento que se va a bajar al pozo.

La columna de perforación debe ser capaz de transmitir a la barrena el torque impreso por la mesa rotatoria. Debe suministrar un conducto cerrado para el flujo del fluido de perforación de la unión giratoria en su extremo superior, a los ductos de la barrena en su extremo inferior. La columna de perforación está constituida por un conjunto de tubos de acero cilíndricos conectados en sus extremos por juntas de tuberías, las cuales cada una contiene roscas (roscas interior-caja; rosca exterior-piñón). A diferentes intervalos se pueden mostrar protectores de hule para reducir el desgaste provocado por el roce de la columna contra las paredes del pozo o la superficie interior de la tubería de revestimiento dentro de la cual tiene que operar con frecuencia.

La sección inferior de la columna de perforación está constituida por los lastrabarreras que son tubos de acero de paredes muy gruesas. Su principal función es la de proporcionar peso y rigidez a la porción inferior de la sarta sujeta a compresión, torsión y esfuerzo de flexión; por lo que permiten establecer condiciones favorables para evitar torsiones y estabilizar el movimiento de la tubería de perforación cuando se opera con

alta presión en la barrena y altas velocidades de rotación.

Las barrenas constituyen la herramienta cortadora. En cierto sentido la barrena es el punto central de todo el equipo de perforación. Se monta en el extremo inferior de la columna de perforación y se sujeta al la trabarrena con una unión de tubería o sustituto. En el sistema rotatorio de perforación, el agujero se hace bajando la columna de tubería hasta que la barrena toca o se acerca al fondo del agujero. Se establece la circulación del fluido de perforación por el interior de la tubería el cual es descargado a través de las toberas de la barrena, de modo que ésta y el fondo del agujero se mantengan limpios. Se establece la rotación de la tubería por medio de la mesa rotatoria.

La barrena que deberá seleccionarse dependerá del tipo de formación que va a ser perforada, considerando también varios factores tales como el peso que se le va a aplicar, el tipo de lodo, velocidad de rotación, capacidad del equipo, etc.

III.2.5. El Sistema Circulatorio. La función principal del sistema circulatorio es transportar los cortes de la barrena del fondo del pozo a la superficie, forzando al fluido por la columna de perforación hacia el fondo del pozo y regresándolo a la superficie por el espacio anular y a través de algunas instalaciones superficiales diseñadas para separar los recortes de perforación, acondicionar y almacenar el exceso de fluido. Los elementos esenciales que constityen el sistema son:

- Fluido de perforación
- Bombas de lodos (normalmente dos) y sus líneas y cabezales de succión y de descarga
- Manguera de lodos
- Unión giratoria -sarta de perforación- espacio anular
- El canal de lodo
- Las presas de lodos (asentamiento y succión)

Como partes adicionales, pero no esenciales, se encuentran el equipo mezclador de lodos, cribas vibratorias y otros implementos para el acondicionamiento de lodos.

Las bombas de lodos tienen la función de impulsar al fluido de perforación de modo que pueda circular en volumen apropiado y con la velocidad necesaria, por la columna de perforación y de regreso a la superficie por el espacio anular.

La manguera de lodos es una manguera blindada construida de hule, lona gruesa, alambre y malla metálica. Es la conexión flexible entre el tubo vertical y el cuello de ganso de la unión giratoria.

El canal de lodo se utiliza para transportar el lodo que regresa del pozo hacia las presas de lodos. De éstas, las bombas succionan el lodo para nuevamente enviarlo hacia el pozo.

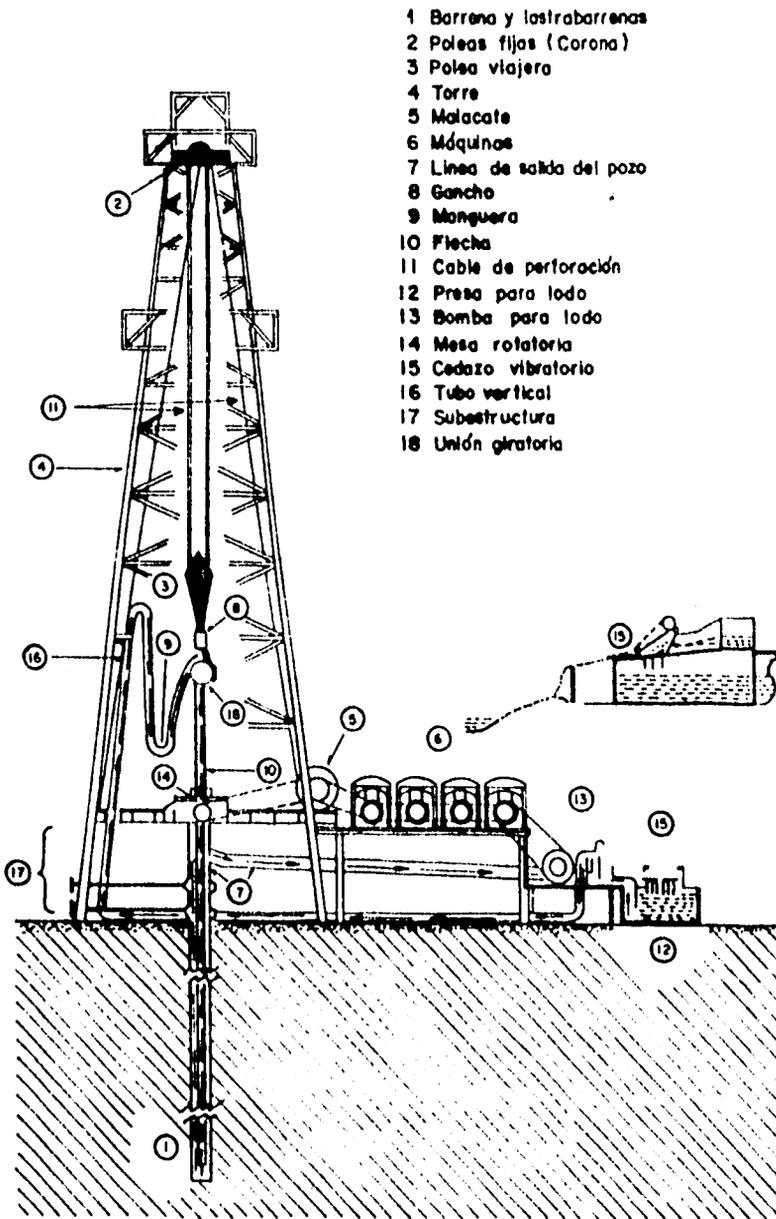


FIG. 1 COMPONENTES BASICOS DE UN EQUIPO DE PERFORACION ROTATORIO

CAPITULO IV
 DESARROLLO DE LA
 PERFORACION ROTATORIA

El desarrollo de la perforación rotatoria se puede dividir en cuatro períodos: 1). período de concepción -1900 a 1920; 2). período de desarrollo -1920 a 1948; 3). período científico -1948 a 1968; y el período de automatización que se inició en 1968¹.

En la tabla 1 se muestra en forma sintetizada el desarrollo de estos cuatro períodos.

T A B L A 1

PERIODO	AÑOS QUE COMPRENDIO	DESARROLLO
CONCEPCION	1900 a 1920	Inicios de la perforación rotatoria -1900- (Spindletop). Tuberías de revestimiento y cementaciones -1904 a 1909- (Halliburton). Introducción de las barrenas de conos -1909- (Hughes). Lodos de perforación -1914- 1916 (National Lead Co.)
DESARROLLO	1920 a 1948	Mayor capacidad de carga de las torres. Mejores barrenas Mejores cementos

Continuación de la Tabla 1

		Lodos especiales
CIENTIFICO	1948 - 1968	<ul style="list-style-type: none">. Aumento de las investigaciones de la perforación.. Mayor conocimiento de los principios hidráulicos.. Mejoras significativas en las barrenas.. Mejoras en la tecnología del lodo.. Desarrollo de los modelos matemáticos de perforación.. Optimización de la perforación.
AUTOMATIZACION	- 1968	<ul style="list-style-type: none">. Automatización en la torre y en el manejo del lodo.. Operación en la torre por computadora en circuito cerrado (closed-loop).. Control de las variables de la perforación.

De los períodos mencionados anteriormente, tiene capital importancia para este trabajo, el denominado científico, pues fue aquí cuando se desarrollaron los principales modelos matemáticos de perforación, de los cuales se presenta a continuación una breve historia.

IV .1 DESARROLLO HISTORICO DE LOS PRINCIPALES MODELOS DE PERFORACION

A partir de 1948 las empresas petroleras empezaron a aportar grandes cantidades de dinero para la investigación, debido a que las opera

ciones de perforación se hacían más y más complejas y por tanto más costosas.

En 1948 los ingenieros de la Cía Humble publicaron un reporte sobre el estudio de las técnicas de la perforación². La mayor parte de este reporte trata de los efectos hidráulicos sobre la perforación con barrenas de arrastre. Ellos concluyeron que:

- a). La velocidad de perforación es proporcional a la velocidad del fluido en las toberas de la barrena a varios gastos.
- b). La velocidad de perforación es proporcional al peso sobre la barrena arriba del punto de embolamiento.

El impacto que provocaron estas conclusiones fueron de consideración. Todos los estudios se enfocaron en concentrar la potencia hidráulica sobre la barrena.

En 1949 la Cía Humble publicó un segundo reporte pero las conclusiones se referían exclusivamente a barrenas de arrastre³. En 1959, sin embargo, éstos reportaron resultados favorables también sobre los efectos hidráulicos en la barrena para diferentes velocidades de chorro⁴.

En este reporte concluyeron que:

- a). La mejor barrena dependerá del tipo de formación que va a ser perforada.
- b). Las velocidades de chorro no afectan solamente a la velocidad de perforación, sino también a la vida de la barrena.
- c). Se necesita una mínima velocidad de chorro.
- d). La velocidad de perforación es función de la velocidad en la boquilla a varios gastos, pero en este caso no es directamente proporcional.
- e). La velocidad de perforación es función de la velocidad de rotación y del peso sobre la barrena, donde la dureza de la formación también es un factor.

En 1951 los ingenieros de la Cía Gulf publicaron un artículo importante indicando que la pérdida de circulación era causada frecuentemente

al bajar la tubería rápidamente⁵. Esto condujo a tener un mejor control de la presión en el pozo.

En 1952 de los resultados de una investigación, la Cía Humble reportó otros factores que tienen influencia en la velocidad de perforación. Estos factores fueron las propiedades del fluido de perforación, es decir densidad, viscosidad, filtrado, gel y contenido de sólidos⁶. Este reporte más tarde confirmó, por experiencia de campo, que la presión hidrostática ejercida por el fluido de perforación en el fondo del pozo tiene influencia en la velocidad de perforación.

En 1954 las barrenas convencionales de dientes pulidos fueron reemplazadas por las barrenas de insertos de carburo de tungsteno. Estas barrenas fueron probadas con éxito particularmente en formaciones muy duras y rocas abrasivas.

Hasta aquí las mejores tecnológicas estuvieron dirigidas a reducir el costo de la perforación y en optimizar la eficiencia en el fondo del agujero; y no fué hasta 1958 en que Speer publicó un artículo en donde muestra como puede optimizarse la perforación⁷. Las conclusiones del artículo de Speer son interesantes:

1. El ritmo de penetración de una barrena varía aproximadamente en proporción directa con el peso aplicado sobre ésta, si hay una circulación suficiente que permita limpiar el fondo del agujero.
2. El peso óptimo sobre la barrena varía con la perforabilidad de la formación.
3. El ritmo de penetración de las barrenas bajo condiciones de pruebas de laboratorio es directamente proporcional a la velocidad de rotación.
4. El ritmo de penetración de las barrenas bajo condiciones de campo varía en función decreciente a la velocidad de rotación.
5. La óptima velocidad rotatoria varía inversamente con el peso sobre la barrena.

6. La potencia hidráulica para obtener una limpieza óptima varía linealmente con el peso.
7. La mínima velocidad del fluido en la boquilla es de cerca de 170 ft/sec en formaciones suaves y de 225 ft/sec en formaciones medio duras.
8. La perforación puede ser optimizada si se cambian las relaciones entre (a) velocidad de perforación y potencia hidráulica, (b) velocidad de perforación y peso sobre barrena, y (c) óptima velocidad rotatoria y peso sobre barrena.

Aunque las conclusiones de Speer fueron en su mayor parte empíricas y basadas en condiciones de campo, estas conclusiones coinciden justamente con resultados de laboratorio publicados en aquellos días y posteriormente ratificados. En ese año O'Brien y Goins de la Cía Gulf publicaron un artículo sobre las prácticas sobre el control de la presión en el pozo, el cual hizo desaparecer muchos conceptos erróneos respecto al origen de los brotes⁸.

En 1959, Goins y Kendall de la Cía Gulf publicaron un artículo sobre la optimización del sistema hidráulico⁹. Ellos probaron matemáticamente que la potencia hidráulica sobre la barrena se maximizó cuando dos terceras partes de la caída de presión fué a través de la barrena y la otra tercera parte en el resto del sistema.

En 1957 Goins de la Cía. Gulf y Cunningham de la Cía Hughes Tool publicaron los resultados de las investigaciones llevadas a cabo con una microbarrena de 1 1/4 de pulgada, indicando el efecto de las propiedades del lodo sobre la velocidad de perforación¹⁰. En 1959, Garnier and VanLingen de la Koninklyke Shell en Holanda investigaron los efectos de presión bajo la barrena¹¹.

En 1960 Cunningham de la Cía Hughes reportó un artículo sobre cómo afecta la velocidad de rotación en el funcionamiento y en el costo¹².

En 1963 Galle and Woods de la Cía. Hughes publicaron el cuarto artículo de una serie de éstos que trata sobre el óptimo peso y combinacio-

nes de velocidades rotatorias¹³. En 1967 Cheatham y Gnirk de la Universidad de Rice escribieron una crítica sobre los aspectos fundamentales de la deformación de la roca y fallas¹⁴, y en el mismo año, Yang and Gray de la Universidad de Texas publicaron el segundo de dos artículos sobre pruebas individuales sobre el impacto del diente de la barrena¹⁵.

CAPITULO V
PRINCIPALES VARIABLES
QUE INTERVIENEN EN LOS MODELOS
MATEMATICOS DE PERFORACION

Las experiencias de laboratorio y de campo han demostrado el efecto de las diversas variables que influyen en la velocidad de perforación.

Las variables que intervienen en la perforación de pozos pueden clasificarse en 2 tipos:

- 1). Variables alterables y
- 2). Variables que permanecen inalterables en el proceso (parámetros).

A continuación se listan las variables anteriores.

VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA PERFORACION⁶

Alterables	Inalterables (parámetros)
LODO	
Tipo	Condiciones atmosféricas
Contenido de sólidos	Localización
Viscosidad	Condiciones del equipo
Pérdida de fluido	Flexibilidad del equipo
Densidad	Gases corrosivos en el agujero
HIDRAULICA	
Presión de la bomba	Temperatura en el fondo del pozo
Velocidad de chorro en la barrena	Tiempo que tarda un viaje redondo (sacar y meter la barrena)

Gasto	
Velocidad en el espacio anular	Propiedades de la roca y de las formaciones geológicas
TIPO DE BARRENA	Problemas en el agujero
PESO SOBRE LA BARRENA	Disponibilidad de agua
VELOCIDAD DE ROTACION	Tipo de formación perforada
	Eficiencia de la cuadrilla
	Profundidad

Esta clasificación no es muy rigurosa, ya que algunas de las variables que se consideran como inalterables (parámetros) pueden variar al cambiar algunas de las consideradas alterables. Por ejemplo las fuerzas de compresión y de tensión de las rocas se consideran constantes, pero al estar perforando, las propiedades de la roca se alteran debido entre otras cosas al cambio del fluido de perforación y al tipo de barrena, por lo que se tiene una relación muy estrecha entre estas variables.

Para considerar cual de las variables deben seleccionarse para la optimización matemática, la investigación y la experiencia de campo sugieren seis: cuatro variables alterables y dos inalterables (parámetros). Las variables alterables son:

- 1). El lodo
- 2). Hidráulica
- 3). Tipo de barrena y
- 4). La relación peso sobre la barrena-velocidad de rotación

Los parámetros son:

- 1). Formación que va a ser perforada y
- 2). La profundidad.

A continuación se hará una breve descripción de como afectan estos factores en la velocidad de perforación, tomando como base observaciones

hechas en el campo y en pruebas de laboratorio.

V.1. LODO

Un programa optimizado de perforación debe contar con un programa de lodos detallado, ya que el fluido de perforación es uno de los factores más importantes que afectan a la velocidad de perforación. La selección del mejor lodo para una área en particular, permitirá el uso de una hidráulica óptima para limpiar la barrena y el agujero, obteniendo con esto una relación peso-RPM óptima y un uso apropiado de la barrena. Las principales funciones que debe cumplir un fluido de perforación son:

1. Arrastrar los recortes de la formación hacia la superficie
2. Controlar las presiones subsuperficiales
3. Enfriar y lubricar la sarta de perforación
4. Limpiar el fondo del agujero
5. Ayudar a la evaluación de la formación
6. Proporcionar protección a la productividad de la formación

Para cumplir satisfactoriamente con estas funciones, el fluido de perforación debe tener sus propiedades (viscosidad, densidad, gel, pérdida de filtrado, pH, etc.) bien definidas.

V.2. HIDRAULICA

Es el comportamiento que sigue el fluido de perforación de acuerdo con la mecánica de los fluidos a través de todo su recorrido en el circuito de perforación.

El programa hidráulico de perforación, es un programa de presión y gasto, adaptado al equipo y condiciones de pozo disponibles, diámetros de tuberías, profundidad del pozo, tipo de formación, densidad del lodo, etc., con el objeto de lograr la mayor velocidad de perforación. Para obtener un programa hidráulico óptimo es necesario tener un balance apro-

piado de los elementos que lo constituyen, obteniendo con esto, una mejor limpieza de la barrena y del fondo del agujero con la mínima potencia requerida por la bomba. Estos elementos son: el gasto, presión de bombeo, relación gasto-potencia de la bomba y fluido de perforación.

1. Gasto. Depende del diámetro del pozo, del diámetro de la tubería de perforación y de la velocidad anular mínima para acarrear los recortes a la superficie.

Velocidad anular. Es la velocidad ascendente con la que el lodo se levanta por el espacio anular. Depende de la bomba y está en razón directa al gasto de la misma y en razón inversa al área en el espacio anular.

$$v = \frac{24.51 Q}{D_b^2 - d_{tp}^2}$$

donde:

V = velocidad anular (pies/min)

Q = gasto (gal/min)

D_b = diámetro de la barrena |pgs|

d_{tp} = diámetro ext. tubería de perf. |pgs|

¶

2. Presión de bombeo. Es la presión necesaria para desplazar al fluido a través de todo su recorrido en el circuito de perforación. La presión de la bomba es consumida por:
 - a). Caída de presión por fricción en las conexiones superficiales
 - b). Caída de presión por fricción dentro de la tubería de perforación y lastrabarreras
 - c). Aceleración del fluido de perforación a través de las toberas
 - d). Caída de presión en el espacio anular

Matemáticamente se puede expresar como:

$$PB = PS + PITP + PIDC + Pb + PEDC + PETP$$

donde:

PB = Presión de bombeo

PS = Pérdida de presión por fricción en las conexiones superficiales

PITP = Pérdida de presión por fricción en el interior de la tubería de perforación

PIDC = Pérdida de presión por fricción en el interior de los lastrabarrenas

Pb = Pérdida de presión en la barrena

PEDC = Pérdida de presión en el exterior de los lastrabarrenas

PETP = Pérdida de presión en el exterior de la tubería de perforación

Para el cálculo de las caídas de presión anteriores se considerará el régimen de flujo que se tenga y el tipo de fluido de perforación utilizado. Por lo general el flujo en el interior de la sarta de perforación y en las conexiones superficiales es un flujo turbulento, mientras que en el espacio anular se tendrá flujo laminar.

3. Relación Gasto-Potencia de la Bomba. Matemáticamente la potencia en la superficie, es el producto de la presión por el gasto.

$$H = \frac{PB \times Q}{1714}$$

donde:

H = potencia hidráulica (caballos de fuerza)

PB = presión de bombeo (lb/pg²)

Q = Gasto (gal/min)

A gasto constante, pero con diferentes diámetros de toberas en la barrena y condiciones iguales se tendrán diferentes presiones superficiales.

Lo anterior dice que se puede seleccionar la potencia necesaria, según el gasto y diámetro de las toberas.

Se puede seleccionar el gasto óptimo para perforar un intervalo aprovechando al máximo la potencia de la bomba, según el criterio seleccionado (A mayor gasto => mayor potencia).

4. Densidad del Fluido de Perforación. Determinará la pérdida de circulación y la velocidad para el acarreo de los recortes a la superficie. Se deberá considerar a las presiones de fondo obtenidas para que se elabore el programa de lodos con la densidad adecuada, ya que si se aumenta mucho la densidad del lodo, se tendrá una mayor presión en el fondo del agujero logrando con esto que la penetración de los dientes de la barrena sea menor, teniendo como consecuencia una velocidad de perforación menor. Esta reducción en la velocidad se debe a un incremento en la presión diferencial (Presión hidrostática - Presión de formación), ya que la presión hidrostática aumenta, al aumentar la densidad.

Se ha comprobado por medio de pruebas de laboratorio que si la presión de formación excede a la presión hidrostática, la velocidad de perforación aumenta¹. El efecto de la presión de formación mayor que la presión ejercida por la columna de lodo con respecto a la velocidad de perforación se puede ver en la Fig. 1.

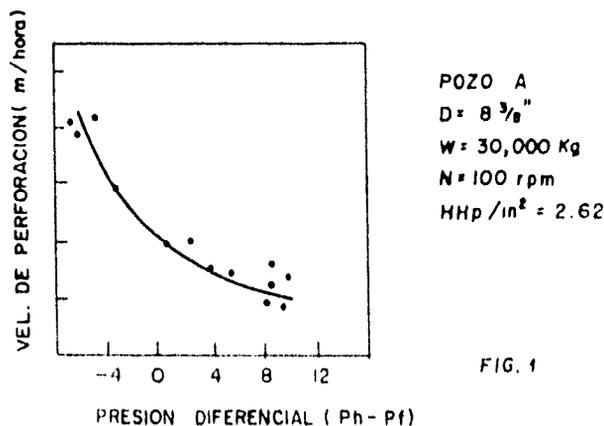


FIG. 1

Para obtener una hidráulica óptima los elementos que la constituyen deben trabajar adecuadamente para lograr la mayor velocidad de perforación. La Fig. 2 muestra como están interrelacionados estos elementos manteniendo una presión de bombeo constante. En ésta se observa que si se incrementa el gasto aumenta la potencia hidráulica de la bomba; a su vez la potencia hidráulica de chorro se incrementará hasta llegar a la máxima potencia que se tiene en las toberas (la cual es menor a la de la bomba) y empieza a disminuir debido a que al incrementarse el gasto aumentan las pérdidas de presión en el sistema; a la máxima potencia del chorro se tiene el impacto máximo del fluido en las toberas. La velocidad anular se incrementa y la velocidad de chorro decrece.

Algunas veces estas interrelaciones son difíciles de definir. Por ejemplo para obtener un balance apropiado entre el gasto y la velocidad en el espacio anular dependerá de la limpieza sobre la barrena, de la erosión en el fondo del agujero causada por un régimen de flujo turbulento y problemas de pérdidas de circulación. La velocidad de chorro óptima es función de las características de la formación, del contenido de sólidos en el lodo, del peso sobre la barrena, del tipo de barrena y de las limitaciones en la velocidad anular.

Los factores principales que deben considerarse para que un programa hidráulico tenga éxito son: a) Limpieza sobre la barrena y b) Limpieza del fondo del agujero.

- a). Limpieza sobre la barrena. Una velocidad de chorro adecuada y el impacto del fluido son necesarios para la limpieza de la barrena. Se recomienda una velocidad de chorro entre 250 y 450 pie/seg.
- b). Limpieza del fondo del agujero. El lodo al estar circulando debe levantar los recortes del agujero hacia la superficie, por lo que se requiere una velocidad anular adecuada para evitar que éstos se asienten debido a la acción de la gravedad. La efectividad del lodo para sacar los recortes depende de varios factores: velocidad en el espacio anular, viscosidad, densidad, etc.

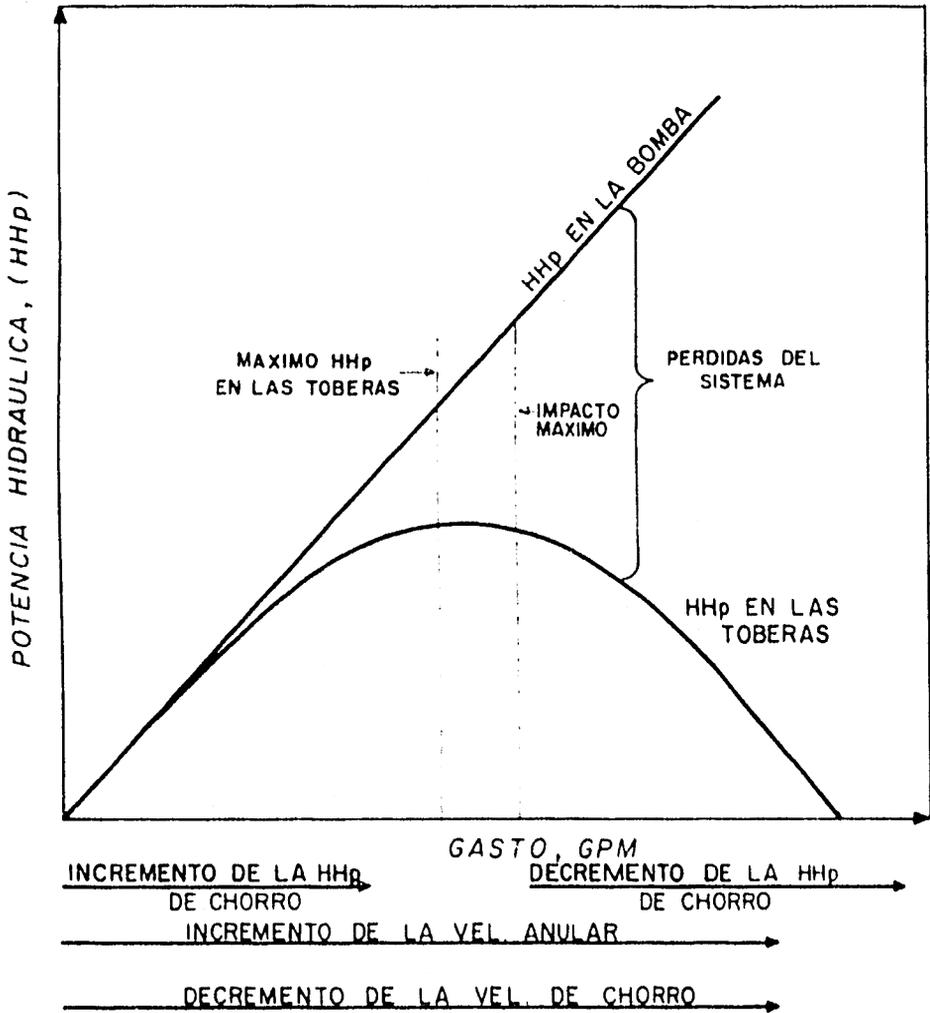


FIG. 2 INTERRELACIONES ENTRE LOS ELEMENTOS HIDRAULICOS Y LA PRESION DE BOMBEO CONSTANTE

V.3. SELECCION DE LA BARRENA

Se deben conocer los diferentes tipos de barrenas, así como el mejor uso de éstas en las formaciones que van a ser perforadas. El tipo de barrena seleccionada para perforar un intervalo a cierta profundidad en el agujero se hará de acuerdo al tipo de formación. Generalmente las formaciones se clasifican como "suaves" o "duras", de acuerdo con la resistencia a la compresión o fractura de la roca.

La clasificación de las barrenas para que éstas tengan un uso adecuado se hace considerando tres dígitos (I, II, III), que son los siguientes:

I. El primer dígito nos indica el tipo de formación:

- 1). Suave
- 2). Mediana
- 3). Dura Para barrenas convencionales
- 4). Muy dura
- 5). Suave
- 6). Mediana
- 7). Medio dura Para barrenas de insertos
- 8). Dura
- 9). Muy dura

II. El segundo dígito nos indica el grado de dureza a suavidad del tipo de formación:

- 1). Muy suave
- 2). Suave
- 3). Mediana
- 4). Dura

III. El tercer dígito está en función de las características mecánicas de la barrena correspondiendo:

- 1). Baleros no sellados sin protección en la hilera de calibre
- 2). Hilera de calibre dientes en forma de "T"

- 3). Baleros no sellados con protección en la hilera de calibre
- 4). Baleros sellados sin protección en la hilera de calibre
- 5). Baleros sellados con protección en la hilera de calibre
- 6). Barrena de chumacera con protección en la hilera de calibre y sellos

Grado de desgaste de una barrena.

El grado de desgaste de una barrena se mide por el estado que guardan en un momento dado dientes, baleros y el diámetro de ésta; este desgaste por lo general se mide en octavos. Para lo anterior se utilizan las siguientes letras:

T : Dientes
 B : Baleros
 I ó 0 : Significa que la barrena está dentro o fuera del diámetro.

Esto se puede ilustrar con un ejemplo:

T4 B5 I

esto quiere decir que el desgaste en dientes es $4/8$, en baleros $5/8$ y está dentro del diámetro, significando lo anterior que la barrena se ha desgastado uniformemente, por lo que se concluye que la barrena es adecuada para el tipo de formación.

V.4 RELACION PESO SOBRE LA BARRENA-VELOCIDAD DE LA ROTARIA.

El peso que se aplica a la barrena y la velocidad a la cual gira ésta, está íntimamente relacionados en la perforación rotatoria.

V.4.1. Peso Sobre la Barrena. Sobre la influencia de esta variable se citan dos casos: El primer caso será para formaciones duras y con el fin de facilitar la comprensión se citan dos tipos de rocas, la cuarzita y el mármol que según la escala de dureza de Moss tienen dureza 7 y 4 respectiva-

mente.

Para el mármol tal como se indica en la fig. 3, el ritmo de penetración es directamente proporcional al peso de la barrena²⁻⁴⁻⁵, en cambio para la cuarzita se necesita un peso inicial capaz de vencer el esfuerzo de compresión de la roca (para el ejemplo 9000 kg/cm²), a partir del cual su comportamiento sigue en proporción directa al peso. El segundo caso considerado es para formaciones suaves como es lógico pensar el ritmo de penetración también varía en forma proporcional al peso sobre la barrena, siempre y cuando se tenga la limpieza adecuada, tal como se muestra en la Fig. 4, de otra manera los recortes impedirán el avance de la barrena.

Un exceso de peso sobre la barrena en formaciones suaves incrementará la velocidad de perforación hasta el momento en el cual la hidráulica de la barrena no sea lo suficiente para remover los cortes generados provocando con esto problemas tales como embolamiento, atascamiento, etc.

Las siguientes figuras 5, 6 y 7 ilustran el efecto del peso en la barrena, en relación con la velocidad de penetración. Estas gráficas fueron formuladas por pruebas AAODC (Sociedad Americana de Contratistas de Perforación de Pozos Petroleros)³.

La Fig. 5 ilustra la distribución típica de los datos para una prueba individual. La Fig. 6 es una curva compuesta promediada para todas las pruebas llevadas a cabo con barrenas de conos. La Fig. 7 es una gráfica similar para pruebas con barrenas de insertos de carburo de tungsteno. Los datos indican que dentro de los límites investigados un 50% de aumento en el peso produce aproximadamente un 65% de aumento en la velocidad de perforación.

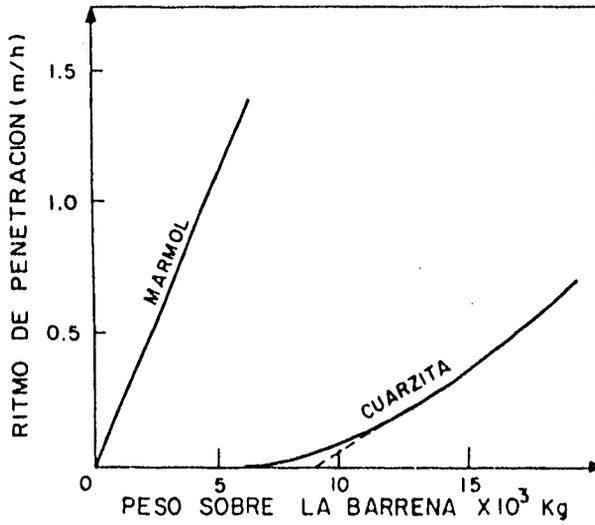


FIG. 3 VARIACION DEL RITMO DE PENETRACION CON EL PESO SOBRE LA BARRENA PARA FORMACIONES DURAS

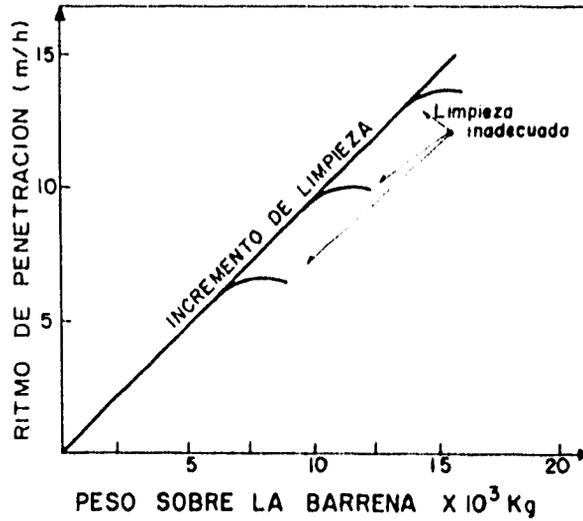


FIG. 4 VARIACION DEL RITMO DE PENETRACION CON EL PESO SOBRE LA BARRENA PARA FORMACIONES BLANDAS

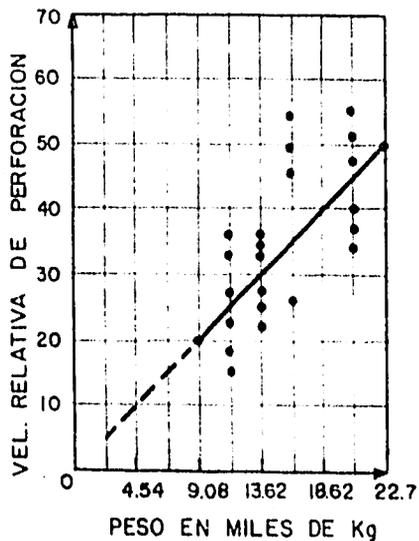


FIG. 5 EFECTO DEL PESO EN LA VELOCIDAD DE PENETRACION

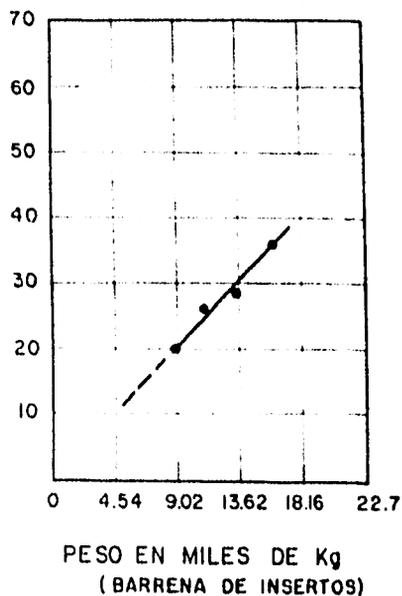
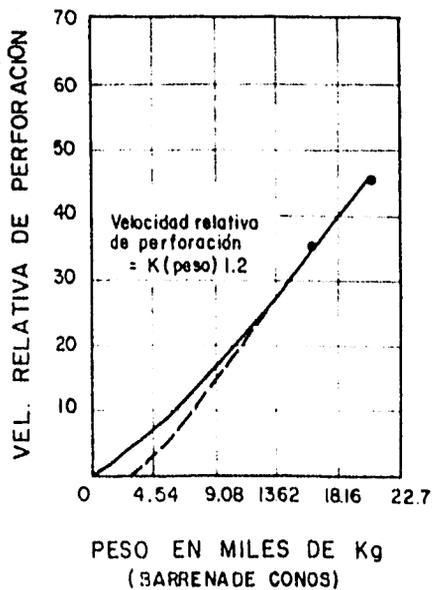


FIG. 6 y FIG. 7.- EFECTOS DEL PESO EN LA VELOCIDAD DE PENETRACION

Puesto que, las rocas de las formaciones difieren en su comportamiento respecto a la perforación, o la velocidad a la cual penetra la barrena a través de ellas, los resultados de las pruebas de velocidad de perforación se reportan a base de porcentajes. Para la realización de éstas pruebas se mantuvieron constantes a todos los demás factores a excepción del peso.

V.4.2 Velocidad de Rotación. Las investigaciones realizadas al respecto, señalan que para formaciones suaves, como se indica en la Fig. 8 el ritmo de penetración es directamente proporcional a la velocidad de rotación²⁻⁴⁻⁵; en cambio para formaciones semiduras y duras existe un límite de velocidad de rotación a partir del cual el ritmo de penetración tiende a permanecer constante.

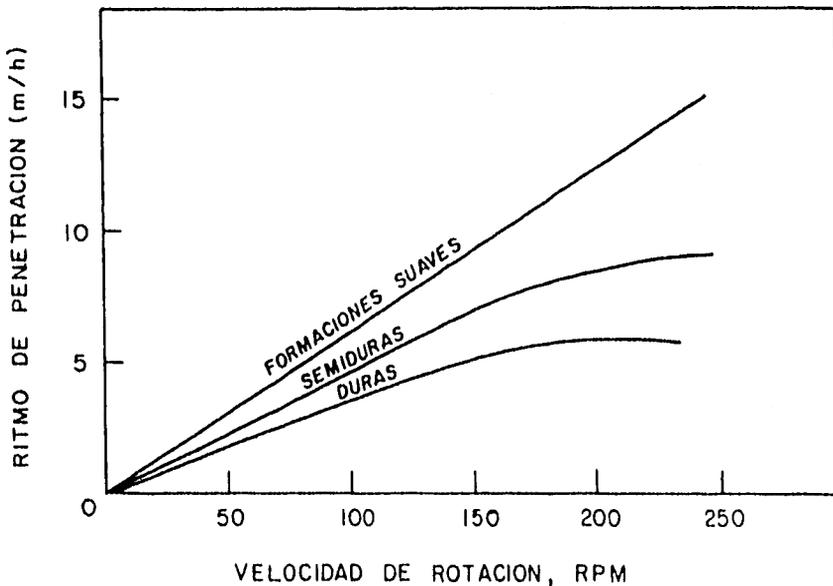


FIG. 8 VARIACION DE LA PENETRACION CON LA VELOCIDAD DE ROTACION (PESO CONSTANTE SOBRE BARRENA)

El efecto de la velocidad de rotación en la penetración con barras de diferentes tipos es más difícil de valorar que el efecto del peso en la barrena. La rotación de la sarta de perforación y la barrena cuando ésta se encuentra perforando, está asociada con vibraciones que se originan en ésta. Estas vibraciones probablemente influyen en la penetración de la barrena en la roca y pueden favorecer al fracturamiento de la roca y ayudar a la perforación.

La vibración excesiva hace que los materiales de dientes, baleros, etc., se dañen provocando con esto a que haya fallas por fatiga en la sarta. Por lo que se tiende a usar velocidades rotatorias más lentas con pesos mayores en la barrena para obtener mayor penetración.

Las figuras 9 y 10 muestran la relación obtenida entre la penetración y la velocidad de rotación para barrenas de conos e insertos.

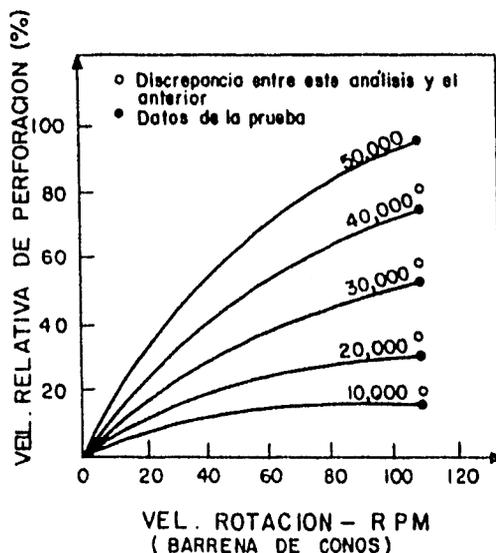
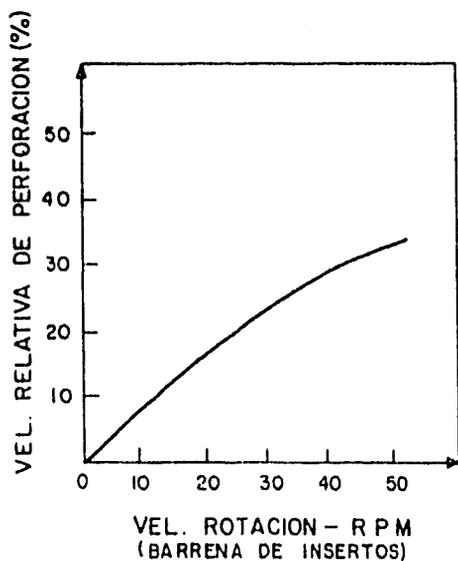


FIG. 9 y FIG.-10 EFECTOS DE LA VEL. DE ROTACION EN LA PENETRACION

Por lo que debido a condiciones de operación, se concluye que a medida que se aumenta el peso sobre la barrena es recomendable disminuir la velocidad de rotación. Tanto la velocidad de rotación como el peso sobre la barrena dentro de la perforación son variables muy importantes y de fácil control mecánico, debido a esto, muchos investigadores recomiendan que se mantenga el producto de las dos variables en el desarrollo de futuros programas de perforación.

CAPITULO VI
OPTIMIZACION
DE LA PERFORACION

La optimización de la perforación es el proceso mediante el cual se busca seleccionar las magnitudes de las variables de perforación controlables que minimizen el costo por unidad de distancia perforada y reduzcan al mínimo los tiempos de perforación.

La definición anterior no implica, forzosamente, que se busque maximizar el ritmo de penetración de la barrena, ya que a mayor velocidad de penetración, se tiene menor duración de la barrena y por consiguiente, cambios frecuentes en la misma, aumentando con ésto el costo y el tiempo de perforación.

Un proceso de optimización de la perforación comprende las siguientes etapas:

- a). Formulación de las ecuaciones principales
- b). Definición del modelo y tipo de información requerida
- c). Selección de la técnica de solución para:
 - c.1. cálculo de los parámetros del modelo y
 - c.2. obtención de las mejores condiciones de operación
- d). Prueba del método y adaptación a una área específica.

En la última fase de la optimización se establece las características generales del modelo y se compara con otros modelos.

El gran número de variables que influyen en la perforación hacen particularmente difícil la optimización de este proceso y complican el planteamiento analítico del problema.

Se han propuesto varios modelos matemáticos para describir el proceso y para buscar su optimización en base a la programación en computadoras. Muchos de estos modelos expresan el ritmo de penetración (R) en términos de peso sobre barrena (W) y velocidad de rotación (N) o éstas mismas variables elevadas a diversos exponentes. Los exponentes y coeficientes en estas relaciones se establecen empíricamente por medio de pruebas de laboratorio y de campo. A continuación se presentan algunos de estos modelos:

* Van Lingen

$$R = W^{1.25} N^{0.8}$$

* Woods

$$R = KN \left(\frac{W}{D}\right)^\sigma \quad (\sigma = 1.0 - 2.4)$$

* Gatlin

$$R = K + b WN^\lambda \quad (\lambda < 1.0)$$

* Eckel, Bielstein y Cannon

$$R = K W N^{0.4}$$

* Moore

$$R = K W N$$

* Brantley

$$R = K + b W N$$

* Cunningham

$$R = \frac{KWN^\lambda}{D} \quad (\lambda \leq 1.0)$$

* Young

$$R = \frac{K(W - W_0) N^\lambda}{1 + C_2 h}$$

En general K , σ y λ son parámetros de ajuste que dependen de la limpieza del fondo del agujero y de la profundidad. Además estos parámetros tienen que abarcar una serie de efectos que intervienen en el fenómeno y que no han sido tomados en cuenta restringiéndolos entonces a casos muy particulares, como a una sola formación y limpieza constante, para que su aplicación sea aceptable.

El tiempo durante el cual se han utilizado estos modelos, ha contribuido apreciablemente a mejorar la eficiencia, mecanización y computarización de la perforación rotatoria.

A continuación se hará el desarrollo del proceso de perforación en que se persigue la optimización de este proceso.

VI.1. ANALISIS DIMENSIONAL

En el proceso de perforación que se describirá, se involucran 10 variables y parámetros independientes además de la variable dependiente R o velocidad de perforación. Algunas de las variables dependen en ocasiones de parámetros secundarios, lo que dificulta el análisis.

Las variables y parámetros involucrados son:

- R: ritmo de penetración
- D: diámetro del agujero
- W: peso sobre barrena
- N: velocidad de rotación
- P: presión diferencial en fondo del agujero
- S: fuerza de ruptura o resistencia a la perforación de la roca
- μ : viscosidad del filtrado de lodo
- Q: gasto de lodo
- V: velocidad de chorro por la acción hidráulica de la barrena
- ρ : densidad del lodo
- E: módulo de Young para la roca perforada (elasticidad de la roca)

En el ejemplo del capítulo II se utilizó un sistema dimensional con base a la dimensión masa. Sin embargo, se establece que, es más conveniente utilizar la dimensión fuerza en un sistema, en vez de utilizar la masa, por lo que se utilizará la dimensión fuerza como base de este análisis

- L: longitud
- T: tiempo
- F: fuerza
- T^{-1} : recíproco del tiempo
- l: grupo dimensional

Procediendo con el análisis, la primera condición es poner a la variable dependiente en función de las variables y parámetros independientes.

$$R = f(D, W, N, P, S, \mu, Q, \rho, V, E) \quad (1)$$

Expresando en términos de dimensiones a las variables y parámetros considerados:

$$R(LT^{-1}), D(L), W(F), N(T^{-1}), P(FL^{-2}), S(FL^{-2}), \mu(FTL^{-1}), \rho(FT^2L^{-4}), V(LT^{-1}), E(FL^{-2})$$

En primer paso es eliminar la dimensión L utilizando a D de la siguiente manera:

$$R/D = f(W, N, PD^2, SD^2, \mu D, Q/D^3, \rho D^4, V/D, ED^2) \quad (2)$$

repetiendo de nueva cuenta la descripción dimensional:

$$R/D (T^{-1}), W(F), N(T^{-1}), PD^2(F), SD^2(F), \mu D(FT), Q/D^3(T^{-1}), \rho D^4(FT^2), V/D(T^{-1}), ED^2(F).$$

eliminando la dimensión T, utilizando N o V/D o cualquiera que se juzgue apropiado:

$$R/ND = f(W, PD^2, SD^2, \mu ND, Q/ND^3, \rho V^2 D^2, V/ND, ED^2) \quad (3)$$

dimensionalmente esto puede ser expresado como sigue:

$$R/ND (1), W(F), PD^2(F), SD^2(F), \mu ND(F), Q/ND^3(1), \rho V^2 D^2(F), V/ND(1), ED^2(F)$$

como se puede observar los términos tienen ahora dimensiones de F o son adimensionales. Los términos con dimensiones de F se refieren al peso sobre la barrena, fuerza de sustentación de las atillas en el fondo del pozo, resistencia a la perforación de la roca, fuerza dinámica sobre las atillas, fuerza hidráulica del chorro y fuerza elástica inducida en la roca, respectivamente.

Eliminando la dimensión F por la combinación apropiada de las variables y parámetros intrínsecos.

$$R/ND = f(W/PD^2, W/SD^2, W/\mu ND, Q/ND^3, \rho V^2/P, V/ND, E/S) \quad (4)$$

Nótese que todos los términos dependientes e independientes de la ec.(4) son adimensionales. Además, el número de términos independientes (dentro del paréntesis) en las ecs. (4) y (1) difieren; esto es por el teorema Pi de Buckingham del análisis dimensional.

La selección de No V/D para eliminar la dimensión T y la combinación de variables intrínsecas para eliminar la variable F, son un poco arbitrarias, pero se basan en el conocimiento y en las características del proceso de perforación. Tienen justificación, porque las relaciones resultantes coinciden con lo observado en la práctica; pero el número

de combinaciones posibles. La selección correcta en ambas constituye el arte y ciencia del análisis dimensional.

Así por la combinación de grupos adimensionales, se pueden formar otros grupos adimensionales que son razonablemente intuitivos y al mismo tiempo útiles en la descripción de lo observado en la práctica. Por lo que se tiene:

$$R/ND = f(W^2/PSD^4, W^2/\mu NSD^3, Q \rho V^2/PND^3, E/S) \quad (5)$$

Nótese que sólo quedaron cuatro términos independientes (adimensionales). Estos representan la acción de la fuerza hacia abajo que vence a la combinación de presión que se tiene en el fondo y resistencia a la perforación de la roca; combinación de fuerzas dinámicas del fondo del agujero y resistencia a la perforación de la roca; la acción hidráulica del chorro que vence a la presión en el fondo; y la acción elástica de la roca que vence su propia fuerza de corte.

Invirtiendo todos los términos de la ecuación (5)

$$\frac{ND}{R} = f\left(\frac{PSD^4}{W^2}, \frac{\mu NSD^3}{W^2}, \frac{PND^3}{Q \rho V^2}, \frac{S}{E}\right) \quad (6)$$

Tal inversión fue sugerida por Wardlaw en 1960, como un medio para mejorar el significado de las relaciones de la perforación¹. Además existen razones adicionales para hacer la manipulación de la ec. (6), por lo cual, ciertos rasgos son revelados. Esto consiste en la división por ND de todos los términos, resultando:

$$\frac{1}{R} = f(PSD^3/NW^2, \mu SD^3/W^2, PD/Q \rho V^2, S/NDE) \quad (7)$$

La utilidad de realizar lo anterior se establece más tarde en la optimización, base de este análisis N y W y sus combinaciones mostradas en la ecuación (7), serán tomadas en cuenta en términos económicos para lograr minimizar el costo de la perforación.

VI.2. EXPLICACION FISICA DE LAS CONDICIONES DE LA PERFORACION.

En el caso en el que se esté aplicando poco peso a la barrena o cuando se le proporcione una potente velocidad de chorro, una relación apropiada es la siguiente:

$$\frac{1}{R} = f\left(\frac{PSD^3}{NW^2}, \frac{S}{NDE}\right) \quad (\text{condición 1})$$

El término $\frac{PSD^3}{NW^2}$ se refiere a la compresión de la roca debido a la acción mecánica del diente de la barrena en el punto de corte, y el movimiento de las astillas en contra de la presión diferencial P, usando para remover los recortes la energía elástica absorbida por la roca del diente anterior a la fractura. El término $\frac{S}{NDE}$, se refiere a la fractura de estas partes de masa de roca donde la igualación de presiones ya ha tomado lugar. Nótese que para la condición 1 no aparecen términos hidráulicos. Si se reduce la presión diferencial o se aumenta el peso sobre barrena, llegamos a la condición 2.

La condición 2 es la situación más frecuentemente encontrada en la perforación de pozos; está expresada por la siguiente relación:

$$\frac{1}{R} = f\left(\frac{PSD^3}{NW^2}, \frac{PD}{Q\rho V^2}\right) \quad (\text{condición 2})$$

El primer término a la derecha es el mismo que para la condición 1 pero el segundo término ha cambiado. Todas las astillas, ahora requieren igualar su presión, y el parámetro P aparece en ambos términos.

Además ahora la perforación es sensible a la potencia hidráulica, representada por el grupo $Q\rho V^2$ en el segundo término.

Un incremento adicional en el peso sobre la barrena reducirá el valor del primer término a la derecha en la condición 2 y hará a la perforación más y más sensitiva a la acción hidráulica. Un incremento en la potencia hidráulica reducirá el valor del segundo término a la derecha, y hará a la perforación más sensitiva al peso sobre la barrena. Por lo tanto, el peso sobre la barrena y la potencia hidráulica en factores interdependientes.

Si el peso sobre la barrena se incrementa o la potencia hidráulica se reduce, una tercera condición aparece, por lo que se asume que la penetración del diente ha progresado más allá de la línea de acción del chorro. Esto es particularmente visible en formaciones duras de baja permeabilidad. La relación queda entonces:

$$\frac{1}{R} = f \left(\frac{\mu S D^3}{W^2}, \frac{S}{NDE} \right) \quad (\text{condición } 3)$$

Nótese que el primero de los términos a la derecha a cambiado para el nuevo grupo, mientras que el segundo, es igual al segundo término de la condición 1. Además, la presión diferencial P ha desaparecido del primer término de la derecha

VI .3 RELACIONES LINEALES

Hasta ahora, las relaciones han sido expresadas como funciones de grupos de variables. Se ha comprobado que estas relaciones son lineales¹.

Introduciendo los coeficientes \bar{a} , \bar{b} , \bar{c} y \bar{d} se puede expresar una relación de la siguiente manera

$$\frac{1}{R} = \bar{a} \frac{PSD^3}{NW^2} + \bar{b} \frac{S}{NDE} + \bar{c} \frac{\mu SD^3}{W^2} + \bar{d} \frac{PD}{Q_0 V^2}$$

Los primeros tres términos a la derecha son grupos mecánicos, el cuarto es hidráulico. Puesto que, no todos los términos son válidos a un mismo tiempo, la ecuación se reduce a:

Condición 1

$$\frac{1}{R} = \bar{a} \frac{PSD^3}{NW^2} + \bar{b} \frac{S}{NDE} \quad (8)$$

Condición 2

$$\frac{1}{R} = \bar{a} \frac{PSD^3}{NW^2} + \bar{d} \frac{PD}{Q_0 V^2} \quad (9)$$

Condición 3

$$\frac{1}{R} = \bar{c} \frac{\mu SD^3}{W^2} + \bar{b} \frac{S}{NDE} \quad (10)$$

VI.4. OPTIMIZACION A BAJO COSTO

Apoyados en las ecuaciones (8), (9), (10), con objeto de facilitar su manejo, éstas se pueden expresar de la siguiente manera:

Condición 1

$$\frac{1}{R} = \frac{a}{NW^2} + \frac{b}{N} \quad (11)$$

Condición 2

$$\frac{1}{R} = \frac{a}{NW^2} + d \quad (12)$$

Condición 3

$$\frac{1}{R} = \frac{c}{W^2} + \frac{b}{N} \quad (13)$$

donde:

$$a : \bar{a} \text{ PSD}^3$$

$$b : \bar{b} \frac{S}{DE}$$

$$c : \bar{c} \mu\text{SD}^3$$

$$d : \bar{d} \frac{PD}{Q\rho V^2}$$

Estas relaciones son de utilidad, para calcular el efecto de otros factores que minimizarán el costo por mt. perforado, una vez, que el óptimo peso sobre barrena y velocidad de rotación, se han establecido.

Por lo tanto, se necesitan realizar algunas pruebas con el equipo de perforación para determinar los coeficientes de las expresiones anteriores. El método recomendado es sugerido por Arthur Lubinski y es conocido con el nombre de "Pruebas de ritmo de perforación, ("drill-off tests").²

Un factor importante que influye en el costo, es el tipo de desgaste de la barrena. Debido a que durante la perforación de un pozo se consume cierta cantidad de barrenas, lo que implica que hay que sacar y meter tubería en varias ocasiones para reemplazar a éstas, dan como resultado que se aumente en forma significativa el costo de la perforación. Por tal motivo es importante la decisión para sacar a la barrena; tal decisión se basa en:

- a) Desgaste del diente
- b) Desgaste del cojinete

Galle and Woods estudiaron ampliamente la situación anterior, tomándola como base para la optimización de la perforación a bajo costo³. Ellos concluyeron que el desgaste de ambos, cojinete y diente son funciones del peso sobre barrena y velocidad de rotación. Como resultado de los diferentes ritmos de desgaste del cojinete y diente de la barrena, velocidades altas de rotación tienden a producir una condición, donde, el desgaste del diente gobierna la vida de la barrena y bajas velocidades de rotación gobiernan el -desgaste del cojinete. Igualmente, un mayor incremento en el peso sobre barrena puede causar que, la condición de la perforación cambie del tipo 1 al tipo 2, del 2 al 3 y viceversa.

A continuación se presentan las expresiones del costo por mt. perforado para el desgaste del diente y cojinete.

Expresión para el costo por metro perforado. Desgaste del cojinete

$$C = \frac{f}{60p} \left| p + mN^2W^2 \right| \frac{1}{R} \quad (14)$$

Expresión para el costo por metro perforado. Desgaste del diente

$$C = \frac{f}{60q} \left| q + mN^2W^2 \right| \frac{1}{R} \quad (15)$$

donde:

C : costo de la perforación, \$ por metro perforado

f : costo del equipo, \$ por hora

m : tiempo que se tarda en sacar y meter tubería.

p : coeficiente de vida del cojinete = $n W^2$

n : revoluciones totales de la barrena antes de sacarla

q : coeficiente de vida del diente = $n N W^2$

R, W y N : son el ritmo de penetración, peso sobre barrena y velocidad de rotación respectivamente.

VI.4.1. Costo de la Optimización. Una expresión para el costo por metro perforado puede establecerse inmediatamente sustituyendo en la ecuación (14) o (15) (dependiendo de cual gobierne la vida sobre la barrena) la expresión $\frac{1}{R}$, establecida por la condición 1, 2 ó 3.

Si se deriva parcialmente a C con respecto a N manteniendo a W constante o a C con respecto a W manteniendo a N constante, se puede establecer el mínimo costo local y si bien, esto es probable, rara vez será el mínimo absoluto, por lo que efectuando una serie de iteraciones al proceso habilitará a que algo parecido al mínimo costo se establezca.

Alternativamente, las ecuaciones diferenciales parciales pueden considerarse como una serie de ecuaciones simultáneas que serán resueltas conjuntamente.

La adición de restricciones de desigualdades en N o W normalmente implicará el uso de Multiplicadores de Lagrange. Sin embargo éste es un método sencillo y fácil de resolver en los casos en que se tengan o no restricciones de desigualdades.

Como un ejemplo, se supone que las restricciones de desigualdad implica usar solamente velocidades de rotación hasta 100 rpm ($N \leq 100$). El problema es resolver para el caso en que no haya restricciones y para el caso de $N = 100$ rpm. En el caso en que no haya restricciones si se tiene una

solución que involucre velocidades de rotación menores de 100 rpm ésta es adoptada. Sin embargo si se involucran velocidades de rotación que sobrepasen de 100 rpm ésta es descartada y la solución para $N = 100$ es adoptada en lugar de aquélla.

La descripción del uso de Multiplicadores Lagrange y Programación geométrica en la optimización de la perforación, puede consultarse en la referencia¹.

VI.4.2. Cálculos de la Optimización. Primero se expresará al costo por metro en términos de N y W sustituyendo la expresión correcta para $\frac{1}{R}$ ecuaciones (11), (12) ó (13) en las ecuaciones (14) ó (15), dependiendo de cual, si el desgaste del diente o cojinete, gobiernan la vida de la barrena.

Debido a que se tienen tres tipos de condiciones y 2 ecuaciones para el costo (diente y cojinete), se tendrán seis casos para analizar, cada uno teniendo la posibilidad de tener restricciones en la velocidad de rotación o en el peso sobre barrena, donde para fines de este trabajo, sólo se analizará el caso 1 y 2

CASO 1

$$C = \frac{f}{60p} \left| p + mNW^2 \right| \frac{1}{R} \quad (14)$$

utilizando la ecuación (11) y sustituyendo en la ecuación (14)

$$\begin{aligned} C &= \frac{f}{60p} \left| p + mNW^2 \right| \left| \frac{b}{N} + \frac{a}{NW^2} \right| \\ &= \frac{f}{60p} \left| bmW^2 + \frac{ap}{NW^2} + \frac{bp}{N} + am \right| \quad (16) \end{aligned}$$

El costo será optimizado minimizando la expresión:

$$\Omega = bmW^2 + \frac{ap}{NW^2} + \frac{bp}{N}$$

esto ocurrirá cuando:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial N} = -\frac{ap}{N^2W^2} - \frac{bp}{N^2} = 0$$

lo cual sucede sólo cuando N es infinito, y

$$\frac{\partial \Omega}{\partial W} = 2bmW - \frac{2ap}{NW^3}$$

lo cual sucede sólo cuando W es cero.

Tal vez antes, sin embargo, es probable que se alcance una condición donde el desgaste del diente reemplace al desgaste del cojinete como un criterio para sacar a la barrena.

Suponiendo que esto sucede cuando $N = \bar{n}$ (limitación a la velocidad de rotación) se obtendría:

CASO 1.a.

la expresión para minimizar nos quedaría:

$$\Omega = bmW^2 + \frac{ap}{\bar{n}W^2} + \frac{bp}{\bar{n}} \quad (17)$$

el cual es estacionario cuando:

$$2 \text{bm}W - \frac{2ap}{\bar{r}W^3} = 0$$

i, e., cuando

$$W^2 = \left| \frac{ap}{\text{bm}\bar{n}} \right|^{1/2}, \quad W = \left| \frac{ap}{\text{bm}\bar{n}} \right|^{1/4}$$

sustituyendo lo anterior en la ecuación (17)

$$\Omega^* = \text{bm} \left| \frac{ap}{\text{bm}\bar{n}} \right|^{1/2} + \frac{ap}{\bar{n}} \left| \frac{\text{bm}\bar{n}}{ap} \right|^{1/2} + \frac{bp}{\bar{n}}$$

y

$$C^* = \frac{f}{60p} \cdot \text{am} \left| \left(\frac{bp}{\text{am}\bar{n}} \right)^{1/2} + 1 \right|^{1/2}$$

Si, en el otro caso, W es la restricción, en lugar de N, entonces hacemos $W = \bar{w}$ (limitación de peso) dando como resultado:

CASO 1.b.

$$\Omega = \text{bm}\bar{w}^2 + \frac{ap}{N\bar{w}^2} + \frac{bp}{N}$$

de modo que:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial N} = - \frac{ap}{N^2 \bar{w}^2} - \frac{bp}{N^2} = 0$$

lo cual sucede solamente cuando N es infinita.

Si en lugar del desgaste del cojinete, el criterio para sacar la barrena es el desgaste del diente, se obtiene:

CASO 2

$$C = \frac{f}{60q} \left| q + mN^2W^2 \right| \frac{1}{R} \quad (15)$$

utilizando la ecuación (11) y sustituyendo en la ecuación (15)

$$C = \frac{f}{60q} \left| q + mN^2W^2 \right| \left| \frac{b}{N} + \frac{a}{NW^2} \right|$$

$$= \frac{f}{60q} \left| bmNW^2 + \frac{aq}{NW^2} + \frac{bq}{N} + amN \right|$$

El costo será optimizado minimizando la expresión:

$$\Omega = bmNW^2 + \frac{aq}{NW^2} + \frac{bq}{N} + amN$$

ésto ocurrirá cuando:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial N} = bmW^2 - \frac{aq}{N^2W^2} - \frac{bq}{N^2} + am = 0$$

y

$$\frac{\partial \Omega}{\partial W} = 2bmNW - \frac{2aq}{NW^3} = 0$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones anteriores, se tiene:

$$N = \left| \frac{bq}{am} \right|^{1/2}$$

$$W^2 = \frac{a}{b}$$

sustituyendo los valores de N y W^2 en Ω

$$\Omega^* = 4(abmq)^{1/2}$$

y

$$C^* = \frac{4f}{60q} (abmq)^{1/2}$$

Para el caso de que haya restricciones en la velocidad de rotación ($N = \bar{n}$), se obtiene:

CASO 2. a

$$\Omega = bm\bar{n}W^2 + \frac{aq}{\bar{n}W^2} + \frac{bq}{\bar{n}} + am\bar{n}$$

y para optimizar:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial W} = 2bm\bar{n}W - \frac{2aq}{\bar{n}W^3} = 0,$$

por lo tanto:

$$W^2 = \left| \frac{aq}{bm\bar{n}^2} \right|^{1/2}$$

sustituyendo la expresión anterior en Ω

$$\Omega^* = \left| (am\bar{n})^{1/2} + \left(\frac{bq}{\bar{n}}\right)^{1/2} \right|^2$$

y

$$C^* = \frac{f}{60q} \left| (am\bar{n})^{1/2} + \left(\frac{bq}{\bar{n}}\right)^{1/2} \right|^2$$

Para el caso en que haya restricciones en el peso ($W = \bar{w}$) entonces:

CASO 2.b

$$\Omega = bmN\bar{w}^2 + \frac{aq}{N\bar{w}^2} + \frac{bq}{N} + amN$$

y para optimizar:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial N} = bm\bar{w}^2 - \frac{aq}{N^2\bar{w}^2} - \frac{bq}{N^2} + am = 0$$

la cual tiene como solución:

$$N = \left| \frac{q}{m\bar{w}^2} \right|^{1/2},$$

sustituyendo la expresión anterior en Ω

$$\Omega^* = 2 \left| \left(\frac{a^2mq}{\bar{w}^2}\right)^{1/2} + (b^2\bar{w}^2qm)^{1/2} \right|$$

y

$$C^* = \frac{f}{30q} \left[\left(\frac{a^2 m q}{w^2} \right)^{1/2} + (b^2 \bar{w}^2 \eta m)^{1/2} \right]$$

Aquí se terminan las soluciones del costo por metro perforado para la condición 1. De manera similar se obtienen las soluciones del costo para las condiciones 2 y 3.

CAPITULO VII
ADQUISICION
Y ANALISIS DE DATOS

Los datos requeridos para elaborar un programa de optimización de la perforación se clasifican de la siguiente manera:

- 1). Datos de entrada a la computadora para calcular los valores óptimos - que servirán para controlar las condiciones deseadas en la perforación.
- 2). Datos de reportes diarios para determinar si se está aplicando eficientemente la optimización y que proporcionarán las bases para sugerir - los cambios en el lodo, hidráulica, barrenas, etc.

VII.1. DATOS DE ENTRADA PARA PREPARAR PROGRAMAS DE OPTIMIZACION DE LA -
PERFORACION.

El primer paso a seguir en la preparación de programas de optimización es organizar los datos necesarios para programarse dentro de la computadora. Se usan varios modelos matemáticos de perforación para analizar la información de pozos de control y para especificar los límites de las principales variables consideradas. La Fig. 1 muestra los datos de perforación necesarios para la preparación de estos programas de optimización, la cual incluye datos de cimas geológicas, especificaciones del lodo, diseño de TR para el diámetro del agujero y comentarios sobre problemas especiales tales como posibles zonas de pérdida de circulación, lutitas deleznales y flujo de agua salada. La Fig. 2 muestra las especificaciones del equipo requeridos para la optimización, la cual incluye la potencia disponible y las especificaciones de la bomba; descripción de la tubería de perforación y las trabarreas.

El espacio titulado "OTRAS ESPECIFICACIONES Y COMENTARIOS" está reservado para la descripción del equipo superficial de lodos incluyendo -

desarenadores y deslimizadores. En la parte inferior de la figura se registra una lista de información extra que deberá de ser adicionada, si se tiene disponible. Los registros de pozos de control, programas de barrenas y de lodos son de mucha importancia en la preparación de los programas de optimización debido a la información que proporcionan.

Los datos necesarios para analizar la influencia de las principales variables que intervienen en la perforación se tratarán a continuación.

VII.1.1. Lodo. Primero se desarrollará el programa de lodos para la perforación, todas las recomendaciones y especificaciones estarán basadas en este programa. La información necesaria para desarrollar un programa de lodos óptimo incluye; programa de lodos y registros de perforación de pozos perforados anteriormente en el área del pozo propuesto. La información de más importancia que debe tomarse de los anteriores programas de lodos es el peso del lodo y la pérdida de fluido. El análisis de estas propiedades determina si el peso del lodo usado fué adecuado y si la pérdida de fluido puede ser incrementada sin causar problemas en el agujero. De los registros de perforación pueden prevenirse algunos problemas que el lodo puede ocasionar. Por ejemplo los problemas en formaciones lutíticas están relacionados con las propiedades del lodo durante la perforación de éstas formaciones, la pérdida de circulación está relacionada con el peso del lodo, presión en la bomba y el método de operación que está siendo usado cuando ocurrió la pérdida. El sistema de circulación en el pozo propuesto deberá ser analizado para determinar si es necesario un equipo adicional para mantener adecuadamente el sistema.

Se han desarrollado modelos matemáticos para predecir el efecto de las propiedades del lodo en el ritmo de penetración y la interacción del lodo con otras variables. Con estos modelos, los rangos de las propiedades del lodo se pueden especificar. Un efecto combinado de los programas de lodos e hidráulicos óptimos incrementará el ritmo de penetración y por lo tanto disminuirá el costo por mt. en la perforación.

VII.1.2. Hidráulica. El balance apropiado de la hidráulica para obtener una perforación efectiva está secundado por un lodo apropiado. Los requisitos de entrada para generar un programa hidráulico son:

- 1). Programa de lodos.
- 2). Diámetro del agujero y programa de TR obtenido del operador.
- 3). Columna de perforación y dimensiones del montaje, limitaciones de la potencia hidráulica del equipo; presión de bombeo y capacidad de la bomba.
- 4). Perforabilidad de la formación obtenida de datos proporcionados del programa de barrenas o mediante registros eléctricos.

VII.1.3. Selección de la Barrena y Condiciones de la Corrida. Una rápida revisión del programa de barrenas y de registros eléctricos puede indicar la selección incorrecta de la barrena. Lo anterior en conjunto con el lodo y datos hidráulicos son usados como datos de entrada para modificar un programa de peso-velocidad de rotación. Se usa un programa de computadora para seleccionar las diversas combinaciones de peso-rpm óptimas que servirán sólo como una guía para el perforador. Se recomienda que se corran pruebas de ritmo de perforación (drill of tests) y se calculen los costos de la perforación para cada cambio en el ritmo de penetración.

VII.2. DATOS PARA ACTUALIZAR LOS PROGRAMAS DE OPTIMIZACION

La experiencia ha demostrado que un programa de optimización debe ser revisado y actualizado diariamente para que pueda ser utilizado efectivamente. Si toda la información usada para preparar el programa de perforación para un pozo específico fuera obtenida apropiadamente, el número de días y barrenas requeridas para perforar un pozo se calcularían con estas predicciones. Sin embargo, esto raramente sucede debido a problemas inesperados tales como perforación en formaciones de lutitas deleznales, brotes de gas, pérdidas de circulación y pegaduras de tuberías. Por lo que es necesario preparar un programa con bastante flexibilidad de tal modo que si encontramos problemas al estar perforando haya alternativas disponibles para regresar al programa básico tan pronto como el proble

ma sea resuelto.

La información necesaria para revisar diariamente o actualizar el programa base de optimización, con la cual, las variables de perforación controlables puedan ser analizadas, implica tener un sistema de instrumentación y procesamiento de datos en el equipo de perforación para que registre diariamente la información relacionada con la perforación del pozo. Este sistema debe ser capaz de captar, registrar, analizar y mostrar la información.

VII.2.1. Evaluación de los Datos de la Perforación. La evaluación de los datos después de la perforación es un aspecto importante en la optimización. Haciendo un análisis de los pozos perforados anteriormente usando un programa optimizado de la perforación, no solamente indicará el lugar en donde la perforación fue menor que la óptima, sino además, indicará el porqué.

Otro aspecto importante en la evaluación de los resultados de los programas de optimización es la determinación de los ahorros que pueden ser atribuidos a la nueva tecnología. Estos ahorros generalmente se calculan en base al costo por mt. perforado, el cual incluye los costos de la barrena, del equipo y del lodo de perforación.

CAPITULO VIII

AUTOMATIZACION DE LA PERFORACION

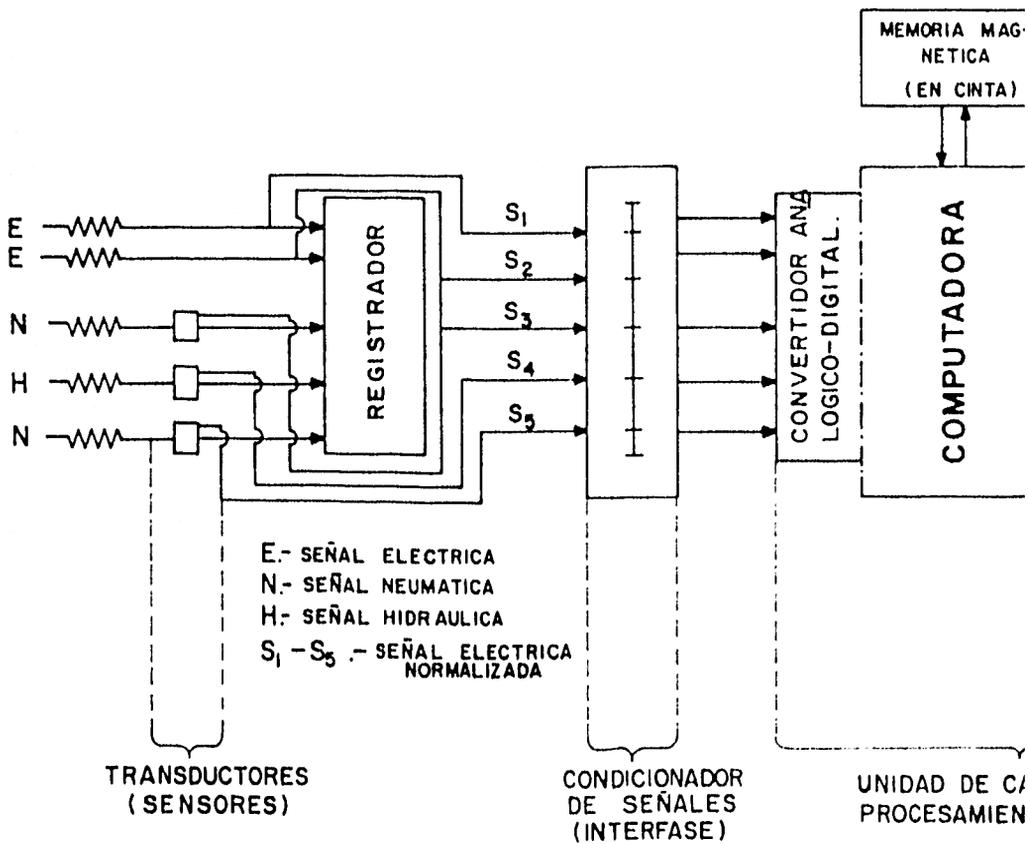
Hasta fechas recientes, el éxito de la perforación dependía en gran medida de la habilidad y experiencia personal del equipo humano que la realizaba. Actualmente, el progreso tecnológico en esta área ha permitido a la industria desarrollar métodos e instrumentos que han hecho posible conducir exitosamente las operaciones de perforación, dependiendo cada vez menos de las habilidades personales y más de los progresos logrados en los sistemas modernos de detección.

La tecnología de la perforación en la última década ha logrado establecer diversas relaciones significativas entre las variables que afectan la perforación, tales relaciones constituyen los modelos de perforación, estos modelos han permitido aplicar técnicas estadísticas y de optimización para mejorar gastos y tiempos en la perforación de pozos; para lo cual se requiere disponer de una unidad de captación de las variables de perforación y de un equipo que insitu, procese la información, utilizando los modelos de perforación.

VIII.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO

En la Fig. 1 se presenta un esquema del sistema de instrumentación y de procesamiento de datos. Este sistema consta de un grupo de sensores que detectan la información sobre las operaciones de perforación y la transmiten a la unidad central de adquisición de datos, donde la información se normaliza, digitizándose para ser procesada en la minicomputadora y, si se juzga conveniente almacenarla en discos o cintas magnéticas. Finalmente se muestra en una pantalla, se grafica y se imprime.

SISTEMA DE INSTRUMENTACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS



Las variables que deberá controlar y cuantificar el sistema descrito son:

- Velocidad de la mesa rotaria. La velocidad de rotación en rpm se observa en un monitor. Este dato es importante pues permite determinar la vida de la barrena, ritmo de penetración y eficiencia de la perforación.
- Posición del bloque o recorrido de la sarta. Determina la posición del bloque y controla la velocidad de penetración de la barrena.
- Velocidad de la bomba y emboladas totales. El ritmo de bombeo es importante ya que determina el flujo del lodo dentro del pozo. Para esto se usa un monitor en donde se controla la presión y potencia hidráulica de la bomba acopladas a las limitaciones de operación de ésta y así poder determinar el volumen de lodo bombeado dentro del pozo.
- Gasto de lodo y densidad. El gasto del lodo dentro y fuera del agujero permite detectar una posible intrusión de fluidos dentro del pozo y prevenir en consecuencia posibles brotes o problemas tales como derrumbes, taponamiento de las toberas de la barrena u otras condiciones.
- Torque de la mesa rotatoria. El torque es de interés para la determinación de las condiciones óptimas de perforación. Generalmente se considera junto con la velocidad rotatoria de la barrena y el peso sobre la barrena.
- Volumen de lodo en las presas. Un aumento de volumen de lodo en las presas permite detectar la intrusión de fluido dentro del pozo y prevenir por consiguiente posibles brotes. La reducción del volumen del lodo indica la pérdida de circulación u otros problemas en el fondo del agujero.
- Peso sobre el gancho. Da una indicación de la carga aplicada sobre la barrena. Sirve para prevenir problemas que resultan al aplicar una carga mayor a la que soporta la estructura elevada, malacate y otros componentes de elevación.
- Presión. La presión hidráulica se controla en varias partes del equipo de perforación incluyendo en el tubo vertical (standpipe), la presión antes de estrangular la línea de retorno del pozo y las presiones en el

equipo que opera hidráulicamente en el pozo.

Si la perforación se realiza costafuera se tendrá que tomar en cuenta a otras variables tales como: la tensión de las anclas del equipo, régimen de giro del navío de perforación, tensión y ángulo del elevador; y otras consideraciones importantes sobre los pozos perforados costafuera.

La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos.

VIII.2 TELEMETRIA EN EL FONDO DEL AGUJERO

Los sensores descritos anteriormente se encuentran localizados en diversas partes del equipo de perforación superficial. A pesar de la precisión de las mediciones y del análisis, la evaluación de algunas de las variables en el fondo dará una mejor estimación de las condiciones de perforación.

La telemetría es un sistema que permite cuantificar algunos parámetros en el fondo del agujero y transmitir la información obtenida a la superficie. A diferencia de los registros de línea de cable estándares, - la telemetría puede hacer las mediciones al estar circulando y perforando.

Un sistema completo de telemetría consta de tres partes esenciales que son:

- a). Sensores electrónicos localizados en la sarta de perforación.
- b). Un dispositivo subtelemétrico que transmite a la superficie la información captada por los sensores.
- c). En la superficie, una computadora recibe los datos, los procesa y los muestra en una pantalla, los grafica e imprime.

La forma de transmitir los datos a la superficie varía, siendo las más comunes: pulsos de presión del lodo, cable o conductor aislado, ondas electromagnéticas y ondas acústicas. Los principales problemas técnicos

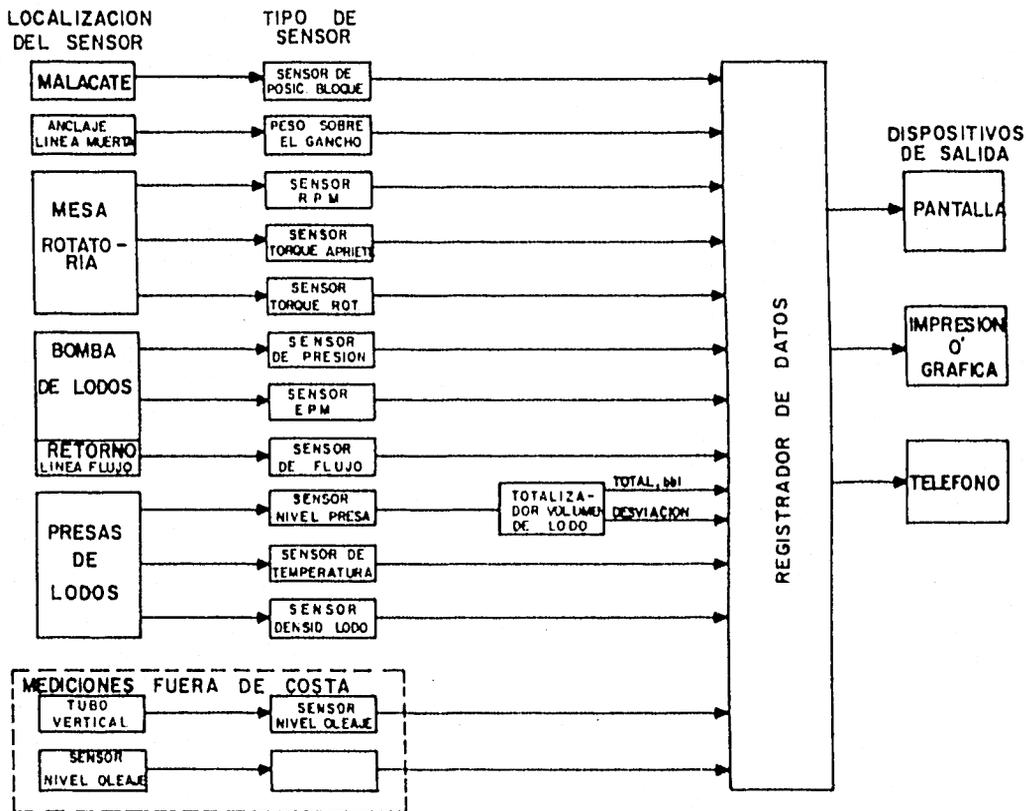


FIG. 2. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS (Equipo superficial)

cos de este método se presentan en la transmisión de datos a la superficie.

VIII.3 CONTROL AUTOMATICO

La situación ideal para obtener un mejor control de la perforación y optimizar ésta, implica tener en la estructura elevada un control - automático por computadora en circuito cerrado (Closed-loop) el cual nos - proporcionará la máxima seguridad y minimizará el tiempo y costo de la perforación.

Las mediciones en tiempo real incluirán sensores superficiales y subsuperficiales. El equipo (hardware) debe ser confiable y de fácil mantenimiento y calibración. Debido a que es un sistema en circuito cerrado cada una de las fases son importantes, ya que si falla una fase, las mediciones efectuadas no serán correctas, así como también dependerá de la validez de los modelos matemáticos programados dentro de la computadora.

La Fig. 3 muestra esquemáticamente los diferentes niveles de aplicación de la computadora en la optimización de la perforación.

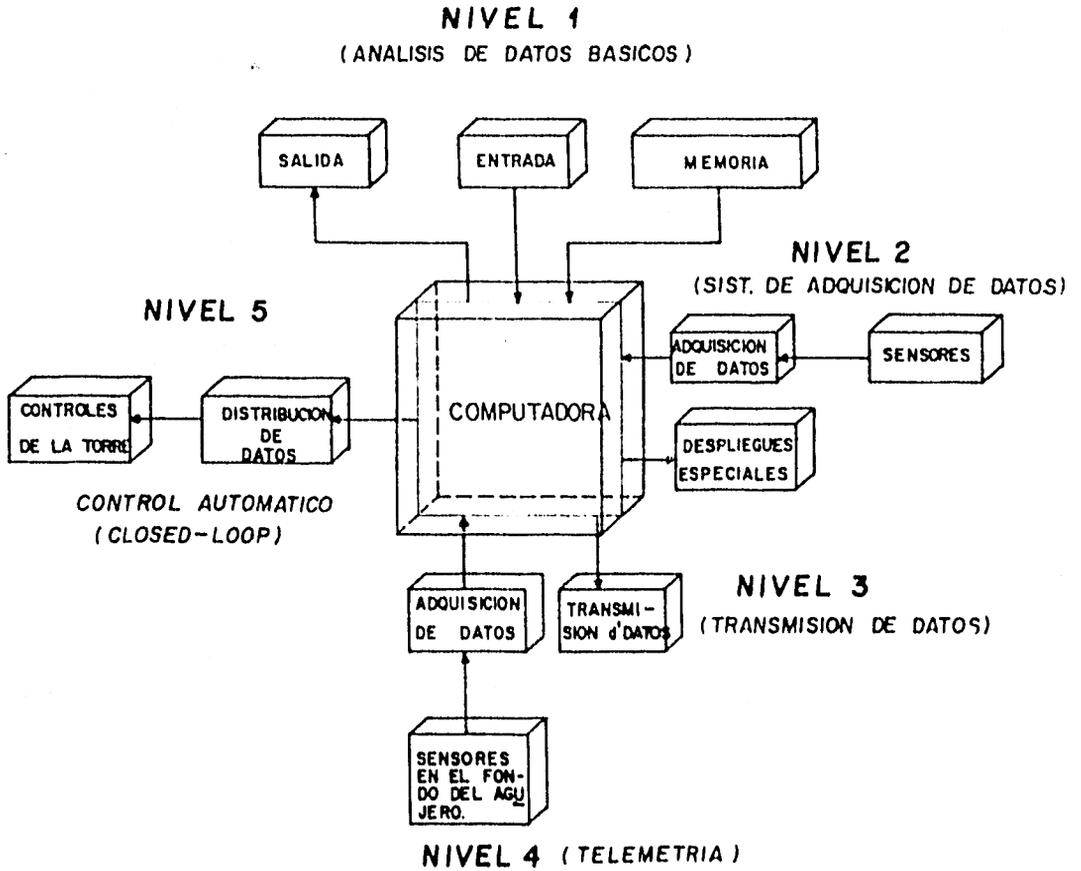


FIG.3 DIFERENTES NIVELES DE APLICACION DE LA COMPUTADORA EN LA OPTIMIZACION DE LA PERFORACION

CAPITULO IX

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De lo visto anteriormente se puede concluir que:

1. Los modelos matemáticos de perforación son expresiones matemáticas basadas en relaciones empíricas obtenidas en pruebas de laboratorio o experiencias de campo. Cabe aclarar que no todas las variables pueden ser manejadas en un modelo, debido a lo complejo de los efectos interactivos entre éstas.
2. El objetivo principal que se persigue con estos modelos, es optimizar la perforación, es decir, minimizar el costo por metro perforado y reducir al mínimo los tiempos de perforación, dentro de un margen adecuado de seguridad.
3. Basados en las relaciones obtenidas en pruebas de laboratorio y experiencias de campo, y mediante el empleo del Análisis Dimensional, relaciones lineales y técnicas de optimización, es factible desarrollar un modelo que contemple a una mayor cantidad de variables físicas que intervienen en el proceso de perforación, con lo cual se optimizará este proceso.
4. El modelo presentado por Wardlaw tiene ventaja sobre los ya existentes de ser más representativo del fenómeno, ya que en él se involucran a casi todas las variables físicas que rigen la perforación de un pozo.
5. Para que un modelo pueda ser aplicado es necesario que esté debidamente probado, además de que toda la información necesaria sea confiable, por lo que es recomendable tener en el pozo un sistema de instrumentación y procesamiento de datos para que registre diariamente la información relacionada con la perforación del pozo, con lo cual se podrá actualizar el programa base de optimización y se dará mayor seguridad al proceso de perforación, evitando con ello, problemas tales como pérdidas de circulación, brotes, pegaduras de tuberías, etc.

6. Por la dinámica de la perforación, es necesario, para obtener mejores resultados de los modelos, poder procesar en tiempo real los programas de optimización en los sistemas que supervisan automáticamente la perforación.
7. El uso creciente de esta tecnología, permite prever la conveniencia de introducir a los alumnos en el curso de perforación a los fundamentos de optimización de este proceso.

REFERENCIAS

CAPITULO II

1. Krick, V.E., "Introducción a la Ingeniería y al Diseño en Ingeniería", Editorial Limusa, México (1974).
2. Ipsen, D.C., "Units, Dimensions and Dimensionless Numbers", McGraw Hill Book Company, New York (1960).
3. Somerton, W.H., "A Laboratory Study of Rock Breakage by Rotary Drilling", Transactions AIME (1959) 216,92.
4. Simon, R., "Energy Balance in Drilling", Presented at the 1st Conference on Drilling and Rock Mechanics, January 1963, at Austin.
5. Wilde, D.J., and Beightler, C.L., "Foundations of Optimization", (1967), Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
6. Kreko, Bela, "Linear Programming", Translated from German, American Elsevier Publishing Company, New York (1968).
7. Duffin, R.J., Peterson, E.L. and Zener, C., "Geometric Programming", (1967), John Wiley & Sons, Inc., New York.

CAPITULO III

1. Uren, L. C., "Ingeniería de Producción del Petróleo", McGraw Hill Book, CECSA, 1a. Edición, 1964.
2. McCray & Cole., "Técnicas de la Perforación de Pozos Petroleros", CECSA, Segunda Edición, 1963.
3. Petróleos Mexicanos, "El Petróleo", Mex. D.F. (1974), XIII Edición

4. Instituto Mexicano del Petróleo, "Lecciones sobre Perforación Rotatoria", Mex. D.F. (1981) 1a. Edición.
5. Friedeberg M.W., "Cátedra de Equipos y Herramientas de Perforación", Facultad de Ingeniería, UNAM. Mex. D.F.

CAPITULO IV

1. Lummus, J.L., "Drilling Optimization", Journal of Petroleum Technology (Nov., 1970) 1379-1389.
2. Nolley, J.P., Cannon, G.E., and Raglans, D., "The relation of Nozzle Fluid Velocity to Rate of Penetration with Drag Type Rotary Bits", API Drilling and Production Practice (1948).
3. Eckel, John R. and Nolley, J.P., "An Analysis of Hydraulic Factors Affecting Rate of Penetration of Drag-Type Rotary Bits", API Drilling and Production Practice (1949).
4. Bielstein, W.J. and Cannon, George E., "Factors Affecting the Rate of Penetration of Rock Bits", API Drilling and Production Practice (1950).
5. Goins, W.C., Jr., Weichert, J.P., Burba, J.L., Dawson, D. D. and Teplitz, A.J., "Down-the-Hole Pressure Surges and Their Effect on Loss of Circulation", API Drilling and Production Practice (1951).
6. Eckel, John R., "Effect of Mud Properties on Drilling Rate", API Drilling and Production Practice, p. 119 (1954).
7. Speer, John W., "A Method for Determining Optimum Drilling Techniques", API Drilling and Production Practice, p. 49 (1958).
8. O'Brien, T.B. and Goins, W.C., "The Mechanics of Blowouts and How to Control Them.", API Drilling and Production Practice, p. 41, 1960.

9. Goins, W.C. and Kendall, H.A., "Design and Operation of Jet Bit Programs for Maximum Hydraulic Horsepower, Impact Force or Jet Velocity.", Transactions AIME (1960) 238.
10. Cunningham, R.A. and Goins, W.C. Jr., "Laboratory Drilling of Gulf Coast Shales" , Drilling and Production Practice, API (1957).
11. Garnier, A.J. and van Lingen, N.H., "Phenomena Affecting Drilling Rates at Depth", Transactions AIME (1959) 216, 232.
12. Cunningham, R.A., "Laboratory Studies of the Effect of Rotary Speed on Rock-Bit Performance and Drilling Cost", API Drilling and Production Practice, p. 7 (1960).
13. Galle, E.M. and Woods, H.B., "Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits", API Drilling and Production Practice, p. 48 (1963).
14. Cheatham, J.B. and Gnirk, P.F., "A Review of the Fundamental Aspects of Rock Deformation and Failure", 7 th World Petroleum Congress, México City (April 1967).
15. Yang, J.H. and Gray, K.E., "Single-Blow Bit Tooth Impact Tests on Saturated Rocks under Confining Pressure, II. Elevated Pore Pressure", Presented at the Third Conference on Drilling and Rock Mechanics, University of Texas, at Austin, January 1967.
16. Wardlaw, H.W.R., "Optimization of Rotary Drilling Parameters", The University of Texas at Austin, Ph. D., 1971. Engineering Petroleum.

CAPITULO V

1. Vidrine, D.J. and Benit, E.J.: "Field Verification of the Effect of Differential Pressure on Drilling Rate", Presented at the 42 nd Annual Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Houston, October 1967.

2. Preston L. Moore and Carl Gatlin, "Six Variable Factors That Affect Penetration Rate", Oil and Gas Journal, April 11, 1960, Vol. 58, No. 15.
3. Woods, H.B and Galle, E.M.: "Effects of Weight on Penetration", The Drilling Contractor, Vol. XIII, No. 6 (October 1957) 74-79
4. Cunningham, R.A.: "An Empirical Approach To Relate Drillings Parameters", SPE 6715, Presented at the 52nd. Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Denver, Oct. 9-12, 1977.
5. Speer, J.W.: "A Method for Determining Optimum Drilling Techniques", API Drilling and Production Practice, p.49 (1958).
6. Lummus, J.L.: "Drilling Optimization", JPT (Nov., 1970) 1379-1389.
7. Preston, L. More and Frank, W.Cole,: "Manual de Operaciones de Perforación", Cap. 9, Instituto Mexicano del Petróleo (1977).
8. Guerra, Badillo, M.A.: "La Teoría de los Espacios Vectoriales en el Análisis Dimensional y su Aplicación a la Perforación de Pozos", Trabajo Escrito, Fac. Ing. UNAM., Méx. D.F., 1976.
9. Benitez, H.M.A., "Cátedra de Tecnología de la Perforación", Fac. Ing., UNAM. Méx. D.F.

CAPITULO VI

1. Wardlaw, H.W.R., "Optimization of Rotary Drilling Parameters", The University of Texas at Austin, Ph.D., 1971. Engineering, Petroleum.
2. Lubinski, Arthur, : "Proposal for Further Tests", Comment on work of the AAODC Study Committe on Weight/Speed/Penetration, Pet. Eng. (Jan., 1958).

3. Galle, E.M. and Woods, H.B., "Best Constant Weight and Rotary Speed of Rotary Rock Bits", API Drilling and Production Practice, p. 48 (1963).
4. Wardlaw, H.W.R., "Drilling Performance Optimization and Identification of Overpressure Formation", Presented at the Fourth Conference on Drilling and Rock Mechanics, January 1969, at Austin.
5. Young, F.S. Jr., "Computerized Drilling Control", present at SPE 43 rd Annual Fall Meeting Held in Houston, Tex., Sep 29-Oct.2, 1968; and at SPE Oklahoma Regional Symposium held in Stillwater, Okla., Oct. 25, 1968.
6. Flores, Alvarez. F., "Optimizaci3n de la Perforaci3n" Tesis Profesional, Fac. Ing., UNAM., Mex. D.F., 1980.

CAPITULO VII

1. Lummus, J.L.: "Acquisition and Analysis of Data for Optimized Drilling", JPT (Nov. 1971) 1285-1293.
2. Lummus, J.L.: "Drilling Optimization", JPT (Nov., 1970) 1379-1389.
3. "Automatic Drilling Data Acquisition, Processing, and Telemetry", Pet. Eng. (Aug., 1971) 39.

CAPITULO VIII

1. Young, F.S. Jr., "Computerized Drilling Control", presented at SPE. 43 rd Annual Fall Meeting held in Houston, Tex., Sep. 29-Oct.2, 1968; and at SPE Oklahoma Regional Symposium held in Stillwater, Okla., Oct. 25, 1968.
2. Zamora, M. and Villarreal, H., "How to size Computers for Drilling optimization", Oil and Gas Journal, Dec. 3, 1979 p.85-89

3. Terbrack, W. and Stivers, G.S., "Drilling Rig Instruments Promote Efficiency, Safety", Pet. Eng., May, 1979, p. 76-82.
4. Lummus, J.L.: "Acquisition and Analysis of Data for Optimized Drilling", JPT (Nov. 1971) 1285-1293.