



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA

0174

1-A  
2ej

Prof. PEDRO CAUDILLO MARQUEZ  
P r e s e n t e

Comunico a usted que a propuesta del COORDINADOR DE LA  
SECCION EN ING. PETROLERA ha sido designado  
como director de tesis del alumno(a) \_\_\_\_\_  
JESUS EMILIO OLAYA BENITEZ para obtener el grado de  
M EN I EN PETROLERA.

Mucho he de agradecerle su comunicación, por escrito, de la  
aceptación a esta designación y el nombre de la tesis a de-  
sarrollar.

Atentamente,  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria a 10 de noviembre de 1986  
EL JEFE DE LA DIVISION

  
DR. GABRIEL ECHAVEZ ALDAPE

E.5.1



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 está 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.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1 FORMULACION DE LAS ECUACIONES PARA MINIMIZAR LOS COSTO DE PERFORACION	3
1.2 RELACIONES BASICAS	6
1.3.1 Ritmo de perforación	6
1.3.2 Efecto de la velocidad de rotación sobre el ritmo el ritmo de perforación	7
1.3.3 Efecto del desgaste del diente sobre el ritmo de perforación	8
1.4 DESGASTE DE LA BARRENA	10
1.4.1 Efecto de la velocidad de rotación sobre el desgaste de la barrena	10
1.4.2 Efecto del peso sobre barrena sobre el desgaste del diente	11
1.4.3 Efecto del desgaste del diente sobre el ritmo de desgaste del diente	12
1.4.4 Efecto del peso sobre barrena en la vida de la barrena	13
1.4.5 Efecto de la velocidad de rotación sobre la vida de la barrena	14
2. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS A PARTIR DE DATOS	

DE CAMPO	16
2.1 Determinación de M, $\lambda$ y K (Pruba de 5 puntos)	16
2.2 Determinación de C2	18
2.3 Parámetros de desgaste del diente	20
2.4 Constante del balero	21
2.5 Error en la medición de parámetros	23
2.6 Consideraciones teoricas	23
3. HIDRAULICA	24
3.1 Efecto de la hidráulica	28
3.2 Interacciones entre la hidráulica y el lodo	29
3.3 Procedimiento para el cálculo de la potencia hidráulica en la barrena	30
4. METODOLOGIA DEL PROGRAMA	34
4.1 DIAGRAMA DE FLUJO	36
4.2 LISTADO	41
4.3 RESULTADOS	51
4.4 DEFINICION DE LAS VARIABLES EMPLEADAS EN EL PROGRAMA	56
4.5 BIBLIOGRAFIA	65
APENDICE	67
4.6 NOMENCLATURA	74

## INTRODUCCION

Experimentos previos de laboratorio y de campo han demostrado el efecto de diferentes variables sobre el ritmo de perforación. Estos resultados han sido incorporados dentro de optimizaciones teóricas para reducir el costo por pie perforado.

Las teorías de perforación para minimizar costos tratan, a partir de la combinación de datos históricos y de técnicas de predicción empíricas, de seleccionar el peso sobre barrena y la velocidad de rotación óptimos. Soluciones pasadas requieren un uso extensivo de equipos de computación; debido tanto a la complejidad de las formulaciones matemáticas, como al gran número de variables involucradas.

Intentos por aplicar estos resultados en el campo han fallado debido a la incertidumbre de los datos de entrada. La combinación óptima del peso sobre barrena y de la velocidad de rotación para minimizar el costo por pie perforado cambia para cada tipo de barrena, equipo de perforación, tipo de formación, y conjunto de condiciones de operación. Por lo tanto deben calcularse el peso sobre barrena, y la velocidad de rotación óptimos para obtener el mínimo costo total por pie perforado de cada barrena.

Después de obtenidos el peso sobre barrena y la velocidad de rotación óptimos, se procede a optimizar la hidráulica para garantizar una buena limpieza en el fondo del agujero, y así asegurar el máximo ritmo de perforación.

Este trabajo tiene la finalidad de presentar en forma integral un programa de computación para minimizar los costos por pie perforado, optimizando el peso sobre barrena, la velocidad de rotación, y la hidráulica.

# 1 FORMULACION DE LAS ECUACIONES PARA MINIMIZAR LOS COSTOS DE PERFORACION

La optimización del peso sobre barrena y velocidad de rotación, para obtener el menor costo por pie perforado en un intervalo y bajo condiciones de operación dadas, no es conveniente extenderla a otros intervalos, ya que los costos por pie perforado varían para cada tipo de barrena.

Los costos por pie perforado de una barrena es la suma de tres costos: el costo de la barrena, el costo de viaje, y los costos de rotación. Si el costo de barrena es dividido por la longitud perforada, el resultado es el costo por pie para el intervalo perforado.

$$\text{Costo } \$/\text{pie} = \frac{CB + CT + CR}{Y} \quad (\$/\text{pie}) \quad (1)$$

Los costos por pie perforado dado por la ecuación (1), es el costo que será minimizado mediante una selección apropiada de peso sobre barrena y velocidad de rotación. La ecuación (1) muestra que la selección de peso sobre barrena y velocidad de rotación, sólo afecta dos parámetros: costo de rotación y la longitud perforada. El costo de barrena y el costo de viaje son fijos para una barrena en particular.

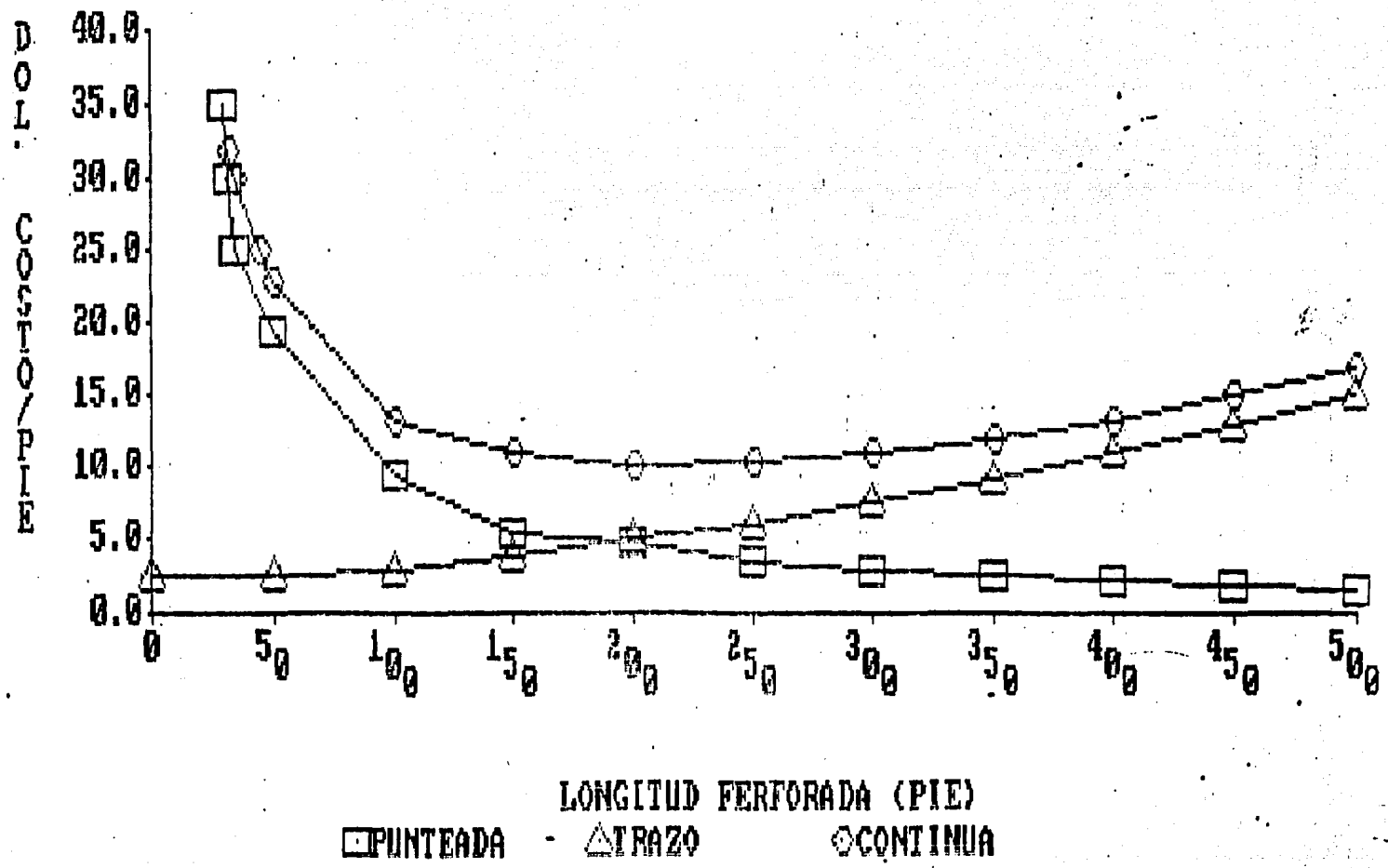
Si el costo fijo (barrena y viaje), y el costo de rotación son considerados separadamente, notamos que la asignación del costo fijo para el costo por pie perforado podría ser muy alto si fuera determinado después de que la barrena perforara el primer pie. Sin embargo esta asignación declina continuamente a medida que la barrena sigue perforando. Por el contrario, la contribución del costo de rotación al costo por pie perforado es inicialmente bajo, ya que la barrena es nueva y perfora más rápido, pero después crece continuamente puesto que el ritmo de perforación declina con el desgaste de la barrena. Estas dos relaciones, según lo ilustra Bruce<sup>1</sup> son mostradas en la Fig. (1) para una barrena hipotética a un peso y velocidad de rotación constante. En esta figura la curva punteada es el costo por pie atribuible a un costo fijo y es independiente del peso sobre barrena y velocidad de rotación seleccionadas, y la curva a trazo es el costo de rotación por pie y es función del peso sobre barrena y velocidad de rotación seleccionadas.

Sus posiciones relativas en la Fig. (1) podrían cambiar drásticamente con otras selecciones de peso sobre barrena y velocidad de rotación. Finalmente, la curva continua es el costo total por pie, y es simplemente, la suma de las dos funciones.

Como se observa la curva continua tiene un valor mínimo, y éste valor está asociado con un peso sobre barrena y velocidad de rotación particulares. Para determinar si este costo mínimo es el



FIG. 1



mínimo costo por pie perforado para todas las combinaciones prácticas de peso sobre barrena y velocidad de rotación, cualquier constante o variable debe ser calculada y comparada. Este trabajo es muy laborioso si se efectúa a mano, pero puede hacerse rápidamente en computadores

El ritmo de perforación puede ser incrementado por un aumento en el peso sobre barrena o la velocidad de rotación, sin embargo, esto reduciría la vida útil de la barrena, y Además, un cambio relativo en el peso sobre barrena y velocidad de rotación produciría diferentes resultados, tanto en el ritmo de perforación, como en el desgaste de la barrena; dependiendo de las condiciones de esta.

Para la solución del problema de optimización de variables ( peso sobre barrena y velocidad de rotación ) se requiere de una rama de las matemáticas conocida como cálculo variacional.

Con las técnicas del cálculo variacional se han logrado programas para perforar a mínimo costo. Estos están basados en el cambio de peso sobre barrena y en la velocidad.

En los párrafos anteriores se han establecido: los tipos de costos que pueden minimizarse, las razones por las cuales éste costo mínimo existe, que el menor costo puede hallarse por una apropiada selección de peso sobre barrena y velocidad de rotación. La

siguiente sección presentará las relaciones básicas entre las variables de operación: peso sobre barrena, velocidad de rotación y condiciones de la barrena.

## 1.2 RELACIONES BASICAS

Las relaciones entre el peso sobre barrena y velocidad de rotación con el ritmo de perforación, se presentan detalladamente a continuación. Las relaciones concernientes al ritmo de perforación se obtuvieron a partir de experiencias de campo en actividades programadas de pruebas de perforación<sup>2,3</sup>

## 1.3 RITMO DE PERFORACION

### 1.3.1 Efecto del peso sobre barrena en el ritmo de perforación

Los incrementos en el peso sobre barrena causan un incremento correspondiente en el ritmo de perforación. Esto sucede en todos los casos, excepto en aquellos en donde a la barrena se le adhieren los recortes lo cual le impiden perforar eficientemente, lo que ocurre frecuentemente en arcillas muy suaves. La relación entre el ritmo de perforación y peso sobre barrena se asume que es lineal en todo el rango de peso sobre barrena que se usa normalmente en operaciones de perforación rotatoria. Extrapolando en la gráfica de ritmo de perforación vs peso sobre barrena, se

obtiene que para un ritmo de perforación cero, la intersección en el eje de peso sobre barrena si da un valor negativo se puede interpretar como un embolemiento parcial de la barrena, o si da un valor positivo se podría interpretar como el umbral del peso que debe excederse antes de que el diente de la barrena penetre la formación; restando la intersección del peso sobre barrena, es posible escribir la relación entre el ritmo de perforación y el peso sobre barrena, de tal forma que sólo intervenga una constante que describa exactamente la forma en que se incrementa el ritmo de perforación a medida que se incrementa el peso sobre barrena. La relación entre el ritmo de perforación y el peso sobre barrena esté dada por:

$$\frac{dy}{dt} \propto (W - M) \quad (2)$$

$\frac{dy}{dt}$  = ritmo de perforación  
 $W$  = peso sobre barrena

$M$  = Peso sobre barrena mínimo para iniciar la perforación

Estas relaciones son ilustradas en la Fig. 2. Por conveniencia todos los pesos sobre barrena, y por lo tanto todos los valores de  $M$ , se expresan en miles de libras.

### 1.3.2 - Efecto de la velocidad de rotación sobre el ritmo de perforación

El ritmo de perforación se incrementa a medida que la velocidad de

rotación se aumenta. La relación es no lineal, o sea que a velocidades de rotación altas, un incremento en ésta tiene menor efecto sobre el ritmo de perforación que un incremento igual a una velocidad de rotación menor. La relación entre el ritmo de perforación y la velocidad de rotación está dada por<sup>4,5</sup>

$$\frac{dY}{dt} \propto N^\lambda \quad (3)$$

donde:

$N$  = Velocidad de rotación, rpm

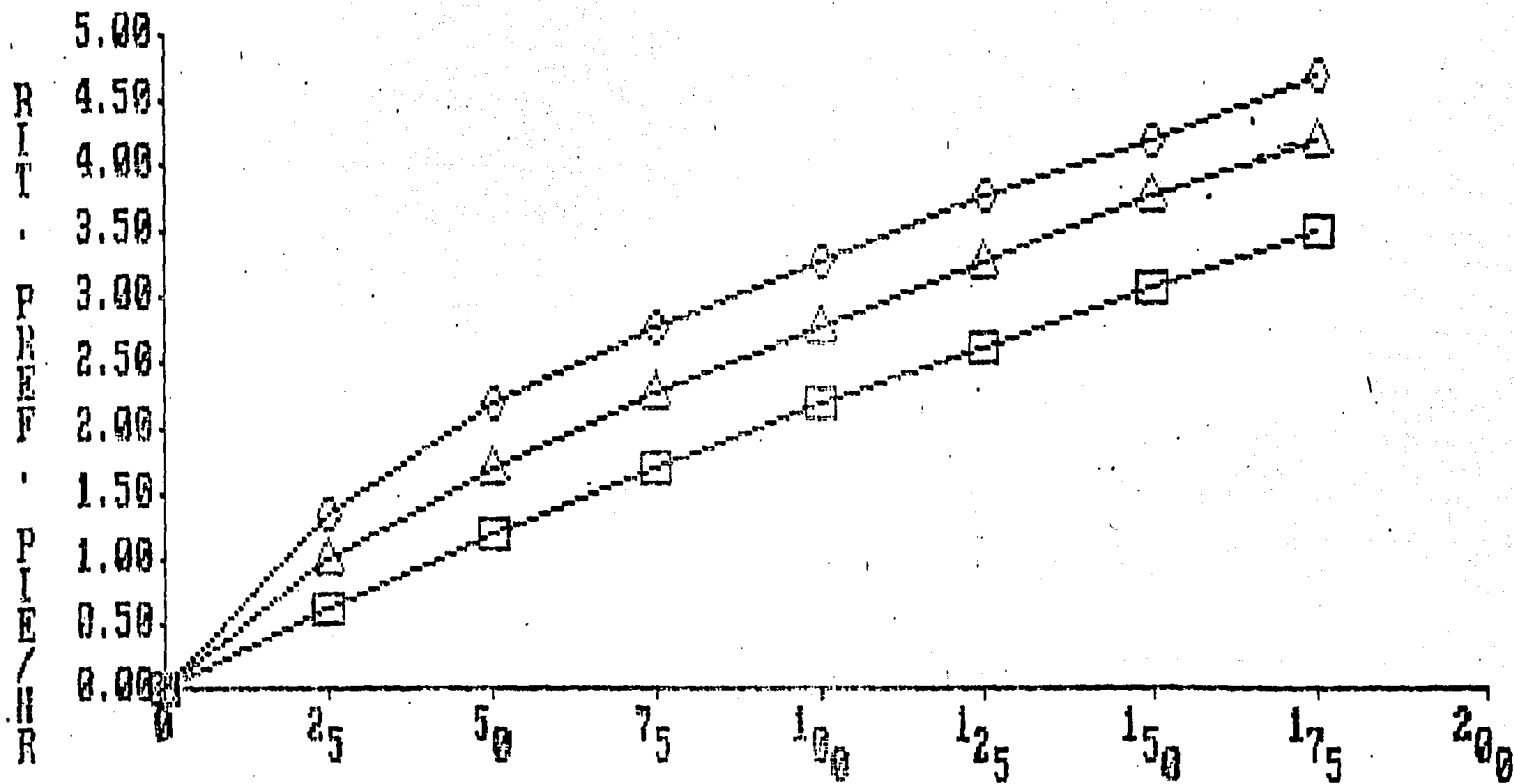
$\lambda$  = Exponente que expresa el efecto de la velocidad de rotación sobre el ritmo de perforación

Pruebas de campo han demostrado<sup>6</sup> que el exponente  $\lambda$  está influenciado por el peso sobre barrena. En general, pesos sobre barrena bajos dan como resultado valores más altos de  $\lambda$  que los obtenidos con los pesos sobre barrena altos. La fórmula que se presenta aquí no toma en cuenta esta observación. Esta interrelación se discutirá en la sección concerniente a la determinación de parámetros a partir de datos de campo. La Fig. 3 ilustra la relación general entre ritmo de perforación y velocidad de rotación.

### 1.3.3 Efecto del desgaste del diente sobre el ritmo de perforación

Para un peso sobre barrena y velocidad de rotación dada, una barrena nueva perfora más rápidamente que una barrena usada. Sin embargo, la deficiencia en ritmo de perforación, es no lineal;

FIG. 3



VELOCIDAD DE ROTACION

□ K=.85 M=30    △ K=.70 M=45    ◇ K=.55 M=60

esto quiere decir que la disminución en el ritmo de perforación es mucho más rápida en las primeras etapas de desgaste del diente que cuando éste empieza a desgastarse significativamente.

Esta condición general esta contenida en la ecuación que relaciona el desgaste del diente con el ritmo de perforación, en la que H está normalizada; esto significa que H=0 para una barrena nueva y H=1 para una barrena totalmente gastada. Matemáticamente esta relación es.

$$\frac{dY}{dT} \propto \frac{1}{(1 + C_2 H)} \quad (4)$$

donde:

H = Desgaste del diente normalizado, ( H=1 para un diente totalmente gastado, H=0 para un diente nuevo )

C<sub>2</sub> = Constante que expresa el efecto de desgaste del diente de la barrena sobre la velocidad de rotación, establecida mediante datos de campo.

El requerimiento de que C<sub>2</sub> sea establecido mediante los datos de campo, obedece a que generalmente se requiere un diente nuevo para perforar lutitas suaves, mientras un diente gastado perfora fácilmente las arenas. Además, el valor de C<sub>2</sub> está influenciado indirectamente por el tipo de barrena. Una Auto Afilable tendrá un valor de C<sub>2</sub> diferente al de una de Crestas Planas, aún cuando ambas estén perforando la misma formación.

Las ecuaciones 2, 3 y 4 describen el efecto del peso sobre barrena, velocidad de rotación y el desgaste del diente sobre el

ritmo de perforación. Esto es:

$$\frac{dY}{dT} \propto (W - M) N^\lambda \frac{1}{(1 + C_2 H)} \quad (5)$$

Una sola constante K, definida como la capacidad de perforación de la formación, permite escribir la ecuación de la forma:

$$\frac{dY}{dT} = K \frac{(W - M) N^\lambda}{(1 + C_2 H)} \quad (6)$$

Es importante notar que el valor real de K es solamente un factor de escala que no tiene influencia en el cambio relativo del ritmo de perforación. Cuando se hacen cambios en el peso sobre barrena, velocidad de rotación o las condiciones del diente, K solamente significa que un peso sobre barrena y velocidad de rotación dadas perforan algunas formaciones más rápido que otras.

#### 1.4 DESGASTE DE LA BARRENA

Las relaciones concernientes al efecto del peso sobre la barrena y velocidad de rotación sobre el desgaste del diente y desgaste del balero, fueron obtenidas principalmente a partir de las referencias<sup>7,8</sup> y de investigaciones de la Cia. Hughes Tool. Las



siguientes ecuaciones se basan en las interpretaciones de infomación hechas por dicha Cia.

#### 1.4.1 Efecto de la velocidad de rotación sobre el desgaste de la barrena

El ritmo de desgaste de los dientes de la barrena se incrementan con un aumento en la velocidad de rotación. Además, el tipo de barrena es importante por dos razones: (1) el cono de una de barrena para formación suave hará mas revoluciones por revolución de la sarta que el de una barrena para formación dura, y (2) el desgaste del diente para una formación suave resulta ser más rápido que el desgaste en una formación dura. Combinaciones de estos efectos dan una relación general que es mostrada en la Fig. 4 y se describen matemáticamente como:

$$\frac{dH}{dT} \propto ( P N + Q N^3 ) \quad (7)$$

donde:

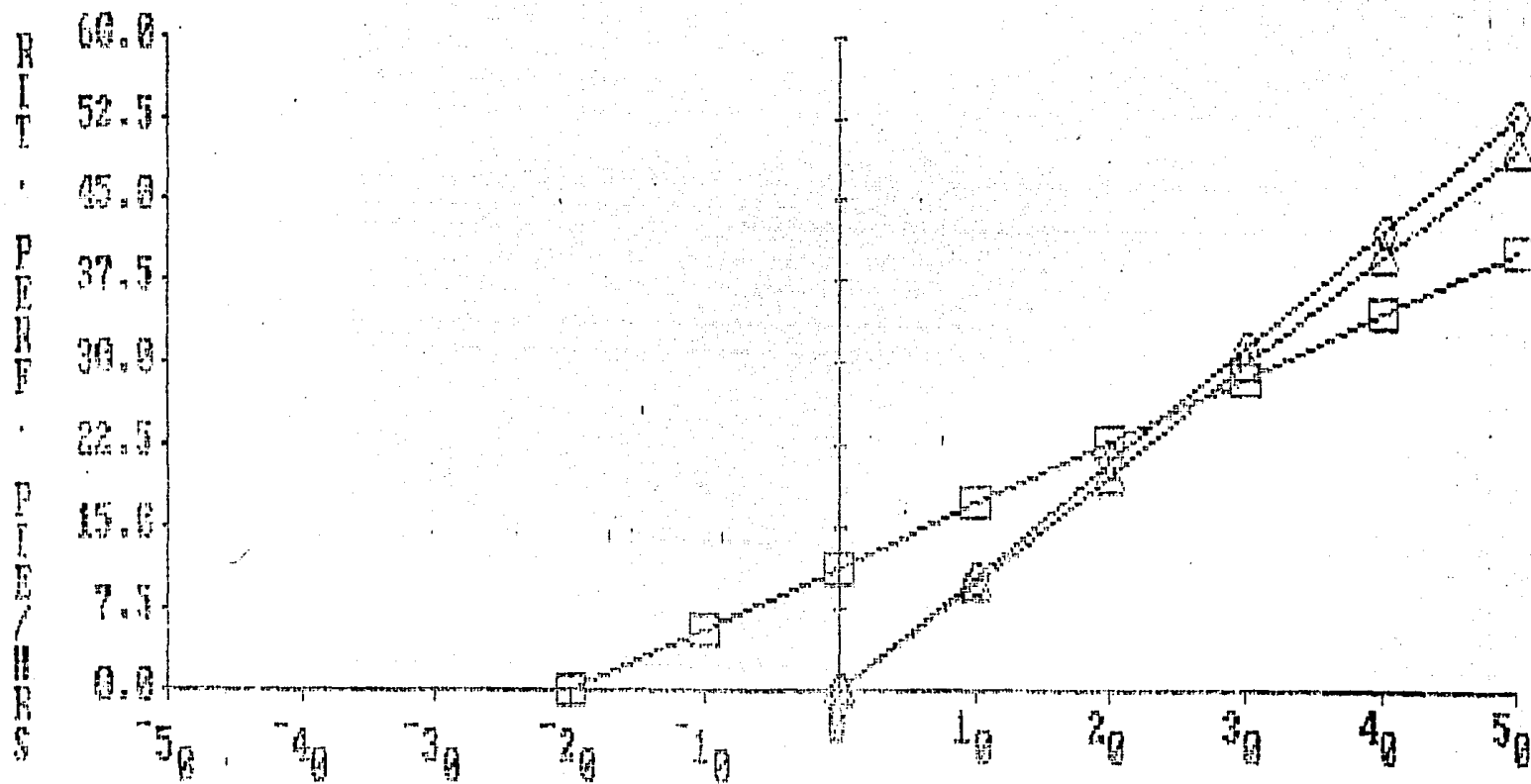
$\frac{dH}{dT}$  = ritmo de desgaste del diente  
 $N$  = velocidad de rotación

$P, Q$  = constantes determinadas para cada tipo de barrena

#### 1.4.2 Efecto del peso sobre barrena sobre el desgaste del diente

El ritmo del desgaste del diente se incrementa con un aumento del peso sobre barrena. Esta relación es no lineal, ya que este ritmo

FIG. 2



PESO SOBRE BARRENO (1000 LBS)

□ CM=0

△ CM=-20

○ CM=20

FIG. 4

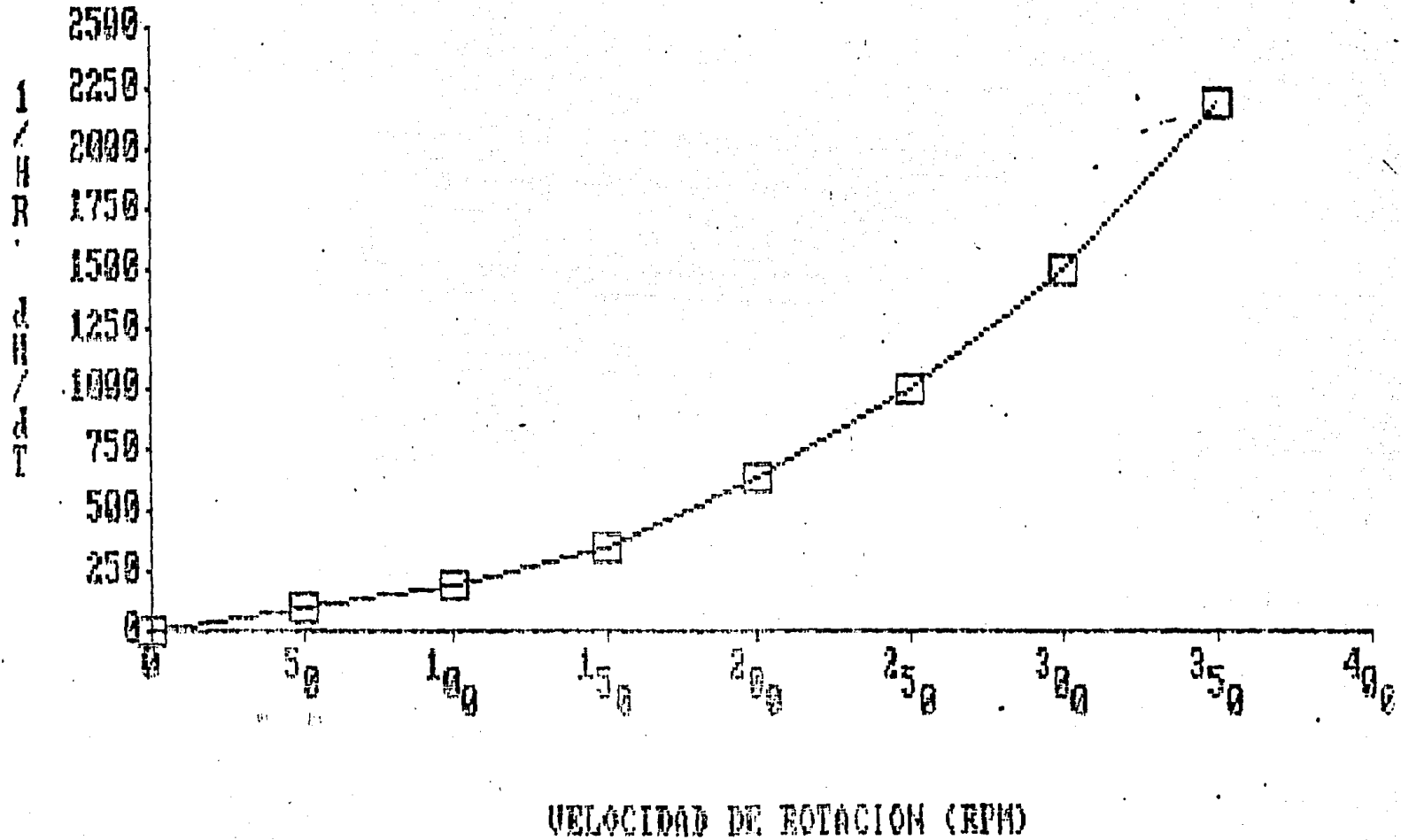
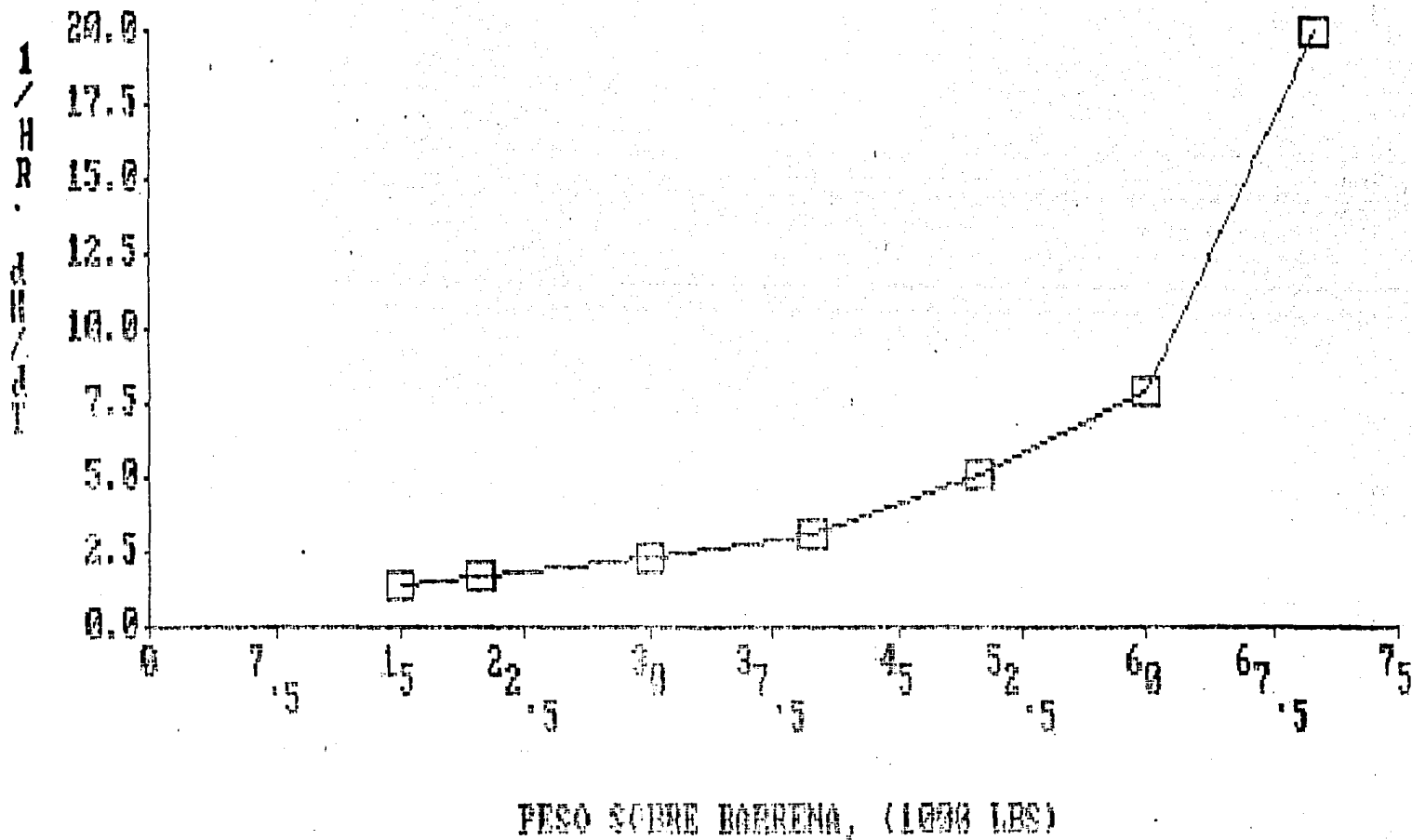


FIG. 5



de desgaste se incrementa más rápidamente con pesos sobre barrenas altos. Esto obedece al hecho de que a partir de un peso determinado la barrena empieza a tener un desgaste excesivamente rápido, y finalmente, se destruye a un peso mayor. La Fig. 5 muestra esta relación. Matemáticamente se expresa como:

$$\frac{dH}{dT} \propto \frac{1}{(-D_1 W + D_2)} \quad (8)$$

En esta expresión las constantes  $D_1$  y  $D_2$  dependen del diámetro de la barrena, y fueron determinados experimentalmente considerando un peso sobre barrena de destrucción de 10000 lb/pg<sup>2</sup>.

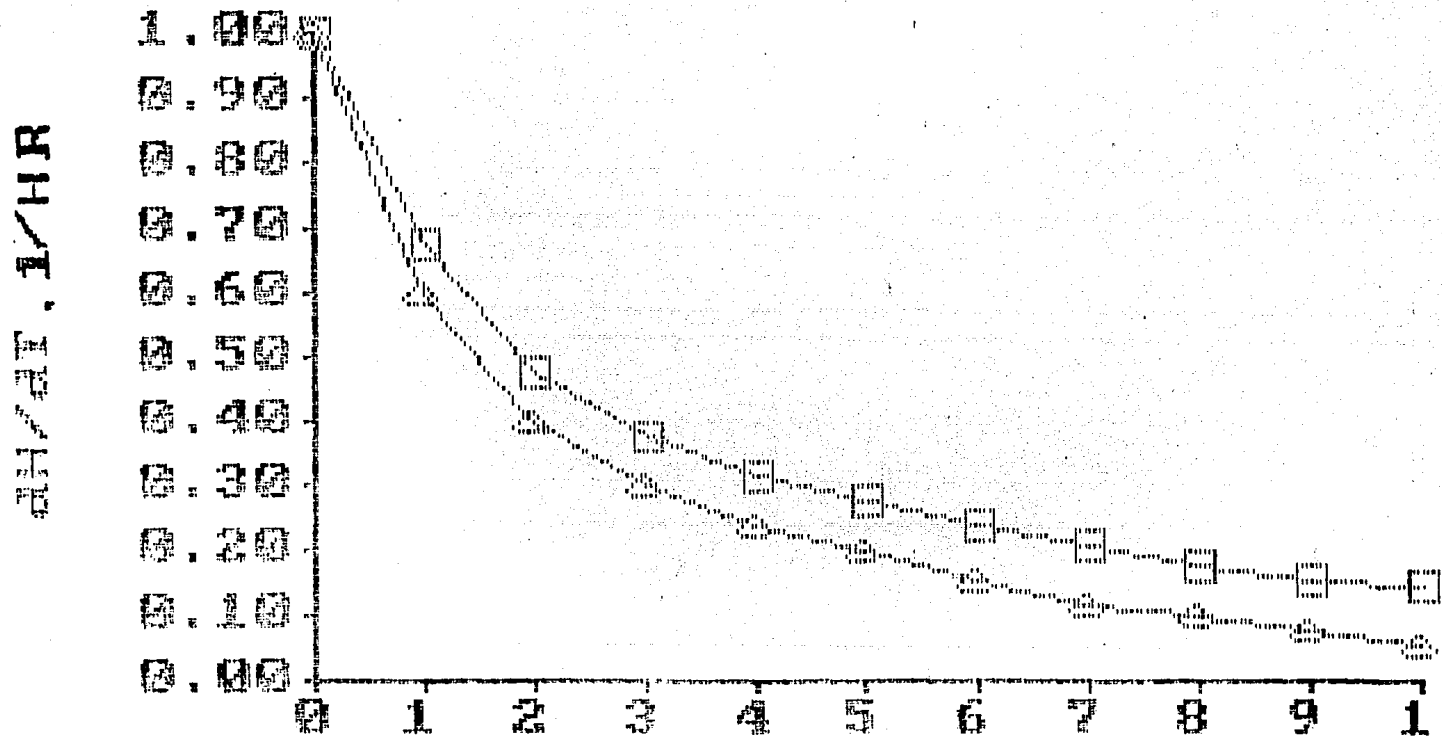
#### 1.4.3 Efecto del tamaño del diente (desgastado) sobre su velocidad de desgaste

El ritmo al cual los dientes de la barrena se desgastan decrece a medida que se va desgastando el diente. La forma del diente para un desgaste progresivo se manifiesta siempre en un crecimiento del área expuesta a la formación. Además, para un peso sobre barrena y velocidad de rotación dada, el desgaste de un diente nuevo es mayor que para un diente gastado.

La diferencia en el ritmo de desgaste entre una barrena para formación dura y otra para formación suave se presenta en la Fig. 6.

La forma del diente refleja la cantidad de carburo de tungsteno sobre el diente y la extensión del tratamiento térmico. La relación es:

FIG. 6



RIT. DE DESGASTE DEL DIENTE  
 □ suave      ● dura

$$\frac{dH}{dT} \propto \frac{1}{(1 + C_1 H)} \quad (9)$$

donde  $C_1$  esta relacionada con el tipo de barrena ( Ver Tabla 1 ).

Las ecuaciones (7), (8) y (9) son combinadas con una constante de proporcionalidad para escribir el ritmo de desgaste sobre el diente.

$$\frac{dH}{dT} = A_f \frac{(P N + Q N^3)}{(-D_1 W + D_2)(1 + C_1 H)} \quad (10)$$

La constante de proporcionalidad  $A_f$ , está definida como el factor de abrasividad de la formación. ( Ver 2.3 pag. 20 )

La ecuación (10) se transforma en.

$$\frac{dH}{dT} = A_f \frac{(P N + Q N^3)}{(-D_1 W + D_2)(1 + C_1 H)} * 10^{-3} \quad (11)$$

donde:

$\frac{dH}{dT}$  = ritmo de desgaste del diente

$A_f$  = factor de abrasividad de la formación

$H$  = altura normalizada del diente,  $H=1$  para un diente totalmente gastado, y  $H=0$  para un diente nuevo

$W$  = peso sobre barrena , 1000 lb

$N$  = velocidad de rotación, rpm

$D_1, D_2$  = constantes dependientes del diámetro de barrena

$F, Q, C_1$  = constantes dependientes del tipo de barrena

Nota: Ver solución en el apéndice B.

#### 1.4.4 Efecto del peso sobre barrena en la vida del balero

El ritmo de desgaste del balero se incrementa rápidamente con el aumento en el peso sobre barrena. La relación es no lineal, como lo describe la Fig. 7, y es expresado como:

$$\frac{dB}{dT} \propto W^s \quad (12)$$

donde:

$\frac{dB}{dT}$  = ritmo de desgaste del balero  
 $W$  = peso sobre barrena, 1000 lbs

El valor de  $s = 1.5$  ha sido determinado experimentalmente en perforaciones anteriores.<sup>8</sup>

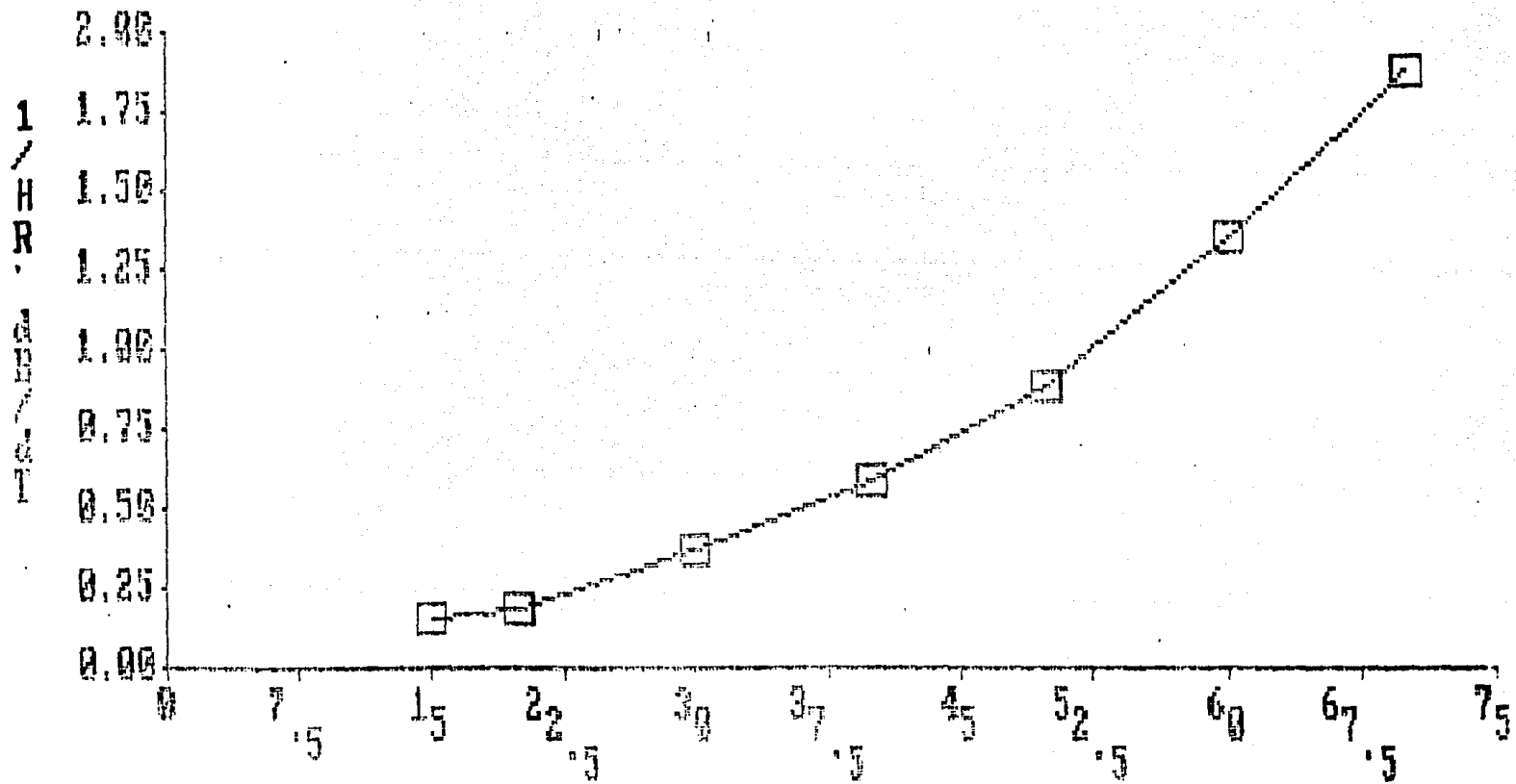
#### 1.4.5 Efecto de la velocidad de rotación sobre la vida del balero

Datos presentados<sup>4</sup> indican que los baleros son capaces de soportar un cierto número de vueltas, indiferentemente de la velocidad de rotación. Por lo tanto, el ritmo de desgaste del balero se incrementa directamente con el aumento de la velocidad de rotación, y se expresada como:

$$\frac{dB}{dT} \propto N \quad (13)$$



FIG. 7



PESO SOBRE BALANZA, (1000 LBS)

Las combinaciones de las ecuaciones (12) y (13) describen el ritmo de desgaste de los baleros de la barrena como una función del peso sobre barrena y la velocidad de rotación

$$\frac{dB}{dT} = \frac{1}{b} N W^{1.5} \quad (14)$$

integrando

$$b = \frac{N W^{1.5} T_r}{B} \quad (14a)$$

donde:

$\frac{dB}{dT}$  = ritmo de desgaste del balero

B = Desgaste normalizado del balero, B=0 para un balero nuevo y B=1 cuando no tiene vida útil

N = velocidad de rotación, rpm

W = peso sobre barrena, 1000 lbs

b = constante del balero

T<sub>r</sub> = tiempo de rotación

La magnitud de la constante de balero b, está influenciada por el lodo de perforación, particularmente por el contenido de sólidos, por el tratamiento químico del lodo, diámetro y tipo de barrena. El incremento de la constante del balero b, con el diámetro de la barrena es proporcional al cuadrado de este.

Todas las relaciones requeridas para obtener la ecuación de mínimo costo han sido hasta ahora desarrolladas. Las ecuaciones del (2) al (14a) describen el efecto del peso sobre barrena y velocidad de rotación sobre el ritmo de perforación y la vida de la barrena.

## 2. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS A PARTIR DE DATOS DE CAMPO

### 2.1 Derminación de M, $\lambda$ , y K (Prueba de 5 punto)

Los párametros M,  $\lambda$ , y K los cuales describen la respuesta del ritmo de perforación a cambios en el peso sobre barrena y velocidad de rotación, pueden ser determinados por pruebas de perforación. Estas pruebas pueden variar en complejidad. En general, la cantidad de datos requeridos para calcular M,  $\lambda$ , y K confiablemente, depende de la obtención de ritmos de perforación factibles para varias combinaciones de peso sobre barrena y velocidad de rotación. Esto significa que la variedad de formación controlará la complejidad de las pruebas de perforación requeridas para determinar estos parámetros.

El peso sobre barrena mínimo para iniciar la perforación M, es calculado a partir de una prueba de cinco puntos usando la siguiente ecuación. (Ver apéndice A)

$$M = .50(W_2 - R_2(W_2 - W_5)/(R_2 - R_5) + W_3 - R_3(W_3 - W_4)/(R_3 - R_4)) \quad (15)$$

El exponente de velocidad de rotación  $\lambda$ , es el calculado por la siguiente ecuación.

$$\lambda = .50 (\ln(R_3/R_2)/\ln(N_3/N_2) + \ln(R_4/R_5)/\ln(N_4/N_5)) \quad (16)$$

El factor de perforabilidad de la formación K, se calcula para

cada punto de la prueba y se obtiene un valor promedio usando la siguiente ecuación,

$$K = .25(R_2 ((W_2-M)N_2^{\lambda})) + (R_3 ((W_3-M)N_3^{\lambda})) + (R_4 ((W_4-M)N_4^{\lambda})) + (R_5 ((W_5-M)N_5^{\lambda})) \quad (17)$$

Las pruebas de cinco puntos se realizan para determinar los valores de  $R_1$  a  $R_6$ . Los resultados de una prueba se muestran en la Fig. 8 y también se enlistan en un ejemplo. Si de los resultados de las cinco pruebas de perforación,  $R_1$  y  $R_6$  (que fueron corridas con el mismo peso y la misma velocidad de rotación) concuerdan dentro de un 15% de error, los resultados de la prueba se consideran aceptables. Si la diferencia es mayor al 15%, es posible que durante la prueba haya ocurrido un cambio litológico y deberá repetirse la prueba. Si la litología es demasiado errática para obtener una prueba válida, entonces  $M$  puede ser supuesta o tomada de pruebas anteriores del área.

Ejemplo. Los siguientes datos se obtuvieron en una prueba de cinco puntos en formación de lutita. Diámetro de barrena 9 7/8 pulg.

Punto	Peso sobre barrena (1000 lbs)	velocidad de rotación (rpm)	ritmo de perforación (pie/hr)
1	55	110	26.2
2	50	75	20.0
3	50	150	34.0
4	60	150	40.1

5	60	75	24.6
6	55	110	25.0

Aplicando las ecuaciones 15, 16 y 17 Los valores de  $M$ ,  $\lambda$ , y  $K$  obtenidos de esta prueba son:

$$M = 392$$

$$\lambda = .735$$

$$K = 1.7 \times 10^{-5}$$

## 2.2 Determinación de $C_2$

El parámetro  $C_2$ , el cual describe la declinación en el ritmo de perforación con el desgaste del diente, podría ser determinado de los rendimientos de barrenas utilizadas previamente (registros de barrenas).

En su forma más simple, pueden obtenerse de los datos de una barrena a peso y velocidad de rotación constantes, mediante la comparación de la longitud perforada a la primera mitad de la vida útil de la barrena. La segunda información requerida es el estado del diente, ya que solamente el valor inicial y final de desgaste del diente son conocidos para una barrena en particular; es necesario estimar la condición promedio durante las respectivas mitades del recorrido de la barrena. La suposición que se hace es que el diente no se desgasta linealmente con el tiempo, entonces el desgaste del diente es  $1/4$  de  $H$  durante la primera mitad y  $3/4$  de  $H$  durante la segunda mitad, donde  $H$  es el estado del diente

cuando la barrena se saca.

Ahora, la ecuación de ritmo de perforación (6) puede ser escrita como:

$$\frac{dY}{dT} = K \frac{(W - M) N^\lambda}{(1 + C_2 H)} \quad (18)$$

Separando variables en la ecuación 18 e Integrando sobre un intervalo desde el tiempo 0 al tiempo  $T_1$  cuando el peso sobre barrena y velocidad de rotación se mantienen constantes se obtiene.

$$Y_1 = K \frac{(W_1 - M) N_1^\lambda T_1}{(1 + C_2 H)} \quad (19)$$

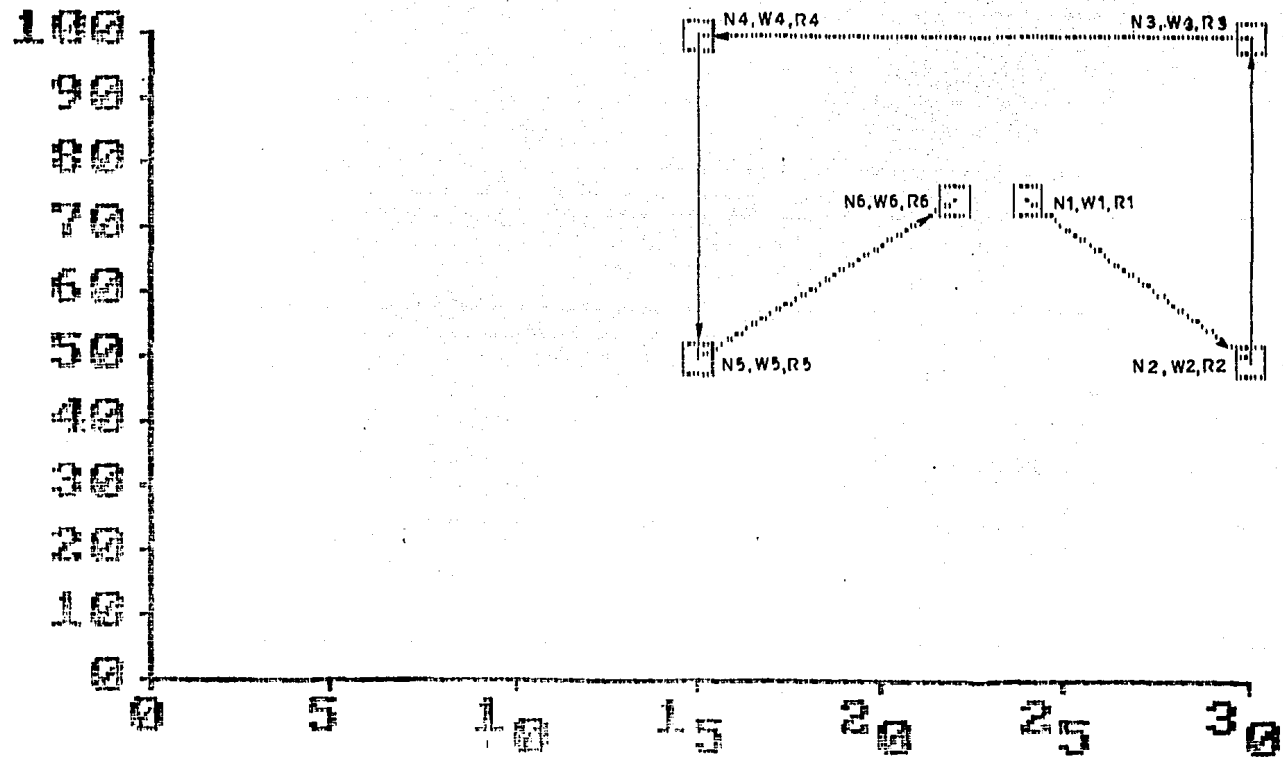
Como el peso sobre barrena y la velocidad de rotación fueron constantes durante el tiempo 0 a  $T_1$  la longitud perforada por la barrena fue medida cada en mitad, entonces de la ecuación (19) despejamos  $C_2$

$$C_2 = \frac{(Y_1 - Y_2)}{H(.75Y_2 - .25Y_1)} \quad (20)$$

donde:

$C_2$  = Constante que expresa la magnitud de la reducción del ritmo de perforación respecto al desgaste del diente

RIT. PERFORACION RPM



PESO SOBRE BARRENA, (1000 LBS)  
FIG. 8

$Y_1$  = Longitud perforada en la primera mitad, pies

$Y_2$  = longitud perforada en la segunda mitad, pies

Ejemplo: barrena tipo 111 diámetro 9 7/8 pulg., perforó 212 pies en 14.5 hrs con un peso de 40000 lbs y 100 rpm. Para la primeras 7:25 hrs perforó 130 pies, la condición del desgaste del diente fue 5/8

$$C_2 = \frac{(130 - 82)}{5/8(.75 \times 82 - .25 \times 130)}$$

$$C_2 = 2.65$$

### 2.3 Parámetros de desgaste del diente

Con excepción del factor de abrasividad,  $A_p$ , todos los parámetros, los cuales aparecen en la ecuación (11) de desgaste del diente, son funciones del tipo y diámetro de la barrena<sup>9</sup>. La Tabla 1 enlista los valores de los parámetros para los tipos de barrenas comunmente usados en el campo.

Se tendrá un valor de  $A_p$  para cada peso sobre barrena y velocidad de rotación.

Si un valor exacto de  $A_p$  es requerido, puede calcularse integrando la ecuación (11) entre los límites de desgaste de diente desde  $H_i$  a  $H_{i+1}$ . Las variables con subíndice  $i$ , son calculadas en un intervalo con un peso sobre barrena y velocidad de rotación constantes.



$$A_f = \frac{10^3(-D_1 W + D_2)}{(P N_i + Q N_i)} \frac{\int_{H_i}^{H_{i+1}} (1 + C_1 H) dH}{\int_{T_i}^{T_{i+1}} dT} \quad (21)$$

Integrando

$$A_f = \frac{\int_{H_i}^{H_{i+1}} (10^3(-D_1 W + D_2) ((H_{i+1} - H_i) + C_1/2(H_{i+1}^2 - H_i^2)))}{\int_{T_i}^{T_{i+1}} (P N_i + Q N_i) (T_{i+1} - T_i)} \quad (21a)$$

Note que los valores del numerador y denominador podrían ser evaluados para cada peso sobre barrena y velocidad de rotación. Si el peso sobre barrena y velocidad de rotación son constantes para todo el recorrido de la barrena, entonces

$$H_{i+1} = H$$

$$H_i = 0$$

$$T_{i+1} = T_r$$

$$T_i = 0$$

Si el peso sobre barrena y velocidad de rotación son constantes  
Sustituyendo en la ecuación (21a)

$$A_f = \frac{10^3(-D_1 W + D_2) (H_f + C_1/2 H_f^2)}{(P N + Q N^3) T_r} \quad (21b)$$

Los valores de los parámetros P, Q, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> y C<sub>1</sub> se encuentran en la Tabla 1 para todas las barrena.

Ejemplo: barrena tipo 114, diámetro de barrena 7 7/8, W=40, N=100, T=14.5 y H=5/8.

$$A_f = \frac{103 (3.84) [(5/8) + 7/2 (25/64)]}{(356) 14.5}$$

$$A_f = 1.48$$

#### 2.4 Constante del balero

La ecuación (14a) describe el efecto del peso sobre barrena y velocidad de rotación sobre la constante del balero. Hay dos valores adicionales los cuales influyen la constante del balero: el tipo de barrena y la composición del fluido de perforación.

Ejemplo. Para una barrena tipo 114, W = 40, N = 100, B = 7/8 y T=14.5

$$b = \frac{(100) (40)^{1.5} (14.5)}{7/8}$$

$$b = 420000$$

Si el peso sobre barrena y la velocidad de rotación cambian durante el recorrido, entonces b es calculado por:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{N_i W_i^{1.5} T_i}{B_i}}{\quad} \quad (23)$$

Donde  $T_i$  es intervalo de tiempo,  $N_i$  y  $W_i$  son constantes.

Todos los parámetros necesarios para un programa de mínimo costo por pie perforado, ya han sido determinados. El capítulo 5 describe el procedimiento del programa y los tipos de condiciones de perforación que deben ser considerados. Cada tipo de condiciones de perforación conducen a diferentes soluciones para la ecuación de mínimo costo.

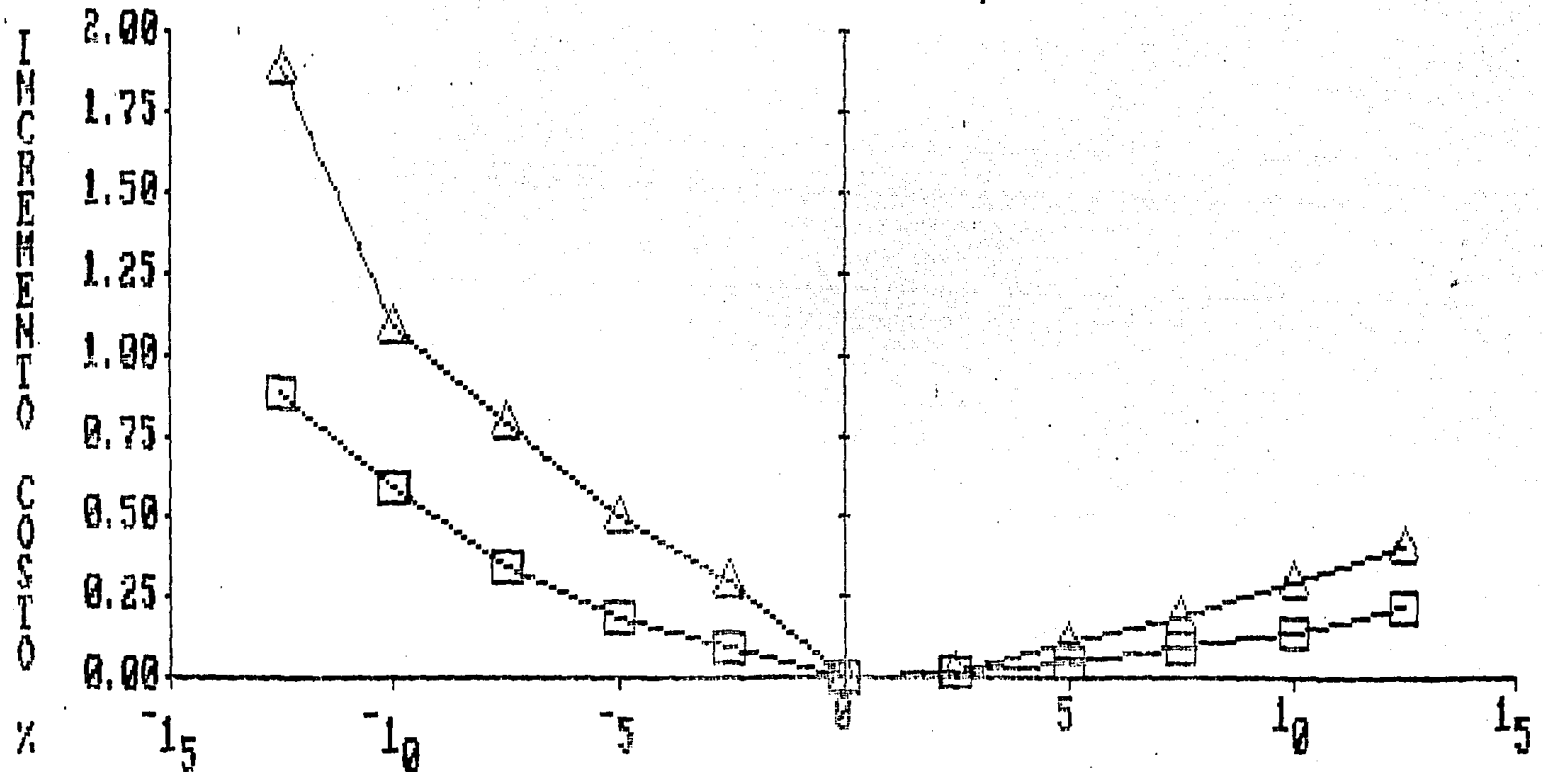
## 2.5 Error en la medición de parámetros

Una serie de cálculos han sido hechos para ilustrar la sensibilidad de los costos de perforación calculados respecto a parámetros medidos en el campo.

Los valores de 0, .65 y 2.5 son asignados a  $M$ ,  $\lambda$  y  $C_2$  respectivamente, como las características físicas que exhibiran las rocas. Los resultados de pesos sobre barrena y velocidad de rotación programados, los cuales fueron calculados con parámetros erróneos, son usados para calcular la longitud perforada. El costo por pie perforado es entonces calculado y comparado con el costo que resultaría si las características verdaderas fueran usadas.

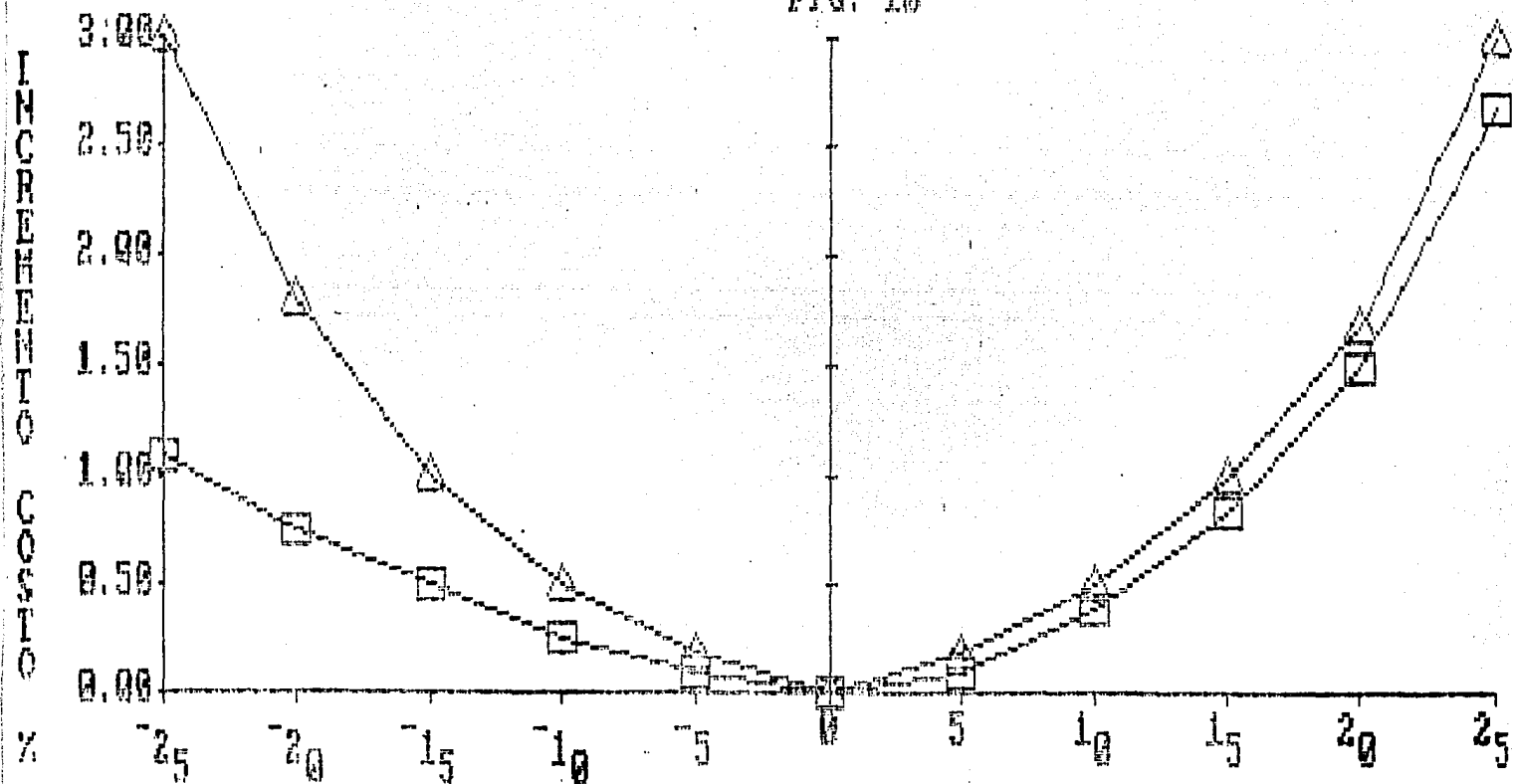
Las figuras 9, 10 y 11 muestran la sensibilidad del costo para errores en los parámetros  $M$ ,  $\lambda$  y  $C_2$ . Una falla del balero

FIG. 9



ERROR EN LA MEDICION DE M  
 □ BALERO      △ DIENTE

FIG. 10

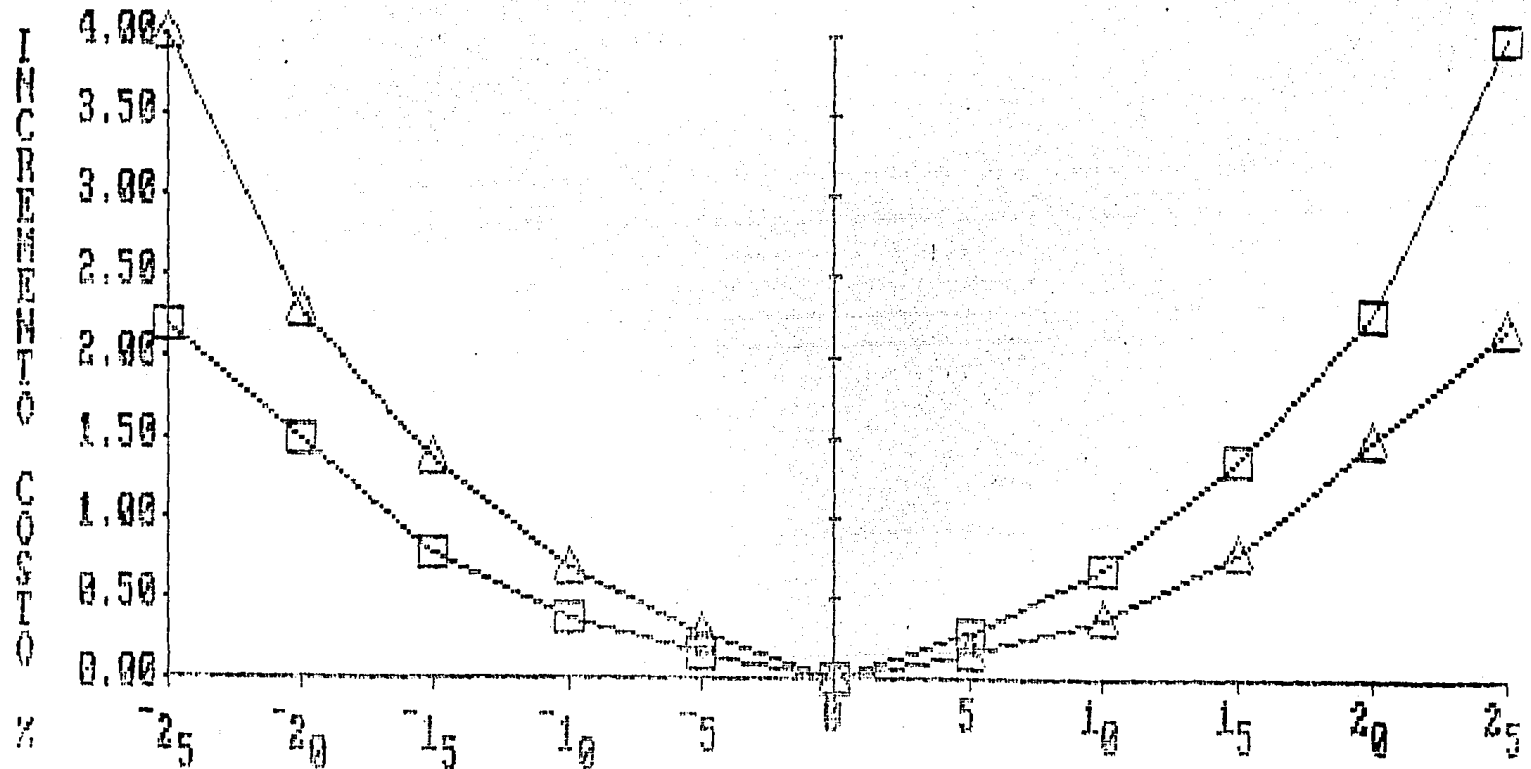


ERROR EN LA MEDICION DE  $\lambda$

□ BALERO

△ DIENTE

FIG. 11



ERROR EN LA MEDICION DE C2

□ BOLERO

△ DIENTE

( $A_f=1.5$ ) y una falla de diente ( $A_f=6.0$ ) son mostradas para cada parámetro.

## 2.6 Consideraciones teóricas

La perforación a mínimo costo por pie perforado requiere una evaluación cuantitativa de las variables involucradas, varias formas de modelos matemáticas han sido sugeridos,<sup>10,11</sup> Las relaciones reportadas aquí, son la solución básica programada en este trabajo.

Una solución para el costo mínimo por pie perforado considera un peso sobre barrena y velocidad de rotación constante durante la vida útil de la barrena. Esta solución está sujeta a ciertas limitaciones,<sup>10</sup> tales como:

1. El costo por pie perforado es la suma del costo de barrena, el costo de vije y el costo de operación.
2. Las barrenas de incrustaciones son excluidas.
3. La vida de la barrena está limitada tanto por la falla del balero como por el desgaste del diente.
4. La hidráulica es adecuada y no limita el ritmo de perforación.
5. las consideraciones de peso sobre barrena excluyen la

desviación del pozo.

6. El ritmo de perforación es solamente una función del peso sobre barrena, velocidad de rotación y del desgaste del diente; esto es, el efecto de presión es ignorado.



### 3. HIDRAULICA

La utilización óptima de la potencia de bombeo del lodo es de significativa importancia en las operaciones de perforación rotatoria. Un entendimiento de la energía consumida por los componentes del equipo y su evaluación analítica son fundamentales para el uso óptimo de tal potencia disponible.

La potencia hidráulica está generalmente asociada con el uso de barrena de toberas. El propósito de las toberas es el de mejorar la acción de limpieza del fluido de perforación en el fondo del agujero. Antes de que las barrenas de toberas fueran introducidas, los recortes de la barrena no eran removidos eficientemente, y la mayor parte de la vida de la barrena era consumida por la pulverización de los recortes ya perforados. Investigadores tales como Lummus<sup>12</sup> y Kendall<sup>13</sup>, han concluido que la mejor acción de limpieza es obtenida cuando la potencia hidráulica en la barrena es máxima.

La determinación de los diámetros apropiados de las toberas es uno de los aspectos más importante que deben atender el personal técnico de perforación.

Un incremento significativo en el ritmo de perforación puede ser logrado a través de una apropiada selección de las toberas.

En formaciones con presiones de poros normales, cuando se observa un incremento en el ritmo de perforación, se debe principalmente a un mejoramiento de limpieza en el fondo del agujero. La pulverización de los recortes ya perforados puede prevenirse si el fluido que circula a través de la barrena remueve los recortes al momento en que estos son perforados.

La verdadera optimización de la hidráulica en la barrena no podrá ser llevada a cabo completamente, hasta que se desarrollen relaciones matemáticas exactas que definan el efecto de la hidráulica sobre:

1. ritmo de perforación
2. costo de operación
3. desgaste de barrena
4. problemas potenciales como la limpieza en el agujero
5. capacidad de acarreo del fluido de perforación

Actualmente todavía no existe acuerdo total acerca de que parámetros de la hidráulica podrían ser usados para indicar la magnitud de su acción de limpieza.

Sin embargo, los parámetros más comúnmente usados para el diseño de la hidráulica son :

1. potencia hidráulica en la barrena
2. fuerza de impacto

### 3. velocidad en las toberas

#### 3.1 Efecto de la hidráulica

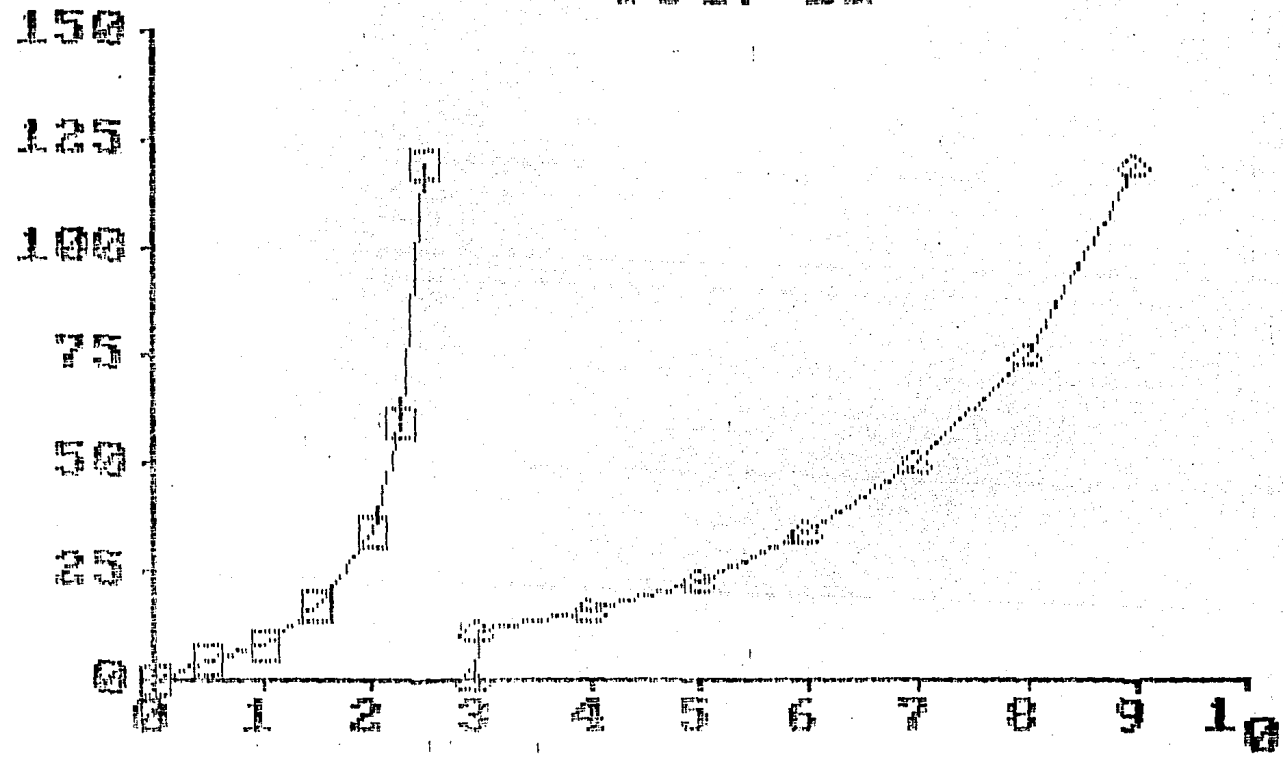
En general se ha aceptado que un gasto suficiente de lodo es necesario para la limpieza de la barrena y que la velocidad en las toberas es necesaria para liberar los recortes de la roca "atrapados" por la diferencial de presión en el fondo del agujero. Y esta velocidad en las toberas tiene un mayor efecto sobre el ritmo de perforación que el gasto por si solo<sup>14</sup>. Sin embargo, para un diámetro de agujero dado, hay un rango limitado de gastos que pueden ser usado para la limpieza del agujero, por lo tanto, la velocidad en las toberas para un diámetro de agujero dado depende de la potencia hidráulica consumida en la limpieza del fondo del agujero. una relación del ritmo de perforación vs la energía hidráulica en el fondo ( $hhp/pulg^2$ ), puede desarrollarse para varias formaciones, desde muy suave hasta muy dura. Tal relación ha sido desarrollada a partir de análisis de datos de campos y es mostrada en la Fig. 12

Esta gráfica puede ser usada para estimar el efecto relativo en el ritmo de perforación por cambios en las condiciones de la hidráulica en el fondo del agujero.

Sin embargo, el efecto de ritmo de perforación vs la potencia hidráulica no es suficiente para la optimización, ya que el concepto básico es el de optimizar el costo, y esto no necesariamente significa un incremento el ritmo de perforación.

MIT. PERF. (PIE/HR)

FIG. 12



■ Midra. min.    ○ Midra. max.

### 3.2 interacciones entre la hidráulica y el lodo

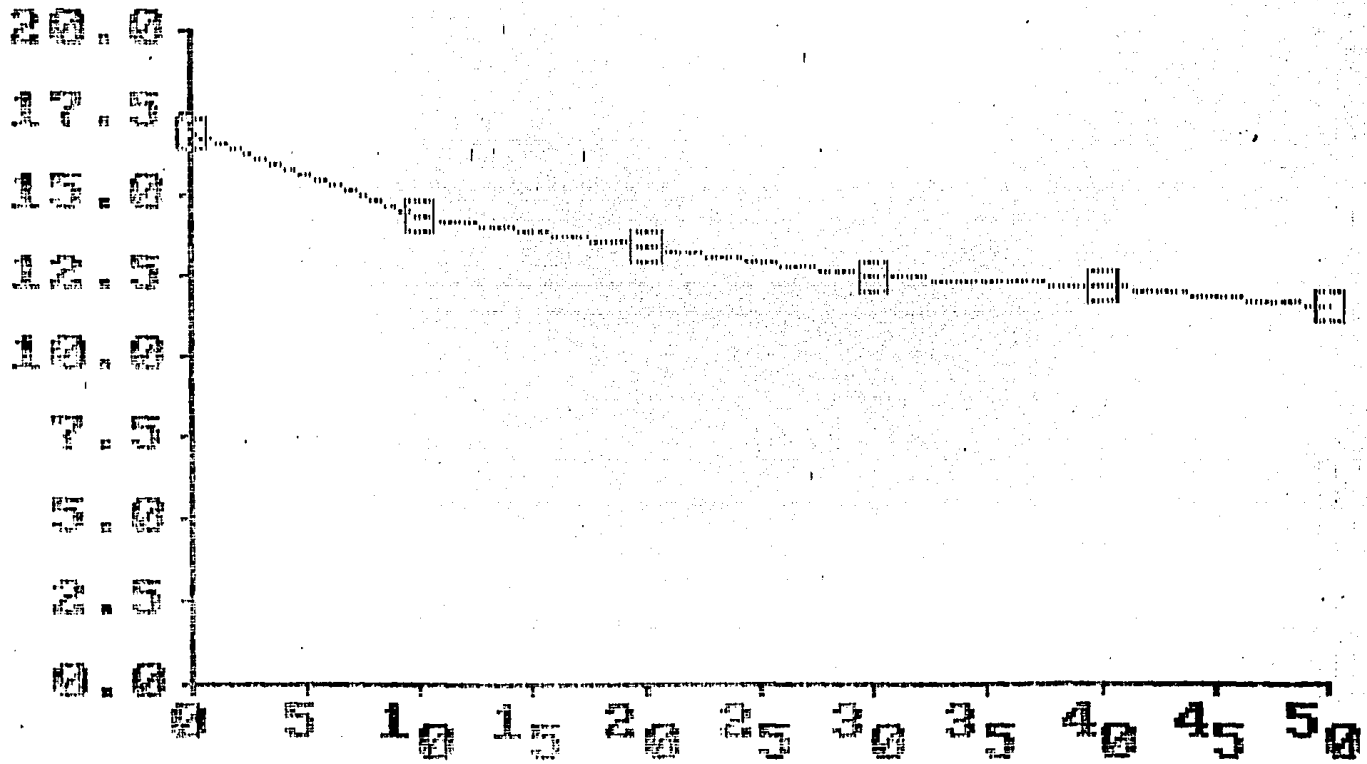
Los efectos combinados del lodo y la hidráulica serán examinados. La Fig. 13 muestra la relación entre el ritmo de perforación y la viscosidad, se nota que el ritmo de perforación disminuye con respecto a la viscosidad, debido a que la viscosidad probablemente afecta la limpieza en la barrena. Pruebas adicionales fueron hechas, donde la hidráulica era ajustada para eliminar el embolamiento de la barrena, y se encontró que la reducción en el ritmo de perforación ocurre aún cuando la barrena sea perfectamente limpiada.

Los mecanismos mas importantes que afectan la perforación en el agujero son:

1. el efecto de la hidráulica insuficiente, la cual causa una limpieza incompleta.
2. el efecto que los sólidos del lodo tienen en la perforación, causado por la interacción roca-barrena durante la fractura de la formación.
3. el efecto de la presión diferencial que tiende a mantener los recortes perforados en el fondo.

FIG. 13

RIT. PERE. CRIENHO



VISCOSIDAD PLASTICA, CP

### 3.3 Procedimiento para el cálculo de la potencia hidráulica en la barrena

A continuación se presenta una combinación de ecuaciones muy exactas y otras de carácter empírico pero de comprobada eficiencia. La mayor defensa de este método es su funcionamiento. En varios casos esto puede sugerir menores presiones de bomba y consumo de combustible para el equipo que otros métodos.

1. Seleccione el gasto, para el diámetro de barrena y ritmo de perforación calculado. Verificando que éste dentro de los límites señalados por Randall<sup>14</sup>.

$$Q_{\min} = 30 \times D_b \quad (23)$$

$$Q_{\max} = 50 \times D_b \quad (23a)$$

donde:

$Q_{\min}$  = Gasto mínimo, gal/min

$Q_{\max}$  = Gasto máximo, gal/min

$D_b$  = Diámetro de barrena, pulg.

2. Calcular la caída de presión total, dentro y fuera de la sarta de perforación, con el gasto seleccionado anteriormente, para este cálculo se utilizarán dos modelos reológicos. El modelo de Bingham (en flujo turbulento) y el modelo ley de potencia (en flujo laminar). Estas caídas de presión incluyen:

- a. pérdidas de presión en superficie (ver Tabla 2)
- b. pérdidas de presión en tuberías de perforación (ver Tabla 3)
- c. pérdidas de presión en lastrabarrenas (ver Tabla 3)
- d. pérdidas de presión en el espacio anular (ver Tabla 4)

3. Calcule la presión requerida a través de las toberas para una máxima potencia en la barrena de la siguiente forma.

Si  $R_p \geq 12$  pie/hr

$$HP_{\min} = (R_p/11.792) \cdot 48426 * Db^2 \quad (24)$$

$$HP_{\max} = (R_p/1.66897) \cdot 43735 * Db^2 \quad (24a)$$

$$HP = (HP_{\min} + HP_{\max})/2 \quad (25)$$

Si  $R_p < 12$  pie/hr

$$HP_{\min} = (R_p/11.792) \cdot 48426 * Db^2 \quad (26)$$

$$HP_{\max} = 3 * Db^2 \quad (26a)$$

$$HP = (HP_{\min} + HP_{\max})/2 \quad (27)$$

donde:

$HP_{\min}$  = potencia mínima requerida en la barrena, hhp/pulg.<sup>2</sup>



$HP_{max}$  = potencia máxima requerida en la barrena, hhp/pulg.<sup>2</sup>

$R_p$  = ritmo de perforación para un costo mínimo, pie/hr

$HPP$  = potencia requerida, Hpp/pulg.<sup>2</sup>

Las ecuaciones 24 a 27 fueron obtenidas apartir de correlaciones publicadas en el trabajo de lummus<sup>12</sup>.

4. Calcule la presión necesaria en la barrena, para producir la potencia requerida.

$$P_b = \frac{1714 HPP}{Q_s} \quad (28)$$

donde:

$P_b$  = presión en la barrena, psi

$Q_s$  = gasto seleccionado va de  $Q_{min}$  a  $Q_{max}$ , gal/min.

5. Sume las pérdidas totales de presión incluyendo la caída de presión en la toberas.

Si la caída total de presión es menor que el límite de presión superficial entonces las condiciones anteriores son las óptimas.

Si las caídas de presión son mayores que el límite de presión superficial, entonces vuelva al punto 1 e incremente el gasto y haga nuevamente los calculos

6. Cálculo para el arreglo de toberas

Arreglo de 3 toberas

$$J_3 = 2.042 * Q_s * (M/P_b)^{.5} \quad (29)$$

Arreglo de 2 toberas

$$J_2 = 2.501 * Q_s * (M/P_b)^{.5} \quad (29a)$$

donde:

$J_3$  = diámetro de tobera en 1/32 de pulg.

$J_2$  = diámetro de tobera en 1/32 de pulg.

M = densidad del lodo, lbs/gal.

$P_b$  = presión en la barrena, psi

$Q_s$  = gasto seleccionado, gal/min

## 7. Velocidad en las toberas

$$V_j = 418.3 * Q_s / (J_1^2 + J_2^2 + J_3^2) \quad (30)$$

donde

$V_j$  = velocidad en las toberas, pie/seg

## 8. Cálculo de la velocidad anular

$$V_a = 24.51 * Q_s * (D_b^2 - D_p^2) \quad (31)$$

donde:

$V_a$  = velocidad anular, pie/seg.

$D_p$  = diámetro de tubería de perforación, pulg.

#### 4 METODOLOGIA DEL PROGRAMA

Una forma de aplicación de las ecuaciones anteriores para determinar el mínimo costo por pie perforado asociado con el peso sobre barrena y velocidad de rotación e hidráulica, se describe a continuación.

1. Determine los parámetros  $M$ ,  $\lambda$  y  $K$  a partir de la prueba de 5 puntos. Note que el valor de  $K$ , no es necesario para determinar los valores de peso sobre barrena y velocidad de rotación, pero es requerido para determinar el costo por pie perforado.
2. Elija el valor mínimo deseado de peso sobre barrena y velocidad de rotación, y resuelva la ecuación 14 para la vida de la barrena.
3. Determine el valor de  $H$  a partir de la forma integral de la ecuación 11. (si  $H \leq 1.0$ , el tiempo de rotación está gobernado por la solución de la ecuación 14, y la vida de la barrena está limitada por la vida de los baleros. Si  $H > 1.0$ , la vida de la barrena está gobernada por la vida de los dientes de la barrena.
4. Si  $H > 1.0$ , haga  $H=1$  y resuelva la ecuación 11 para el tiempo de rotación.
5. Halle la longitud perforada a partir de la forma integral de la ecuación 6.

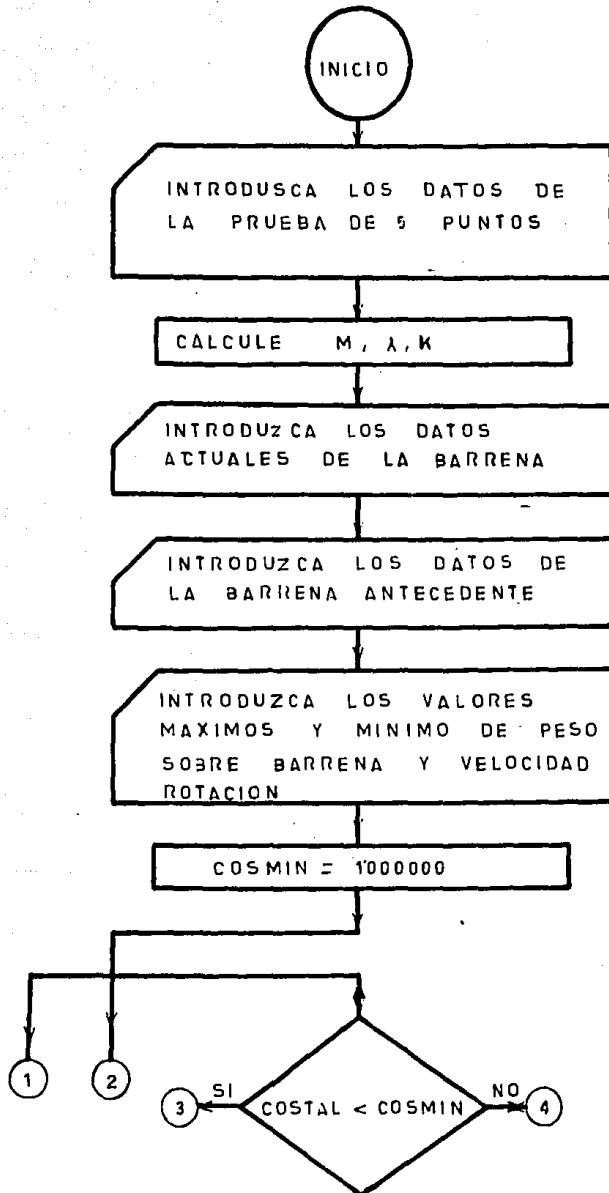
6. Resuelva la ecuación 1 para el costo por pie perforado, asociado con el peso sobre barrena y velocidad de rotación seleccionadis.

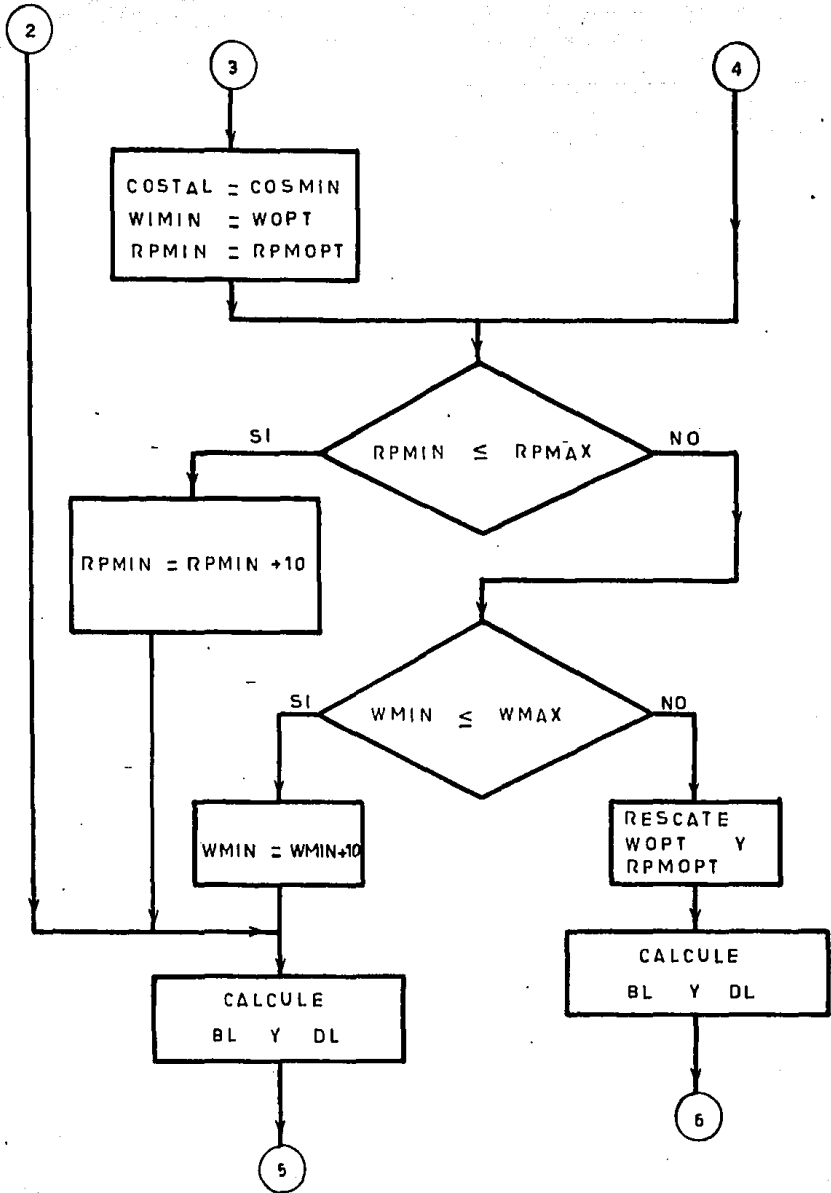
7. repita el paso 3 hasta el 6 para cada combinación de peso sobre barrena y velocidad de rotación disponible.

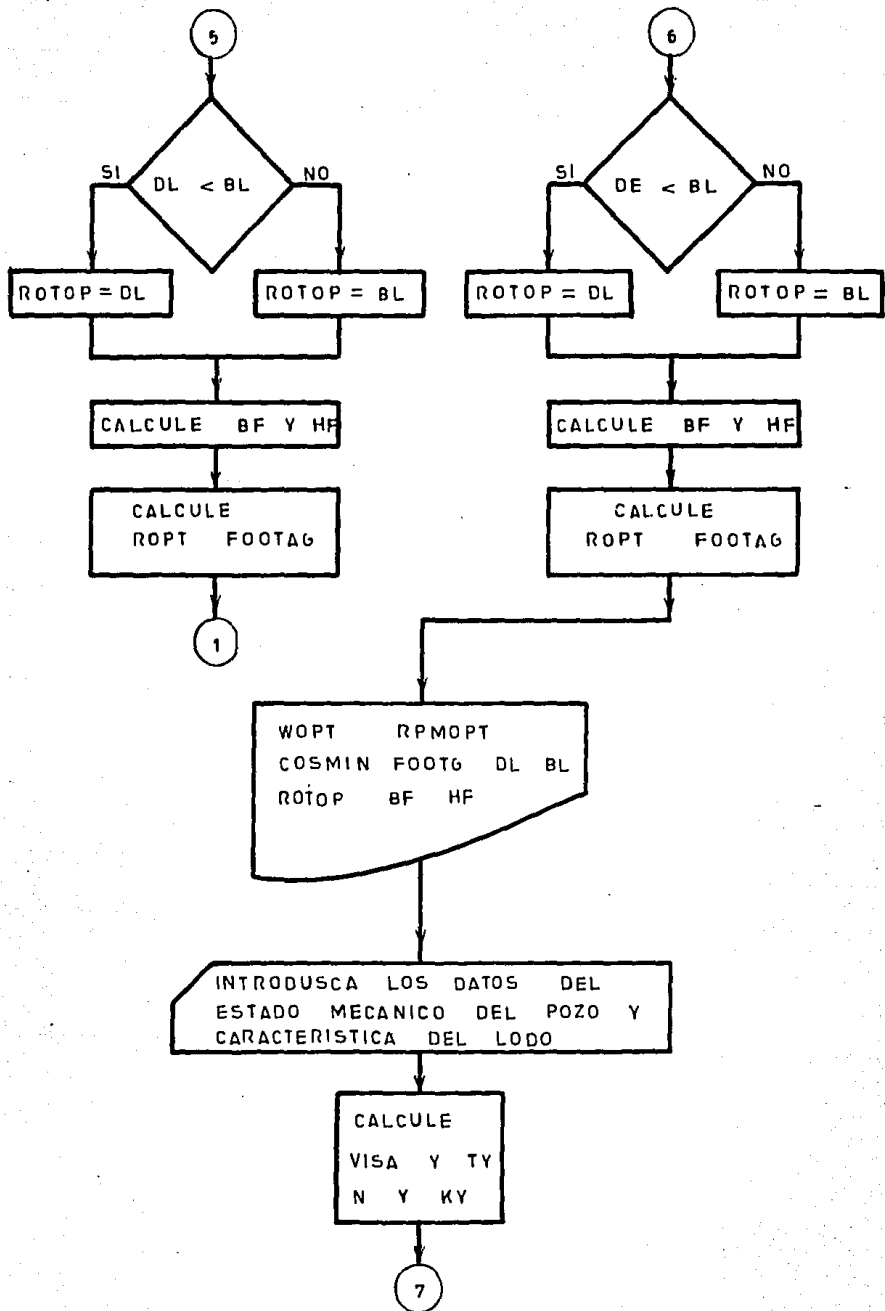
8. Para los arreglos acumulados de peso sobre barrena, velocidad de rotación y costo, encontrar el valor mínimo de la función de costo.

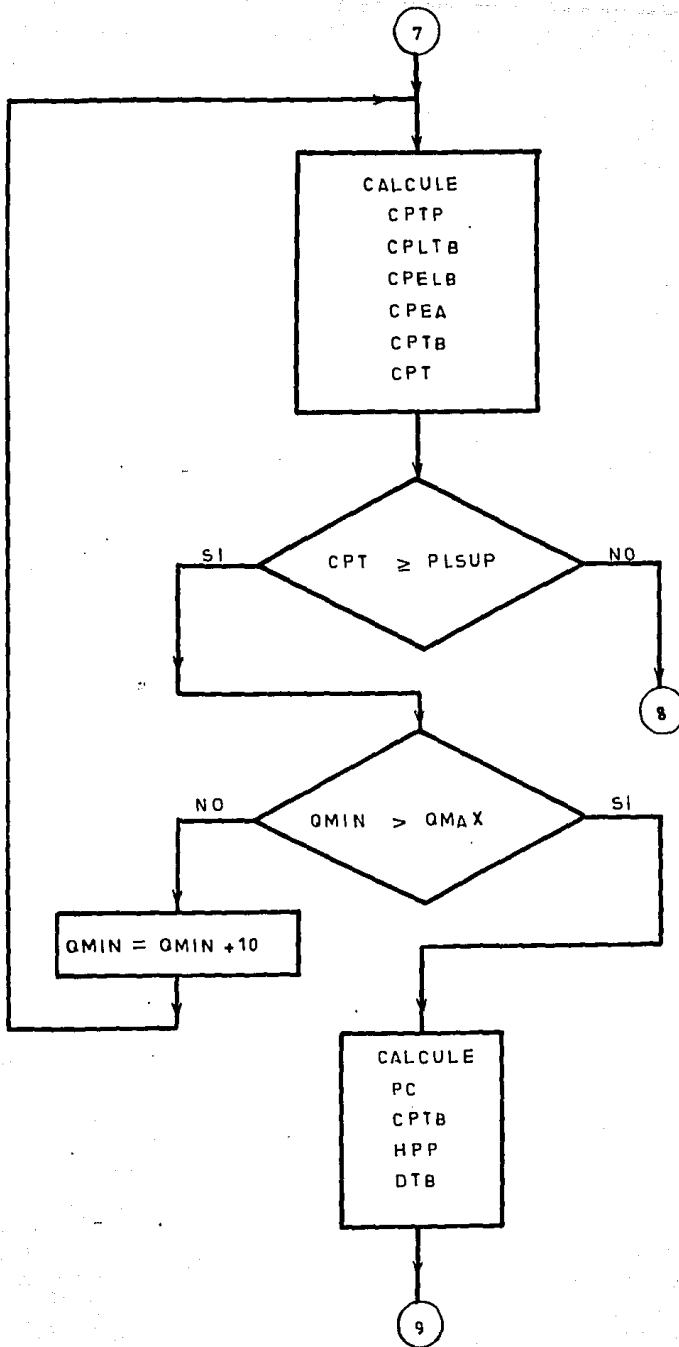
9. Siga el procedimiento para el cálculo de la potencia hidráulica de la barrena, descrito en la pág. 29

#### 4.1 DIAGRAMA DE FLUJO

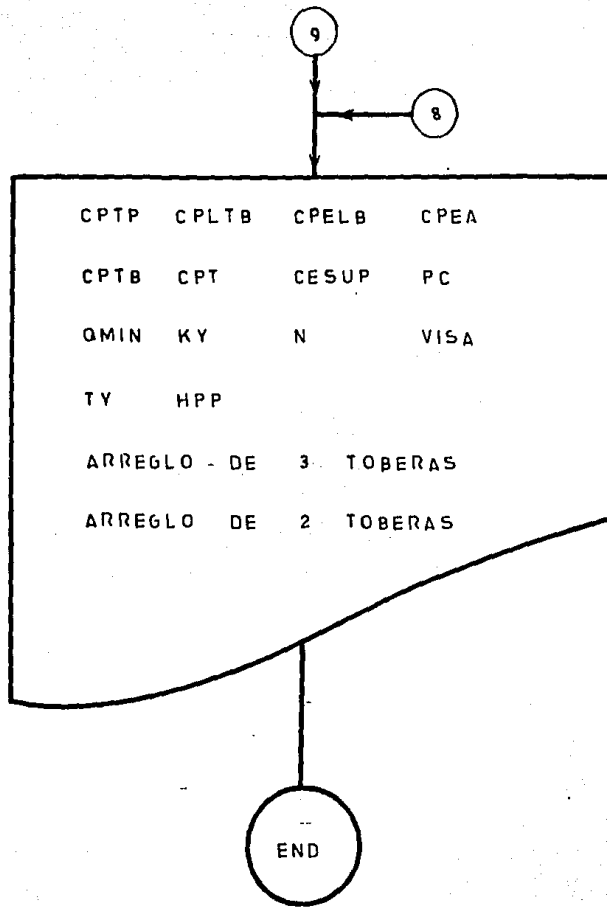












## 4.2 LISTADO

```

5 INPUT * SE DESEA IMPRESION DE DATOS Y RESULTADOS 1=SI - 2=NO *,IMPRES
10 PRINT *PROGRAMA PARA OPTIMIZAR PESO SOBRE BARRENA, VELOCIDAD DE ROTACION E H
IDRAULICA"
15 PRINT
19 PRINT
20 PRINT TAB(20); *ELABORADO POR: JESUS OLAYA BENITEZ*
21 PRINT
22 PRINT
23 DEF FND(X)=INT(X*100+.5)/100
30 PRINT TAB(20); * DATOS PARA LA PRUEBA DE 5 PUNTOS* :PRINT:PRINT:PRINT
31 IF IMPRES=2 THEN 40
32 LPRINT *PROGRAMA PARA OPTIMIZAR PESO SOBRE BARRENA, VELOCIDAD DE ROTACION E
HIDRAULICA"
33 LPRINT:LPRINT
34 LPRINT TAB(20); *ELABORADO POR: JESUS OLAYA BENITEZ*
35 LPRINT:LPRINT:LPRINT
36 LPRINT TAB(20); * DATOS PARA LA PRUEBA DE 5 PUNTOS* :LPRINT:LPRINT:LPRINT
40 INPUT * PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 2 EN Lbs *;W2
50 INPUT *VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 2 EN RPM *;N2
60 INPUT *RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 2 EN PIE/HR *;R2
70 INPUT *PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 3 EN Lbs *;W3
80 INPUT *VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 3 EN RPM *;N3
90 INPUT *RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 3 PIE/HR *;R3
100 INPUT *PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 4 EN Lbs *;W4
110 INPUT *VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 4 EN RPM *;N4
120 INPUT *RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 4 EN PIE/HR *;R4
130 INPUT *PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 5 EN Lbs *;W5
140 INPUT *VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 5 EN RPM *;N5
150 INPUT *RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 5 EN PIE/HR *;R5
151 IF IMPRES=2 THEN 168
152 LPRINT * PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 2 =";W2;"LB";
LPRINT * =";FND(W2/2.2);"KG";L
PRINT
153 LPRINT * VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 2 =";N2;"RPM";LPRINT
154 LPRINT * RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 2 =";R2;"PIE/HR";
LPRINT * =";FND(R2/3.28);"
MT/HR";LPRINT
155 LPRINT * PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 3 =";W3;"LB";
LPRINT * =";FND(W3/2.2);"K
G";LPRINT
156 LPRINT * VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 3 =";N3;"RPM";LPRINT
157 LPRINT * RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 3 =";R3;"PIE/HR";
LPRINT * =";FND(R3/3.28);"
MT/HR";LPRINT
158 LPRINT * PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 4 =";W4;"LB";
LPRINT * =";FND(W4/2.2);"K
G";LPRINT
159 LPRINT * VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 4 =";N4;"RPM";LPRINT
160 LPRINT * RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 4 =";R4;"PIE/HR";
LPRINT * =";FND(R4/3.28);"
MT/HR";LPRINT
161 LPRINT * PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 5 =";W5;"LB";
LPRINT * =";FND(W5/2.2);"K
G";LPRINT

```

```

162 LPRINT " VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 5           =";N5;"RPM";LPRINT
163 LPRINT " RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 5           =";R5;"PIE/HR";
LPRINT "                                                    =";FND(R5/3.28);"
MT/HR";LPRINT
168 M=.5*(W2-R2*(W2-W5)/(R2-R5)+W3-R3*(W3-W4)/(R3-R4))
170 Y=.5*(LOG(R3/R2)/LOG(N3/N2)+LOG(R4/R5)/LOG(N4/N5))
180 K=.25*((R2/((W2-M)*N2^Y))+R3/((W3-M)*N4^Y))+R4/((W4-M)*N4^Y)+R5/((W5-M)*
N5^Y))
185 PRINT
186 PRINT TAB(20);"RESULTADOS DE LA PRUEBA DE 5 PUNTOS"
187 PRINT
190 PRINT "M=";M
200 PRINT "Y=";Y
210 PRINT "K=";K
211 IF IMPRE=2 THEN 218
212 LPRINT
213 LPRINT TAB(20);"RESULTADOS DE LA PRUEBA DE 5 PUNTOS";LPRINT ;LPRINT
214 LPRINT
215 LPRINT TAB(20);"M =";FND(M);LPRINT
216 LPRINT TAB(20);"Y =";FND(Y);LPRINT
217 LPRINT TAB(20);"K =";K ;LPRINT
218 PRINT
219 PRINT
220 PRINT TAB(20); "DATOS ACTUALES DEL POZO"
221 PRINT
222 INPUT "PROFUNDIDAD EN PIE = ";PROF
224 INPUT "COSTO DE OPERACION $ = ";COP
230 INPUT "TIEMPO DE VIAJE PIE/HR = ";TV
240 INPUT "TIEMPO DE CONECCION +REVISION HR/1000 PIE = ";TCS
250 INPUT "DIAMETRO DE BARRENA EN PUG = ";DB
260 INPUT "COSTO DE BARRENA $ = ";CDB
270 INPUT "CODIGO DE BARRENA = ";COD
279 PRINT
280 PRINT TAB(20) " DATOS INICIALES DE BARRENA"
281 PRINT ;PRINT
290 INPUT "PESO SOBRE BARRENA EN MILES DE LIBRAS = ";PSB
300 INPUT "VELOCIDAD DE ROTACION EN RPM = ";RPM
310 INPUT "TIEMPO DE ROTACION EN HR = ";ROT
320 INPUT "DESGASTE DEL DIENTE = ";CD
330 INPUT "DESGASTE DEL BALERO = ";CB
340 INPUT "RITMO DE PENETRACION INICIAL EN PIE/HR = ";ROPI
350 INPUT "RITMO DE PENETRACION PROMEDIO EN PIE/HR = ";ROPA
360 INPUT "LONGITUD PERFORADA EN PIE = ";PF
369 PRINT
370 PRINT TAB(20)" LIMITES DE OPERACION DE BARRENA";PRINT ;PRINT
380 INPUT "PESO SOBRE BARRENA MAXIMO EN MILES DE LIBRAS = ";WMAX
390 INPUT "PESO SOBRE BARRENA MINIMO EN MILES DE LIBRAS = ";WMIN
391 INPUT "VELOCIDAD DE ROTACION MAXIMA EN RPM =";RPMAX
392 INPUT "VELOCIDAD DE ROTACION MINIMA EN RPM = ";RPMIN
393 INPUT "CUANTO QUIERE QUE DURE EL DIENTE ";D
394 INPUT "CUANTO QUIERE QUE DURE EL BALERO ";OB
395 IF IMPRE=2 THEN 426
396 LPRINT

```

```

397 LPRINT TAB(20); 'DATOS ACTUALES DEL POZO':LPRINT :LPRINT
398 LPRINT ' PROFUNDIDAD                               = ";PROF;"PIE":
      LPRINT "                                         = ";FND(PROF/3.28);"
MT*:LPRINT
399 LPRINT 'COSTO DE OPERACION                          = ";COP;"$/DIA" :LPR
INT
400 LPRINT 'TIEMPO DE VIAJE                             = ";TV;"PIE/HR":
      LPRINT "                                         = ";FND(TV/3.28);"MT
/HR":LPRINT
401 LPRINT 'TIEMPO DE CONECCION +REVISION              = ";TCS;"HR/1000 PIE
      ":LPRINT "                                         = ";TCS;"HR/305 MT":
LPRINT
402 LPRINT 'DIAMETRO DE BARRENA                        = ";DB;"PUG":
      LPRINT "                                         = ";FND(DB*2.54);"CM
":LPRINT
403 LPRINT 'COSTO DE BERRENA                            = ";$";CDB:LPRINT
404 LPRINT 'CODIGO DE BARRENA                          = ";COD.;"COD:LPRIN
T
405 LPRINT
406 LPRINT TAB(20) ' DATOS DE BARRENA ANTERCEDENTE'
407 LPRINT :LPRINT
408 LPRINT 'PESO SOBRE BARRENA                        = ";PSB;"10^3 LB":
      LPRINT "                                         = ";FND(PSB/2.2);"10
^3 KG":LPRINT
409 LPRINT 'VELOCIDAD DE ROTACION                     = ";RPM;"RPM":LPRINT
410 LPRINT 'TIEMPO DE ROTACION                       = ";ROT;"HR":LPRINT
411 LPRINT 'DESGASTE DEL DIENTE                       = ";CD":LPRINT
412 LPRINT 'DESGASTE DEL BALERO                      = ";CB":LPRINT
413 LPRINT 'RITMO DE PENETRACION INICIAL              = ";ROPI;"PIE/HR":
      LPRINT "                                         = ";FND(ROPI/3.28);"
MT/HR":LPRINT
414 LPRINT 'RITMO DE PENETRACION PROMEDIO             = ";ROPA;"PIE/HR":
      LPRINT "                                         = ";FND(ROPA/3.28);"
MT/HR":LPRINT
415 LPRINT 'LONGITUD PERFORADA .                      = ";PF;"PIE":
      LPRINT "                                         = ";FND(PF/3.28);"MT
":LPRINT
416 LPRINT
417 LPRINT TAB(20)' LIMITES DE OPERACION DE BARRENA':LPRINT :LPRINT
418 LPRINT 'PESO SOBRE BARRENA MAXIMO                 = ";WMAX;"10^3 LB":
      LPRINT "                                         = "FND(WMAX/2.2);"10
^3 KG":LPRINT
419 LPRINT 'PESO SOBRE BARRENA MINIMO                 = ";WMIN;"10^3 LB":
      LPRINT "                                         = "FND(WMIN/2.2);"10
^3 KG":LPRINT
420 LPRINT 'VELOCIDAD DE ROTACION MAXIMA              = ";RPMAX;"RPM":LPRI
NT
421 LPRINT 'VELOCIDAD DE ROTACION MINIMA              = ";RPMIN;"RPM":LPRI
NT
422 LPRINT 'CUANTO QUIERE QUE DURE EL DIENTE         = ";D":LPRINT
423 LPRINT 'CUANTO QUIERE QUE DURE EL BALERO         = ";OB":LPRINT
426 IF COD=111 THEN F=2.5 :Q=.000109 :C1=7 :GOTO 510
427 IF COD=112 THEN F=2.5 :Q=.000109 :C1=7 :GOTO 510
428 IF COD=113 THEN F=2.5 :Q=.000109 :C1=7 :GOTO 510
429 IF COD=114 THEN F=2.5 :Q=.000109 :C1=7 :GOTO 510
430 IF COD=121 THEN F=2! :Q=.000087 :C1=6 :GOTO 510
431 IF COD=122 THEN F=2! :Q=.000087 :C1=6 :GOTO 510
432 IF COD=123 THEN F=2! :Q=.000087 :C1=6 :GOTO 510

```

```

433 IF COD=124 THEN F=2! :Q=.000087 :C1=6 :GOTO 510
440 IF COD=131 THEN F=2! :Q=.000087 :C1=6 :GOTO 510
441 IF COD=132 THEN F=2! :Q=.000087 :C1=6 :GOTO 510
442 IF COD=133 THEN F=2! :Q=.000087 :C1=6 :GOTO 510
443 IF COD=134 THEN F=2! :Q=.000087 :C1=6 :GOTO 510
450 IF COD=211 THEN F=2.5 :Q=.0000653:C1=5 :GOTO 510
451 IF COD=212 THEN F=2.5 :Q=.0000653:C1=5 :GOTO 510
452 IF COD=213 THEN F=2.5 :Q=.0000653:C1=5 :GOTO 510
453 IF COD=214 THEN F=2.5 :Q=.0000653:C1=5 :GOTO 510
460 IF COD=221 THEN F=1.2 :Q=.0000522:C1=4 :GOTO 510
461 IF COD=222 THEN F=1.2 :Q=.0000522:C1=4 :GOTO 510
462 IF COD=223 THEN F=1.2 :Q=.0000522:C1=4 :GOTO 510
463 IF COD=224 THEN F=1.2 :Q=.0000522:C1=4 :GOTO 510
470 IF COD=231 THEN F=.9 :Q=.0000392:C1=3 :GOTO 510
471 IF COD=232 THEN F=.9 :Q=.0000392:C1=3 :GOTO 510
472 IF COD=233 THEN F=.9 :Q=.0000392:C1=3 :GOTO 510
473 IF COD=234 THEN F=.9 :Q=.0000392:C1=3 :GOTO 510
480 IF COD=311 THEN F=.65 :Q=.0000218:C1=2 :GOTO 510
481 IF COD=312 THEN F=.65 :Q=.0000218:C1=2 :GOTO 510
482 IF COD=313 THEN F=.65 :Q=.0000218:C1=2 :GOTO 510
483 IF COD=314 THEN F=.65 :Q=.0000218:C1=2 :GOTO 510
490 IF COD=321 THEN F=.5:Q=.0000218:C1=2 :GOTO 510
491 IF COD=322 THEN F=.5:Q=.0000218:C1=2 :GOTO 510
492 IF COD=323 THEN F=.5:Q=.0000218:C1=2 :GOTO 510
493 IF COD=324 THEN F=.5:Q=.0000218:C1=2 :GOTO 510
500 INPUT "F=",F
502 INPUT "Q=",Q
504 INPUT "C1=",C1
510 D1=.2709*DB^-.6207
520 D2=2.7057*DB^-.3817
525 WMIN=WMIN
530 B=RPM*PSB^1.5*ROT*B/CB
540 AF=10^3*(-D1*PSB+D2)*(CD/B+C1/2*(CD/B)^2)/((F*RPM+Q*RPM^3)*ROT)
550 C2=(PF*.61-PF*.39)/(CD/8*(.75*PF*.39-.25*PF*.61))
558 COSTAL=(CDB+COF/24*(ROT+PROF/TV+PROF/1000*TCS))/PF
560 COSMIN=1000000!
570 BL=B*OB/((RPM*WMIN^1.5)*B)
580 H=(-1+(1+2*C1*AF*10^-3*(F*RPM+Q*RPM^3)*ROT/(-D1*WMIN+D2))^5)/C1
590 IF H<=1*D/B THEN ROT=BL:GOTO 620
595 HF=B
600 ROT=(-D1*WMIN+D2)*(1+C1/2)/((AF*(F*RPM+Q*RPM^3))*10^-3)
610 BF=RPM*WMIN^1.5*ROT*B/B:GOTO 630
620 HF=H*B
625 BF=RPM*WMIN^1.5*ROT*B/B
630 ROPS=K*(WMIN*1000-(M))*RPM^Y/(1+C2*HF/B)
635 ROPK=K*(WMIN*1000-M)*RPM^Y
636 ROP=(ROPS+ROPK)/2
640 FOOTG=ROP*ROT
650 COSTAL=(CDB+COF/24*(ROT+PROF/TV+PROF/1000*TCS))/FOOTG
660 IF COSTAL>COSMIN THEN 700
670 COSTOP=COSTAL
680 WOPT=WMIN
690 RPMOPT=RPMIN
695 ROTOP=ROT
696 COSMIN=COSTAL
700 IF RPMIN<RPMAX THEN 730
705 IF RPMIN=RPMAX THEN 740

```

```

710 RPFMIN=RPFMIN+10
715 WMIN=WMIN
720 GOTO 570
730 IF WMIN>=WMAX THEN 710
740 WMIN=WMIN+5
750 GOTO 570
760 BL=B*OB/((RPMOFT*WOFT^1.5)*B)
770 H=(-1+(1+2*C1*AF*10^-3*(P*RPMOFT+Q*RPMOFT^3))*BL/(-D1*WOFT+D2))^0.5/C1
780 IF H<=1*D/8 THEN ROTOP=BL :GOTO 810
785 HF=D
790 DL=(-D1*WOFT+D2)*(1+C1/2)/((AF*(P*RPMOFT+Q*RPMOFT^3))*10^-3)
795 DL=(-D1*WOFT+D2)*(1+C1/2)/((AF*(P*RPMOFT+Q*RPMOFT^3))*10^-3)
800 BF=RPMOFT*WOFT^1.5*ROTOP*8/B:GOTO 820
810 HF=H*D
815 DL=(-D1*WOFT+D2)*(1+C1/2)/((AF*(P*RPMOFT+Q*RPMOFT^3))*10^-3)
816 BF=OB
820 ROFTM=K*(WOFT*1000-(M))*RPMOFT^Y/(1+C2*HF/B)
823 ROP=K*(WOFT*1000-M)*RPMOFT^Y
830 FOOTG=(ROP+ROFTM)/2*ROTOP
840 COSTAL=(CDB+COP/24*(ROTOP+PROF/TV+.001*PROF*TCS))/FOOTG
842 PRINT
843 PRINT TAB(20);"RESULTADOS DE LOS VALORES OPTIMOS":PRINT
844 PRINT"COSTO ANTERIOR EN $/PIE =";COSTAN
845 PRINT "COSTO POR FT % = ";COSTAL
850 PRINT "PESO SOBRE BARRENA OPTIMO EN MILES DE LIBRAS =";WOPT
855 PRINT "VELOCIDAD DE ROTACION EN RPM = ";RPMOFT
860 PRINT "RITMO DE PENETRACION INICIAL EN FT/HR =";ROP
870 PRINT "RITMO DE PENETRACION PROMEDIO EN FT/HR =";(ROP+ROFTM)/2
880 PRINT "LONGITUD PERFORADA EN FT =";FOOTG
890 PRINT "VIDA DEL BALERO EN HR =";BL
900 PRINT "VIDA DEL DIENTE EN HR =";DL
910 PRINT "TIEMPO DE ROTACION EN HR =";ROTOP
920 PRINT "DESGASTE DEL DIENTE =";INT(HF)
930 PRINT "DESGASTE DEL BALERO =";INT(BF)
939 PRINT
940 IF IMPRE=2 THEN 946
941 LPRINT:LPRINT :LPRINT
942 LPRINT TAB(20);"RESULTADOS DE LOS VALORES OPTIMOS":LPRINT :LPRINT
943 LPRINT "COSTO ANTERIOR" "=";FND(COSTAN);"$%/PIE"
:LPRINT
944 LPRINT "COSTO POR PIE OPTIMIZADO" "=";FND(COSTAL);"$%/PIE"
:LPRINT
945 LPRINT "PESO SOBRE BARRENA OPTIMO" "=";WOPT;" 10^3 LB";
LPRINT " " "=";FND(WOPT/2.2);" 10^
3 LB":LPRINT
946 LPRINT "VELOCIDAD DE ROTACION OPTIMA" "=";RPMOFT;"RPM":LPRINT
947 LPRINT "RITMO DE PENETRACION INICIAL" "=";FND(ROP);"PIE/HR":
LPRINT " " "=";FND(ROP/3.28);"MT/HR"
R":LPRINT
948 LPRINT "RITMO DE PENETRACION PROMEDIO" "=";FND((ROP+ROFTM)/2);
"PIE/HR":LPRINT " " "=";FND((ROP+ROFTM
)/6.56);"MT/HR":LPRINT
949 LPRINT "LONGITUD PERFORADA" "=";FND(FOOTG);"PIE";
LPRINT " " "=";FND(FOOTG/3.28);"MT"
:LPRINT
950 LPRINT "VIDA DEL BALERO" "=";FND(BL);"HR":LPRINT

```

```

951 LPRINT "VIDA DEL DIENTE" = ";FND(DL);"HR":LPRINT
952 LPRINT "TIEMPO DE ROTACION" = ";FND(ROTOP);"HR":LPR
INT
953 LPRINT "DESGASTE DEL DIENTE" = ";INT(HF):LPRINT
954 LPRINT "DESGASTE DEL BALERO" = ";INT(BF):LPRINT
955 LPRINT
966 PRINT TAB(20);" DATOS ACTUALES DEL ESTADO DEL POZO Y DEL LODO"
967 PRINT
968 INPUT "DIAMETRO INTERIOR DE TP EN PUG = ";DITP
969 INPUT "DIAMETRO EXTERIOR DE TP EN PUG = ";DETP
970 INPUT "LONGITUD DE TP EN PIE = ";LDTP
980 INPUT "DIAMETRO INTERIOR DE LASTRABARRENA EN PUG = ";DILTB
990 INPUT "DIAMETRO EXTERIOR DE LASTRABARRENA EN PUG = ";DELTB
1000 INPUT "LONGITUD DE LASTRABARRENA EN PIE = ";LDLTB
1010 INPUT "DIAMETRO INTERIOR DE LA ULTIMA TR EN PUG = ";DUTR
1020 INPUT "LONGITUD DE TR EN PIE = ";LDTR
1030 INPUT "TIPO DE EQUIPO 1,2,3 o 4 = ";TESUP
1040 INPUT "DENSIDAD DEL LODO EN Lb/Gal = ";DEL
1050 INPUT "LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANNIN A 600 RPM = ";LVES
1060 INPUT "LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANNIN A 300 RPM = ";LVFT
1065 INPUT "PRESION LIMITE EN SUPERFICIE EN PSI = ";PLSUP
1066 IF IMPRE=2 THEN 1085
1067 LPRINT
1068 LPRINT TAB(20);" DATOS ACTUALES DEL ESTADO DEL POZO Y DEL LODO"
1069 LPRINT
1070 LPRINT "DIAMETRO INTERIOR DE TP" = ";DITP;"PUG":
LPRINT " = ";FND(DITP*2.54);"CM":
LPRINT
1071 LPRINT "DIAMETRO EXTERIOR DE TP" = ";DETP;"PUG":
LPRINT " = ";FND(DETP*2.54);"CM":
LPRINT
1072 LPRINT "LONGITUD DE TP" = ";LDTP;"PIE":
LPRINT " = ";FND(LDTP/3.28);"MT":
LPRINT
1073 LPRINT "DIAMETRO INTERIOR DE LASTRABARRENA" = ";DILTB;"PUG":
LPRINT " = ";FND(DILTB*2.54);"CM":
:LPRINT
1074 LPRINT "DIAMETRO EXTERIOR DE LASTRABARRENA" = ";DELTB;"PUG":
LPRINT " = ";FND(DELTB*2.54);"CM":
:LPRINT
1075 LPRINT "LONGITUD DE LASTRABARRENA" = ";LDLTB;"PIE":
LPRINT " = ";FND(LDLTB/3.28);"MT":
:LPRINT
1076 LPRINT "DIAMETRO INTERIOR DE LA ULTIMA TR" = ";DUTR;"PUG":
LPRINT " = ";FND(DUTR*2.54);"CM":L
PRINT
1077 LPRINT "LONGITUD DE TR" = ";LDTR;"PIE":
LPRINT " = ";FND(LDTR/3.28);"MT":
LPRINT
1079 LPRINT "DENSIDAD DEL LODO" = ";DEL;"LB/GAL":
LPRINT " = ";FND(DEL*.12);"GPM/CC
":LPRINT
1080 LPRINT "LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 600 RPM" = ";LVFS:LPRINT
1081 LPRINT "LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 300 RPM" = ";LVFT:LPRINT
1082 LPRINT "PRESION LIMITE EN SUPERFICIE" = ";PLSUP;"PSI":
LPRINT " = ";FND(PLSUP/14.7);"KG/
CM^2":LPRINT
1085 QMAX=50*DB
1086 QMIN=30*DB

```

```

1090 HPMIN=(ROP/11,79197387#)^(1/2,065010111#)
1100 IF ROP<=10 THEN HPMAX=3;GOTO 1120
1110 HPMAX=(ROP/,6689743325#)^(1/2,286495049#)
1120 HPP=(HPMIN+HPMAX)/2*,7854*DB^2
1130 VISA=LVS-LVFT
1140 TY=LVFT-VISA
1141 N=3,32*LOG(LVS/LVFT)/2,302
1142 KY=LVFT/511^N
1150 IF TESUP=1 THEN PESUP=2,525*10^-4*DEL^,8*QMIN^1,8*VISA^,2;GOTO 1190
1160 IF TESUP=2 THEN PESUP=9,619001*10^-5*DEL^,8*QMIN^1,8*VISA^,2;GOTO 1190
1170 IF TESUP=3 THEN PESUP=5,335*10^-5*DEL^,8*QMIN^1,8*VISA^,2;GOTO 1190
1180 IF TESUP=4 THEN PESUP=4,163*10^-5*DEL^,8*QMIN^1,8*VISA^,2
1190 V1=QMIN/(2,45*DITP^2)
1200 V2=QMIN/(2,45*DILT^2)
1210 V3=QMIN/(2,45*(DB^2-DELTB^2))
1220 V4=QMIN/(2,45*(DB^2-DETP^2))
1230 V5=QMIN/(2,45*(DUTR^2-DETP^2))
1240 V6=QMIN/(2,45*(DUTR^2-DELTB^2))
1250 NRETP=2965*DITP*V1*DEL/VISA
1260 NRELTB=2965*DILT*V2*DEL/VISA
1270 FFTP=.046/NRETP^,23854
1280 FFLT^=.046/NRELTB^,23854
1290 CPTP=FFTP*LDITP*V1^2*DEL/(25,8*DITP)
1300 CPLTB=FFLT*LDLT*V2^2*DEL/(25,8*DILT)
1310 X=PROF-LDLTE
1320 IF X<=LDTR THEN 1390
1330 L=PROF-LDTR
1340 CPELB=(144*V3/(DB-DELTB)*(2*N+1)/(3*N))^N*LL*KY/(300*(DB-DELTB))
1350 LL=LDLT-L
1360 CPELB=CPELB+(144*V6/(DUTR-DELTB)*(2*N+1)/(3*N))^N*LL*KY/(300*(DUTR-DELTB))
1370 CPEA=(144*V5/(DUTR-DETP)*(2*N+1)/(3*N))^N*LDTP*KY/(300*(DUTR-DETP))
1380 GOTO 1430
1390 CPELB=(144*V3/(DB-DELTB)*(2*N+1)/(3*N))^N*LDLT*KY/(300*(DB-DELTB))
1400 CPEA=(144*V5/(DUTR-DETP)*(2*N+1)/(3*N))^N*LDTR*KY/(300*(DUTR-DETP))
1410 LY=LDTP-LDTR
1420 CPEA=CPEA+(144*V4/(DB-DETP)*(2*N+1)/(3*N))^N*LY*KY/(300*(DB-DETP))
1430 CPTB=HPP*1714/QMIN
1440 CPT=CPT+CPLTB+CPELB+CPEA+PESUP+CPTB
1450 IF CPT<=PLSUP THEN 1481
1460 IF QMIN>=QMAX THEN 1530
1470 QMIN=QMIN+10
1480 GOTO 1150
1481 DTB=(DEL*QMIN^2/(10858*CPTB))^,5
1482 DIA=(DTB*.425)^,5*32
1483 DEB=DIA-INT(DIA)
1484 IF DEB>,9 THEN T1=INT(DIA+1);T2=INT(DIA+1);T3=INT(DIA+1);GOTO 1488
1485 IF DEB>,5 THEN T1=INT(DIA);T2=INT(DIA+1);T3=INT(DIA+1);GOTO 1488
1486 IF DEB>,15 THEN T1=INT(DIA);T2=INT(DIA);T3=INT(DIA+1);GOTO 1488
1487 IF DEB<,15 THEN T1=INT(DIA);T2=INT(DIA);T3=INT(DIA)
1488 DTB=(DTB*.637)^,5*32
1489 DEB=DTB-INT(DTB)
1490 IF DEB>,7 THEN T4=INT(DTB+1);T5=INT(DTB+1);GOTO 1497
1491 IF DEB>,2 THEN T4=INT(DTB);T5=INT(DTB+1);GOTO 1497
1492 IF DEB<,2 THEN T4=INT(DTB);T5=INT(DTB)
1493 PRINT

```



```

1496 PRINT
1497 PRINT TAB(20);"RESULTADOS DE LA HIDRAULICA"
1498 PRINT
1499 PRINT "CAIDA DE PRESION DEL EQUIPO SUPERFICIAL PSI=";PESUP
1500 PRINT "CAIDA DE PRESION EN LAS TOBERAS PSI=";CPTB
1501 PRINT "CAIDA DE PRESION EN TP PSI=";CPTP
1502 PRINT "CAIDA DE PRESION EN LASTRABARRENAS PSI=";CPLTB
1503 PRINT "CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE TP PSI=";CPEA
1504 PRINT "CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE LASTRABARRENAS PSI=";CPELB
1505 PRINT "VISCOSIDAD PLASTICA CENTIPOISE=";VISA
1506 PRINT "PUNTO DE CEDENCIA LB/100 PIE CUADRADO =" ;TY
1507 PRINT "INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO =" ;N
1508 PRINT "INDICE DE CONSISTENCIA LB/100 PIE^2 =" ;KY
1509 PRINT "CABALLAJE HFP/SQRT IN =" ;(HFMIN+HFMAX)/2
1510 PRINT "GASTO DE LA BOMBA Gal/min =" ;QMIN
1511 PRINT "ARREGLO DE 3 TOBERAS =" ;T1;"-" ;T2;"-" ;T3
1512 PRINT "ARREGLO DE 2 TOBERAS =" ;T4;"-" ;T5
1513 IF IMPRE=2 THEN 1528
1514 LPRINT:LPRINT TAB(20);"RESULTADOS DE LA HIDRAULICA":LPRINT :LPRINT
1515 LPRINT "CAIDA DE PRESION DEL EQUIPO SUPERFICIAL
P);"PSI":LPRINT " =";FND(PESU
="";FND(P
ESUP/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1516 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN LAS TOBERAS
");"PSI":LPRINT " =";FND(CPTB
="";FND
(CPTB/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1517 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN TP
");"PSI":LPRINT " =";FND(CPTP
="";FND
(CPTP/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1518 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN LASTRABARRENAS
B);"PSI":LPRINT " =";FND(CPLTB
="";FND
(CPLTB/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1519 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE TP
");"PSI": LPRINT " =";FND(CPEA
="";FND
(CPEA/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1520 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE LASTRABARRENAS =";FND(CPELB
="";FND
(CPELB/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1521 LPRINT "VISCOSIDAD PLASTICA
NTIPOISE":LPRINT " =";VISA;"CE
1522 LPRINT "PUNTO DE CEDENCIA
00 PIE^2":LPRINT " =";TY;"LB/1
1523 LPRINT "INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO
1524 LPRINT "INDICE DE CONSISTENCIA
00 PIE^2":LPRINT " =";N;"LB/1
1525 LPRINT "CABALLAJE
FMAX)/2;"HFP/PUG^2":LPRINT " =";(HFMIN+H
1526 LPRINT "GASTO DE LA BOMBA
L/MIN":LPRINT " =";QMIN;"GA
="";FND(QM
IN/264.2);"MT^3/MIN":LPRINT
1527 LPRINT "ARREGLO DE 3 TOBERAS
2;"-" ;T3:LPRINT " =";T1;"-" ;T
1528 LPRINT "ARREGLO DE 2 TOBERAS
5:LPRINT " =";T4;"-" ;T
1529 STOP
1530 PC=CPTP+CPLTB+CPELB+CPEA+PESUP
1540 CPTB=PLSUP-PC
1549 PC=CPTP+CPLTB+CPELB+CPEA+PESUP
1550 DTB=(DEL*QMIN^2/(10658*CPTB))^.5

```

```

1551 DIA=(DTB*.425)^.5*32
1552 DEA=DIA-INT(DIA)
1553 IF DEA>.9 THEN T1=INT(DIA+1);T2=INT(DIA+1);T3=INT(DIA+1);GOTO 1557
1554 IF DEA>.5 THEN T1=INT(DIA);T2=INT(DIA+1);T3=INT(DIA+1);GOTO 1557
1555 IF DEA>=.15 THEN T1=INT(DIA);T2=INT(DIA);T3=INT(DIA+1);GOTO 1557
1556 IF DEA<.15 THEN T1=INT(DIA);T2=INT(DIA);T3=INT(DIA)
1557 DIB=(DTB*.637)^.5*32
1558 DEB=DIB-INT(DIB)
1559 IF DEB>.7 THEN T4=INT(DIB+1);T5=INT(DIB+1);GOTO 1580
1560 IF DEB>=.2 THEN T4=INT(DIB);T5=INT(DIB+1);GOTO 1580
1561 IF DEB<.2 THEN T4=INT(DIB);T5=INT(DIB)
1580 HPP=CPTB*QMIN/(1714*DB^2)
1581 PRINT
1582 PRINT
1583 PRINT TAB(20);"RESULTADOS DE LA HIDRAULICA"
1584 PRINT
1585 PRINT "PRESION DEL EQUIPO SUPERFICIAL PSI=";PESUP
1586 PRINT "PRESION EN LAS TOBERAS PSI=";CPTB
1587 PRINT "CAIDA DE PRESION EN TP PSI=";CPTP
1588 PRINT "CAIDA DE PRESION EN LASTRABARRENAS PSI=";CPLTB
1589 PRINT "CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE TP PSI=";CPEA
1590 PRINT "CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE LASTRABARRENAS PSI=";CPELB
1591 PRINT "VISCOSIDAD PLASTICA CENTIPOISE=";VISA
1592 PRINT "PUNTO DE CEDENCIA LB/100 PIE CUADRADO =" ;TY
1593 PRINT "INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO           =";N
1594 PRINT "INDICE DE CONSISTENCIA                         =";KY;"LB/1
00 PIES^2
1595 PRINT "GASTO DE LA BOMBA Gal/min =" ;QMIN
1596 PRINT "ARREGLO DE 3 TOBERAS                          =";T1;"-";T
2;"-";T3
1597 PRINT "ARREGLO DE 2 TOBERAS                          =";T4;"-";T
5
1604 PRINT "CABALLAJE HPP/SQRT IN =" ;(HPMIN+HPMAX)/2
1605 IF IMPRE=2 THEN 1700
1606 LPRINT:LPRINT TAB(20);"RESULTADOS DE LA HIDRAULICA":LPRINT :LPRINT
1607 LPRINT "CAIDA DE PRESION DEL EQUIPO SUPERFICIAL      =";FND(PESU
P);"PSI": LPRINT "                                     =";FND
(PESUP/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1608 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN LAS TOBERAS              =";FND(CPTB
);"PSI": LPRINT "                                     =";FND(
CPTB/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1609 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN TP                       =";FND(CPTP
);"PSI": LPRINT "                                     =";FND
(CPTP/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1610 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN LASTRABARRENAS          =";FND(CPLT
B);"PSI": LPRINT "                                     =";FND
(CPLTB/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1620 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE TP  =";FND(CPEA
);"PSI": LPRINT "                                     =";FND
(CPEA/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1630 LPRINT "CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE LASTRABARRENAS =";FND(CPEL
B);"PSI": LPRINT "                                     =";FND
(CPELB/14.7);"KG/CM^2":LPRINT
1640 LPRINT "VISCOSIDAD PLASTICA                          =";VISA;"CE
NTIPOISE":LPRINT

```

1650 LPRINT "PUNTO DE CEDENCIA 00 PIE^2":LPRINT	=";TY;"LB/1
1651 LPRINT "INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO	=";N
1652 LPRINT "INDICE CONSISTENCIA 00 PIE^2":LPRINT	=";KY;"LB/1
1660 LPRINT "CABALLAJE IN+HPMAX)/2);"HPF/PUG^2":LPRINT	=";FND(HPM
1670 LPRINT "GASTO DE LA BOMBA MT/MIN":LPRINT	=";QMIN;"GA =";FND(Q
MIN/264.2);"MT^3/MIN":LPRINT	
1680 LPRINT "ARREGLO DE 3 TOBERAS 2;"-"T3:LPRINT	=";T1;"-"T
1681 LPRINT "ARREGLO DE 2 TOBERAS 5:LPRINT	=";T4;"-"T
1700 END	

PROGRAMA PARA OPTIMIZAR PESO SOBRE BARRENA, VELOCIDAD DE ROTACION E HIDRAULICA

ELABORADO POR: JESUS OLAYA BENITEZ

DATOS PARA LA PRUEBA DE 5 PUNTOS

PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 2	= 25000 LB
	= 11363.64 KG
VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 2	= 100 RPM
RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 2	= 15.2 PIE/HR
	= 4.63 MT/HR
PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 3	= 25000 LB
	= 11363.64 KG
VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 3	= 140 RPM
RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 3	= 18.4 PIE/HR
	= 5.61 MT/HR
PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 4	= 40000 LB
	= 18181.82 KG
VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 4	= 140 RPM
RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 4	= 25.3 PIE/HR
	= 7.71 MT/HR
PESO SOBRE BARRENA EN EL PUNTO 5	= 40000 LB
	= 18181.82 KG
VELOCIDAD DE ROTACION EN EL PUNTO 5	= 100 RPM
RITMO DE PENETRACION EN EL PUNTO 5	= 21.6 PIE/HR
	= 6.59 MT/HR

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE 5 PUNTOS

M = -12912.5

Y = .52

K = 3.717497E-05

DATOS ACTUALES DEL POZO

PROFUNDIDAD	= 15000 PIE
	= 4573.17 MT
COSTO DE EQUIPO	= 4000000 \$/DIA
TIEMPO DE VIAJE	= 1050 PIE/HR
	= 320.12 MT/HR
TIEMPO DE CONECCION +REVISION	= 2.5 HR/1000 PIE
	= 2.5 HR/305 MT
DIAMETRO DE BARRENA	= 8.5 PUG
	= 21.59 CM
COSTO DE BERRENA	= \$ 1500000
CODIGO DE BARRENA	= COD. 124

DATOS DE BARRENA ANTECEDENTE

PESO SOBRE BARRENA	= 35 10 <sup>3</sup> LB
	= 15.91 10 <sup>3</sup> KG
VELOCIDAD DE ROTACION	= 120 RPM
TIEMPO DE ROTACION	= 36 HR
DESGASTE DEL DIENTE	= 6
DESGASTE DEL BALERO	= 8
RITMO DE PENETRACION INICIAL	= 20 PIE/HR
	= 6.1 MT/HR
RITMO DE PENETRACION PROMEDIO	= 10 PIE/HR
	= 3.05 MT/HR
LONGITUD PERFORADA	= 360 PIE
	= 109.76 MT

LIMITES DE OPERACION DE BARRENA

PESO SOBRE BARRENA MAXIMO	= 50 10 <sup>3</sup> LB
	= 22.73 10 <sup>3</sup> KG
PESO SOBRE BARRENA MINIMO	= 25 10 <sup>3</sup> LB
	= 11.36 10 <sup>3</sup> KG
VELOCIDAD DE ROTACION MAXIMA	= 200 RPM
VELOCIDAD DE ROTACION MINIMA	= 100 RPM
CUANTO QUIERE QUE ILRE EL DIENTE	= 8
CUANTO QUIERE QUE ILRE EL BALERO	= 8

### RESULTADOS DE LOS VALORES OPTIMOS

COSTO ANTERIOR	= 44806.21 \$/PIE
COSTO OPTIMO POR PIE PERFORADO	= 33204.2 \$/PIE
PESO SOBRE BARRERA OPTIMO	= 45 10 <sup>3</sup> LB = 20.45 10 <sup>3</sup> LB
VELOCIDAD DE ROTACION OPTIMA	= 140 RPM
RITMO DE PENETRACION INICIAL	= 27.91 PIE/HR = 9.51 MT/HR
RITMO DE PENETRACION PROMEDIO	= 19.43 PIE/HR = 5.93 MT/HR
LONGITUD PERFORADA	= 411.35 PIE = 125.41 MT
VIDA DEL BALERO	= 21.17 HR
VIDA DEL DIENTE	= 35.63 HR
TIEMPO DE ROTACION	= 21.17 HR
DESGASTE DEL DIENTE	= 5
DESGASTE DEL BALERO	= 3

. DATOS ACTUALES DEL ESTADO DEL POZO Y DEL LODO

DIAMETRO INTERIOR DE TP	= 4.276 PUG
	= 10.86 CM
DIAMETRO EXTERIOR DE TP	= 5 PUG
	= 12.7 CM
LONGITUD DE TP	= 14300 PIE
	= 4359.74 MT
DIAMETRO INTERIOR DE LASTRABARRENA	= 2.8125 PUG
	= 7.14 CM
DIAMETRO EXTERIOR DE LASTRABARRENA	= 7 PUG
	= 17.78 CM
LONGITUD DE LASTRABARRENA	= 700 PIE
	= 213.41 MT
DIAMETRO INTERIOR DE LA ULTIMA TR	= 9.625 PUG
	= 24.45 CM
LONGITUD DE TR	= 7000 PIE
	= 2134.15 MT
DENSIDAD DEL LODO	= 13 LB/GAL
	= 1.56 GRM/CC
LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 600 RPM	= 90
LECTURA DEL VISCOSIMETRO FANN A 300 RPM	= 55
PRESION LIMITE EN SUPERFICIE	= 2400 PSI
	= 163.27 KG/CM <sup>2</sup>

## RESULTADOS DE LA HIDRAULICA

CAIDA DE PRESION DEL EQUIPO SUPERFICIAL	= 18.15 PSI
	= 1.23 KG/CM <sup>2</sup>
CAIDA DE PRESION EN LAS TOBERAS	= 1264.58 PSI
	= 86.03 KG/CM <sup>2</sup>
CAIDA DE PRESION EN TP	= 220.63 PSI
	= 15.01 KG/CM <sup>2</sup>
CAIDA DE PRESION EN LASTRABARRENAS	= 79.39 PSI
	= 5.4 KG/CM <sup>2</sup>
CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE TP	= 179.09 PSI
	= 12.18 KG/CM <sup>2</sup>
CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DE LASTRABARRENAS	= 82.83 PSI
	= 5.63 KG/CM <sup>2</sup>
VISCOSIDAD PLASTICA	= 35 CENTIPOISE
PUNTO DE CEDENCIA	= 20 LB/100 PIE <sup>2</sup>
INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO	= .7102614
INDICE DE CONSISTENCIA	= .6556561 LB/100 PIE <sup>2</sup>
CABALLAJE	= 3.315488 HPP/PUG <sup>2</sup>
GASTO DE LA BOMBA	= 255 GAL/MIN
	= .97 MT <sup>3</sup> /MIN
ARREGLO DE 3 TOBERAS	= 10 - 10 - 11
ARREGLO DE 2 TOBERAS	= 13 - 13



## DEFINICION DE LAS VARIABLES EMPLEADAS EN EL PROGRAMA

**AF** = FACTOR DE ABRASIVIDAD DE LA FORMACION  
**B** = CONSTANTE DEL BALERO  
**BL** = VIDA DEL BALERO ,HR  
**BF** = DESGASTE DEL BALERO  
**C1,P,Q** = CONSTANTES DETERMINADA PARA CADA TIPO DE BARRENA  
**C2** = CONSTANTE QUE EXPRESA EL DESGASTE DEL DIENTE  
**COD** = CODIGO IAAC DE BARRENA  
**CPEA** = CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR EN TP ,PSI  
**CPELB** = CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR LASTRABARRENA ,PSI  
**CPLTB** = CAIDA DE PRESION EN LASTRABARRENA ,PSI  
**CPT** = CAIDA DE PRESION TOTAL ,PSI  
**CPTB** = CAIDA DE PRESION EN LAS TOBERAS ,PSI  
**CPTP** = CAIDA DE PRESION EN TP ,PSI  
**COSMIN** = COSTO MINIMO ,\$/PIE  
**COSTAL** = COSTO DE PERFORACION ,\$/PIE  
**COSTAN** = COSTO DE PERFORACION ANTERIOR ,\$/PIE  
**D1** = CONSTANTE DEPENDIENTE DEL DIAMETRO DE BARRENA  
**D2** = CONSTANTE DEPENDIENTE DEL DIAMETRO DE BARRENA  
**DL** = VIDA DEL DIENTE ,HR  
**DTB** = AREA TOTAL DE TOBERAS ,PUG<sup>2</sup>  
**FFTP** = FACTOR DE FANNIN EN TP  
**FFLT B** = FACTOR DE FANNIN EN LASTRABARRENA  
**FOOTG** = LONGITUD PERFORADA ,PIE  
**H** = FRACCION DE DESGASTE DEL DIENTE  
**HF** = DESGASTE DEL DIENTE  
**HPMAX** = CABALLAJE MAXIMO ,HPP/PUG<sup>2</sup>  
**HPMIN** = CABALLAJE MINIMO ,HPP/PUG<sup>2</sup>  
**K** = CONSTANTE DE PERFORABILIDAD  
**KY** = INDICE DE CONSISTENCIA ,LB/100 PIE<sup>2</sup>  
**LDTR** = LONGITUD DE TR ,PIE  
**N** = PESO SOBRE BARRENA EXTRAPOLADO A UNA VELOCIDAD CERO  
**N** = INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO  
**NRELT B** = NUMERO DE REYNOLD EN LASTRABARRENA  
**NRETP** = NUMERO DE REYNOLD EN TP  
**PC** = CAIDA DE PRESION POR CIRCULACION ,PSI  
**PLSUP** = PRESION LIMITE SUPERFICIAL ,PSI  
**PROF** = PROFUNDIDAD ,PIE  
**PESUP** = CAIDA DE PRESION EN EL EQUIPO SUPERFICIAL ,PSI  
**QMAX** = GASTO MAXIMO ,GAL/MIN  
**QMIN** = GASTO MINIMO ,GAL/MIN  
**ROP** = RITMO DE PERFORACION ,PIE/HR  
**ROT** = TIEMPO DE ROTACION ,HR  
**ROTOP** = TIEMPO DE ROTACION OPTIMO ,HR

**RPMAX** = VELOCIDAD DE ROTACION MAXIMA ,RPM  
**RPMIN** = VELOCIDAD DE ROTACION MINIMA ,RPM  
**RPMOPT** = VELOCIDAD DE ROTACION OPTIMA ,RPM  
**T1...5** = DIAMETRO DE TOBERAS EN 12 DE PULG.  
**TESUP** = TIPO DE EQUIPO SUPERFICIAL  
**TY** = PUNTO DE CEDENCIA ,LB/100 PIE^2  
**V1** = VELOCIDAD EN TP ,PIE/SEG  
**V2** = VELOCIDAD EN LASTRABARRENA ,PIE/SEG  
**V3** = VELOCIDAD ENTRE LASTRABARRENA - AGUJERO ,PIE/SEG  
**V4** = VELOCIDAD ENTRE TP - AGUJERO ,PIE/SEG  
**V5** = VELOCIDAD ENTRE TP - TR ,PIE/SEG  
**V6** = VELOCIDAD ENTRE LASTRABARRENA - TR ,PIE/SEG  
**VISA** = VISCOSIDAD APARENTE ,CENTIPOISE  
**WMAX** = PESO SOBRE BARRENA MAXIMO ,1000 LB  
**WMIN** = PESO SOBRE BARRENA MINIMO ,1000 LB  
**WOPT** = PESO SOBRE BARRENA OPTIMO ,1000 LB  
**Y** = EXPONENTE QUE EXPRESA EL DESGASTE DEL DIENTE

## 4.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo desarrollado predice el ritmo de perforación teniendo en cuenta los efectos e interacciones en el peso sobre barrena, velocidad de rotación, tipo de barrena y tipo de formación, siempre y cuando las condiciones de la hidráulica sean las adecuadas.

Una apropiada selección de la barrena es el factor central para el control de la efectividad de cualquier programa de perforación.

Pesos sobre barrena y velocidad de rotación altos son requeridos para minimizar el costo por pie perforado.

Con un peso sobre barrena apropiado, una moderada velocidad de rotación y un buen limpieza en el fondo del agujero se reduce el costo por pie perforado.

La penetración por revolución en la barrena decrece con el incremento en la velocidad de rotación cuando la presión del lodo existe en el agujero.

El ritmo de perforación varía aproximadamente en proporción directa con el peso sobre barrena, en formaciones de perforación normales.

El peso sobre barrena óptimo, varia inversamente con el factor de perforabilidad de la formación, K.

La velocidad de rotación varia inversamente con el peso sobre barrena.

El HHP requerido para obtener una limpieza óptima en el fondo del agujero varia directamente con el peso sobre barrena y el ritmo de perforación para cualquier tipo de formación.

El costo por pie optimizado puede reducir hasta  $2/3$  al costo obtenido en perforaciones previas.

Hay necesidad de mejorar las técnicas de predicción de desgaste de la barrena y mejorar la instrumentación del equipo de perforación particularmente para las mediciones de ritmo de perforación, propiedades de los fluidos y los parámetros de la hidráulica.

**TABLA 1**

**Parámetros de desgaste del diente para una barrena tricónica**

Serie	Clasificación	tipo	P	-G	C <sub>1</sub>
1	Diente	1	2.5	0.0001088	7
	Formación	2	2.0	0.0000870	6
	suave	3	2.0	0.0000870	6
2	Diente	1	1.5	0.0000653	5
	Formación	2	1.2	0.0000522	4
	media	3	1.2	0.0000522	4
		4	0.9	0.0000392	3
3	Diente	1	.65	0.0000283	2
	Formación dura	2	0.5	0.0000218	2

**CONTINUACION TABLA 1**

**Parámetros para los diámetros de la barra**

<b>Diámetro de barra (pulg.)</b>	<b>D<sub>1</sub></b>	<b>D<sub>2</sub></b>
6 1/4	0.088	5.50
6 3/4	0.083	5.61
7 7/8	0.074	5.94
8 5/8	0.071	6.11
9 1/2	0.067	6.39
9 5/8	0.066	6.42
9 7/8	0.065	6.44
10 3/4	0.062	6.68
12 1/4	0.058	7.15
13 3/4	0.055	7.56

**TABLA 2**

<b>TIPO DE EQUIPO</b>		<b>CAIDA DE PRESION (PSI)</b>
<b>Tipo I</b>		
Tubo Vertical	3" x 40' D.I.	
Mangera	2" x 45' D.I.	
Unión Girat.	2" x 20' D.I.	$P_s = 2.525 \times 10^{-4} \rho \cdot B Q^{1.8} \mu \rho^2$
Flecha	2 1/4" x 40' D.I.	
<b>Tipo II</b>		
Tubo Vertical	3 1/2" x 40' D.I.	
Mangera	2 1/2" x 55' D.I.	
Unión Girat.	2 1/2" x 25' D.I.	$P_s = 9.619 \times 10^{-5} \rho \cdot B Q^{1.8} \mu \rho^2$
Flecha	3 1/4" x 40' D.I.	
<b>Tipo III</b>		
Tubo Vertical	4" x 45' D.I.	
Mangera	3" x 55' D.I.	
Unión Girat.	2 1/2" x 25' D.I.	$P_s = 5.335 \times 10^{-5} \rho \cdot B Q^{1.8} \mu \rho^2$
Flecha	3 1/4" x 40' D.I.	
<b>Tipo IIII</b>		
Tubo Vertical	4" x 45' D.I.	
Mangera	3" x 55' D.I.	
Unión Girat.	3" x 30' D.I.	$P_s = 4.163 \times 10^{-5} \rho \cdot B Q^{1.8} \mu \rho^2$
Flecha	4" x 40' D.I.	

TABLA 3

MODELO DE BINGHAM (CIRCULACION EN TUBERIA)	
$\mu_p$	0 600 - 0 300
$\tau_0$	0 300 - $\mu_p$
$V_c$	$\frac{67.91}{D} (\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + 8.816 \tau_0 D^2 \rho})$
$\Delta P_i$ turbulento	$\frac{L \rho \cdot 8 \sqrt{1.8 \mu_p^2}}{3212923 D^{1.2}}$
$\Delta P_i$ laminar	$\frac{L V \mu_p}{89775 D^2} + \frac{\tau_0 L}{225 D}$

Donde:

- $\mu_p$  Viscosidad plastica, cp
- $\tau_0$  Punto de cedencia, lbf/100 pie<sup>2</sup>
- 0 600 Lectura del viscosimetro a 600 rpm
- 0 300 Lectura del viscosimetro a 300 rpm
- $\rho$  densidad del lodo, Lb/gal
- D Diametro interior de TP o lastrabarrena, pulg.
- L Longitud pie
- V Velocidad de circulaci3n, pie/min
- $V_c$  Velocidad critica, pie/min
- $\Delta P_i$  Caída de presi3n en tubería, psi



TABLA 4

MODELO LEY DE POTENCIA (CIRCULACION ESPACIO ANULAR)	
PARAMETRO A CALCULAR	
n	$3.32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}$
K	$\frac{\theta_{300}}{511^n} \quad \frac{\theta_{600}}{1022^n}$
Vc	$1.969 \left( \frac{4.08(3470 - 1370)K}{\rho} \right)^{1/2-n} \left( \frac{2n+1}{0.64(D_o - D_i)} \right)^{n/2+n}$
$\Delta P_a$ laminar	$\frac{KL}{300(D_o - D_i)} \left( \frac{0.8 V}{(D_o - D_i)} \frac{2n+1}{n} \right)^n$

Donde:

- $\theta_{600}$  Lectura del viscosímetro a 600 rpm
- $\theta_{300}$  Lectura del viscosímetro a 300 rpm
- $\rho$  Densidad del lodo, lbs/gal
- $D_o$  Diámetro del pozo, pulg.
- $D_i$  Diámetro exterior de T.P. o lastrabarrena, pulg.
- K Índice de consistencia, lbf seg/100 pie<sup>2</sup>
- n Índice de comportamiento
- V Velocidad de circulación, pie/min
- Vc Velocidad crítica, pie/min
- $\Delta P_a$  Caída de presión en el espacio anular, psi

## BIBLIOGRAFIA

1. Bruce, G. H., Friedman, R. H., Graham, J. W. and Simon, L. H.: "Minimum Cost Drilling -- Selection of Weight on the Rotary Speed", Unpublished report PR 61-1, Humble oil & refining Co.
2. Galle, E. M. and Woods, H. B.: "Variable Weight and Rotary Speed for Lowest Drilling Cost", paper presented at 20th Annual Meeting of AAODC, New Orleans, La., Sept. 25-27, 1960.
3. Graham, J. W. and Muench, N. L.: "Analytical Determination of optimum Bit Weight and rotary Speed Combinations", paper SPE 1349-G presented at SPE 34th Annual Fall Meeting, Dallas, Tex., Oct. 4-7, 1959.
4. Eckel, J. E. and Rawley, D. S.: "The Effect of Rotary Speed on Penetration Rate," 17th Annual Meeting of AAODC, Tulsa, Oklahoma, October 13-15, 1957. Drilling Contractor, (December 1957), 14, No.
5. Moore, P. L. and Gatlin, C.: "How to reduce Drilling Cost: Part 5. What We Know About Effect of Rotary Speed on Drilling Rate", Oil and Gas J. (Aug. 15, 1960) 170.
6. Outmans, H. D.: "The Effect of Some Drilling Variables on the Instantaneous Rate of Penetration", Trans., AIME (1960) 219-137-149.
7. Cunningham, S. S. (Consultant to Esso production Research Co.): Private communication, 1964.
8. King, G. R.: "Why Rock-Bit Bearing Fail", Oil and Gas J. (Nov. 16, 1959) 166-170, 173, 175, 178, 179, 182.
9. Lubinski, Artur: "Proposal for Further Tests", Comment on work of the AAODC Study Committee on Weight/Speed/Penetration, Pet. Eng. (Jan., 1958).
10. Garnier, A. J. and Van Lingen, N. H.: "Phenomena Affecting Drilling Rate at Depth", Trans., AIME (1959) 216, 232-239.
11. Galle, E. M. and Woods, H. B.: "How to Calculate Bit Weight and rotary speed for Lowest-Cost Drilling", Part 1. Oil and Gas J. (Nov. 14, 1960) 167, 169, 172, 174, 176.
12. Lummus, J. L.: "Analysis of Mud - Hydraulics Interactions," Pet. Eng. (Feb. 1974).
13. Kendall, H. A.: "Design and Operation of Jet - Bit Programs for Maximum Hydraulics Horsepower," Trans., AIME (1961).

14. Randall, B. O.: "Optimum Hydraulics," *Pat. Eng.* ( Sept. 1975 )

## APENDICE A

### Prueba de los cinco puntos

El programa secuencial para esta prueba es mostrado en la Fig. 8. Si la relación  $R_1 - R_6 \leq \lambda$ , se considera la prueba aceptable, y los ritmos de penetración,  $R_2, R_3, R_4$  y  $R_5$  son usados para evaluar las constantes  $M, \lambda$  y  $K$  en la ecuación de ritmo de perforación.

$$\frac{dT}{dR} = K \frac{(W - M) N^\lambda}{(1 + C_2 H)} \quad (A-1)$$

$M$  y  $\lambda$  son determinados como sigue. El ritmo de perforación el cual se asume que es proporcional al peso sobre barrena, puede ser expresado como  $R = aW + b$ . Refiriéndose a la Fig. 15 y usando esta nomenclatura, la relación entre el ritmo de perforación y una velocidad de rotación constante viene dada por:

$$W = aR + M \quad (A-2)$$

donde la pendiente  $a$ , es igual  $W/R$ . Más específicamente para una velocidad de rotación  $N$ , igual a  $N_1$

$$W = R(W/R) + M_1 \quad (A-3)$$

Recomendando

$$M_1 = W - R(W/R) \quad (A-4)$$

Para el punto 2 a una velocidad de rotación constante  $N$ ,  $W = W_2$  a  $R = R_2$ , entonces:

$$M_1 = W_2 - R_2[(W_2 - W_5)/(R_2 - R_5)] \quad (A-5)$$

$M_2$  puede ser calculada similarmente para una velocidad de rotación constante,  $N_2$ .

$$M_2 = W_3 - R_3[(W_3 - W_4)/(R_3 - R_4)] \quad (A-6)$$

$M$  se obtiene del promedio entre  $M_1$  y  $M_2$

$$M = .50[W_2 - R_2(W_2 - W_5)/(R_2 - R_5) + W_3 - R_3(W_3 - W_4)/(R_3 - R_4)] \quad (A-7)$$

El parametro  $\lambda$  es determinado como sigue. El ritmo de perforación es proporcional a la velocidad de rotación para un peso sobre barrenos y desgaste del diente constante. La relación entre los ritmos de perforación  $R_1$  y  $R_2$  para dos diferentes velocidades de rotación  $N_1$  y  $N_2$  es:

$$\frac{R_1}{R_2} = \left( \frac{N_1^\lambda}{N_2^\lambda} \right) \quad (A-8)$$

El exponente  $\lambda$  puede ser resuelto tomando logaritmo natural en ambos lados de la ecuación (A-8) y la solución para  $\lambda$  es:

$$\ln(R_1/R_2) = \lambda \ln(N_1/N_2)$$

$$\lambda = \ln(R_1/R_2) / \ln(N_1/N_2) \quad (A-9)$$

Refiriéndonos a la Fig. 14, para un peso sobre barrena constante  $W_1$ ,  $\lambda_1$  puede ser determinado como sigue.

$$\lambda_1 = \ln(R_3/R_2) / \ln(N_3/N_2) \quad (A-10)$$

$\lambda_2$  puede ser calculado similarmente para un peso sobre barrena constante  $W_2$ .

$$\lambda = \ln(R_4/R_5) / \ln(N_4/N_5) \quad (A-11)$$

$\bar{\lambda}$  se obtiene del promedio entre  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ .

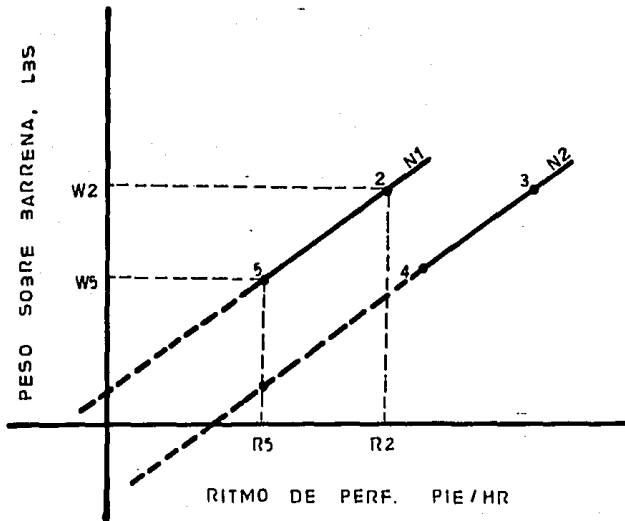
$$\bar{\lambda} = .5[\ln(R_3/R_2) / \ln(N_3/N_2) + \ln(R_4/R_5) / \ln(N_4/N_5)] \quad (A-12)$$

Ahora que todos los parámetros han sido determinados, el factor de perforabilidad  $K$  puede calcularse para el tiempo el cual el desgaste del diente es igual a la altura normalizada del diente de la barrena

$$R = K \frac{(W - M) N^{\bar{\lambda}}}{(1 + C_2 H)} \quad (A-13)$$

Despejando  $K$

RITMO DE PERF. VS PESO SOBRE BARRERA



RITMO DE PERF. VS VELOCIDAD DE ROTACION

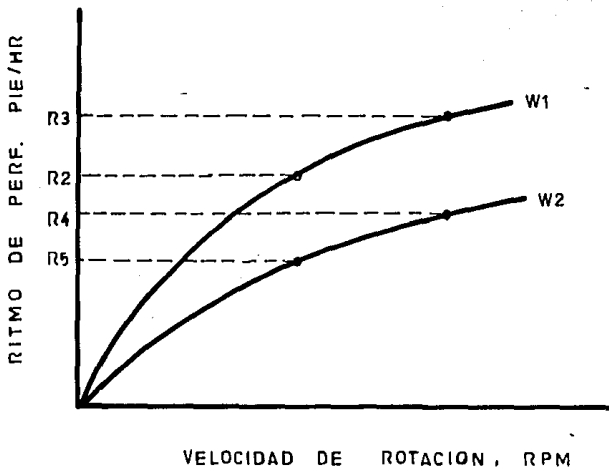


FIG. 13

$$K = F \frac{(1 + D_2/H)}{(W - M) N^{\wedge}} \quad (A-14)$$

Si la barrena es nueva entonces,  $H=0$  y la ecuación (A-14) para el punto 2 será:

$$K_2 = \frac{R_2}{(W_2 - M) N_2^{\wedge}} \quad (A-15)$$

Para el punto 3:

$$K_3 = \frac{R_3}{(W_3 - M) N_3^{\wedge}} \quad (A-16)$$

Y así sucesivamente,  $K$  se obtiene de la siguiente forma:

$$K = \frac{K_2 + K_3 + K_4 + K_5}{4} \quad (A-17)$$

Remplazando

$$K = .25 [ R_2 / ((W_2 - M) N_2^{\wedge}) + R_3 / ((W_3 - M) N_3^{\wedge}) + R_4 / ((W_4 - M) N_4^{\wedge}) + R_5 / ((W_5 - M) N_5^{\wedge}) ] \quad (A-18)$$



## APENDICE B

### Soluciones de las ecuaciones de desgaste del diente

#### Desgaste del balero

El ritmo de desgaste del balero es directamente proporcional a la velocidad de rotación y peso sobre barrena elevado a la potencia :

$$\frac{dB}{dT} = N W^{\sigma}$$

Usando una constante de balero  $1/b$ , la ecuación para el desgaste del balero sería

$$\frac{dB}{dT} = \frac{1}{b} N W^{\sigma} \quad (B-1)$$

Integrando el desgaste del balero  $dB$ , entre el intervalo  $B_{i-1}$  a  $B_i$  y  $dT$  desde  $T_{i-1}$  a  $T_i$

$$dB = \frac{N W^{\sigma}}{b} dT \quad (B-2)$$

o

$$(B_i - B_{i-1}) = \frac{N W^{\sigma}}{b} (T_i - T_{i-1}) \quad (B-3)$$

donde  $i$  es cualquier tiempo durante la vida de la barrena.  
Haciendo uso de diferencias finitas, el desgaste acumulativo del

balero, B, es ahora

$$E_i = \sum_{t=0}^{t_i} E = \sum_{t=0}^{t_i} N_f W_f t/b \quad (B-4)$$

### Desgaste del balero

Los efectos velocidad de rotación, peso sobre barrena y desgaste del diente sobre el ritmo de desgaste del diente son presentados en la siguiente relación:

$$\frac{dD}{dT} = \frac{(PN + QN^3)}{(-D_1W + D_2)(1 + C_1 H)} \quad (B-5)$$

La constante  $A_f$ , es usada para definir el ritmo de perforación de desgaste del diente y distingue el ritmo de desgaste del diente de varias formaciones

$$\frac{dH}{dT} = A_f \frac{(PN + QN^3)}{(-D_1W + D_2)(1 + C_1 H)} \quad (B-6)$$

o

$$(1 + C_1 H)dH = A_f \frac{(PN + QN^3)}{(-D_1W + D_2)} dT \quad (B-7)$$

Integrando dH desde  $H_{i-1}$  a  $H_i$  y dT desde  $T_{i-1}$  a  $T_i$

$$\int_{H_{i-1}}^{H_i} (1 + C_1 H)dH = \int_{T_{i-1}}^{T_i} A_f \frac{(PN + QN^3)}{(-D_1W + D_2)} dT \quad (B-8)$$

$$H_i + \frac{C_1}{2} H_i - (H_{i-1} + \frac{C_1}{2} H_{i-1}) = A_f \frac{(PN + QN^2)(T_i - T_{i-1})}{(-D_1W + D_2)} \quad (B-9)$$

Los valores de los parámetros P, Q, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> y C<sub>1</sub> son conocidos para cada tipo de barrenas (ver Tabla 1). El factor de absorvidad es determinado a partir de previos recorridos de barrenas o de información adicional.

La ecuación (B-9), puede resolverse usando la raíz positiva como solución deseada.

$$H_i = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2C_1 \left[ H_{i-1} + \frac{C_2}{2} (H_{i-1}) + A_f \frac{(PN + QN^2)T}{(-D_1W + D_2)} \right]}}{C_1} \quad (B-10)$$

## NOMENCLATURA

- AF = FACTOR DE ABRASIVIDAD DE LA FORMACION
- γ = CONSTANTE (PESO SOBRE BARRENA VS RITMO DE PERFORACION)
- B = ALTURA NORMALIZADA DEL GALERO
- b = CONSTANTE DEL GALERO
- C = COSTO DE PERFORACION, \$/PIE
- CB = COSTO DE BARRENA, \$
- CR = COSTO DE EQUIPO, \$
- CT = COSTO POR VIAJE, \$/HRS
- Cl = CONSTANTE DEPENDIENTE DEL TIPO DE BARRENA
- Db = DIAMETRO DE BARRENA, PULG.
- D.I. = DIAMETRO INTERIOR, PULG.
- Do = DIAMETRO DE T.P., PULG.
- D1 = CONSTANTE DEPENDIENTE DEL DIAMETRO DE BARRENA
- D2 = CONSTANTE DEPENDIENTE DEL DIAMETRO DE BARRENA
- H = ALTURA NORMALIZADA DEL DIENTE
- J = DIAMETRO DE TOBERA, 1/32 PULG.
- K = CONSTANTE DE PERFORABILIDAD
- K = INDICE DE CONSISTENCIA LBF/100 PIE<sup>2</sup>
- L = LONGUITUD, PIES
- N = VELOCIDAD DE ROTACION, RPM
- n = INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUIDO
- M = PESO MINIMO SOBRE BARRENA PARA INICIAR PERF., 1000 LBS
- P = CONSTANTE DEPENDIENTE DEL DIAMETRO DE BARRENA

$Q$  = CONSTANTE DEPENDIENTE DEL DIAMETRO DE BARRENA

$Q_{max}$  = GASTO MAXIMO, GAL/MIN.

$Q_{min}$  = GASTO MINIMO, GAL/MIN.

$Q_s$  = GASTO SELECCIONADO, GAL/MIN.

$R$  = RITMO DE PERFORACION, PIE/HRS

$V$  = VELOCIDAD DE CIRCULACION, PIE/MIN

$V_c$  = VELOCIDAD CRITICA, PIE/MIN

$V_j$  = VELOCIDAD EN LAS TOBERAS, PIE/MIN

$\Delta P$  = CAIDA DE PRESION EN TUBERIAS, PSI

$\rho$  = DENSIDAD DEL LODO, LB/GAL

$\mu_p$  = VISCOSIDAD PLASTICA, CP