

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO DE PETROLEO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE PETROLEO

CALCULO DE UN PROGRAMA DE PERFORACION

PESO SOBRE LA BROCA - VELOCIDAD DE ROTACION

VARIABLES

Mario Cornejo McNulty

Promoción 1957.

CALCULO DE UN PROGRAMA DE PERFORACION

PESO SOBRE LA BROCA - VELOCIDAD DE ROTACION

VARIABLES

CONTENIDO

PARTE PRIMERA

ESTUDIO TEORICO DEL PROBLEMA

CAPITULO I - GENERALIDADES

- a.- Introducción
- b.- Historia
- c.- Ecuación del Costo de Perforación
- d.- Métodos de Cálculo
- e.- Graficación del Problema
- f.- Sumario

CAPITULO II - ESTUDIO DEL METODO DE LA HUGHES TOOL Co. "PESO Y VELOCIDAD DE ROTACION VARIABLES PARA UN COSTO MINIMO DE PERFORACION"

- a.- Generalidades
- b.- Ecuaciones fundamentales
- c.- Solución del Problema y Conclusiones
- d.- Fórmula Desarrollada del Costo
- e.- Manera de Aplicar el Método Hughes
- f.- Nomenclatura

CAPITULO III.- ESTUDIO DE LOS GRAFICOS HUGHES.-

- a.- Generalidades
- b.- Cálculo del Computador Electrónico
- c.- Identificación de los Gráficos Hughes
- d.- Manera de Usar los Gráficos Hughes

CAPITULO IV.- LIMITACIONES DEL METODO HUGHES.-

- a.- Generalidades
- b.- Estudio del Exponente "k" del Peso sobre la Broca
- c.- Estudio de la Función "r" de la Velocidad de Rotación
- d.- Limitaciones del Método Hughes

CAPITULO VI.- PROCEDIMIENTO SUGERIDO PARA UTILIZAR EL METODO HUGHES.-

- a.- Generalidades
- b.- Procedimiento Sugerido

PARTE SEGUNDA

CALCULO DE UN PROGRAMA DE PERFORACION

PESO - VELOCIDAD VARIABLES

CAPITULO I.- GENERALIDADES

- a.- Introducción
- b.- Consideraciones Preliminares

CAPITULO II.- REUNION DE DATOS BASICOS

- a.- Generalidades
- b.- Información Geológica
- c.- Registros de los Instrumentos del Equipo
- d.- Registros del Comportamiento y Estado de las Brocas
- e.- Datos de Operación

CAPITULO III.- PRUEBAS DE PENETRACION.-

- a.- Generalidades
- b.- Elección de las zonas
- c.- Conducción de las Pruebas de Penetración
- d.- Análisis de las Pruebas de Penetración (Cálculo de k y λ)

CAPITULO IV.- CALCULO DE LA ABRASIVIDAD DE LA FORMACION.-

- a.- Ecuación de la Abrasividad
- b.- Cálculo de la Abrasividad A_f

CAPITULO V.- CALCULO DE LA PERFORABILIDAD DE LA FORMACION.-

- a.- Ecuaciones de la Perforabilidad
- b.- Cálculo de la Perforabilidad C_f

CAPITULO VI.- CALCULO DEL FACTOR DE COJINETES DE LA BROCA.-

- a.- Ecuación del Factor de Cojinetes
- b.- Cálculo del Factor de Cojinetes S

CAPITULO VII.- CALCULO DE COMO VARIAR EL PESO SOBRE LA BROCA Y LA VELOCIDAD DE ROTACION.-

Cálculo de los Parámetros A_n y S_n

- b.- Cálculo de los Pesos y Velocidades Variables

CAPITULO VIII.- CALCULO DEL AVANCE DE LAS BROCAS Y DEL COSTO POR PIE PERFORADO.-

- a.- Ecuación del Avance de las Brocas
- b.- Ecuación del Costo por Pie Perforado
- c.- Forma Final del Programa Peso-Velocidad Variables

CAPITULO IX.- RESULTADO ECONOMICO DEL PROGRAMA.-

- a.- Costos de Referencia
- b.- Posible Ahorro Derivado del Programa Peso Velocidad Calculado

CAPITULO X.- DISCUSION DEL PROGRAMA CALCULADO.-

- a.- Limitaciones del Programa de Costo Mínimo
- b.- Evaluación de Campo del Programa Calculado

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO PRIMERO

GENERALIDADES

a.- INTRODUCCION.- El presente trabajo trata sobre un nuevo concepto en ingeniería de perforación, la variación simultánea del peso sobre la broca y de la velocidad de rotación con el objeto de reducir al mínimo el costo de perforación. Un importante estudio sobre esta materia fué publicado en 1960 por E.M. Galle y Henry Woods de la Hughes Tool Co. La aplicación de la teoría Galle-Woods en la práctica da como resultado un ahorro considerable.

Existen algunas limitaciones en la aplicación de la teoría Galle-Woods, siendo una de las de mayor importancia la reacción de la formación a aumentos en el peso sobre la broca y en la velocidad de rotación. La teoría Galle-Woods considera sólo cuatro casos de estas reacciones. La aplicación de la teoría estará entonces limitada a aquellas formaciones que correspondan a estas cuatro condiciones específicas.

El ingeniero de perforación que desee aplicar el método Galle-Woods, debería tomar sus gráficos como guía y luego interpolar entre dichos gráficos para obtener resultados más exactos. En el presente trabajo se propone este método de interpolación.

En síntesis, la presente tesis provee un método práctico de aplicar la teoría Galle-Woods a situaciones distintas a aquellas que fueron específicamente presentadas por estos autores. Ha sido necesario realizar algunas pruebas de campo para determinar los cambios producidos en el ritmo de penetración por cambios en el peso sobre la broca y en la velocidad de rotación, para luego poder aplicar el método de interpolación propuesto. El resultado es un programa de peso-velocidad variables calculado específicamente para la formación a perforarse.

En la primera parte de la tesis se analiza el método de la Hughes Tool Co. y se discute la manera de complementarlo. La segunda parte es la aplicación del método propuesto a un caso real.

b.- HISTORIA.- El concepto de preseleccionar los pesos sobre la broca y las velocidades de rotación, se encuentra entre las nuevas ideas que se han desarrollado para mejorar las prácticas de perforación. En 1960,

El peso sobre la broca y la velocidad de rotación afectan a los pies perforados antes de que la broca se gaste y al costo de operación en que se incurre al perforar esos pies. El avance de la broca es el producto del ritmo de penetración promedio por el tiempo de rotación, o la integral de la curva ritmo de penetración versus tiempo. El ritmo de penetración es fuertemente afectado por el peso sobre la broca y la velocidad de rotación, tanto directa como indirectamente, siendo los efectos indirectos los que se derivan de la influencia de estas variables en el desgaste de los dientes y consiguiente reducción en la altura de los mismos; esta altura de dientes a su vez influencia al ritmo de penetración.

El tiempo de rotación es también influenciado por el peso sobre la broca y la velocidad de rotación, ya que el tiempo de vida de una broca en un medio dado está determinado por las condiciones de peso y velocidad a que se trabaja. Esto a su vez afecta el costo de operación del equipo ya que este es el producto del tiempo por el costo del equipo de perforación por unidad de tiempo.

d.- MÉTODOS DE CALCULO. Todos los estudios existentes sobre programas peso-velocidad utilizan la ecuación básica del cost, la cual se muestra en la figura 2. Las variables primarias, peso sobre la broca y velocidad de rotación, son las cantidades que se consideran para reducir el costo por pie en esta ecuación. Las variables secundarias, tipo y propiedades de lodo, hidráulica en la broca y tipo de broca son, por supuesto, de gran importancia; pero no son alteradas durante el desarrollo del programa peso-velocidad.

En la solución de la ecuación básica de la figura 2 todos utilizan ecuaciones similares para determinar el ritmo de penetración, ritmo de desgaste de los dientes de la broca y ritmo de desgaste de los cojinetes de la broca, figura 3, aunque las técnicas para solucionarlas varían. Cada uno de los programas preselecciona el peso sobre la broca y la velocidad de rotación, de manera que se obtenga el máximo rendimiento de la broca a un costo mínimo, mediante la determinación de constantes que hacen que las ecuaciones sean aplicables a una situación específica en la perforación de un campo.

e.- GRAFICACION DEL PROBLEMA.- La variación del costo por pie con el avance de la perforación se muestra en la figura 1, en la cual se ha ploteado el costo por pie contra los pies perforados con peso y velocidad de rotación constantes. La línea punteada muestra la disminución en el costo de broca y tiempo de viaje por pie, conforme se perfora cada pie; la línea rayada muestra el aumento en el costo de operación por pie, conforme se perfora cada pie. Este aumento en los costos es consecuencia de la disminución en el ritmo de penetración, causado por el desgaste de la broca con el correspondiente aumento en el costo de operación. La línea lisa muestra la suma de estos costos como costo total por pie y muestra también, que existe un número de pies perforados y por lo tanto un tiempo, en los cuales el costo por pie es mínimo.

Si el mismo tipo de curvas se ploteara para una combinación de peso y de velocidad de rotación distinta, habría también un costo mínimo distinto al anterior que se obtendría a un número de pies perforados diferente. El problema es entonces encontrar los cambios apropiados que se deberán hacer en estas dos variables, a lo largo de la vida de la broca, para producir el costo mínimo más bajo.

f.- SUMARIO.- En los párrafos anteriores se ha discutido de un modo general las relaciones entre el costo de perforación, peso sobre la broca y velocidad de rotación. También se ha demostrado que existe un costo mínimo y la razón de su existencia.

Para seguir adelante con el desarrollo de la ecuación del costo de perforación es necesario considerar con mayor detalle las relaciones básicas entre el peso sobre la broca, velocidad de rotación, condición de la broca y costo. En el siguiente capítulo se discutirá las relaciones entre estas variables y las suposiciones involucradas en la derivación de las ecuaciones, según el método de la Hughes Tool Co.

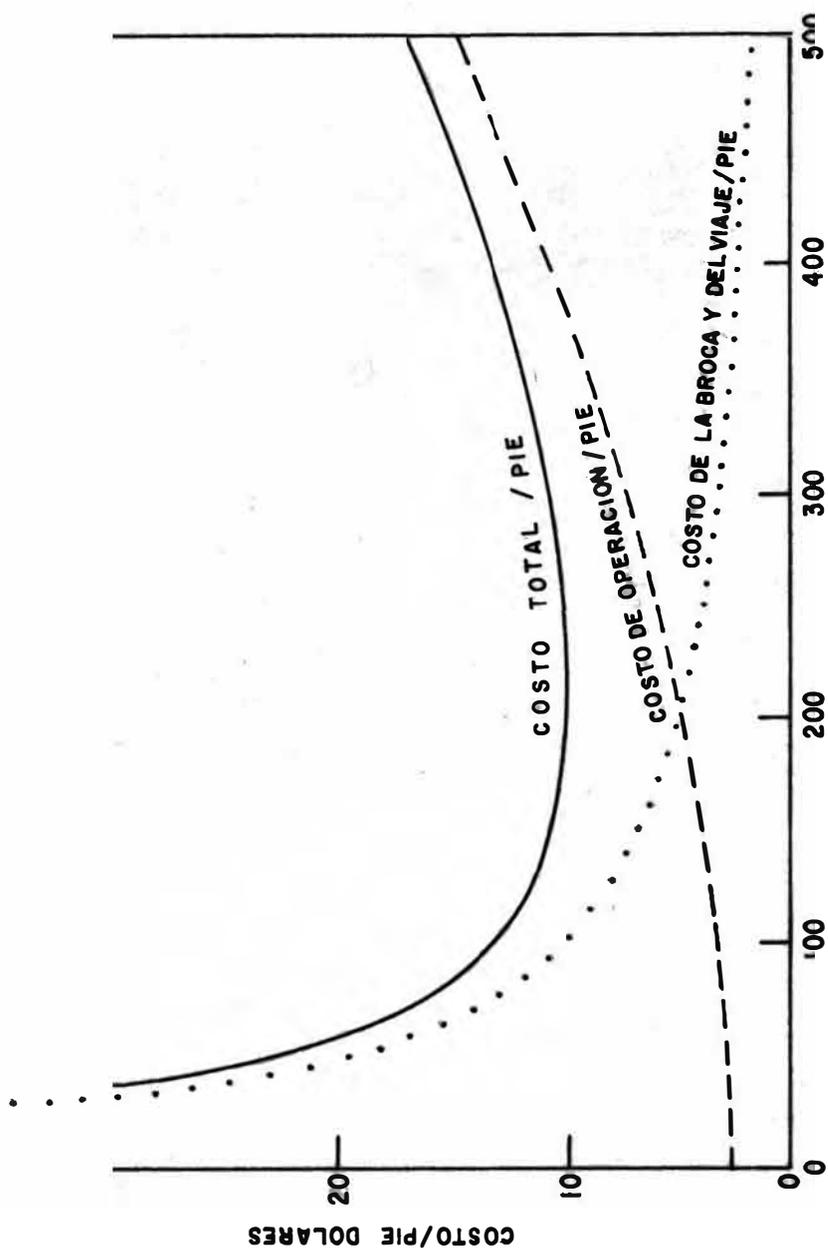


FIG. LA SUMA DE LOS COSTOS DE OPERACION Y DE LA BROCA Y LOS VIA ES MUESTRA UN NUM RO DE PIES (Y UN TIEMPO) EN EL QUE EL COSTO POR PIE ES MINIMO

$$\$/Pie = \frac{\text{Costo de Broca (\$)} + \text{Costo de Equipo (\$/Hora)} \times [\text{Tiempo de Viaje} + \text{Tiempo de Rotación}]}{\text{Avance de la Broca}}$$

VARIABLES PRIMARIAS:

Peso sobre la Broca
 Velocidad de Rotación

VARIABLES SECUNDARIAS

(De importancia, pero que no varían durante el programa peso-velocidad)

Tipo y Propiedades del Lodo
 Hidráulica
 Tipo de Broca

RELACIONES BASICAS

Ritmo de Penetración
 Ritmo de Desgaste de los Dientes
 Ritmo de Desgaste de los Cojinetes

FIG. 2. ECUACION BASICA DEL COSTO

$$R = C_f \frac{W^k N^\lambda}{\lambda} \quad \text{Desgaste efectivo de la Broca}$$

- R - Ritmo de Penetración
 C_f - Factor de Desgaste de la Formación
 W - Peso sobre la Broca
 k - Aproximadamente 1.0
 N - Velocidad de Rotación
 λ - Entre 0.4 y 0.8

Desgaste efectivo de la Broca = $C_1 + C_2 D + C_3 D^2$
 y aumenta conforme se desgastan los dientes

- D - Altura del diente
 C_1, C_2, C_3 - Constantes arbitrarias

(A) Ritmo de Penetración

$$\frac{\Delta D}{\Delta T} = \frac{1}{A_f} \frac{f_1 \text{ (Velocidad)}}{f_2 \text{ (Peso)}} \quad \text{Desgaste Absoluto de la Broca}$$

- $\Delta D / \Delta T$ - Ritmo de desgaste de los dientes
 A_f - Factor de " " " "
 f_1 (Velocidad) - Aumenta con la velocidad de rotación
 f_2 (Peso) - Disminuye con el aumento de peso

Desgaste absoluto de la Broca = $C_4 + C_5 D + C_6 D^2$
 y aumenta conforme se desgastan los dientes

- D - Altura del diente
 C_4, C_5, C_6 - Constantes Arbitrarias

(B) Ritmo de desgaste de los dientes

$$\frac{\Delta B_x}{\Delta T} = \frac{1}{S} \frac{N}{L}$$

- $\Delta B_x / \Delta T$ - Ritmo de desgaste de los cojinetes
 S - Factor " " " "
 N - Velocidad de Rotación
 L - Función del peso sobre la Broca.
 Disminuye aproximadamente según (Peso Sobre la Broca) 1.5

(C) Ritmo de Desgaste de Los Cojinetes

FIG.3 RELACIONES BASICAS PARA LA ECUACION DEL COSTO

CAPITULO SEGUNDO

ESTUDIO DEL METODO DE LA HUGHES TOOL Co.

"PESO Y VELOCIDAD DE ROTACION VARIABLES PARA UN COSTO

MINIMO DE PERFORACION"

a.- GENERALIDADES.- De entre las muchas variables que afectan los costos de perforación, el método Hughes considera solamente dos, peso y velocidad de rotación y asume que la selección de la broca a usarse se hace correctamente, que la hidráulica está bien calculada y que se usa un buen fluido de perforación. También asume que la desviación del pozo no es el factor que limita el máximo peso que se puede aplicar sobre la broca y que el equipo es de un tipo tal, que la velocidad de rotación se puede variar considerablemente sin afectar la hidráulica.

La finalidad del trabajo de la Hughes es el de combinar la información obtenida en pruebas de campo por la Asociación de Contratistas de Perforación (AAODC) con información adicional obtenida de pruebas de laboratorio y de campo, para hallar la manera de variar el peso y la velocidad de rotación durante la vida de una broca, para hacer hueco a un costo mínimo.

b.- ECCACIONES FUNDAMENTALES.- Con el objeto de establecer el más económico peso y velocidad de rotación que debe usarse en una broca, es necesario saber:

- 1.- La relación entre el ritmo de penetración, y los factores que lo afectan.
- 2.- La relación entre el ritmo de desgaste de los dientes de la broca y los factores que lo afectan.
- 3.- La relación entre el ritmo de desgaste de los cojinetes de la broca y los factores que lo afectan.

Es muy difícil obtener relaciones exactas para estos tres puntos. Sin embargo, la Hughes ha desarrollado fórmulas empíricas basadas en datos de laboratorio y experimentos de campo, las cuales se muestran en la figura 5. En la figura 4 se muestran estas relaciones en forma gráfica.

Las relaciones básicas que establece la Hughes se pueden sintetizar en lo siguiente:

- 1.- El ritmo de penetración aumenta con la perforabilidad, con el peso sobre la broca y con la velocidad de rotación; y disminuye conforme se desgasten los dientes de la broca.
- 2.- El ritmo de desgaste de los dientes de la broca aumenta conforme aumenta la abrasividad, el peso sobre la broca y la velocidad de rotación; y disminuye conforme aumenta el mismo desgaste de los dientes.
- 3.- La vida de los cojinetes de la broca disminuye con el aumento en peso y velocidad de rotación y aumenta con el factor de fluido de perforación S . Para un mismo tipo de fluido de perforación, el valor de S varía para diferentes tipos de broca que contengan cojinetes de diferente capacidad.

c.- SOLUCION DEL PROBLEMA Y CONCLUSIONES.- Habiendo establecido relaciones matemáticas para el ritmo de perforación, para el desgaste de los dientes de la broca y para el desgaste de los cojinetes de la broca en función de los parámetros de perforación, la Hughes usa el cálculo de variables para hallar la manera en que el peso y la velocidad de rotación se deben variar para obtener un mínimo costo de perforación. Si el peso y velocidad son variados de manera ideal, hay tres casos a considerar:

- Caso 1.- Los dientes limitan la vida de la broca.
- Caso 2.- Los cojinetes limitan la vida de la broca.
- Caso 3.- Los dientes y los cojinetes se gastan simultáneamente.

La Hughes recurre a un computador automático para resolver el problema, con los siguientes resultados:

- 1.- Asumiendo que se ha seleccionado el tipo correcto de broca, de fluido de perforación y de hidráulica, en las brocas de dientes:
 - a.- El peso se debe aumentar conforme se desgasta la broca.

- b.- La velocidad de rotación se debe aumentar conforme se desgasta la broca.
- c.- La variación apropiada de peso y velocidad de rotación depende de la abrasividad de la formación, del fluido de perforación, del tiempo de viaje, del costo del equipo por hora y del costo de la broca.

2.- En las brocas de incrustaciones de carburo de tungsteno:

- a.- El peso y velocidad de rotación deben permanecer constantes durante la vida de la broca.
- b.- La variación apropiada de peso y velocidad de rotación depende del fluido de perforación, del tiempo de viaje, del costo del equipo por hora y del costo de la broca.

3.- La Hughes ha desarrollado gráficos para facilitar la aplicación de este método.

d.- FORMULA DESARROLLADA DEL COSTO.- En base a las relaciones presentadas en la figura 5, la Hughes obtiene su fórmula desarrollada del costo (14-e), la cual se muestra en la figura 7. También se muestran las principales funciones de relación y la ecuación del desgaste de los cojinetes.

En la ecuación (14-e), el numerador tiene los mismos tres términos que la ecuación (1) del costo. El denominador es también el mismo, avance de la broca.

En la nomenclatura que se adjunte se da una explicación detallada de los términos que intervienen en la ecuación (14-e).

e.- MANERA DE APLICAR EL METODO HUGHES.- El procedimiento de cálculo del programa peso-velocidad para una broca según el método Hughes, consta de los siguientes pasos (Ver figura 6):

- 1.- Selección del gráfico apropiado.- Se hace en base al tipo de formación que se perfora y al tipo de desgaste de dientes que se obtiene en esa formación.

- 2.- Cálculo de las Constantes de formación A_f y C_f .-
Se calcula haciendo una prueba de campo. Ver ecuaciones (6-a) y (7-a). Una formación muy abrasiva tendrá un valor bajo de A_f y una formación en que la perforación es lenta tendrá un valor bajo de C_f .
- 3.- Cálculo de la constante de fluido de perforación S. En base a pruebas de campo. Un valor alto de S significa un fluido de perforación bueno para los cojinetes de la broca. Ver ecuación (8-a).
- 4.- Cálculo de como variar el peso sobre la broca y la velocidad de rotación según el tiempo de perforación se obtiene del gráfico seleccionado. Ver ecuaciones (9-a), (10-a), (11-a), que dan los valores con los que se entra a los gráficos.
- 5.- Cálculo de los pies totales a perforarse con esa broca y del costo por pie.- Cálculo numérico. Ver ecuaciones (12-a) y (13-a).

Oportunamente se explicará con más detalle cada uno de estos pasos. Al final del presente capítulo se adjuntan las tablas que dan los valores de las funciones (Figs. 8 y 9).

f.- NOMENCLATURA.-

- A Tiempo de Viaje + Costo de la Broca/Costo del Equipo/Hr, hrs.
- A_f Parámetro de la Abrasividad de la Formación
- A_n A/A_f
- B Tiempo de Vida de los Cojinetes, horas
- B_x Fracción Gastada de la Vida de los Cojinetes
- B_{xf} Fracción Final Gastada de la Vida de los Cojinetes
- C Costo de Perforación, horas de equipo/pie "
- C_f Parámetro de Perforabilidad de la Formación
- D Desgaste de los Dientes de la Broca, fracción gastada de la altura original.
- D_f Desgaste Final de los Dientes de la Broca

F Distancia Perforada por la Broca, pies

F_f ... Distancia Final Perforada por la Broca, pies

$$F_n \dots \frac{F}{A_f C_f} = \int_0^{D_n} \frac{W^k r m a^{1-p}}{i} dD$$

H Diámetro del Hueco o de la Broca, pulgadas

K Valor Graficado para Obtener Costo por Pie = C x C_f

L Función Tabulada de \bar{W} Usada en la Ecuación de los Cojinetes

N Velocidad de Rotación, rpm

N_f ... Velocidad Final de Rotación, rpm

S Parámetro de Fluido de Perforación

$$S_n \dots \frac{S}{A_f} = \int_0^{D_f} \frac{N a m}{L i} dD$$

T Tiempo de Rotación, horas

T_f..... Tiempo Final de Rotación, horas

$$T_n \dots \frac{T}{A_f} = \int_0^{D_f} \frac{a m}{i} dD$$

$$U \dots 714.19 \int_0^{D_f} a dD \text{ . Valor Tabulado}$$

$$V \dots 714.19 \int_0^{D_f} a^{1/2} dD \text{ . Valor Tabulado}$$

W Peso sobre la Broca, 1000 libras

\bar{W} Peso Equivalente en Broca de 7 7/8" = 7.88 W/H

a Función del Desgaste de los Dientes = .928125 D² + 6.0 D + 1

i N + 4.348 10⁻⁵ N³ . Valor tabulado

k Exponente del Peso en la Ecuación del Ritmo de Penetración

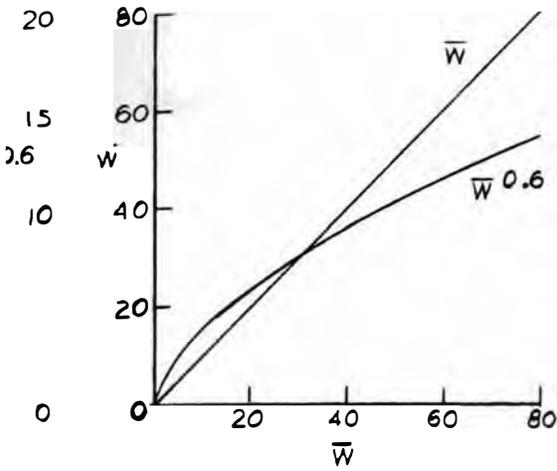
m 1359.1 - 714.19 log₁₀ \bar{W} . Valor Tabulado

\bar{m} m/714.19

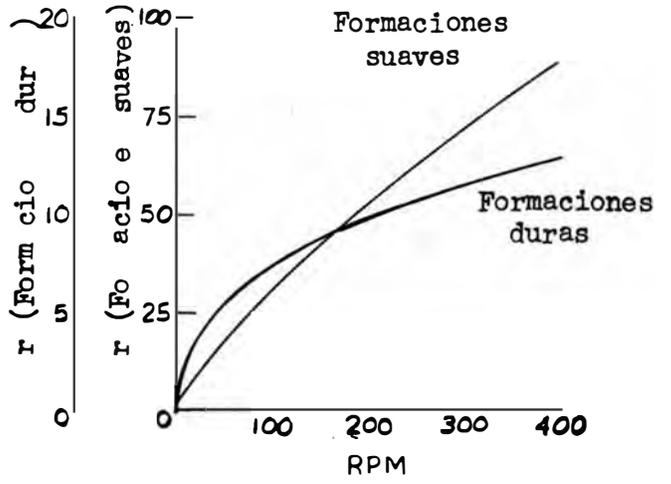
p Exponente de (a) en la Ecuación del Ritmo de Penetración

$$F \dots \left[e^{-100/N^2} N^{.428} + .2N (1 - e^{-100/N^2}) \right] \text{ Para Formaciones Duras}$$

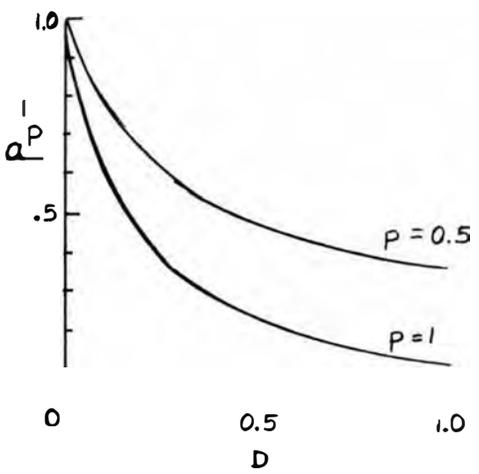
$$F \dots \left[e^{-100/N^2} N^{.75} + .5N (1 - e^{-100/N^2}) \right] \text{ Para Formaciones Suaves}$$



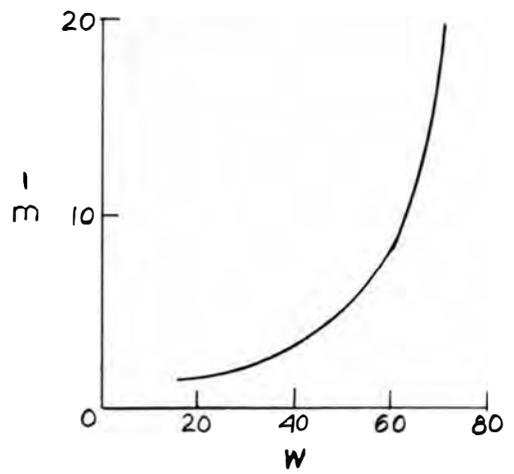
Efecto del Peso en el Ritmo de Perforación



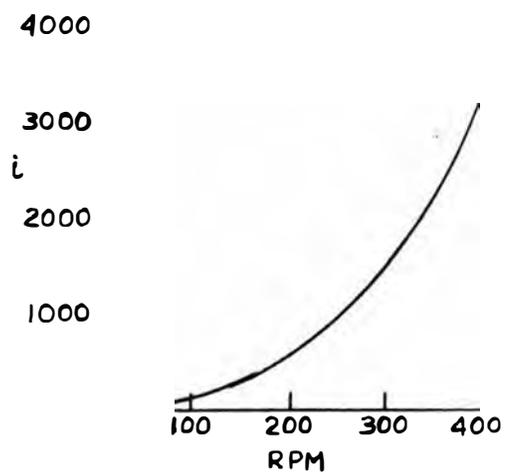
Efecto de las RPM en el Ritmo de Perforación



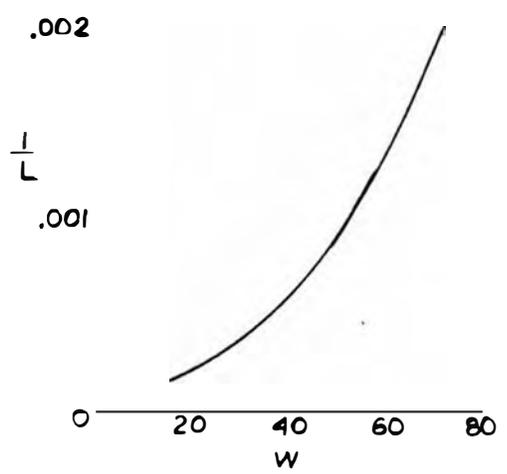
Efecto del Desgaste en el Ritmo de Perforación y Desgaste de los Dientes



Efecto del Peso en el Desgaste de los Dientes



Efecto de las RPM en el Desgaste de los Dientes



Efecto del Peso en el Desgaste de los Cojinetes

Relación entre el Ritmo de Penetración y los Factores que lo afectan

$$(1-a) \quad \frac{dF}{dt} = C_f \frac{W^k r}{a^p}$$

- k = 1.0 para la mayoría de las formaciones excepto las muy suaves
- k = 0.6 para formaciones muy suaves
- p = 1.0 para desgaste de dientes con cresta plana
- p = 0.5 para desgaste de dientes auto-afilante o irregular
- C_f = Constante de Perforabilidad. Incluye los efectos de tipo de broca hidráulica, lodo y formación.

Relación entre el Ritmo de Desgaste de los Dientes de la Broca y los Factores que lo Afectan.

$$(2-a) \quad \frac{dD}{dT} = \frac{1}{A_f} \frac{1}{a m}$$

- A_f = Constante de Abrasividad. Incluye los efectos del tipo de broca, hidráulica, lodo y formación.

Relación entre el Desgaste de los Cojinetes y los Factores que lo afectan

$$(3-a) \quad B = S \frac{L}{N}$$

L es una función que disminuye con el aumento del peso.

Si Bx = fracción de vida de los cojinetes gastada en tiempo T

$$(4-a) \quad Bx = \frac{T}{B} = \frac{T \cdot N}{S L} \quad \text{para peso y velocidad constantes}$$

$$(5-a) \quad \frac{dBx}{dT} = \frac{N}{S L} \quad \text{para peso y velocidad variables}$$

FIGURA 5

Cálculo de la Abrasividad y Perforabilidad de la Formación

$$(6-a) \quad A_f = \frac{T_f \cdot i}{\bar{m} \cdot U}$$

$$(7-a) \quad C_f = \frac{F_f \cdot i}{A_f \cdot r \cdot W \cdot \bar{m} \cdot V}$$

N, W y D se obtienen de una prueba de campo

i, r, \bar{m} , U y V se obtienen de tablas de la Hughes

Cálculo de la constante de Fluído de Perforación

$$(8-a) \quad S = \frac{T_f \cdot N}{B_{xp} \cdot L}$$

L está dado en tablas

Para entrar al gráfico que dá los pesos y velocidades a usarse, calcular:

$$(9-a) \quad A = \text{Costo Broca/Costo del Equipo por Hr.} \cdot \uparrow \text{Tiempo de Viaje, horas}$$

$$(10-a) \quad A_n = A/A_f$$

$$(11-a) \quad S_n = S/A_f$$

Cálculo del total de pies a perforarse y del costo por pie

$$(12-a) \quad F_f = \frac{(A + T_f) \cdot C_f}{\dots}$$

$$(13-a) \quad \text{Costo por Pie} = \frac{K (\text{Costo del Equipo/Hr.})}{C_f}$$

ECUACION DEL COSTO Y PRINCIPALES

FUNCIONES DE RELACION

<p>Ecuación del Costo:</p>	$C_B + e F_o C + A_f C \sum_{D_o}^{D_f} \frac{a m}{i} d D \quad (14-a)$ $C_f A_f \sum_{D_o}^{D_f} \frac{W^k r m a}{i a^p} d D$ <p>e = Tiempo de Viaje(horas)/Profundidad(pies) F_o = Profundidad Inicial para la Broca</p>
<p>Desgaste de los Dientes: a =</p>	$0.928125 D^2 + 6.0 D + 1$
<p>Peso sobre la Broca(W): m =</p>	$- 714.19 \log_{10} W + 1359.1$
<p>Velocidad de Rotación(N): i =</p>	$N + 0.00004348 N^3$
<p>Ritmo de Penetración(R) vs. Peso sobre la Broca:R</p>	W^k
<p>Ritmo de Penetración (R) vs. Veloc.de Rotación: R</p>	$\left[e^{-100/N^2} N C_1 + C_2 N (1 - e^{-100/N^2}) \right] = r$ <p>C₁ y C₂ dependen de la formación</p>
<p>Ritmo de Penetración(R) vs. Desgaste de los Dientes R</p>	$a \text{ ó } a^{\frac{1}{2}}$

ECUACION DEL DESGASTE DE LOS COJINETES

<p>Ecuación del Desgaste de los Cojinetes:</p>	$B_x = \frac{1}{S} \sum_{t_i}^{t_f} \frac{N}{L} d T$
<p>Parámetro del Fluido:</p>	<p>S</p>
<p>Peso Sobre la Broca</p>	<p>L (Tabulado)</p>
<p>Velocidad de Rotación</p>	<p>N</p>
<p>Tiempo Total de Rotación</p>	<p>T_f</p>

FIGURA 7

TABULACION DE LA FUNCION L

\bar{w}	L	L'
15	6240	-443.35
20	4439	-287.72
25	3270	-187.78
30	2496	-126.58
35	1963	- 89.37
40	1578	- 66.12
45	1288	- 50.68
50	1063	- 39.88
55	884	- 32.07
60	739	- 26.15
65	620	- 21.70
70	520	- 18.47
75	434	- 16.03
80	359	- 14.00
85	294	- 11.98
90	240	- 9.48
95	201	- 5.88

FIGURA 8

CAPITULO TERCERO

ESTUDIO DE LOS GRAFICOS HUGHES

a.- GENERALIDADES.- En el capítulo anterior se indicó que, si el peso sobre la broca y la velocidad de rotación se varían de una manera ideal, se deben considerar tres casos:

Caso 1.- Los dientes limitan la vida de la broca

Caso 2 - Los cojinetes limitan la vida de la broca

Caso 3 - Los dientes y los cojinetes se gastan simultáneamente

Las relaciones entre las variables son diferentes para cada caso y no pueden ser resueltas en forma directa, por lo que la Hughes recurrió a un computador automático de tipo digital, combinado con métodos numéricos, para encontrar las soluciones.

Al investigar cada uno de los casos, la Hughes encontró que cuando los cojinetes limitan la vida de la broca, o cuando los cojinetes y los dientes se gastan simultáneamente, el costo por pie para la óptima variación de peso y velocidad era, excepto en unos pocos casos, esencialmente el mismo que si la broca se hubiera corrido considerando que los dientes eran el factor límite. Dado que la aplicación del Caso 1 en el campo es mucho más sencilla que las otras dos, la dificultad de aplicar los Casos 2 y 3 no se puede justificar con el pequeño ahorro adicional que se obtendría. Por este motivo, las soluciones que ofrece la Hughes en forma de gráficos fueron calculados para el Caso 1. En el caso en que se desee aplicar el método Hughes a una formación en la cual los cojinetes limitan la vida de la broca, se puede utilizar el gráfico desarrollado para formaciones muy suaves.

b.- CALCULOS DEL COMPUTADOR ELECTRONICO.- La teoría de los cálculos efectuados por la Hughes es bastante sencilla y, en forma general, consta de los siguientes pasos:

- 1.- El computador electrónico se carga con la ecuación desarrollada del costo (14-a).
- 2.- Se selecciona una serie de pesos sobre la broca y velocidades de rotación que sean factibles de aplicar en un tipo de formación dada.

- 3.- Se hace, en forma analítica, que los dientes de la broca se vayan gastando; es decir que D , o sea el desgaste de los dientes expresado como fracción de la altura original de dientes, vaya aumentando.
- 4.- Para cada incremento en el desgaste, o sea para cada valor de D , el computador aplicará la ecuación (14-a) para cada una de las combinaciones posibles de los pesos y velocidades seleccionados en el paso 2. Si se eligieron cinco pesos y cinco velocidades, el computador hará veinticinco cálculos para cada incremento de desgaste de los dientes.
- 5.- De las soluciones que ofrece el computador, se escoge la combinación de peso y velocidad que dá el mínimo costo de perforación para ese valor de desgaste de dientes. Por ejemplo, si consideramos incrementos de desgaste de 10%, podemos obtener que la mejor combinación es 20,000 lbs. 80 rpm para la primera hora de rotación (tiempo en que los dientes se desgastan 10%); 32,000 lbs.- 90 rpm. para las dos horas siguientes (tiempo que demora la broca en gastar otro 10% de su altura de dientes); y así sucesivamente hasta llegar a un desgaste de dientes de 100%.

Es en base a este método que la Hughes desarrolló sus gráficos, los cuales se muestran en las figuras 10 a 13.

c.- IDENTIFICACION DE LOS GRAFICOS HUGHES.- Cuatro son los gráficos desarrollados por la Hughes para brocas de dientes, los cuales representan combinaciones de diferentes valores de los parámetros p , r y k de la ecuación (1-a). Los cuatro juegos de ecuaciones fundamentales obtenidos se encuentran definidos por los siete números dígitos de identificación que aparecen en cada uno de los gráficos:

2	075	060	p	1/2, r (formaciones suaves), k	0.6
2	075	100	: p	1/2, r (" "), k =	1.0
2	043	100	: p	1/2, r (formaciones duras), k =	1.0
1	043	100	p	1.0 r (" "), k	1.0

El primer dígito de cada gráfico denota el tipo de desgaste de dientes que muestran las brocas corridas en la formación en estudio; así, el número 1 es para desgaste con cresta plana, mientras que el número 2 es para desgaste de dientes en forma autoafilante o irregular. El primer grupo de tres dígitos caracteriza el tipo de formación que se está perforando; así, el número 075 es para las formaciones suaves y medio-suaves tales como gredas y gredas intercaladas con areniscas, mientras que el número 043 es para las formaciones de tipo medio-dura y dura tales como arenas duras, calizas y dolomitas. Los segundos grupos de tres dígitos indican la variación del ritmo de penetración con el aumento de peso. El número 060 es para formaciones muy suaves en las que el ritmo de penetración no aumenta linealmente con el peso sobre la broca mientras que el número 100 es para todas las demás formaciones en las cuales el aumento en el ritmo de penetración es aproximadamente lineal con el peso. Aunque la Hughes no hace hincapié en este punto, el primer grupo de tres dígitos indica la variación del ritmo de penetración con el aumento de la velocidad de rotación, como se puede observar de la ecuación (1-a) y de las funciones que definen "r" en la nomenclatura del capítulo II.

En el siguiente capítulo se estudiarán con más detenimiento los exponentes de la velocidad y del peso.

d.- MANERA DE USAR LOS GRAFICOS HUGHES.- Una vez que se ha elegido el gráfico apropiado para el problema, se sienta el diámetro de la broca frente a su escala y el valor de A_f frente a su escala respectiva. Se encuentra luego la intersección de las líneas A_n y S_n y se lee el valor de K y T_f (tiempo total que trabajará a la broca). Se lee el peso y la velocidad de rotación versus el tiempo de rotación a lo largo de la línea constante K hasta llegar al tiempo total de rotación T_f . Si el valor de S_n es mayor que el indicado en la intersección de A_n y la línea que representa el desgaste 100% de la broca, el valor de K y T_f se deben leer en esta intersección. Esto indicará que los dientes se gastarán antes que se desgasten los cojinetes. Al leer el valor de K , tomar en cuenta que las distancias entre las curvas K no son lineales.

Cuando se hace el cálculo para brocas de diámetro distinto a 7-7/8", se deben corregir los pesos hallados:

$$W = \frac{\text{Peso leído en el gráfico}}{7.88} \times H$$

y cuando no se cuenta con escala móvil que permita fijar el valor de la abrasividad de la formación sobre la flecha de la parte inferior, se deberán corregir los tiempos encontrados de acuerdo a las fórmulas:

$$T = \frac{\text{T tiempo leído en el gráfico}}{10} \times A_p \text{ (Graf. 2 075 060, 2 075 100)}$$

$$T = \text{T tiempo leído en el gráfico} \times A_p \text{ (Graf. 1 043 100, 2 043 100)}$$

CAPITULO IV

LIMITACIONES DEL METODO HUGHES

a.- GENERALIDADES.- En el presente capítulo pretendemos analizar únicamente las limitaciones a que se ve sujeto el operador al tratar de aplicar el método Hughes para reducir sus costos de perforación. La evaluación del método se hará al final del presente trabajo.

Ante todo debemos estudiar brevemente el significado de k , exponente del peso sobre la broca en la ecuación (1-a); y de r , función de la velocidad de rotación.

b.- ESTUDIO DEL EXPONENTE "k" DEL PESO SOBRE LA BROCA.- El exponente k del peso sobre la broca indica la manera en que el ritmo de penetración responde al aumento del peso sobre la broca. La relación entre ambas variables podemos observarla en la ecuación (1-a) y en la curva correspondiente de la figura 4. Siendo esta relación una ecuación exponencial, podemos escribir.

$$R = C W^k \quad C = \text{Constante}$$

$$\log R = \log C + k \log W$$

o sea

$$y = b + mx$$

que es la ecuación de una línea recta. Si en un papel logarítmico ploteáramos, la variación del ritmo de penetración para varios valores de peso sobre la broca, a velocidad de rotación constante, debemos obtener una línea recta. La pendiente de esta recta nos dará el valor del exponente k .

c.- ESTUDIO DE LA FUNCION "r" DE LA VELOCIDAD DE ROTACION.- La ecuación que define la función r de la velocidad de rotación se encuentra en la nomenclatura del Capítulo II. Asimismo, en la figura 4, la segunda figura nos ofrece las curvas resultantes de plotear la función r para formaciones suaves y formaciones duras, según los valores Hughes.

Al comparar las curvas que muestran la variación del ritmo de penetración con el peso, con las curvas que muestran la variación del ritmo de perforación con la velocidad, se observó la gran semejanza que existe entre ambos juegos de curvas, tanto en las de formaciones suaves como en las duras. Cabía suponer entonces que la función que exprese la variación del ritmo de penetración R con la velocidad de rotación N , sea semejante a $R = C W^k$. En efecto, al plotear la función $R = CN^\lambda$ para varias velocidades de rotación, se obtuvo la curva que se muestra en la figura 14, la cual tiene las mismas características que las curvas de la función r . Quedaba por averiguar el motivo por el cual la Hughes desarrolló una función tan complicada como r , en lugar de N^λ . La razón, según el Sr. Henry Woods, fué que si:

$$R = N^\lambda$$

cuando $N \rightarrow 0$ $\lambda \rightarrow \infty$ (o sea la pendiente de la recta)

lo cual no convenía a la Hughes para el desarrollo de sus gráficos. En un caso práctico, N no será nunca cero.

De lo expuesto podemos deducir que, al aplicar el método Hughes a un caso práctico, es posible utilizar la función N para representar la manera en que el ritmo de penetración responde a cambios en la velocidad de rotación, en lugar de la función r . El valor del exponente λ se podrá obtener en forma similar al exponente k del peso sobre la broca; es decir, corriendo pruebas de penetración a varias velocidades y peso constante, y obteniendo la pendiente de la recta que resulta de plotear los resultados en papel logarítmico.

d.- LIMITACIONES DEL METODO HUGHES.- El inconveniente principal con que se tropieza al tratar de aplicar el método Hughes, es el que sólo se cuenta con cuatro gráficos, es decir, que ofrece soluciones para cuatro situaciones específicas determinadas por los valores de k , r y p :

<u>p</u>	r	k	Gráfico
0.5	0.75	0.60	2 075 060
0.5	0.75	1.00	2 075 100
0.5	0.43	1.00	2 043 100
1.0	0.43	1.00	.1 043 100

Difícil sería encontrar en la práctica una formación para la cual los valores de r y k caigan dentro de alguna de las cuatro combinaciones que ofrece la Hughes, y aunque es posible aproximar, los resultados no serán tan exactos como sería de desear. Dado que es posible encontrar los valores de k y λ según se ha demostrado en párrafos anteriores, vamos a tratar ahora de desarrollar un procedimiento que nos permita aplicar el método Hughes, para valores de k y λ que reflejen con mayor exactitud el tipo de formación para el que se hace el estudio. En el siguiente capítulo se sugiere dicho método.

CAPITULO V

PROCEDIMIENTO SUGERIDO PARA UTILIZAR

EL METODO HUGHES

a.- GENERALIDADES.- En el presente capítulo vamos a sugerir un procedimiento que permita utilizar el método Hughes en forma tal, que ofrezca valores más exactos para una formación dada.

En el capítulo anterior ya hemos visto lo siguiente:

- 1.- Que se puede utilizar la función N^{λ} en lugar de r , para expresar la forma en que el ritmo de penetración responde a una variación en la velocidad de rotación.
- 2.- Que podemos calcular, mediante pruebas sencillas de penetración, los valores de los exponentes k y λ de manera que nos expresen en forma más aproximada las características de una formación.

Vamos a suponer entonces que tenemos ya los valores de k y de λ y que queremos encontrar la manera en que se debe variar el peso sobre la broca y la velocidad de rotación, durante la vida de la broca, para obtener un costo mínimo de perforación.

b.- PROCEDIMIENTO SUGERIDO.- El procedimiento que se sugiere para utilizar el método Hughes de manera que ofrezca resultados más exactos, es bastante sencillo. Consta, esencialmente de los siguientes pasos:

- 1.- Obtención de los parámetros k y λ , de manera que nos definan en la forma más aproximada posible, la reacción de la formación en estudio a variaciones en el peso y en la velocidad.
- 2.- Interpolación entre las curvas ofrecidas por la Hughes, hasta obtener una curva promedio que satisfaga los valores de k y λ obtenidos.

Este método quedará mejor explicado con el ejemplo siguiente:

Supongamos que, para una formación dada, tenemos los siguientes valores:

$$p = 1/2 \qquad \lambda = 0.60 \qquad k = 0.90$$

necesitamos encontrar entonces la curva

$$2 \quad 060 \quad 090$$

Supongamos también que calculamos los valores:

$$S_n \quad 0.03$$

El procedimiento a seguir se puede sintetizar de la siguiente manera:

- 1.- Con los valores de S_n y A_n obtenemos las curvas K en los gráficos 2 075 100 y 2 043 100, y las ploteamos en papel milimetrado. Tomamos solamente la porción de cada curva que nos interesa, es decir, hasta el tiempo de rotación final que se obtenga en cada gráfico.
- 2.- Interpolamos entre ambas curvas para obtener la curva 2 060 100
- 3.- Con los mismos valores de S_n y A_n , obtenemos la curva K del gráfico 2 075 060 y la ploteamos.
- 4.- Interpolamos entre las curvas 2 075 060 y 2 075 100 para obtener la curva 2 075 090.
- 5.- La curva buscada 2 060 090 se encuentra promediando las curvas 2 060 100 y 2 075 090 obtenidas.

Estos cinco pasos se pueden esquematizar en la forma siguiente:

Plotear	<u>Interpolar</u>	Promediar
2 075 100		
2 043 100	2 060 100	
		2 060 090
2 075 060		
	2 075 090	
2 075 100		

Debido a que, por la variedad de escalas de los gráficos Hughes, no es posible plotear las curvas de manera que satisfagan los tres ejes tiempo, peso y velocidad, se debe seguir dos veces el procedimiento descrito. Es decir, una vez para los ejes tiempo-peso sobre la broca y otra para los ejes tiempo-velocidad de rotación.

La figura 15 ilustra el ejemplo discutido. En la parte superior se ha obtenido la curva 2 060 090 para los ejes tiempo-peso y en la parte inferior para los ejes tiempo-velocidad. El tiempo final de rotación se ha obtenido en el gráfico superior como promedio de los tiempos finales de cada curva, dando como resultado 2.9 horas.

La Fig. 16 muestra el programa que se obtiene de las curvas ploteadas.

PROGRAMA RESULTANTE

Tiempo hrs.	Peso 1000 #	Velocidad <u>rpm.</u>
0.5	46	65
1	47	70
2	48	78
2.9	48	83

MODELO	NATIONAL C - 75
RANGOS	6000' - 9000'
DISEÑO PARA	650 HP
MAQUINA	TRES MOTORES PAXMAN II
ACOPLAMIENTO	HIDRAULICO
BOMBAS	DOS IDEAL C-50 600 HP

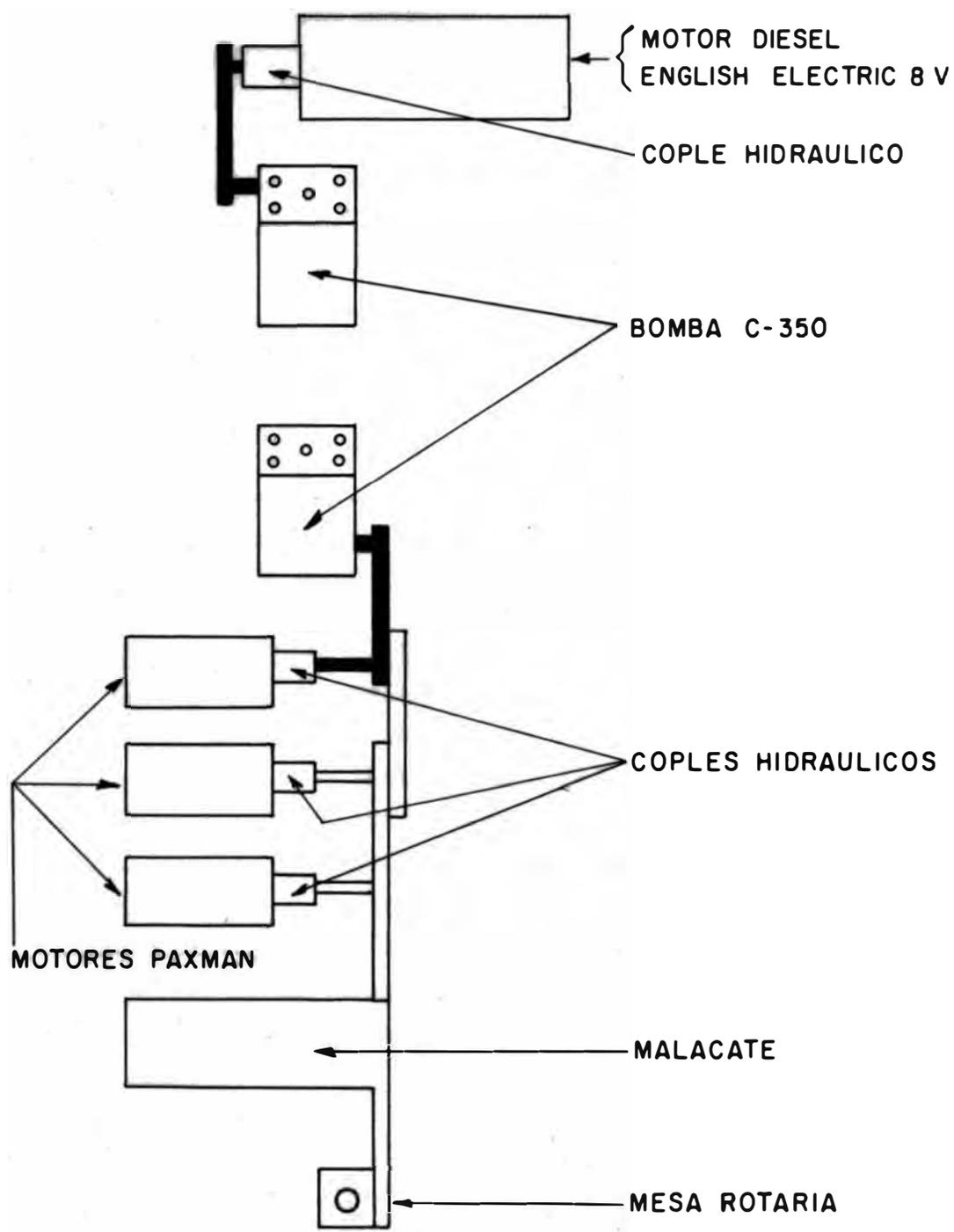


FIGURA 20

CAPITULO TERCERO

PRUEBAS DE PENETRACION

a.- GENERALIDADES.- Una vez que se han acumulado los datos básicos, que se han determinado las secciones geológicas y que se han elegido parámetros de operación, se deben conducir una serie de pruebas en un segundo pozo de referencia, para determinar la forma en que el peso sobre la broca y la velocidad de rotación afectan al ritmo de penetración de la broca en las diferentes formaciones que se encuentran en el pozo. Estas pruebas consisten en perforar una serie de intervalos cortos con un peso y velocidad constantes y con una descarga constante de la bomba. Pruebas de aproximadamente 2 pies, o de 2 a 6 minutos, bajo cada condición en las secciones uniformes, permitirá en la mayoría de los casos seleccionar los exponentes del peso y de la velocidad.

Es de vital importancia que durante estas pruebas se mantengan el peso, velocidad y las condiciones de operación de la bomba constantes. También se debe mantener en un nivel óptimo la hidráulica del equipo y las propiedades del lodo.

b.- ELECCION DE LAS ZONAS.- Tomando como referencia la información geológica, especialmente el registro eléctrico y el registro de brocas del pozo "Referencia No. 1" (ver figura 17 y 19) se determinaron tres zonas con características geológicas y de perforación determinadas, las cuales están indicadas en la figura 22. Asimismo se indican los pesos y velocidades con que se planeó hacer las pruebas de penetración los cuales fueron elegidos con la sola idea de tener puntos apartados que sean de fácil ploteado. Las formaciones sobre la zona No.1 se descartaron por ser de perforación rápida en las que un factor de importancia en el costo sería el tiempo empleado en hacer conexiones.

c.- CONDUCCION DE LAS PRUEBAS DE PENETRACION.- Las figuras 23, 25 y 27 muestran, en su parte superior, la forma en que se condujeron las pruebas de penetración. En las orillas del cuadro se pueden

ver los pesos y velocidad que se planeó usar para lograr las 9 combinaciones diferentes, así como los pesos y velocidades que se pudieron usar. En cada uno de los cuadrados internos se encuentran indicados los ritmos de penetración que se obtuvieron con la respectiva combinación de peso y velocidad. En las esquinas de cada uno de estos cuadrados está anotado el número que indica el orden en que se efectuó la prueba.

d.- ANALISIS DE LAS PRUEBAS DE PENETRACION (CALCULO DE k y λ).- Una vez que se efectuaron las pruebas de penetración, se procedió a calcular los parámetros k y λ

k = Exponente del Peso Sobre la Broca.

λ = Exponente de la Velocidad de Rotación

Para calcular estos parámetros, se plotearon primeramente los ritmos de penetración (Ft/hr.) obtenidos de las pruebas, en papel logarítmico, considerando primero el peso y luego la velocidad constante. Luego se trazaron la mejor línea recta que pase por esos puntos, como se muestra en las figuras 24, 26 y 28. El criterio del ingeniero que efectuó las pruebas juega papel preponderante al asignar valor a los puntos que tienen un valor extraño (ya sea por que durante las pruebas se encontró alguna vena de arena o greda, o por cualquier otro motivo.) A las rectas así obtenidas se les encuentra la pendiente, cuyo promedio nos debe dar los valores de k y λ . En la parte inferior de las figuras 23, 25 y 27, se encuentran indicados los valores obtenidos para k y λ en cada una de las zonas consideradas, así como los valores con que se hallaron. Como ilustración, se adjunta el gráfico del registrador Totco que corresponde a las pruebas de penetración de la zona No.3 (Figura 29). Los valores encontrados para k y λ se han incluido en la Figura 22.

Con la terminación de las pruebas de penetración en el pozo "Referencia No.2", ya se cuenta con información suficiente para establecer un programa de peso-velocidad controlados.

FIGURA 22

ZONAS DE PERFORACION

Zona No.	Intervalo Pies	Profundidad Representativa Pies	Brocas No.	Brocas Tipo	Fcsos sobre la Broca 1000 lbs.	Velocidades de Rotación rpm.	k	λ
Zona No. 1	1877 - 3469	3000	3-6	Suave	20-30-40	70-100-130	0.95	0.70
Zona No. 2	5391 - 5604	5500	16-19	Media	25-35-45	60-80-100	0.95	0.65
Zona No. 3	6220 - 6909	6500	27-33	Media	25-35-45	80-100-120	1.05	0.60

PRUEBAS DE PENETRACION

ZONA No.1

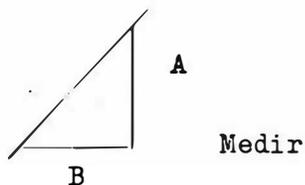
Velocidad rpm. Peso 1000 lbs.	Planeada 130	Planeada 100	Planeada 70
	Usada 131	Usada 104	Usada 72
Planeado 40	7	8	9
Usado 40	—	24.2	20.4
Planeado 30	1	2	3
Usado 30	29.8	17.7	15.8
Planeado 20	6	5	4
Usado 20	16.9	13.6	11.2

CALCULO DE k
ZONA No. 1

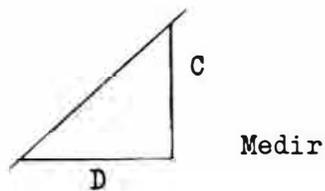
RPM	A	B	k
131	2.1	1.98	1.06
104	2.9	2.6	0.93
72	2.4	2.8	0.86
Promedio	-	-	0.95

CALCULO DE λ
ZONA No. 1

Peso	C	D	λ
40,000	2.0	2.9	0.69
30,000	1.8	2.4	0.75
20,000	2.0	3.1	0.65
Promedio	-	-	0.70



$$k = A/B$$



$$\lambda = C/D$$

FIGURA 23

PRUEBAS DE PENETRACION

ZONA No. 2

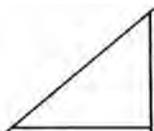
Velocidad rpm Peso 1000 lbs.	Planeada 100	Planeada 80	Planeada 60
	Usada 96	Usada 82	Usada 68
Planeado 45	8	7	9
Usado 45	16.3	14.1	12.4
Planeado 35	1	6	5
Usado 35	12.4	10.9	9.8
Planeado 25	2	3	4
Usado 25	8.9	8.1	7.2

CALCULO DE k
ZONA No.2

CALCULO DE λ
ZONA No.2

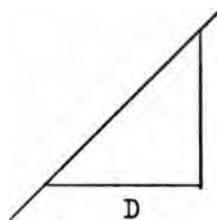
RPM	A	B	k
96	2.9	2.9	1.00
82	2.9	3.1	0.94
68	2.4	2.6	0.96
Promedio	-	-	0.95

Peso	C	D	λ
45,000	2.1	2.8	0.74
35,000	1.5	2.4	0.62
25,000	2.0	3.3	0.60
Promedio	-	-	0.65



A
Medir

$$k = A/B$$



C
Medir

$$\lambda = C/D$$

FIGURA 25

PRUEBAS DE PENETRACION

ZONA No.3

Velocidad rpm	Planeada 120	Planeada 100	Planeada 80
	Usada 120	Usada 100	Usada 89
Peso 1000 lbs.			
Planeado 45	7	8	9
Usado 45	15.4	16.2	19.2
Planeado 35	1	2	3
Usado 35	12.8	11.2	9.5
Planeado 25	6	5	4
Usado 25	6.7	8.8	8.05

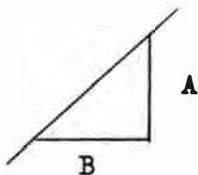
Nota.- Las pruebas tomadas con 45,00 lbs. se descartaron, parece que se hicieron al perforar una vena de greda.

CALCULO DE k
ZONA No.3

RPM	A	B	k
120	2.7	1.4	1.93
100	1.8	2.5	0.72
84	1.6	3.1	0.52
Promedio	-	-	1.05

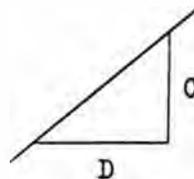
CALCULO DE λ
ZONA No.3

Peso	C	D	λ
45,000	-	-	-
35,000	1.9	2.5	0.76
25,000	1.1	2.5	0.44
Promedio	-	-	0.60



Medir

$$k = A/B$$



Medir

$$= C/D$$

CAPITULO CUARTO

CALCULO DE LA ABRASIVIDAD DE LA FORMACION

a.- ECUACION DE LA ABRASIVIDAD.- La ecuación que define el parámetro "Abrasiveidad de la Formación" es como sigue:

$$A_f = \frac{T_f \cdot i}{\bar{m} \cdot U}$$

en la que:

- A_f = Abrasiveidad
 T_f = Tiempo de rotación total de la broca, horas.
 i = Función tabulada. La tabla que da los valores de esta función se adjuntó al final del capítulo segundo.
 \bar{m} = Función tabulada. La tabla que da los valores de esta función también se adjuntó al final del capítulo segundo.
 U = Constante tabulada. Los valores tabulados también se adjuntó.

b.- CALCULO DE LA ABRASIVIDAD A_f .- En la figura 28 se describen los pasos seguidos para el cálculo de la abrasiveidad. Los valores indicados en las columnas 1, 2, 4 y 6 son promedios de las brocas que se consideraron como representativas para cada zona, esto es, las brocas No.3 a 6 para la zona 1, brocas No.16 a 19 para la zona 2 y las brocas No.27 a 33 para la zona 3. Los valores utilizados para obtener los promedios se obtuvieron de la Figura 19.

Los valores considerados para W son, en este caso, los pesos que se usaron sobre las brocas de 7 7/8". Si se hubieran usado brocas de otro diámetro, se hubiesen tenido que corregir los pesos usados de acuerdo a la fórmula:

$$= \frac{7.875 \cdot W}{H}$$

en que:

- H Diámetro de la broca, in.
- W = Peso sobre la broca, 1000 lbs.
- \bar{W} = Peso sobre la broca corregido para
7 7/8", 1000 lbs.

Es en realidad con este peso corregido \bar{W} con el que se debe entrar a la tabla para hallar \bar{m} , sólo que en el presente caso W y \bar{W} coinciden.

Cabe mencionar nuevamente que cuanto más bajos son los valores de A_f , mayor es la abrasividad de la formación.

FIGURA 28

CALCULO DE A_f

Nombre	Tiempo de Rotación	Velocidad de Rotación	Función	Peso sobre la Broca	Función	Desgaste de la Broca	Función	Abrasividad
Símbolo	T _f	N	i	W	\bar{m}	D	U	A _f
Fuente	Registrador Totco	Registro de Brocas	Tabla	Registrador Totco	Tabla	Registro de Brocas	Tabla	1 1 3 5 1 7
Zona 3	9.5	100	143	40	.300	6/8	1834	2.47
Zona 2	11	100	143	30	.425	5/8	1337	2.77
Zona 1	12	120	195	20	.601	4/8	920	4.23

CAPITULO QUINTO

CALCULO DE LA PERFORABILIDAD DE LA FORMACION

a.- ECUACIONES DE LA PERFORABILIDAD.- La ecuación de perforabilidad varía ligeramente según el gráfico Hughes que se vaya a utilizar. Las ecuaciones son:

$$(a) \quad C_f = \frac{.0014 F_f i}{A_f r \bar{W} \bar{m} D} \quad \text{cuando se usa (1 075 100) o (1 043 100)}$$

$$(b) \quad C_f = \frac{F_f i}{A_f r \bar{W} \bar{m} V} \quad \text{cuando se usa (2 075 100) o (2 043 100)}$$

$$(c) \quad C_f = \frac{F_f i}{A_f r \bar{W}^{.6} \bar{m} V} \quad \text{cuando se usa (2 075 060)}$$

en que:

C_f = Perforabilidad de la Formación

F_f = Total de pies perforados por la broca, pies

$r = N^\lambda$ = Relación Ritmo de Penetración - Velocidad de Rotación

\bar{W}^k = Relación Ritmo de Penetración - Peso sobre la Broca

V = Función tabulada. La tabla que da los valores de esta función se adjuntó al final del capítulo segundo

Los demás términos se explicaron en el capítulo anterior.

Para el cálculo de C_f usando las constantes encontradas con pruebas de penetración, usaremos la fórmula:

$$\frac{F_f i}{A_f N^\lambda \bar{W}^k \bar{m} V}$$

En que N^λ y \bar{W}^k son funciones que indican las variaciones del ritmo de penetración con la velocidad de rotación y con el peso sobre la broca, respectivamente.

b.- CALCULO DE LA PERFORABILIDAD C_f .- En la figura 29 se muestra

los pasos seguidos para calcular C_f . Los valores indicados en las columnas 1, 2, 6 y 9 son promedios de las brocas que representan cada zona. Los valores \bar{W} y \bar{W}^6 , como se explicó en el capítulo anterior, corresponden a W y W^6 respectivamente, por haberse usado broca de 7 7/8". C_f se ha calculado con las fórmulas b y c, ya que no tenemos desgaste plano de dientes ($p = 1$), por lo que no vamos a usar los gráficos 1 075 100 ó 1 043 100. Para la fórmula b se ha debido considerar los dos valores de r que muestra la tabla.

Como ya se ha indicado oportunamente, los valores de "p", o sea el factor de desgaste de los dientes, se asigna como sigue:

$p = 1.0$ para dientes desgastados con cresta plana

$p = 0.5$ para desgaste autoafilante o irregular

$p = 0$ para broca tipo de dientes insertados

En la figura 30 se muestra el cálculo de C_f para aplicarlo en el método recomendado en el presente estudio. Las columnas 1, 2, 6 y 10 muestran valores promedio para las brocas de cada zona.

CAPITULO SEXTO

CALCULO DEL FACTOR DE COJINETES

DE LA BROCA

a.- ECUACION DEL FACTOR DE COJINETES.- Ya se ha indicado que la finalidad del factor de cojinetes era limitar el cálculo del costo mínimo de perforación. Es decir, que a pesar de que los gráficos han sido desarrollados variando el desgaste de los dientes para calcular la óptima magnitud de desgaste a la cual hay que sacar la broca, debemos considerar también la posibilidad de que los cojinetes fallen antes que los dientes. La ecuación que se utiliza es:

$$S = \frac{T_f N}{B_{xf} L}$$

en que:

S = Factor de cojinetes

Fraccción gastada de la vida de los cojinetes de la broca.

L = Función tabulada. La tabla que da los valores de esta función se adjuntó al final del capítulo segundo.

b.- CALCULO DEL FACTOR DE COJINETES S.- En la figura 31 se indican los pasos seguidos para el cálculo de S. Las columnas 1, 2, 3 y 4 son promedios para las brocas de cada zona.

FIGURA 31

CALCULO DE S

Nombre	Tiempo de Rotación	Velocidad de Rotación	Desgaste de los Cojinetes	Peso sobre la Broca,	Función	Factor de los Cojinetes
Símbolo	T_f	N	B_x	W	L	
Fuente	Registrador	Registro de Brocas	Registro de Brocas	Registrador	Tabla	1×2 3×5
Zona 3	9.5	100	5/8	40	1578	0.965
Zona 2	11	100	6/8	30	2496	0.587
Zona 1	12	120	6/8	20	4439	0.433

CAPITULO SEPTIMO

CALCULO DE COMO VARIAR EL PESO SOBRE LA BROCA Y LA VELOCIDAD DE ROTACION

a.- CALCULO DE LOS PARAMETROS A_n y S_n .- Para calcular los parámetros A_n y S_n con los cuales poder entrar a los gráficos, debemos primero calcular el factor A, que es la suma del tiempo de viaje más el costo de la broca en horas:

$$A = \text{Tiempo de Viaje} + \frac{\text{Costo de la Broca}}{\text{Costo del Equipo/Hora}} \text{ horas.}$$

Con el valor de A, ya se puede calcular los parámetros A_n y S_n :

$$S_n = S/A_f$$

La figura 32 nos muestra los pasos seguidos para calcular A, A_n y S_n . Los valores mostrados en la columna 1 son promedio para las brocas de cada zona.

b.- CALCULO DE LOS PESOS Y VELOCIDADES VARIABLES.- Conociendo A_n y S_n , ya podemos entrar a los gráficos Hughes para calcular los pesos y velocidades variables que se usarán en cada zona. El método es, como ya se ha indicado, entrar a los gráficos con A_n y S_n y encontrar la intersección de estas dos curvas. Por esta intersección se pasa la curva K interpolada. Entrando con el tiempo deseado hasta la curva K obtenida, se pueden hallar los pesos y velocidades a usarse.

Los valores encontrados de los gráficos Hughes se han ploteado en papel milimetrado para poder aplicar el método sugerido de interpolación. Sin embargo, los tiempos con los que se entra a los gráficos Hughes son distintos a los ploteados, ya que deben ser corregidos para los valores de la abrasividad, de acuerdo a las fórmulas indicadas en el capítulo tercero-d.

En la figura 33 se puede seguir paso a paso el procedimiento seguido para el cálculo de las curvas que nos darán los pesos y velocidades variables con que hemos de trabajar las brocas de cada zona, así como su tiempo total de rotación. Las figuras 34, 35 y 36 muestran las curvas obtenidas de los gráficos Hughes en línea sólida, las curvas interpoladas en línea punteada; y la curva solución para la zona, en línea sólida gruesa.

Teniendo las curvas solución para cada zona, ya podemos corretear puntos y encontrar el programa peso-velocidad variables para cada zona. Sin embargo, antes de hacerlo, vamos primero a calcular el total de pies que debe perforar cada broca y el costo por pie perforado.

FIGURA 32

CALCULO DE A , A_n y S_n

Nombre	Tiempo de Viaje, hrs.	Costo de la Broca	Costo del Equipo/Hr.	Abrasiveidad A_f	Factor de Cojinetes S	Parámetro A	Parámetro A_n	Parámetro n
Símbolo	-	-	-					
Fuente	Registrador Totco	Dato de Operación	Dato de Operación	Fig. 28	Fig. 31	1 + 2/3	6/4	5/4
Zona 3	4.75	235	75	2.47	0.965	7.89	3.20	0.391
Zona 2	4.39	235	75	2.77	0.587	7.53	2.72	0.211
Zona 1	2.49	235	75	4.23	0.433	5.63	1.37	0.103

FIGURA 33

CALCULO DE LOS PESOS Y VELOCIDADES

Nombre	Parámetro	Parámetro	Abrasiveidad	Plotear	Interpolar	Plotear	Interpolar	Promediar	Hallar
Símbolo	A_n	S_n	A_f	Gráfico	-	Gráfico	-		
Fuente	Fig. 32	Fig. 32	Fig. 28	Gráfico	-	Gráfico	-		
				ZONA 3					
	3.20	0.391	2.47	2 043 100	2 060 100	2 075 060	2 075 105	2 060 100	2 060 105
				2 075 100	2 075 100	2 075 100	2 075 105	2 075 105	
				ZONA 2					
	2.72	0.211	2.77	2 043 100	2 065 100	2 075 060	2 075 095	2 065 100	2 065 095
				2 075 100	2 075 100	2 075 100	2 075 095	2 075 095	
				ZONA 1					
	1.37	0.103	4.23	2 043 100	2 070 100	2 075 060	2 075 095	2 070 100	2 070 095
				2 075 100	2 075 100	2 075 100	2 075 095	2 075 095	

CAPITULO OCTAVO

CALCULO DEL AVANCE DE LAS BROCAS

Y DEL COSTO POR PIE PERFORADO

a.- ECUACION DEL AVANCE DE LAS BROCAS.- La ecuación que nos permite calcular el total de pies que perforará cada broca es, según se indicó en la figura 6:

$$F_f = \frac{(A + T_f) C_f}{K}$$

en que:

F_f = Avance de la broca, ft.

A = Factor (Cap. VII)

T_f = Tiempo total de rotación de la broca (gráficos Cap. VII), hrs.

C_f = Perforabilidad de la formación (Cap. V)

K = C x C_f

b.- ECUACION DEL COSTO POR PIE PERFORADO.- Igualmente, en la figura 6, se da la fórmula que se usa para calcular el costo por pie a perforarse en cada zona.

La fórmula es:

$$\text{Costo por Pie} = \frac{K \times \text{Costo del Equipo/Hora}}{C_f}$$

en que:

Costo del Equipo/Hora = \$ 75/hr (dato de operación)

En la figura 37 se puede seguir el cálculo del total de pies a perforarse y del costo por pie.

c.- FORMA FINAL DEL PROGRAMA PESO-VELOCIDAD VARIABLES.- Las figuras 38, 39 y 40 muestran los resultados del programa calculado,

tal como se deben presentar para su uso. Los pesos sobre la broca y velocidades de rotación a usarse en los distintos intervalos de tiempo, se han obtenido tomando puntos de la curva desarrollada para cada zona (figuras 34, 35 y 36). La primera columna indica las horas rotando a las condiciones de las columnas dos y tres. Las horas de rotación se indican en fracciones no menores de media hora, excepto el tiempo final al cual hay que sacar la broca. Se usan incrementos de 1000 libras para el peso sobre la broca y de 5 rpm para la velocidad de rotación.

Es muy importante indicar que el perforador puede y debe sacar la broca a su discreción, antes del tiempo teórico recomendado, si cree que los dientes e los cojinetes se han gastado. Asimismo, puede seguir perforando a las condiciones finales recomendadas, si la penetración parece ser satisfactoria y no hay indicación de falla de los cojinetes.

EQUIPO No. _____ POZO No. BROCA DE 7-7/8"

INTERVALO 1,900' 3,450'

Horas Rotando	RPM	Peso sobre la Broca
0 - 1	65	46,000
1 - 2	75	47,000
2 - 3	80	48,000
3 - 4	85	49,000
4 - 5	90	49,000
5 - 5.9	95	50,000

Avance Esperado: 242 pies
Costo Esperado por Pie: \$ 2.30 por pie

FIGURA 38

EQUIPO No. _____ POZO No. _____ BROCA DE 7-7/8"

INTERVALO 5,400' 5,600'

Horas Rotando	RPM	Peso sobre la Broca
0 - 1	60	45,000
1 - 2	70	47,000
2 - 3	75	48,000
3 - 4	80	49,000
4 - 5	85	50,000
5 - 6	90	51,000
6 - 8.3	95	51,000

Avance Esperado 58 pies
Costo Esperado por Pie \$27.18 por pie

FIGURA 39

EQUIPO No. _____ POZO No. _____ BROCA 7-7/8"

INTERVALO 6,250' - 6,900'

Horas Rotando	RPM	Peso sobre la Broca
0 - 1	60	48,000
1 - 2	70	50,000
2 - 3	80	51,000
3 - 4	85	52,000
4 - 5	90	53,000
5 - 6	95	53,000
6 - 7	100	54,000
7 - 8	105	54,000
8 - 10.3	110	55,000

Avance Esperado 104 pies
Costo Esperado por Pie \$13.35 por pie

FIGURA 40

CAPITULO NOVENO

RESULTADO ECONOMICO DEL PROGRAMA CALCULADO

a.- COSTOS DE REFERENCIA.- El primer paso para hacer un análisis económico de los resultados del programa peso-velocidad calculado, es encontrar los costos por pie que se obtuvieron al perforar el pozo de referencia, con el fin de utilizarlos como base de comparación. Estos valores se obtienen aplicando la ecuación del costo (Capítulo I-C, ecuación 1.)

$$\text{Costo } \$/\text{ft} = \frac{\text{Costo Broca } (\$) + \text{Costo Viaje } (\$) + \text{Costo Operación } (\$)}{\text{Pies Perforados } (\text{ft}).}$$

La figura 41 muestra los cálculos efectuados y los costos de referencia obtenidos y para lo cual se ha considerado:

$$\begin{aligned} \text{Costo de Viaje } (\$) &= \text{Costo Operación } (\$/\text{hr}) \times \text{Tiempo Viaje } (\text{hrs}) \\ \text{Costo Operación } (\$) &= \text{Costo Operación } (\$/\text{hr}) \times \text{Tiempo Rotación } (\text{hrs}) \end{aligned}$$

siendo los tiempos de viaje y los tiempos de rotación valores promedio para cada zona.

b.- POSIBLE AHORRO DERIVADO DEL PROGRAMA PESO-VELOCIDAD CALCULADO.-

La figura 42 muestra un cuadro comparativo de los resultados que teóricamente se obtendrán al aplicar el programa peso-velocidad calculado, con los resultados que se obtuvieron al perforar el pozo Referencia No.2. El ahorro a obtenerse en cada zona es:

$$\text{Ahorro } \% = \frac{\text{Costo Actual } \$ - \text{Costo Calculado } \$}{\text{Costo Actual } \$} \times 100$$

$$\text{Zona 1.- Ahorro } \% = \frac{\$ 3.30 - \$ 2.30}{\$ 3.30} \times 100 = 30.3\%$$

COSTOS DE REFERENCIA

Zona 3.-

$$\$/ft. = \frac{\$ 235 + \$75 \times 4.75 \text{ hrs.} + \$75 \times 9.5 \text{ hrs.}}{90}$$

\\$ 14.50 por pie

Zona 2.- $\$/ft. = \frac{\$ 235 + \$75 \times 4.4 \text{ hrs.} + \$75 \times 11 \text{ hrs.}}{55}$

\\$ 25.25 por pie

Zona 1.-

$$\$/ft = \frac{\$ 235 + \$75 \times 2.5 \text{ hrs.} + \$75 \times 12 \text{ hrs.}}{400}$$

\\$ 3.31 por pie

FIGURA 41

POSIBLE AHORRO

Programa	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	Actual	Calculado	Actual	Calculado	Actual	Calculado
Peso sobre la Broca	20,000	46-50,000	30,000	45-51,000	40,000	48-55,000
Vel. de Rotación: 5 rpm.	120	65-95	100	60-95	100	60-110
Horas Perforando	12	5.9	11	8.3	9.5	10.3
Avance -ft.	400	242	55	58	90	104
Costo - \$/ft.	3.30	2.30	25.25	27.18	14.50	13.35
Posible Ahorro %	-	30.3	-	-7.65	-	7.9

FIGURA 42

CAPITULO DECIMO

DISCUSION DEL PROGRAMA CALCULADO

a.- LIMITACIONES DEL PROGRAMA DE COSTO MINIMO.- Se puede considerar que el programa peso-velocidad variables desarrollado en el presente trabajo, cuenta con las limitaciones siguientes:

- 1.- Un programa de perforación como el calculado asume que las condiciones permanecerán constantes durante toda la duración de la broca. Estas condiciones pueden cambiar en forma abrupta de manera que el programa ya no sea aplicable bajo las nuevas condiciones.
- 2.- Al calcularse un programa se asume que la broca puede fallar sólo debido al desgaste de los dientes o de los cojinetes. Las brocas, sin embargo, pueden fallar debido al desgaste de su diámetro, o por alguna falla en las boquillas, entre otros motivos. Estas posibilidades no están consideradas en el programa en estudio.
- 3.- En el programa de costo mínimo se implica que el peso sobre la broca no está limitado por la desviación del pozo. A pesar de que es posible calcular el programa imponiendo al máximo peso un límite distinto al de la falla de la broca, el programa resultante puede no tener un costo tan bajo como uno sin esta restricción.
- 4.- Algunos equipos de perforación no pueden lograr algunas velocidades de rotación sin afectar la hidráulica. Aunque este defecto se puede corregir, a veces esto causará un aumento en el costo.
- 5.- Los programas de costo mínimo de perforación están basados en relaciones empíricas entre las variables. Aunque se tiene bastante confianza en estas relaciones, no se puede negar que siempre existe lugar para mejoras y aún para el desarrollo de una mejor aproximación teórica al problema.

6.- Finalmente, dado que la manera ideal de desarrollar un programa de este tipo es calcular los óptimos programas peso-velocidad constantes y peso-velocidad variables, para poder decidir cual ofrece mejores perspectivas de ahorro; el método estudiado se encuentra en desventaja con respecto aun programa completo, calculado con un computador electrónico. Sin embargo la facilidad de utilizar el método Hughes corregido, hasta cierto punto compensa esta desventaja.

b.- EVALUACION DE CAMPO DEL PROGRAMA CALCULADO - Al aplicarse por primera vez en el campo el programa peso-velocidad calculado, se debe tomar todas las medidas necesarias para que el programa pueda ser perfectamente controlado y así poder contar con todos los datos necesarios para su evaluación. Las brocas que se van cambiando en el pozo en perforación se deberán examinar a conciencia, para decidir sobre la conveniencia de aumentar el tiempo teórico de rotación. Es recomendable trazar las curvas del trabajo de cada broca con el objeto de determinar su curvatura, así como calcular la abrasividad, perforabilidad y el factor de cojinetes para cada broca, para comparar estos valores con los que se calcularon en base a pozos perforados con anterioridad. De esta forma, siempre será posible ir efectuando pequeños ajustes en el programa peso-velocidad variables, obteniendo así un costo cada vez menor de perforación.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Variable Weight and Rotary Speed for Lowest Drilling Cost-
E. M. Galle and H.B. Woods; Hughes Tool Co., 1963.
- 2.- Use Theoretical Charts to Reduce Drilling Costs -
Sam A. Billington and K.A. Blenkarn Pan American Corp., Tulsa-
World Oil Mayo 1962.
- 3.- How High Rotary speed Shortens Bit Life, Increases Drilling
Costs.- R.A. Cunningham, Hughes Tool Co.
The Oil and Gas Journal July 11, 1960.
- 4.- Rock Bit Design, Selection and Evaluation.- H.G. Bentson
Drilling and Production Practice 1956.
- 5.- Why Rock-Bit Bearings Fail - G.R. King
The Oil and Gas Journal November 16, 1959
- 6.- Rotary Drilling Bits - Hughes Tool Co. 1960