

Rolando López C.

Instituto de Investigaciones Petroleras  
Universidad del Zulia  
Maracaibo, Venezuela

# Efectos del Peso Sobre la Barrena y la Velocidad de Rotación en el Costo de Perforación

(Recibido el 3 de Octubre, 1977;  
y la versión revisada el 20 de Febrero, 1978)

## RESUMEN

*El costo de perforación está íntimamente relacionado a la velocidad de perforación y al tiempo de perforación. La velocidad de perforación y el tiempo de perforación están afectados por un gran número de factores; tales como: Tamaño y tipo de barrena, profundidad del pozo, tipo de formación, tipo y condiciones del lodo, velocidad de circulación, impacto del lodo en el fondo del agujero, capacidad de acarreo del lodo, peso sobre barrena, velocidad de rotación.*

*En diferentes trabajos publicados con anterioridad, en los cuales se muestran experimentos de campo y de laboratorio, se ha demostrado el efecto de varias variables sobre la velocidad de perforación. En el presente trabajo estos resultados se han incorporado en teorías de optimización, con el propósito de reducir los costos de perforación.*

## INTRODUCCION

Galle, E.M., y Woods H.B.<sup>5-7</sup> han publicado dos trabajos sobre como calcular el peso sobre la barrena y la velocidad de perforación, para obtener costos de perforación más bajos. Las técnicas de optimización de la perforación de pozos que se han venido aplicando desde 1967, han reducido significativamente los costos de per-

## SUMMARY

*The cost of drilling is intimately related to its speed and the time required. The speed and the time of drilling are affected by a great number of factors. For example, the size and the type of bit, depth of the well, type of formation, type and the condition of mud, velocity of circulation of mud, impact of the mud on the bottom of the hole, carrier capacity of the mud, weight on the bit, speed of rotation.*

*In some of the previous published field and laboratory works, the effect of several variables on the speed of drilling has been shown. In the present work these results have been incorporated in a theory of optimization to minimize the cost of drilling.*

foración, existiendo ya una determinada filosofía que se sigue en el campo para obtener buenos resultados. La definición y la filosofía de la optimización está resumida en el trabajo sobre optimización de perforación publicado por James L. Lummus<sup>8</sup> El éxito en el desarrollo de un programa de optimización en la perforación de pozos depende de un gran número de factores, siendo uno de los más importantes la forma en que se

manejan los datos de los pozos, ya perforados en el área y la propia adquisición de dichos datos. Sobre la forma de adquirir los datos y el control de la perforación por sistemas computarizados se han publicado varios trabajos entre los cuales cabe destacar el publicado por Lummus J.L. 9 y el publicado por Young F.S. Jr. 10.

Tomando en cuenta estas publicaciones, nos hemos propuesto a efectuar el presente trabajo, que trata sobre los efectos del peso sobre la barrena y la velocidad de rotación en el costo de perforación.

En este análisis se supone que el tamaño de barrena, profundidad del pozo y tipo de formación son constantes para determinada localización. Además, se supone que el tipo de barrena, tipo y condiciones del lodo, velocidad de circulación, impacto del lodo en el fondo del agujero y capacidad de acarreo del lodo son adecuados y que no limitan el peso sobre barrena y velocidad de rotación que se deseen aplicar. Se supone, además que los requerimientos de desviación del pozo no limitan el peso sobre barrena. Esto nos deja con dos factores muy importantes y que son: el peso sobre barrena y la velocidad de rotación.

El objeto de este trabajo es desarrollar una fórmula matemática del costo de perforación como función del peso sobre barrena y la velocidad de rotación, así como calcular la velocidad de rotación óptima cuando el peso sobre barrena se mantiene constante; y calcular el peso óptimo sobre barrena cuando la velocidad de rotación se mantiene constante.

#### CONSIDERACIONES TEORICAS.

La relación básica del costo de perforación como función de las condiciones de perforación es:

$$C = \frac{B + E (t_p + t_v)}{M} \quad (1)$$

Donde:

- C = Costo de perforación Bs / metro
- B = Costo de una barrena Bs / barrena
- E = Costo de operación de equipo, Bs / hora
- t<sub>p</sub> = Tiempo perforando (vida de barrena) horas
- t<sub>v</sub> = Tiempo cambiando barrena, horas
- M = Metros perforados por barrena, metros.

El metraje perforado por la barrena es igual al producto de la velocidad promedio de perforación y el tiempo perforando

Por lo tanto:

$$M = v_p t_p \quad (2)$$

Donde: V<sub>p</sub> = Velocidad promedio de perforación, metros/hora.

Substituyendo la ecuación 2. en la ecuación 1. tenemos que:

$$C = \frac{B + E (t_p + t_v)}{v_p t_p} \quad (3)$$

El tiempo empleado en cambiar barrena se compone del tiempo manejando los portamechas y el tiempo manejando la tubería de perforación, y se puede expresar como función de la profundidad del pozo.

Por lo tanto:

$$t_v = t_{tp} + t_m \quad (4)$$

Donde: t<sub>tp</sub> = Tiempo empleado en sacar y meter la tubería de perforación

HORAS

t<sub>m</sub> = Tiempo empleado en sacar y meter los portamechas:

HORAS

El tiempo empleado manejando los portamechas es una función del número de portamechas, lo cual, a su vez, es función del peso sobre barrena que se desea aplicar. Considerando que por cada portamecha en la sarta de perforación se aplica una tonelada de peso sobre barrena, y que se emplea 0.25 horas en sacar y meter una parada de portamechas (tres), el tiempo total manejando los portamechas es:

$$t_m = 0.25 \frac{W}{3} = 0.0833 W = 83.3 \times 10^{-3} W \quad (5)$$

Donde: W = Peso sobre barrena en toneladas

El tiempo empleado en manejar la tubería de perforación es aproximadamente 0.4 horas por 100 mts. de longitud de tubería.

Por lo tanto:

$$t_{tp} = 0.004 L = 4 \times 10^{-3} L \quad (6)$$

Donde: L = Longitud de la tubería de perforación, en metros.

La longitud promedio de la tubería de perforación que se maneja por viaje redondo es igual a la profundidad del pozo donde se inicia la perforación con barrena nueva, menos la longitud de los portamechas, más la mitad del metraje perforado por la barrena.

Si consideramos que cada portamecha mide 9.3 metros, tenemos que:

$$L = P - 9.3 W + \frac{V_p t_p}{2} \quad (7)$$

Donde: P = Profundidad donde se inicia la perforación con barrena nueva, metros.

Substituyendo la ecuación 7, en la ecuación 6, tenemos que:

$$t_{tp} = 4 \times 10^{-3} \left( P - 9.3 W + \frac{V_p t_p}{2} \right)$$

$$t_{tp} = 4 \times 10^{-3} P - 37.2 \times 10^{-3} W + 2 \times 10^{-3} V_p t_p \quad (8)$$

Substituyendo las ecuaciones 5, y 8, en la ecuación 4, tenemos que:

$$t_v = 83.3 \times 10^{-3} W + 4 \times 10^{-3} P - 37.2 \times 10^{-3} W + 2 \times 10^{-3} V_p t_p$$

$$t_v = 46.1 \times 10^{-3} W + 4 \times 10^{-3} P + 2 \times 10^{-3} V_p t_p \quad (9)$$

Substituyendo la ecuación 9, en la ecuación 3, tenemos que:

$$C = \frac{B + E \left( P + 46.1 \times 10^{-3} W + 4 \times 10^{-3} P + 2 \times 10^{-3} V_p t_p \right)}{V_p t_p} \quad (10)$$

De la ecuación 10, es obvio que el costo de perforación es mínimo cuando los valores de velocidad de perforación ( $V_p$ ) y tiempo de perforación ( $t_p$ ) son máximos. Dentro del rango de operación normal la velocidad de perforación ( $V_p$ ) y el tiempo de perforación (vida de la barrena) ( $t_p$ ) están sujetos a una relación inversa; es decir: un aumento en la velocidad de perforación ( $V_p$ ) produce generalmente una disminución en el tiempo de perforación ( $t_p$ ) y viceversa.

La velocidad de perforación es proporcional, tanto al peso sobre barrena, como a la velocidad de rotación.

La ecuación para velocidad de perforación se puede describir como sigue:

$$V_p = K W N^a \quad (11)$$

Donde: K = Constante de perforabilidad que se determina experimentalmente.

W = Peso sobre barrena, tons.

N = Velocidad de rotación, r.p.m.

a = Exponente que varía entre 0.45 y 0.6 y que en este análisis se considera igual a 0.5

Por lo tanto:

$$V_p = K W N^{0.5} \quad (12)$$

Si consideramos que la vida de la barrena está limitada por la falla de los baleros o cojinetes, ésta es inversamente proporcional al producto de la velocidad de rotación y el peso sobre barrena elevado a una potencia. Matemáticamente la podemos expresar como sigue:

$$t_p = \frac{b}{N W^n} \quad (13)$$

Donde: b = Constante que se determina experimentalmente

n = Exponente que varía entre 1 y 2 y que en este análisis se considera igual a 1.5

Por lo tanto:

$$t_p = \frac{b}{N W^{1.5}} \quad (14)$$

Substituyendo las ecuaciones 12, y 14, en la ecuación 10, tenemos que:

$$C = \frac{B + E \left( \frac{b}{N W^{1.5}} + 46.1 \times 10^{-3} W + 4 \times 10^{-3} P + 2 \times 10^{-3} \frac{K b}{N^{0.5} W^{0.5}} \right)}{\frac{K b}{N^{0.5} W^{0.5}}}$$

$$C = \frac{B + \frac{E b}{N W^{1.5}} + 46.1 \times 10^{-3} E W + 4 \times 10^{-3} E P + \frac{2 \times 10^{-3} E K b}{N^{0.5} W^{0.5}}}{\frac{K b}{N^{0.5} W^{0.5}}}$$

$$C = \left( \frac{B}{K b} \right) N^{0.5} W^{0.5} + \left( \frac{E}{K} \right) \frac{1}{N^{0.5} W} + \left( \frac{46.1 \times 10^{-3} E}{K b} \right) N^{0.5} W^{1.5}$$

$$+ \left( \frac{4 \times 10^{-3} E P}{K b} \right) N^{0.5} W^{0.5} + 2 \times 10^{-3} E$$

$$C = \left( \frac{B + 4 \times 10^{-3} E P}{K b} \right) N^{0.5} W^{0.5} + \left( \frac{E}{K} \right) \frac{1}{N^{0.5} W} + \left( \frac{46.1 \times 10^{-3} E}{K b} \right)$$

$$N^{0.5} W^{1.5} + 2 \times 10^{-3} E$$

Si dejamos que:

$$X = \frac{B + 4 \times 10^{-3} E P}{K b} \quad (15)$$

$$Y = \frac{E}{K} \quad (16)$$

$$Z = \frac{46.1 \times 10^{-3} E}{K b} \quad (17)$$

$$T = 2 \times 10^{-3} E \quad (18)$$

Entonces:

$$C = X N^{0.5} W^{0.5} + \frac{Y}{N^{0.5} W} + Z N^{0.5} W^{1.5} + T \quad (19)$$

La ecuación 19. es la expresión final de costo de perforación como función de peso sobre barrena y la velocidad de rotación; y es aplicable solamente cuando la vida de los dientes de la barrena es mayor que la vida de los baleros o cojinetes de la barrena.

Para determinar el costo mínimo de perforación como función de la velocidad de rotación, primero se deriva la ecuación 19. con respecto a la velocidad de rotación (N) y la primera derivación se iguala a cero. Por lo tanto:

$$\frac{\partial C}{\partial N} = \frac{0.5 X W^{0.5}}{N^{0.5}} - \frac{0.5 Y}{N^{1.5} W} + \frac{0.5 Z W^{1.5}}{N^{0.5}} = 0$$

$$X N W^{0.5} - \frac{Y}{W} = Z N W^{1.5} = 0$$

$$N (X W^{0.5} + Z W^{1.5}) = \frac{Y}{W}$$

$$N = \frac{Y}{X W^{1.5} + Z W^{2.5}} \quad (20)$$

La ecuación 20. supone que el peso sobre barrena se mantiene constante.

Para determinar a qué peso sobre barrena (W) se obtiene el costo mínimo de perforación (con velocidad de rotación constante), se diferencia la ecuación 19. con respecto a peso sobre barrena (w) y la primera derivación se iguala a cero. Por lo tanto,

$$\frac{\partial C}{\partial W} = \frac{0.5 X N^{0.5}}{W^{0.5}} - \frac{Y}{N^{0.5} W^2} + 1.5 Z N^{0.5} W^{0.5} = 0$$

$$0.5 X N W^{1.5} - Y + 1.5 Z N W^{2.5} = 0$$

$$0.5 N W^{1.5} (X + 3 Z W) - Y = 0$$

$$0.5 N W^{1.5} (X + 3 Z W) = Y$$

$$W^{1.5} (X + 3 Z W) = \frac{2Y}{N} \quad (21)$$

Debido a la forma de la ecuación 21. el valor de W se calcula por el método de ensayo y error.

El análisis anterior está basado en que la vida de los baleros de la barrena limita la vida de la barrena. En la práctica se ha observado que generalmente esto ocurre a profundidades mayores de 1.500 m. Siendo que generalmente el peso sobre barrena que se puede aplicar está limitado por el número de portamechas disponibles, la ecuación 20. tiene más aplicación práctica que la ecuación 21.

EJEMPLO DEL USO DE LAS ECUACIONES:

#### POZO HIPOTETICO

Costo de operación del equipo de perforación = Bs. 600.00/hora (E)

Costo de una barrena de 8-5/8" "JET" = Bs. 2,700.00 (B)

|   |   |            |                   |
|---|---|------------|-------------------|
| Intervalo 600 - 800 m.                        |   |            |                   |
| Profundidad donde se inicia con barrena nueva | = | 600 mts.   | (P)               |
| Metros perforados por la barrena              | = | 200 "      | (M)               |
| Velocidad promedio de perforación             | = | 20 m/hora. | (V <sub>p</sub> ) |
| Tiempo de perforación (vida de barrena)       | = | 10 horas   | (t <sub>p</sub> ) |
| Peso sobre barrena - constante -              | = | 16 Tons.   | (W)               |
| Velocidad de rotación                         | = | 120 rpm.   | (N)               |

Para estas condiciones:

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| K = 0.1136                  | Ecuación 12. |
| b = 76,750                  | Ecuación 14. |
| X = 0,463                   | Ecuación 15. |
| y = 5.280                   | Ecuación 16. |
| Z = 3.17 x 10 <sup>-3</sup> | Ecuación 17. |
| T = 1.20                    | Ecuación 18. |

La velocidad de rotación óptima para estas condiciones es

$$N = 161 \text{ r.p.m.}$$

Ecuación 20.

Comparando costos, tenemos que:

Cuando N = 120 r.p.m.  
y cuando N = 161 r.p.m.

$$C = Bs \ 53.82/m, \text{ Ecuación 19.}$$

$$C = Bs \ 53.27/m, \text{ Ecuación 19.}$$

Intervalo 1700 m.- 1800 m.

|   |   |              |                   |
|---|---|--------------|-------------------|
| Profundidad donde se inicia con barrena nueva | = | 1.700 m.     | (P)               |
| Metros perforados por la barrena              | = | 100 m.       | (M)               |
| Velocidad promedio de perforación             | = | 11.11 m/hora | (V <sub>p</sub> ) |
| Tiempo de perforación (vida de barrena)       | = | 9 horas      | (t <sub>p</sub> ) |
| Peso sobre barrena - constante -              | = | 16 tons.     | (W)               |
| Velocidad de rotación                         | = | 120 r.p.m.   | (N)               |

Para estas condiciones:

|                             |
|-----------------------------|
| K = 0.0633                  |
| b = 69,100                  |
| x = 1.55                    |
| y = 9.480                   |
| Z = 6.32 x 10 <sup>-3</sup> |
| T = 1.20                    |

La velocidad de rotación óptima para estas condiciones es:

$$N = 90 \text{ rpm.}$$

Comparando costos tenemos que:

|                      |                   |
|----------------------|-------------------|
| Cuando N = 120 rpm.  | C = Bs. 127.53/m. |
| Y cuando N = 90 rpm. | C = Bs. 126.23/m. |

Usando la ecuación 19. y tomando los datos del ejemplo aquí expuesto, se construyó la Fig. 1. para mostrar el efecto de variaciones en la velocidad de rotación sobre el costo de perforación. Una inspección de la Fig. 1 nos dice que cuando se perfora con peso sobre barrena constante, la velocidad de rotación óptima disminuye con aumento de profundidad y que el efecto de variaciones en la velocidad de rotación sobre el costo de perforación aumenta con la profundidad.

Con la ayuda de las ecuaciones 12 y 14 se dibujó la Figura 2, la cual muestra el efecto de variaciones en la velocidad de rotación sobre el metraje perforado por barrena, suponiendo el peso sobre barrena constante (W = 16 tons), y formación homogénea.

La Fig. 3 muestra el efecto de variaciones en la velocidad de rotación sobre la vida de la barrena.

Aplicación Práctica de las Ecuaciones:

Para aplicar en el campo las ecuaciones aquí expuestas, se sugiere lo siguiente:

1. Determinar el costo real de operación de los diferentes equipos de perforación en cada zona.
2. Para cada estructura, y para diferentes profundidades y tipos de formación, determinar experimentalmente los valores de las constantes K, b, a y n.
3. Para cada estructura, determinar experimentalmente el efecto de la profundidad sobre la velocidad de perforación.

4. Para cada equipo de perforación, determinar el peso máximo sobre barréna que se puede aplicar sin que se embole la barréna.

Esto es función del impacto del lodo en el fondo del agujero.

5. Para cada equipo de perforación, determinar el tiempo real empleado en manejar la sarta de perforación como función de profundidad.

6. Para obtener el costo real de perforación es necesario sumar a la ecuación 19, una constante para incluir los costos del tiempo empleado en otras cosas que no sean tiempo perforando o tiempo cambiando barréna, tales como esperando órdenes, reparando equipo, esperando materiales, etc.

7. Una vez determinado el costo real de perforación, registrar en gráficas de costo de perforación por metro perforado contra profundidad. Esta gráfica será de sumo valor para hacer otros estudios económicos tal como determinar la economía de trabajos de pesca.

#### CONCLUSIONES:

1. Se ha desarrollado una ecuación de costo de perforación como función del peso sobre barréna y la velocidad de rotación. La ecuación desarrollada es aplicable solamente cuando la vida de la barréna está limitada por la vida de los baleros de la barréna.
2. Se ha desarrollado una ecuación para calcular la velocidad óptima de rotación (costo mínimo) cuando el peso sobre barréna se mantiene constante. Esta ecuación es aplicable solamente cuando la vida de los dientes de la barréna es mayor que la vida de los baleros de la barréna.
3. Se ha desarrollado una ecuación para calcular el peso óptimo sobre barréna (costo mínimo) cuando la velocidad de rotación se mantiene constante. Esta ecuación es aplicable solamente cuando la vida de los baleros limita la vida de la barréna.
4. Por medio de un ejemplo se explicó el uso de las ecuaciones.
5. Se hicieron recomendaciones para aplicar correctamente las ecuaciones en el campo.

#### NOMENCLATURA

|   | <i>Unidad</i> |
|---|---------------|
| a Exponente que varía entre 0.45 y 0.6<br>y que en este análisis se considera igual a 0.5 | Sin Dim.      |
| B Costo de barréna  | Bs /Barréna   |
| b Constante que se determina experimentalmente  | Sin Dim.      |
| C Costo de perforación  | Bs / metro    |
| E Costo de operación de equipo  | Bs / hora     |
| K Constante de perforabilidad que se determina experimentalmente.                         | Sin. Dim.     |
| L Longitud de tubería de perforación  | Metros        |
| M Metros perforados por barréna   | Metros        |
| N Velocidad de Rotación   | r.p.m.        |
| n Exponente que varía entre 1 y 2<br>y que en este análisis se considera igual a 1.5      | Sin Dim.      |
| T Constante definida por ecuación 18  |               |
| $t_m$ Tiempo empleado en sacar y meter los portamechas (Drill Collars)                    | Horas         |
| $t_p$ Tiempo perforando (vida de Barréna)   | Horas         |
| $t_{tp}$ Tiempo empleado en sacar y meter la tubería de perforación                       | Horas         |
| $t_v$ Tiempo empleado en cambiar barréna = $t_m + t_{tp}$                                 | Horas         |
| V <sub>p</sub> Velocidad promedio de perforación  | Metros/Hora   |
| W Peso sobre Barréna  | toneladas     |
| X Constante definida por ecuación 15  |               |
| Y Constante definida por ecuación 16  |               |
| Z Constante definida por ecuación 17  |               |

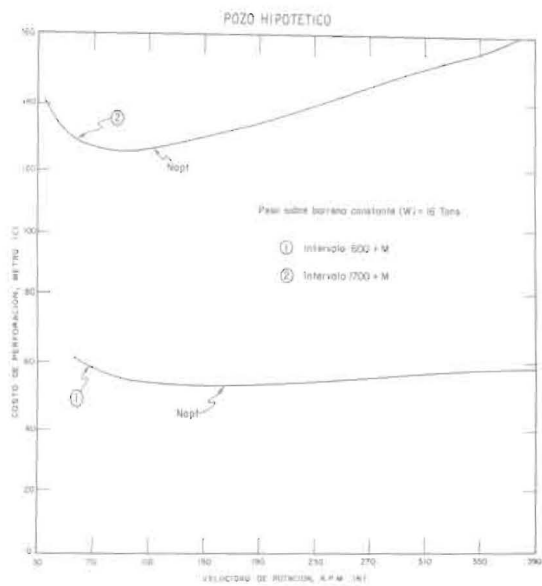


Fig. No 1- Velocidad de Rotación vs Costo

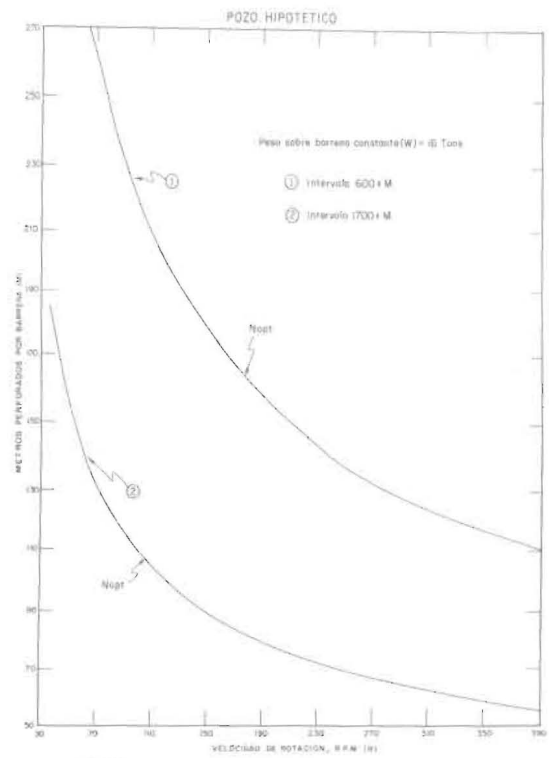


Fig. No 2- Velocidad de Rotación vs Metros Perforados por Barreno

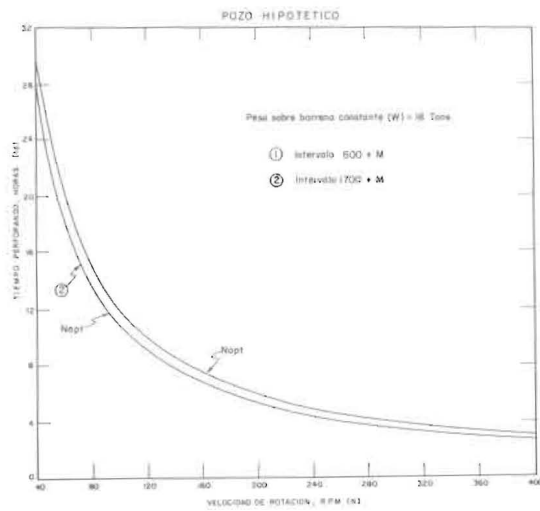


Fig. No 3- Velocidad de Rotación vs Tiempo Perforando

## BIBLIOGRAFIA

1. McCray A., Cole F., Oil Well Drilling Technology, 1st ed., University of Oklahoma Press, Norman, 1959, pp. 463.
2. Brantly J.E., Clayton E.H., "A Preliminary Evaluation of Factors Controlling Rate of Penetration en Rotary Drilling", API Drilling and Production Practices, 1939, pp. 8.
3. Bielstein W.J., Cannon G.E., "Factors Affecting the Rate of Penetration of Rock Bits", API Drilling and Production Practices, 1950, pp. 61.
4. Gatlin C., "How Rotary Speed and Bit Weight Affect Rotary Drilling Rate", Oil and Gas Journal, Mayo 20, 1957, pp. 193.
5. Galle E.M., Woods H.B., "How to Calculate Bit Weight and Rotary Speed for lowest Cost Drilling", The Oil and Gas Journal, Noviembre 14 y 21, 1960, pp. 2.
6. Speer, J.W., "Drilling Time Reduced 31 Per cent", Oil and Gas Journal, Octubre 11, 1954, pp. 61.
7. Galle E.M., Woods J.B., "Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits", API Drilling and Production Practices, 1963, pp. 48-73.
8. Lummus J.L., "Drilling Optimization", J. Pet. Tech., Noviembre, 1970, pp. 1379-1388.
9. Lummus J.L., "Acquisition and Analysis of Data for Optimized Drilling", J. Pet. Tech., Noviembre, 1971, pp. 1285-1293.
10. Young F.S., Jr., "Computerized Drilling Control", J. Pet. Tech., Abril, 1969.
11. McDaniel K.W., Lummus J.L., "Here is How to Apply Optimized-Drilling Techniques", Oil and Gas Journal, Junio 14, 1971, pp. 57-63.