

0565

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE INGENIERIA PETROLERA

Un Nuevo Método Práctico para Diseñar
Programas Hidraulicos en la Perforación
Rotatoria

DESCARTE

TRABAJO ESCRITO
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A
Jesús Alberto Milchorena Olivares

MEXICO, D. F:

1978



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1111

Con respeto: a tí Señor

Con cariño a mis padres y hermanos, y
a todos los que a base de sus esfuer-
zos y estímulos hicieron posible este
presente

Con sincera admiración y agradecimiento, al
maestro y amigo: Ing. Efraín Capriles L., -
por la guía que significó para mí en esta -
humilde aportación

Con afecto a los ingenieros:
Oscar Arreola R. y Eduardo Cervera del C.,
en reconocimiento a la aceptación de este-
trabajo escrito

I N D I C E

	Pág.
ANTECEDENTES	
INTRODUCCION	1
I.- EL PROGRAMA HIDRAULICO	2
II.- LA POTENCIA HIDRAULICA	3
III.- ALGUNOS DATOS ESTADISTICOS DESCUBIERTOS HASTA HOY SOBRE LA EFICIENCIA EMPLEADA DE LA BARRENA DE CHORRO	5
IV.- LIMITACIONES HIDRAULICAS DEL USO DE UNA BARRENA DE CHORRO EN EL CAMPO	7
V.- METODOS PARA OPTIMIZAR LA POTENCIA HIDRAULICA	10
-- Optimización mediante máxima potencia hidráulica en la barrena	10
-- Optimización mediante máxima fuerza de impacto del chorro de la barrena	12
VI.- UN METODO MATEMATICO Y GRAFICO ANTERIOR AL QUE SE VA A PRESENTAR	16
-- Método matemático para máxima potencia hidráulica en la barrena	16
-- Método matemático para máxima fuerza de impacto del chorro de la barrena	19
-- Método gráfico.- Para máxima potencia hidráulica en la barrena.- Para máxima fuerza de impacto del chorro de la barrena	24
-- INFERENCIAS PRELIMINARES	29
VII.- CRITERIO PARA ELEGIR PROGRAMAS HIDRAULICOS	31
VIII.- UN NUEVO METODO PRACTICO PARA DISEÑAR PROGRAMAS HIDRAULICOS EN LA PERFORACION ROTATORIA	36
IX.- EJEMPLO ILUSTRATIVO	43
X.- CONCLUSIONES	53
APENDICE	54
BIBLIOGRAFIA	57

ANTECEDENTES

La aplicación de la Hidráulica en la perforación rotatoria - fue iniciada en 1948, cuando las primeras toberas fueron usadas en barrenas de aletas, y ésto, dió lugar al diseño de los programas hidráulicos.

Lo anterior ha representado uno de los descubrimientos más -- significativos en la perforación rotatoria ya que ésta comenzó en - 1901, usando las barrenas convencionales de diámetro central.

Las primeras pruebas de campo con barrenas de chorro, revelaron la posibilidad de incrementos significativos en la velocidad de perforación, siempre y cuando se usara un programa hidráulico planeado correctamente. A pesar de éso, mucho se dudó en un principio de la eficacia de las barrenas de chorro y en 1955 solamente un mínimo porcentaje del total de barrenas empleadas, fueron de ese tipo; hacia 1970 al rededor del 60 al 70 % de las barrenas que fueron utilizadas estaban equipadas con toberas de chorro, y la inconveniencia que se discutió entonces fue la del aspecto económico, considerando que su costo en ocasiones no era justificado.

En México, se empezó a adoptar este tipo de barrenas a partir de 1958 aproximadamente, y en la actualidad prácticamente el 100 % de las operaciones de perforación se realiza con barrenas de chorro, salvo raras excepciones, en que resulta más conveniente usar una de tipo convencional.

INTRODUCCION

En la perforación rotatoria, se emplea más potencia para los fluidos de circulación que en cualquier otra operación; por otra parte, el uso de barrenas de chorro implica el empleo de mayor potencia en las bombas, y ésto requiere equipo de capacidad mayor. En cuanto a su construcción, definitivamente se ha incrementado la potencia de las bombas, sin embargo, el problema no queda completamente resuelto con lo anterior si no se considera otro aspecto de relevante importancia: la optimización de la potencia hidráulica de que se dispone; para éso se define un programa hidráulico.

El objetivo principal de este trabajo está enfocado hacia un nuevo método práctico para el diseño de programas hidráulicos, después de un criterio de elección previo.

También se analiza un método matemático y gráfico anterior al que se va a presentar, con el objeto de establecer posteriormente una diferencia entre ambos métodos gráficos, por medio de un problema ilustrativo.

1.- EL PROGRAMA HIDRAULICO

Un programa hidráulico en la perforación rotatoria de pozos petroleros utilizando barrena de chorro, implica:

-- el uso óptimo de potencia superficial, es decir, de la potencia de las bombas de que se dispone y,

-- la selección más adecuada del tamaño de las toberas de la barrena:

todo ésto, con el objeto de obtener una mayor velocidad de perforación de acuerdo a las condiciones de operación.

La optimización de la potencia superficial puede obedecer a diferentes criterios, según sea el efecto hidráulico que se desee maximizar:

- a) Potencia hidráulica en la barrena, ó
- b) Fuerza de impacto del chorro de la barrena.

Nota.- Existen otros dos efectos que algunos autores presentan: c) Velocidad del chorro en las toberas y d) Velocidad anular del fluido, pero los dos primeros se consideran como los principales y por éello en este trabajo solo se analizarán dichos casos.

Ahora bién, la selección del tamaño de las toberas se hace de acuerdo a la presión que se desee utilizar en la barrena, de tal manera que ayuden a mantener un control de la presión deseada.

El diseño de un programa hidráulico en general, consiste en elegir un gasto óptimo para cada profundidad de la perforación y que estará relacionado directamente con el efecto hidráulico que se esté considerando.

II.- LA POTENCIA HIDRAULICA

Podemos decir que el corazón de cualquier sistema hidráulico es la bomba, ya que es la que genera la fuerza requerida por el fluido para efectuar el proceso dinámico que le ha sido asignado.

El objeto de una bomba es convertir la potencia impulsora o energía mecánica que recibe, en potencia hidráulica.

Esta conversión de energía puede ser representada mediante el siguiente proceso matemático.

Pot. mec. = $\frac{\zeta \text{ mec.}}{t} = \frac{F d}{t}$; multipl. y div. por el área:

$$\frac{F d A}{t A} \Rightarrow \frac{F \text{ Vol.}}{A t} = \text{Pres.} \cdot Q = \text{Pot. hidr.}$$

Por lo tanto:

$$\boxed{\text{Pot. hidr.}_{\text{bomba}} = (\text{Pres.}_{\text{bombeo}})(Q_{\text{bomba}})} \quad (1) \quad (\text{para --$$

cualquier tipo de unids. consistentes).

Se establece que:

Pot. hidr. = (Pot. impulsora)(Efic. mec.) , donde se considera Efic. mec. = 0.85 .

Por lo tanto:

$$\boxed{\text{Pot. hidr.} = 0.85 \text{ Pot. impulsora}}$$

Las formas prácticas más usuales de la ecuación (1) son las siguientes:

para el sist. métr. dec.: Pot. h. $\left[\frac{\text{CF}}{\text{bomba}} \right] = \frac{P_{\text{bombeo}} \left[\frac{\text{Kg}_f}{\text{cm}^2} \right] Q_{\text{bomba}} \left[\frac{\text{lt}}{\text{min}} \right]}{457}$

para el sist. inglés: Pot. h. $\left[\frac{\text{HP}}{\text{bomba}} \right] = \frac{P_{\text{bombeo}} \left[\frac{\text{psia}}{\text{cm}^2} \right] Q_{\text{bomba}} \left[\frac{\text{gpm}}{\text{min}} \right]}{1714}$

para sist. métr. dec.: Pot. h. $\left[\frac{\text{HP}}{\text{bomba}} \right] = \frac{P_{\text{bombeo}} \left[\frac{\text{Kg}_f}{\text{cm}^2} \right] Q_{\text{bomba}} \left[\frac{\text{bl}}{\text{min}} \right]}{2.83}$
 (unids. combinadas con sist. inglés)

De la ecuación (1), se observa que la potencia necesaria que requerirá una bomba, depende de los volúmenes de bombeo y de la presión de circulación. Por lo tanto la selección de una bomba dependerá de la variación de los gastos que se pueden obtener de ella, con la presión requerida(+): además se deberá considerar la "flexibilidad" (++) que ésta pueda presentar.

De hecho, la cantidad de presión creada por la bomba, depende del trabajo de carga impuesto sobre el sistema de circulación del fluido en el pozo. Lo anterior implica el óptimo aprovechamiento de la eficiencia de las bombas, lo cual se traducirá posteriormente en una mayor velocidad de perforación, con el consecuente abajamiento de los costos de perforación: con ésto, se muestra que debido a que la potencia hidráulica representa el máximo efecto en el incremento de la velocidad de perforación, también lo es en cuanto al costo de la perforación, de ahí la importancia tan singular que debe ser observada en ella, sobre todo para el ingeniero de perforación.

(+) Mediante el cambio de camisas de la bomba.

(++) La facilidad y rapidez con que se puede efectuar el cambio de camisas.

III.- ALGUNOS DATOS ESTADISTICOS DESCUBIERTOS HASTA HOY SOBRE LA EFICIENCIA EMPLEADA DE LA BARRENA DE CHORRO

En las barrenas de chorro, las toberas se han diseñado para poder imprimir al fluido de circulación una alta velocidad, dirigida precisamente hacia el fondo del agujero, a fin de aprovechar el efecto de erosión sobre la formación, producido al disiparse la energía cinética o de movimiento que posee el fluido, y transformarse posteriormente en energía de calor; además el chorro descargado a alta presión, permite una rápida elevación del "corte" de la formación y la turbulencia mantiene los dientes de la barrena y el fondo del agujero limpios.

Las pruebas han mostrado definitivamente que cuando se usan programas de barrena de chorro, los dientes de la barrena se lim -- pian adecuadamente si se tiene en las toberas de la misma una velocidad del fluido aproximadamente de 220 ft/seg (70 m/seg); cabe decir que esta velocidad es muy inferior a la que se obtiene en la mayoría de las operaciones de campo cuando se usan barrenas de chorro, pues dicha velocidad varía de 250 a 450 ft/seg (77 a 127 m/seg).

También se ha comprobado que la velocidad de perforación con -- lodo y usando barrena de chorro, es de 60 % de la velocidad de perforación si se usara agua como fluido de circulación.

A grandes rasgos, esas serían las principales ventajas subs -- tanciales que representan las barrenas de chorro y, en cuanto a riesgos acerca del uso de las mismas, se puede decir que se presentan solamente para algunas velocidades de perforación dadas, sobre -- todo en el caso de perforación lenta que requiere grandes pesos sobre la barrena y bajas velocidades de rotación, derivadas del tipo -- de formación a perforar.

De cualquier manera, las barrenas de chorro siempre ofrecen -- ventajas en comparación con las barrenas ordinarias, y para una mejor ilustración de lo anterior se presenta el siguiente cuadro com --

parativo entre los dos tipos de barrena:

Tipo de barrena	Vel. que pueden producir las tob. al fluido de perf.	% Vel. de perf. con lodo en rel. a la perf. con agua	Máx.Pres.Sup. req. [psi]
Ordinaria	125 ft/seg (38 m/seg)	40	800-1 000
Chorro	250-450 ft/seg (77-127 m/seg)	60	1 500

Hay un dato que nos debe guiar necesariamente a una convicción plena, para tratar de avocarnos con verdadero interés en el diseño y aplicación correcta de los programas hidráulicos en la perforación rotatoria; me estoy refiriendo a que tan solo el 50 % de eficiencia aprovechable en la barrena, ha sido utilizado hasta hoy.

IV.- LIMITACIONES HIDRAULICAS DEL USO DE UNA BARRENA DE

CHORRO EN EL CAMPO

Estas limitaciones incluyen:

- 1.- La presión superficial máxima --- P_m
- 2.- El gasto máximo a la presión superficial máxima --- Q_m
- 3.- La presión superficial en cualquier
valor del gasto --- P_s ($P_{min.} \leq P_s \leq P_m$)
- 4.- Gasto cualquiera --- Q ($Q_a \leq Q \leq Q'_m$)
- 5.- Potencia máxima de la bomba --- $P_s Q$ ó $P_m Q_m$ (para unids. consistentes)
ó
HP. máx. de la bomba --- $K P_s Q$ ó $K P_m Q_m$, K= cte. según las unids. que se empleen.
- 6.- El gasto máximo de la bomba a la presión superficial mínima --- Q'_m
- 7.- El gasto anular mínimo para remover los cortes adecuada --
mente --- Q_a (+)
- 8.- Las pérdidas de presión por fricción en el sistema de circulación (excluy. barrena), para cualquier profundidad --- P_c (++)

(+) $Q_a = f(\text{tamaño del agujero})$ ya que $Q_{anul.} = V_a A$ (para unids. consistentes)

donde:

V_a --- Vel. ascendente o anular

A --- Area del espacio anular = $\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$, D --- ϕ aguj.
 d --- ϕ tub. perf.

Nota. - V_s debe ser > vel. de asentamiento de los cortes (V_s)

$$V_s = \frac{p^2 (\gamma_s - \gamma_{fl. perf.})}{\mu_A fl. perf.} \quad (\text{para unids. consistentes})$$

donde:

p --- diámetro ó mayor dimensión de la partícula

γ_s --- peso específico de la partícula

$\mu_A fl. perf.$ --- viscosidad (dinám. o abs.) aparente del fl. de perf. (ver Avéndice, p. 56a)

Cabe anotar que, cuando $V_s > V_a$ el corte no puede ser arras--
trado a la superficie; en este caso para lograr el objetivo, debe -
incrementarse la viscosidad aparente del fluido de circulación y la
velocidad de asentamiento bajará, llegando a ser $< V_a$.

Fórmulas prácticas más usuales de V_a y V_s :

para sist. métr. dec.: V_a [m/seg] = $\frac{q [\text{lt/min}]}{30.39 [(D [\text{in}])^2 - (d [\text{in}])^2]}$
(unids. combinadas con
sist. inglés)

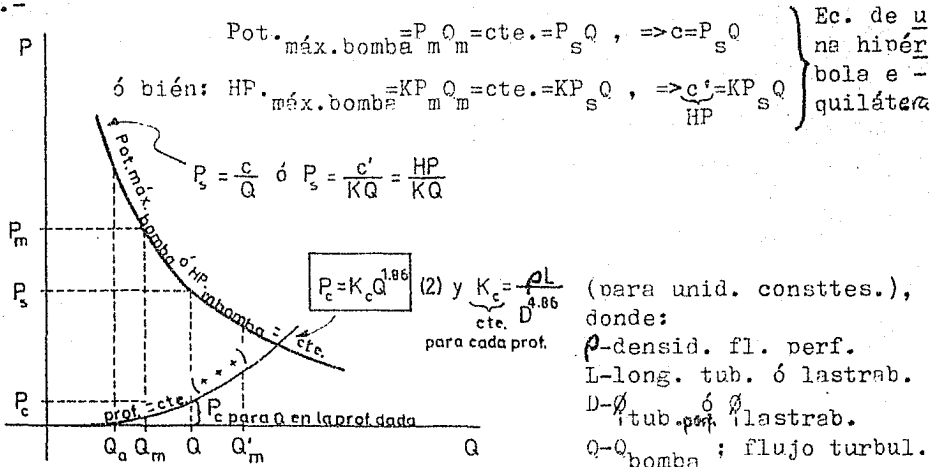
para el sist. métr. dec.:

$$V_s [\text{m/seg}] = \frac{21.23(p [\text{cm}])^2 (\gamma_s [\text{gr}_f/\text{cm}^3] - \gamma_{fl. \text{ perf.}} [\text{gr}_f/\text{cm}^3])}{\mu_{fl. \text{ perf.}} [\text{cp}]}$$

(++) Para objeto de cálculo se consideró que todo el flujo es
turbulento (lo cual no puede ser correcto para espacios anulares), -
pero el error no es muy significativo.

Gráfica donde se muestra cada una de las limitaciones anterior

res.-



Formas práct. más usuales de la ec. (2), utilizadas para obtener solucs. parciales de P correspondtes. a las pérd. de presión en el int. de tubs. ó lastrab.^c (donde el flujo es realmente turbulento) y que están resueltas en el nomograma 3 (anexo):

para el sist. métr. dec.:

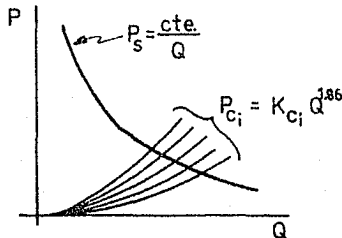
$$P_{it \text{ ó } id} \left[\frac{Kg_f}{cm^2} \right] = \frac{92.8 \times 10^5 \rho \left[\frac{gr_m}{cm^3} \right] L [m] (Q [lt/min])^{1.86}}{(D [cm])^{4.86}}$$

para el sist. inglés:

$$P_{it \text{ ó } id} \left[\frac{psi}{ft} \right] = \frac{61 \times 10^6 \rho \left[\frac{lb_m}{gal} \right] L [ft] (Q [gpm])^{1.86}}{(D [in])^{4.86}}$$

(+++)
 (++) Se pueden hacer las siguientes observaciones:

-- Para cada profundidad existe una curva de P_c , por lo tanto la gráfica P vs Q incluye una familia de curvas P_c como se muestra abajo:



-- Para cada curva: ve que la profundidad = cte., por lo tanto $P_c = f(Q)$.

V.- METODOS PARA OPTIMIZAR LA POTENCIA HIDRAULICA

Como ya se había hecho notar al principio de este trabajo, en el diseño de un programa hidráulico han surgido cuatro alternativas diferentes sobre la optimización de la potencia hidráulica de las bombas, de acuerdo al efecto hidráulico que se desee maximizar:

- Potencia hidráulica en la barrena
- Fuerza de impacto del chorro de la barrena
- Velocidad del chorro en las toberas. Y,
- Velocidad anular del fluido.

Ya que en la mayoría de las operaciones los dos primeros métodos son los más utilizados, serán los que se esbosen en detalle:

-- Optimización mediante máxima potencia hidráulica en la barrena. --

"Con la potencia hidráulica en la barrena, nos estamos refiriendo a un término de energía donde la conclusión es que la remoción de los cortes depende de la energía gastada por el fluido al pasar a través de las bocas o toberas de la barrena".

Por lo tanto:

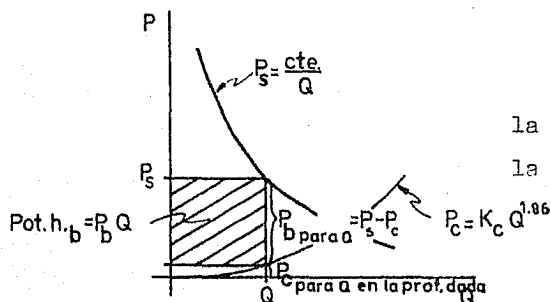
$$\text{Pot. hidr. en la barrena} = P_{\text{barrena}} Q \quad (3)$$

(para cualquier tipo de unidades consistentes)

donde:

P_{barrena} son las pérdidas de presión en la barrena

Q es el gasto de la bomba.



En la gráfica anterior se puede apreciar objetivamente el concepto de potencia hidráulica en la barrena, para una profundidad dada.

Es posible especificar o determinar series de condiciones óptimas para el uso de cualquiera de los efectos hidráulicos en la barrena, mediante el proceso matemático de los máximos y mínimos; para ésto, primeramente diremos que de acuerdo a las restricciones iniciales para el diseño del programa hidráulico, pueden existir tres casos diferentes:

1) El caso donde la presión superficial es ilimitada y la única limitación es la velocidad anular mínima requerida para levantar las partículas.

2) El caso donde la presión superficial es limitada y la potencia en la superficie tiene que ser decrementada para obtener el máximo del efecto hidráulico que se trate. Y,

3) Un caso intermedio que está situado entre los dos anteriores.

Así pues, considerando los tres casos anteriores para la maximización de la potencia hidráulica en la barrena se obtienen los siguientes resultados:

1) Para $P_{\text{superf.}}$ ilimitada (variable), se considera $HP_{\text{superf.}} = cte.$; $Q_{\text{ópt.}} = Q_{\text{anul. mín.}} = Q_a$, por tanto $\Rightarrow P_c \text{ ópt.} = P_c \text{ a } Q_a$.

2) Para $P_{\text{superf.}}$ limitada = P_m (cte.) se considera $HP_{\text{superf.}}$ variable; $P_c \text{ ópt.} = 0.35 P_m$, $\Rightarrow Q_{\text{ópt.}} = \left(\frac{0.35 P_m}{K_c} \right)^{\frac{1}{1.86}}$.

3) Para $P_{\text{superf.}}$ limitada = P_m y $HP_{\text{máx.}}$ (ambas ctes.); $Q_{\text{ópt.}} = \frac{HP_m}{P_m}$, por tanto $\Rightarrow P_c \text{ ópt.} = P_c \text{ a } Q = \frac{HP_m}{P_m}$.

-- Optimización mediante máxima fuerza de impacto del

chorro de la barrena.--

En el caso de la fuerza de impacto hidráulico en la barrena, se debe entender que el fluido golpea muy fuerte a los cortes, lo mejor posible para que sean removidos.

"La fuerza de impacto hidráulico está definida como la variación del momentum del fluido con el tiempo".

Se tiene: $G = mv$ fórmula del momentum lineal para un sistema de partículas en general.

Por lo tanto:

$$F_b = \frac{dG}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt} = ma$$

Ya que: $m = \frac{W}{g}$:

luego: $F_b = \frac{W}{g} a$ (4a),

ó bien: $F_b = \frac{W}{g} \frac{dv}{dt}$ (4b).

Para obtener el impulso de F_b durante un intervalo de tiempo dado, se puede multipl. por dt ambos miembros de la ecuación (4b)- y escribirla en su forma integral:

Por lo tanto: $\int_0^t F_b dt = \int_{v_1}^{v_2} \frac{W}{g} dv$; integrando:

$$F_b t = \frac{W}{g} (v_2 - v_1) \quad (5) \quad \text{ecuación del - impulso de } F_b.$$

Por lo tanto:

$$F_b = \frac{W}{g} \frac{(v_2 - v_1)}{t} \quad (6).$$

La ecuación (6) expresa a F_b ó sea la variación del momentum-lineal, para un intervalo de tiempo t definido. La ecuación indica que para dicho intervalo la velocidad cambia de v_1 a v_2 .

En el caso del fluido de circulación en un pozo se trata de un movimiento desacelerado, por lo tanto la ecuación (6) queda:

$$F_b = \frac{W}{g} \frac{(v_1 - v_2)}{t}, \text{ donde } v_1 - v_2 \text{ es el cambio}$$

de la velocidad normal del chorro a la del fluido en la superficie en un tiempo t .

Si consideramos:

$$v_2 = 0$$

Además:

$$\frac{W}{gt} = \frac{m}{t} \quad \text{y} \quad \rho Q = \frac{m}{t},$$

Por lo tanto:

$$\boxed{F_b = \rho Q v_1} \quad (7) \quad (\text{para cualquier tipo de unidades consistentes})$$

Esta ecuación expresa la fuerza de impacto del chorro de la barrena (F_b), donde:

ρ es la densidad del fluido de perforación

Q es el gasto de la bomba

v_1 es la V chorro en tob. de la barrena.

A F_b también se le puede expresar en función de P_b , si

$v_1 = f(P_b)$, así pues:

Dividiendo ambos miembros de la ecuación (7) entre el $A_{T \text{ tob.}}$:

$$\frac{F_b}{A_{T \text{ tob.}}} = \frac{\rho Q v_1}{A_{T \text{ tob.}}}$$

$$\Rightarrow P_b = \frac{\rho Q v_1}{A_{T \text{ tob.}}}$$

Por lo tanto:

$$v_1 = \frac{P_b A_{T \text{ tob.}}}{\rho Q}$$

Si hacemos:

$$K' = \frac{A_{T \text{ tob.}} \sqrt{P_b}}{\rho Q}$$

Luego: $v_1 = K' \sqrt{P_b}$, subst. en (7):

$$F_b = \rho Q K' \sqrt{P_b} ;$$

$$\text{pero: } \rho K' = \rho \frac{A_{T \text{ tob.}} \sqrt{P_b}}{\rho Q} = \frac{A_{T \text{ tob.}} \sqrt{P_b}}{v_1 A_{T \text{ tob.}}} = \frac{\sqrt{\frac{\rho Q v_1}{A_{T \text{ tob.}}}}}{v_1} =$$

$$= \frac{\sqrt{\frac{\rho v_1 A_{T \text{ tob.}} v_1}{A_{T \text{ tob.}}}}}{v_1} = \frac{\sqrt{\rho v_1^2}}{v_1} = \frac{v_1 \sqrt{\rho}}{v_1} = \sqrt{\rho}$$

Por lo tanto:

$$F_b = \sqrt{\rho} Q \sqrt{P_b} \quad (8) \quad (\text{para cualquier tipo de unids. consistentes})$$

Nota.- Fórmulas prácticas más usuales de F_b :

$$F_b = f(v_1)$$

para el sist. métr. dec.:

$$F_b [K_g f] = 1.66 \times 10^3 \rho [gr_m/cm^3] Q [lt/min] v_1 [m/seg]$$

para el sist. inglés:

$$F_b [lb_f] = 0.516 \times 10^3 \rho [lb_m/gal] Q [gpm] v_1 [ft/seg]$$

$$F_b = f(P_b)$$

para el sist. métr. dec.:

$$F_b [Kg_f] = 0.527 \times 10^2 (\rho [gr_m/cm^3])^{\frac{1}{2}} Q [lt/min] (P_b [Kg_f/cm^2])^{\frac{1}{2}}$$

para el sist. inglés:

$$F_b [lb_f] = 1.73 \times 10^2 (\rho [lb_m/gal])^{\frac{1}{2}} Q [gpm] (P_b [psi])^{\frac{1}{2}}$$

Para definir las condiciones óptimas del uso de la fuerza de impacto del chorro de la barrena, se procede en forma similar al caso de la máxima potencia hidráulica en la barrena y se obtiene:

1) Para $P_{superf.}$ ilimitada (variable), se considera $HP_{superf.}$

$$HP_{máx.} = cte.; P_c \text{ ópt.} = 0.26 P_m, \Rightarrow Q_{\text{ópt.}} = \left(\frac{0.26 HP_m}{K_c} \right)^{\frac{1}{2.86}}$$

2) Para $P_{superf.}$ limitada = P_m (cte.), se considera $HP_{superf.}$

$$\text{variable; } P_c \text{ ópt.} = 0.52 P_m, \Rightarrow Q_{\text{ópt.}} = \left(\frac{0.52 P_m}{K_c} \right)^{\frac{1}{1.86}}$$

3) Para $P_{superf.}$ limitada = P_m y $HP_{superf.} = HP_{máx.}$ (ambas -

$$\text{ctes.); } Q_{\text{ópt.}} = \frac{HP_m}{P_m}, \text{ por tanto } \Rightarrow P_c \text{ ópt.} = P_c \text{ a } Q = \frac{HP_m}{P_m}$$

VI.- UN METODO MATEMATICO Y GRAFICO ANTERIOR AL QUE SE VA A PRESENTAR

La denominación de los programas hidráulicos en la perforación rotatoria con barrena de chorro, está basada en la óptima selección de:

-- las pérdidas de presión en la barrena (P_b),
-- los valores del gasto correspondiente a cada una de las pérdidas anteriores y

-- los tamaños de las toberas en la barrena, todo lo anterior tomando en cuenta: las limitaciones de la bomba, la tubería, el agujero, el valor del gasto anular mínimo para un adecuado removimiento de los cortes y además, el efecto hidráulico que se desee maximizar.

Independientemente del método que se utilice para hacer el diseño del programa hidráulico ya sea matemático ó gráfico, la primera responsabilidad que se debe considerar para éllo es la de sumar todas las pérdidas de presión producidas en cada una de las partes del sistema de circulación, excluyendo a la barrena. Esta suma de pérdidas, se debe determinar en el valor del gasto anular mínimo (Q_a) para cada profundidad. Luego con estos valores de las pérdidas de presión y auxiliándose de otros datos que se dan implícitamente en el problema de diseño, se pueden seleccionar los valores óptimos del gasto para las diferentes profundidades, con lo que prácticamente queda definido el programa hidráulico.

La selección de las toberas de la barrena, se puede hacer con los datos obtenidos anteriormente y con la ayuda de un nomograma -- que relaciona las variables P_b , Q , P y diám. de las toberas.

Método matemático para máxima potencia hidráulica en la barrena.--

Se desarrolla bajo el siguiente procedimiento:

I) Análisis de la primera alternativa para ver si es aplica -

ble el caso 1 (P_s ilimitada).-

1) Se calcula $Q_a = Q_{\text{anular mín.}}$, $Q_a = V_a \text{ mín. } A_{\text{anular}}$

2) Se calcula P_s a Q_a , mediante la ecuación:

$$HP. = KPQ \quad ; \text{ se considera: } HP. \text{ superf.}^=$$

$HP. \text{ m} = \text{cte.}$ que es dato.

3) Comparación de P_s a Q_a y $HP. \text{ m} = \text{cte.}$, con la máx. P_s - permisible.

Para P_s a $Q_a \leq P_s \text{ máx.}$, el caso 1 si es aplicable, e implica que la perforación se hará en un solo rango de operación y -- que $Q_a = Q_{\text{ópt.}}$.

Si P_s a $Q_a > P_s \text{ máx.}$, el caso 1 no es aplicable.

II) Análisis de la segunda alternativa para aplicación del caso 2 (P_s limitada) y del caso 3 (P_s y $HP. \text{ superf.} = \text{cte.}$).- (Este análisis solo se sigue si no fue aplicable el caso 1).

Nota.- Se parte de la serie de datos calculados: P_{c_i} para --- $Q = Q_a$, en cada una de las profundidades que se van a analizar. El cálculo de estas pérdidas se hace mediante nomogramas y de acuerdo a las condiciones iniciales del problema. Para efecto de ilustración, se incluirá dicho cálculo en el ejemplo general que se describe posteriormente.

a) Para el caso 2: (P_s limitada = P_m y se considera -- $HP. \text{ superf.}$ variable)

4) Para la primera profundidad:

se toman los datos P_c vs Q_a

se determina $P_c \text{ ópt.} = 0.35 P_s \text{ máx.}$, y con ambos datos se

determina Q_1 para $P_c \text{ ópt.}$, mediante la ecuación:

$$Q_1 = Q \left(\frac{P_c \text{ ópt.}}{P_c} \right)^{0.53} \quad ; \text{ ya que: } Q_{\text{ópt.}} = \left(\frac{0.35 P_m}{K_c} \right)^{\frac{1}{1.86}}$$

5) Se obtiene $HP_{\text{superf.}}$ a $P_s \text{ máx.}$ y Q_1 .

6) Comparación de $HP_{\text{superf.}}$ a $P_s \text{ máx.}$ y Q_1 con HP_m .

Para $HP_{\text{superf.}}$ a $P_s \text{ máx.}$ y $Q_1 < HP_m$, el caso 2 si es aplicable, y por lo tanto $Q_1 = Q_{\text{ópt.}}$, e implica que se debe pasar a la siguiente profundidad y se inicia nuevamente el proceso a partir del inciso 4, a manera de iteración.

Lo anterior implica que cuando la P_s está limitada a algún -- máximo debido a este máximo será necesario decrementar la $HP_{\text{superf.}}$ abajo de la HP_m , con el objeto de obtener la máxima HP_b .

Si $HP_{\text{superf.}}$ a $P_s \text{ máx.}$ y $Q_1 > HP_m$, el caso 2 no es aplicable, por lo tanto se debe continuar con el proceso (inciso b).

Nota.- Es posible que:

$HP_{\text{superf.}}$ a $P_s \text{ máx.}$ y $Q_1 = HP_m$, en tales circunstancias se podría decir que también el caso 2 es aplicable; sin embargo como vamos a observar posteriormente, también podría decirse que pertenece al tercer caso.

b) Para el caso 3: (P_s limitada = P_m y $HP_{\text{superf.}} = HP_m$).

7) Se obliga a que:

$$HP_m = P_m Q_{\text{ópt.}}$$

Por lo tanto:

$$Q_{\text{ópt.}} = \frac{HP_m}{P_m}; \text{ hecho lo anterior implica que se}$$

debe pasar a la siguiente profundidad, y se inicia nuevamente el -- proceso a partir del inciso 4, a manera de iteración.

En general para la segunda alternativa, se tendrían tres rangos de operación posibles que englobarían definitivamente a los dos últimos casos estudiados anteriormente, con la integración del tercer rango constituido por el límite al que está sujeto el gasto (Q_a).

Método matemático para máxima fuerza de impacto del chorro

de la barrena. -

Se desarrolla bajo el siguiente procedimiento:

Nota.- Se parte de la serie de datos P_{c_i} en el valor de $Q = Q_a$ para cada profundidad.

a) Para el caso 1: (P_s ilimitada)

1) Para la primera profundidad;

se toman los datos P_c vs Q_a

se considera $HP_{superf.} = HP_m = cte.$ que es dato y, con ambos datos se determina Q_1 , mediante la ecuación:

$$Q_1 = Q^{0.64} \left(\frac{0.26 HP_m}{P_c} \right)^{0.35} ; \text{ ya que: } Q_{\text{ópt.}} = \left(\frac{0.26 HP_m}{K_c} \right)^{\frac{1}{2.8}}$$

2) Se obtiene P_s a Q_1 y HP_m , mediante la ecuación:

$$HP_m = KPQ$$

3) Comparación de P_s a Q_1 y HP_m , con la máx. P_s permisible.

Para P_s a $Q_1 < P_s \text{ máx.}$, el caso 1 si es aplicable y por lo tanto $Q_1 = Q_{\text{ópt.}}$, implica que se debe pasar a la siguiente profundidad y se inicia nuevamente el proceso, a manera de iteración.

Si P_s a $Q_1 > P_s \text{ máx.}$, el caso 1 no es aplicable, por lo tanto se debe continuar con el proceso (inciso b).

Nota.- Es posible que:

$$P_s \text{ a } Q_1 = P_s \text{ máx.} ; \text{ por lo tanto se podría decir}$$

que el caso 1 también es aplicable, sin embargo como vamos a observar posteriormente, también podría decirse que pertenece al tercer caso.

b) Para el caso 3: (P_s limitada = P_m y $HP_{superf.} = HP_m$)

4) Se considera;

$$HP_m = P_m Q_1 \quad ; \text{ ya que: } HP_m = P_m Q_{\text{ópt.}}$$

Por lo tanto;

$$Q_1 = \frac{HP_m}{P_m}$$

5) Se obtiene P_c a Q_1 .

6) Comparación de P_c a Q_1 con $0.52 P_m$.

Para la P_c a $Q_1 < 0.52 P_m$, el caso 3 si es aplicable y por lo tanto $Q_1 = Q_{\text{ópt.}}$, e implica que se debe pasar a la siguiente profundidad, pero esta vez el proceso se inicia a partir del inciso 4, también a manera de iteración.

Si P_c a $Q_1 > 0.52 P_m$, el caso 3 no es aplicable, por lo tanto se debe continuar con el proceso (inciso c).

Nota.- Es posible que;

P_c a $Q_1 = 0.52 P_m$, por lo tanto se podría decir que también el caso 3 es aplicable, pero como en casos anteriores vamos a observar posteriormente que también podría decirse que pertenece al segundo caso.

c) Para el caso 2: (P_s limitada = P_m y se considera -- HP_{superf.} variable)

7) Se toman los datos P_c vs Q_a

Se determina $P_c \text{ ópt.} = 0.52 P_m$, y con ambos datos se determina $Q_{\text{ópt.}}$ para $P_c \text{ ópt.}$, mediante la ecuación:

$$Q_{\text{ópt.}} = Q \left(\frac{P_c \text{ ópt.}}{P_c} \right)^{0.53} \quad ; \text{ ya que: } Q_{\text{ópt.}} = \left(\frac{0.52 P_m}{K_c} \right)^{\frac{1}{1.86}}$$

8) Para comprobar: se obtiene HP_{superf.} a P_m y $Q_{\text{ópt.}}$.

9) Comprobación:

Si HP. superf. a P_m y Q_{opt} . \ll HP. m , por lo tanto es co-

rrecta la aplicación del caso 2, e implica que se debe basar a la siguiente profundidad, pero ahora el proceso se iniciará a partir del inciso 7, a manera de iteración.

En general, se tendrían cuatro rangos de operación posibles que englobarían definitivamente a los tres casos estudiados anteriormente, con la integración del cuarto rango constituido al igual que en la máxima potencia hidráulica en la barrena, por el límite al que está sujeto el gasto (Q_a).

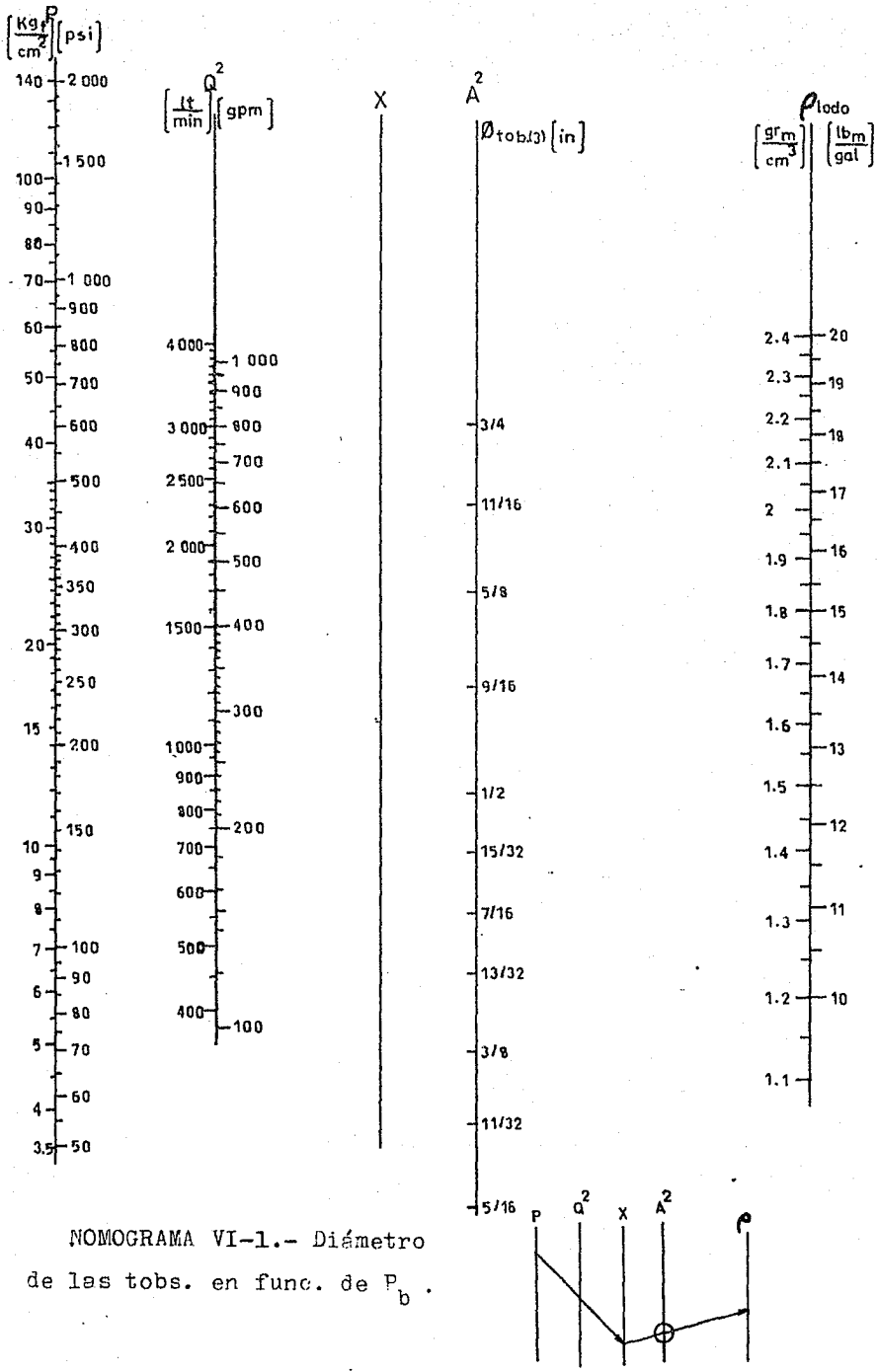
En cualquiera de los dos procedimientos matemáticos anteriores lo único que restaría sería publicar los resultados obtenidos, en una tabla para mayor facilidad de manejo del programa; los diáms. de las tob. ($\phi_{\text{tob.}}$) como ya se había hecho notar, se obtendrían mediante el nomograma que se presenta a continuación y en el cual están resueltas las siguientes ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} \text{para el sist. métr. dec.: } P_b \left[\text{Kg}_f / \text{cm}^2 \right] &= \frac{\rho \left[\text{gr}_m / \text{cm}^3 \right] (Q \left[\text{lt} / \text{min} \right])^2}{7\,060 \, c^2 (A_T \text{ tob.} \left[\text{cm}^2 \right])^2} \\ \text{para el sist. inglés: } P_b \left[\text{psi} \right] &= \frac{\rho \left[\text{lb}_m / \text{gal} \right] (Q \left[\text{gpm} \right])^2}{12\,031 \, c^2 (A_T \text{ tob.} \left[\text{in}^2 \right])^2} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} c=0.95 \\ \text{(coef.} \\ \text{orif.} \\ \text{tobs.)}, \end{array}$$

cuya forma general es:

$$P_b = \frac{\rho Q^2}{c^2 A_T \text{ tob.}^2} \quad (9) \quad \text{(para cualquier -}$$

tipo de unids. consistentes).



NOMOGRAMA VI-1.- Diámetro de las tobs. en func. de P_b .

(+)

Por último, si se desea conocer el valor de la velocidad de lodo en las toberas ($V_{\text{tob.}}$), puede emplearse otro nomograma que resuelve las ecuaciones:

para el sist. inglés:
$$V_{\text{tob.}} [\text{ft/seg}] = \frac{Q [\text{gpm}]}{3.117 A_{\text{T tob}} [\text{in}^2]}$$

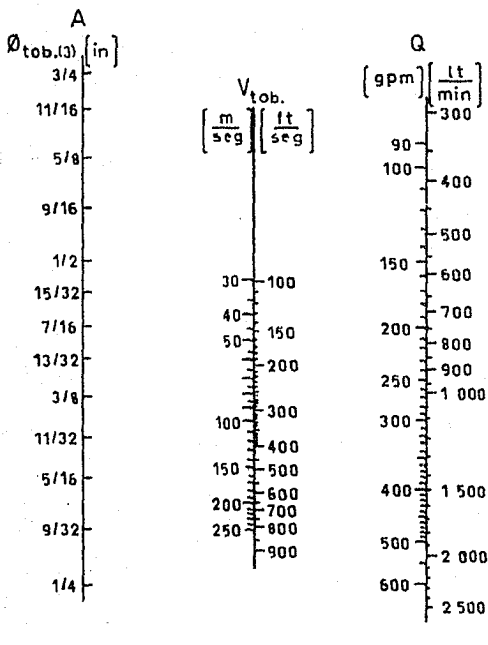
para sist. métr. dec.:
(unids. combinadas con sist. inglés)

$$V_{\text{tob.}} [\text{m/seg}] = \frac{Q [\text{lt/min}]}{38.7 A_{\text{T tob}} [\text{in}^2]}$$

cuya forma general es:

$$V_{\text{tob.}} = \frac{Q_{\text{bomba}}}{A_{\text{T tob.}}} \quad (10) \quad (\text{para cualquier tipo de unids. consistentes}).$$

tipo de unids. consistentes).



NOMOGRAMA VI-2.- Velocidad en las tobs. de la barrena.

Método gráfico.-

Básicamente consiste en la construcción de una gráfica P [psia ó Kg/cm² abs.] vs Q [gpm ó lt/min]; la escala de la gráfica es logarítmica en ambos ejes y en ella se representan:

- a) La curva de la potencia hidráulica superficial máxima [HP].
- b) La familia de curvas correspondientes al comportamiento de P_c para las diferentes profundidades. Y,
- c) La denominación ó diseño del programa hidráulico propiamente dicho, de acuerdo a la serie de condiciones de campo que se dan y al efecto hidráulico que se desea maximizar.

Se puede decir que utilizando el método gráfico, en el inciso c es donde únicamente van a variar los diseños de los programas hidráulicos, debido a las diferencias que existen en las condiciones óptimas para el uso de la máxima potencia hidráulica en la barrera y de la máxima fuerza de impacto del chorro de la misma.

Para representar la curva de potencia hidráulica superficial máxima [HP], se sigue este desarrollo:

(Utilizando sist. inglés)

$$\text{Se tiene: } HP_{\text{superf.}} = \frac{P_{\text{superf}} [\text{psia}] Q [\text{gpm}]}{1.714}$$

$$1.714 \text{ HP}_s = P_s Q$$

$$\Rightarrow P_s = \frac{1.714 \text{ HP}_s}{Q} \quad ; \text{ obteniendo logaritmos:}$$

$$\log P_s = \log(1.714 \text{ HP}_s) - \log Q \quad , \text{ esta ecuación es de la forma: } y = b + m x \quad .$$

Por lo tanto para un sistema coordenado con ambos ejes logarítmicos, la curva de la potencia hidráulica superficial se reduce a una recta de pendiente $m = -1$ y ordenada al origen $b = 1.714 \text{ HP}_s$. Por otro lado si se obtiene un punto por el que pase la curva HP_s , entonces podría quedar completamente definida en el sistema logarítmico.

Luego:

Si consideramos: $HP_m = HP_s$ (dato), y disponiendo además - de algún valor de cualquiera de las dos variables: P_s ó Q , se puede obtener el correspondiente de aquélla que faltara mediante la ecuación:

$HP_s = KPQ$, con lo que se tendría un punto (Q, P_s) por el que pasa $HP_s = HP_m$; de esta manera ya puede ser representada dicha curva en la gráfica log-log.

Ahora bién, para representar la familia de curvas correspondientes al comportamiento de P_c para las diferentes profundidades, se procederá de una manera muy semejante a la anterior:

Se tiene: $P_c = K_c Q^{1.8}$; obteniendo logaritmos:

$$\log P_c = \log K_c + 1.8 \log Q, \text{ esta ecuación es de la}$$

$$\text{forma: } y = b + m x.$$

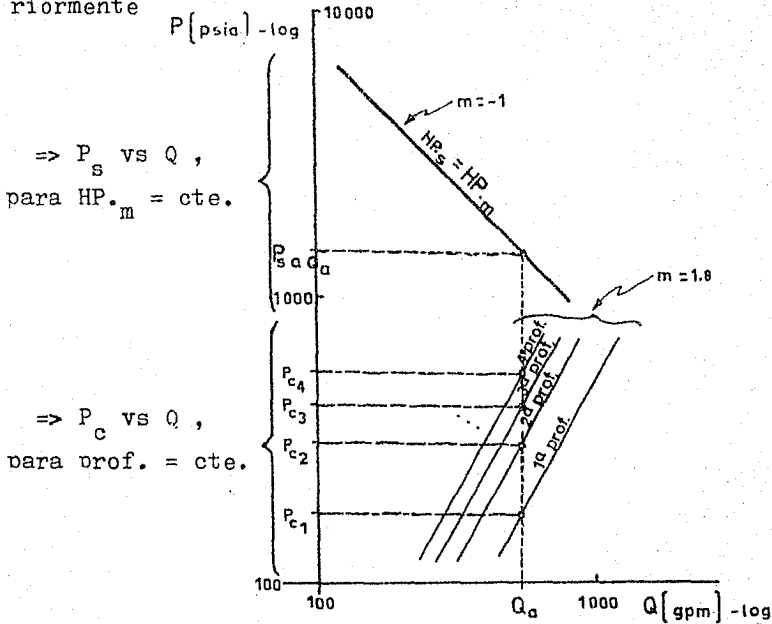
Por lo tanto la curva P_c para una profundidad dada, se reducirá a una recta en un sistema cartesiano con ambos ejes logarítmicos; esta recta tendrá una pendiente $m = 1.8$ y ordenada al origen $b = K_c$. También si se tubiera un punto por el que pasa la curva, entonces podría definirse perfectamente en el sistema log-log; éso precisamente se haría con el resto de las curvas.

De lo anterior se desprende que, la familia de curvas P_c para las diferentes profundidades, se reduce a una familia de rectas dependiente $m = 1.8$ al trasladarlas al sistema coordinado mencionado.

Los puntos por donde pasan las curvas, se pueden determinar previamente ya que se trata de la serie de datos calculados: P_{c_i} para $Q = Q_a$ en cada una de las profundidades que se van a programar, por lo tanto de esta manera se puede establecer que la familia de curvas P_c ha quedado definida.

La siguiente gráfica muestra objetivamente la forma general en

que pueden quedar trazados los dos tipos de curvas analizadas anteriormente

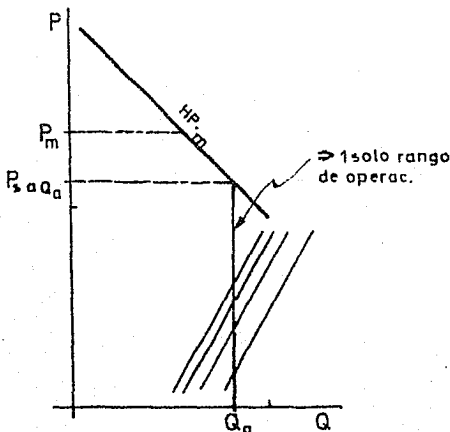


El análisis del inciso c, se va a hacer en dos partes que son independientes entre si, ya que cada una constituye el método gráfico del diseño del programa hidráulico, como se había hecho notar anteriormente, según se trate de maximizar la potencia hidráulica en la barrena ó bien la fuerza de impacto del chorro de la misma.

Para máxima potencia hidráulica en la barrena.-

I) Para la primera alternativa:

Si en la gráfica se tiene:

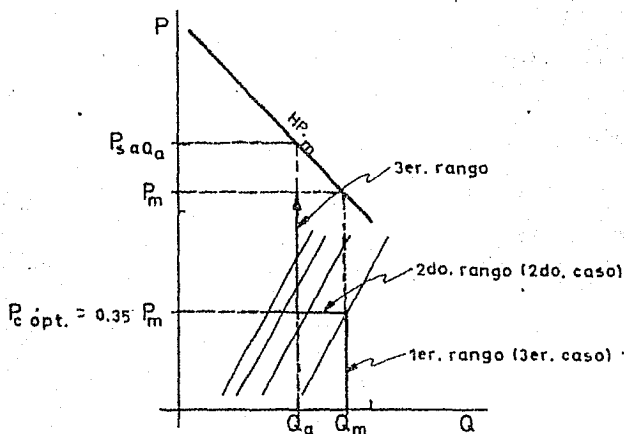


$$\therefore P_s a Q_a \leq P_m,$$

\therefore si es aplicable el 1er. caso (P superf. ilimitada) y sólo hay un rango de op.; luego: $Q_a = Q_{\text{opt.}}$

II) Para la segunda alternativa:

Obviamente si no fue aplicable el caso anterior, implicará que se tendrán los tres rangos de operación posibles, y para determinarlos se procede como sigue:



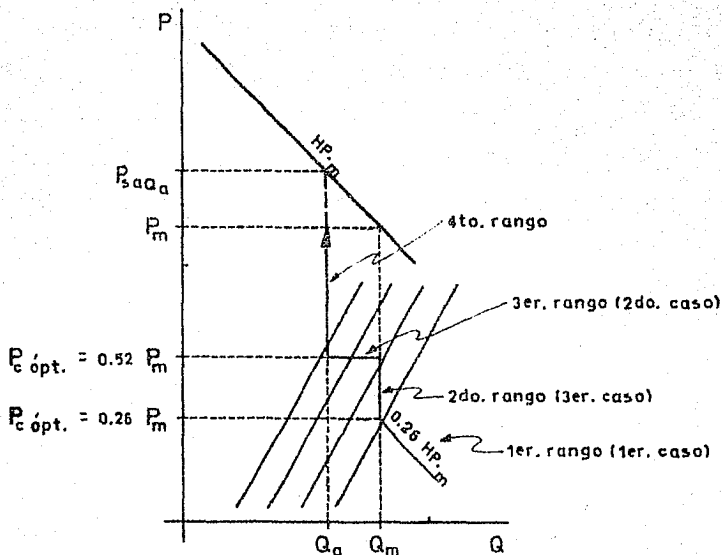
Para el rango 1 se usa la limitación de presión igual a P_m del liner, y se opera con el gasto correspondiente al valor de Q_m (valor del gasto para P_m y HP_m) hasta que la relación $\frac{P_c}{P_m} = 0.35$ (im-

plica que $\frac{HP_m}{HP_m} \cdot \frac{b}{m}$ se decrementa a 0.65); luego se conserva constante esta relación mediante la reducción del valor del gasto (+) para obtener el rango 2. El rango 2 está limitado por el valor del gasto-anular mínimo (Q_a), que constituirá el 3er. rango de operación y que en última instancia estaría limitado a su vez por la $P_s \text{ máx.} = P_m$.

Para máxima fuerza de impacto del chorro de la barrena.-

Para este efecto hidráulico máximo, solo se tiene una alternativa general y por lo tanto una sola gráfica con los cuatro rangos de operación posibles, cuya determinación se presenta a continuación.

(+) Esta reducción produce un efecto de decremento en la $HP_{\text{superf.}}$, debido a la limitación de la presión superficial (P_m).



El 1er. rango se define seleccionando valores del gasto que permitirán el uso del 74 % de la HP_m en la barrena, por lo que los puntos de la gráfica que cumplen con esta condición, estarán indicados en una línea paralela a HP_m y que corresponde al valor $0.26 HP_m$; éso indica que dicha línea pasa por el punto donde $P_c \text{ ópt.} = 0.26 P_m$ para $Q = Q_m$. De esta manera queda definido el 1er. rango cuyo límite en sentido ascendente es precisamente el punto a que se hizo referencia.

El 2do. rango se obtiene operando con el gasto correspondiente al valor Q_m hasta que la relación $\frac{P_c}{P_m} = 0.52$ (implica que $\frac{HP_b}{HP_m}$ se decrementa de 0.74 a 0.48); luego se conserva constante esta relación mediante la reducción del valor del gasto para obtener el rango 3. Como en la segunda alternativa para máxima potencia hidráulica en la barrena, pero ahora en el 3er. rango se tiene un límite para el mismo, definido por el valor del gasto anular mínimo (Q_a) que constituirá el 4to. rango de operación con su respectivo límite $P_s \text{ máx.} = P_m$.

Nota.- Para propósitos prácticos, el rango I puede ser ignorado y entonces la operación se inicia como en el caso de máxima potencia hidráulica en la barrena con un gasto cte. = Q_m ; la razón principal que justifica lo anterior estriba en que para obtener la P_b máx. al principio de la perforación, en el 1er. rango se requeriría variar el tamaño del liner de la bomba tantas veces como fuera posible, con el objeto de lograr diversos Q_m con sus correspondientes P_m y así poder operar con una P_c ópt. = $0.26 P_m$ diferente en cada cambio de liner, ésto para procurar trabajar con un HP_c ópt. = $0.26 HP_m$, lo cual resulta muy impráctico.

INFERENCIAS PRELIMINARES.-

-- Cuando el gasto anular mínimo (Q_a) es mayor que Q_m (valor del gasto para P_m y HP_m), no hay diferencia en la operación para máxima potencia hidráulica en la barrena ó máxima fuerza de impacto del chorro en la misma; los máximos efectos en la barrena son obtenidos operando siempre en el valor de Q_a .

-- Cuando Q_a es menor que Q_m , se puede establecer una opción (preferencia) de operar en condiciones que proporcionen uno u otro máximo:

a) Para máxima potencia hidráulica en la barrena, el valor del gasto inicialmente sería Q_m hasta una profundidad en la cual la $P_b = 65 \% P_m$ ($P_c = 0.35 P_m$); luego dicho valor sería decrementado con la profundidad mientras la P_b permanece constante en $65 \% P_m$ hasta que el valor de Q_a es alcanzado; este último valor del gasto se mantendría hasta la profundidad total del pozo.

b) Para máxima fuerza de impacto del chorro de la barrena y, considerando que se opera ignorando el 1er. rango para fines prácticos, los valores del gasto son idénticos a los del inciso anterior, excepto que la P_b se mantiene constante cuando es igual al $48 \% P_m$ ($P_c = 0.52 P_m$) en el rango correspondiente.

-- Ya que para ambos efectos hidráulicos siempre es deseable operar en la máxima $P_{superf.}$ posible, independientemente del valor

del gasto e indiferentemente de la profundidad (puesto que la optimización está en función de P_m), se sugiere que el tamaño de liner (\emptyset camisas) de las bombas para dichos efectos siempre sea el más pequeño que sea factible, con el objeto de usar una $P_{\text{superf.}}$ comparable a la P_m admisible del liner.

-- Comparando ambas condiciones de optimización para un mismo pozo y equipo disponible (implica situaciones de operación similares), se puede observar que las diferencias en efectos de la barrena, pueden ser grandes. Esta diferencia variará con la profundidad y para otros problemas de campo.

El uso de bombas en paralelo incrementará más aún dicha diferencia, ya que la operación proporcionaría con mayor caballaje, un incremento en el gasto máximo (Q_m), con lo cual se dispondría de un intervalo más amplio para seleccionar los gastos óptimos.

VII.- CRITERIO PARA ELEGIR PROGRAMAS HIDRAULICOS

Los primeros pasos para usar un buen programa hidráulico son:

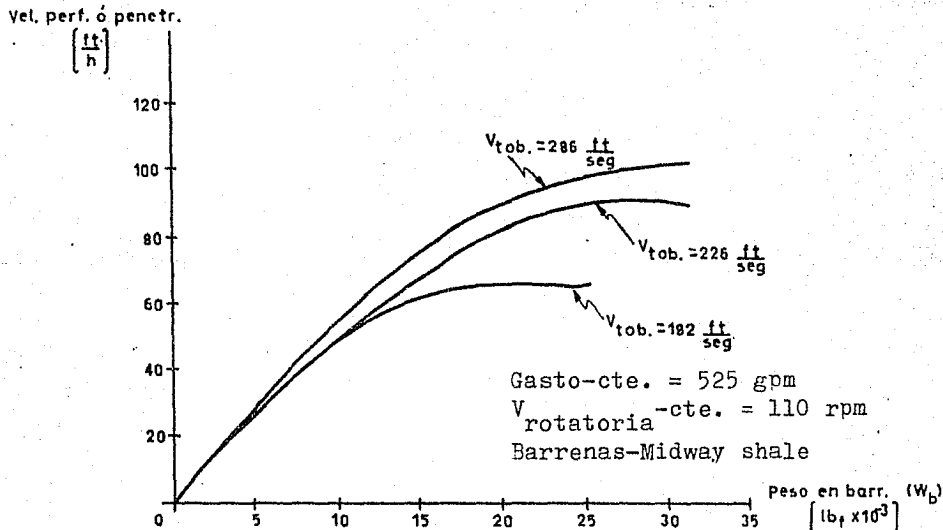
a) Considerar el equipo aprovechable para el trabajo (barrenas, tuberías, lastrabarrenas y bombas) y,

b).- Considerar el material que se va a emplear para el mismo (fluido de perforación).

Ahora bién, el fluido de perforación tiene 9 funciones importantes, pero para nuestro objeto, dos de ellas son esenciales:

- Limpiar el fondo del agujero y,
- acarrear los cortes a la superficie.

Se requiere un método para determinar el límite de limpieza necesaria en el fondo del agujero, para valores máximos de penetración, y para éllo se muestra la siguiente gráfica basada en pruebas de campo.



Gráfica que muestra el efecto de la limpieza del fondo del agujero.

En la gráfica se puede apreciar de manera objetiva, que para la mayor $V_{tob.}$ ($V_{tob.3}$) definitivamente la limpieza en el fondo -

del agujero no fue adecuada en su fase final, ya que la relación de los incrementos $\Delta V_{\text{tob.}}$ y $\Delta \text{Vel. perf.}$ o penetración, no se aproxima a la proporción directa.

Entonces una $V_{\text{tob.}}$ ideal sería aquella que lograra una relación lineal de los incrementos ΔW_b y $\Delta \text{Vel. perf.}$, para obtener valores máximos de perforación; pero esto sólo se lograría si la limpieza del agujero fuera la requerida, sin embargo no siempre es posible que se establezca esa relación de incrementos ya que por un lado, el peso de la barrena (W_b) está limitado por la máxima resistencia de la roca al fracturamiento salvo en muy raras excepciones en que ésta última pudiera ser mayor que W_b , y por otro lado, si la $V_{\text{tob.}}$ al principio de la perforación implicaba una limpieza ideal, a mayores profundidades va disminuyendo su eficiencia ya que el monto de limpieza necesaria es dependiente de:

- 1) El tipo de formación y profundidad en la que ocurre.
- 2) El tipo de barrena usada y programa para aplicar pesos en la misma (W_b) y velocidades rotatorias ($V_{\text{rotat.}}$).
- 3) Las propiedades del fluido. Y,
- 4) El equipo y la cuadrilla de trabajadores del mismo.

Nota.- El último factor puede ser el más importante, por la visión que pueden adquirir los operadores a través de la experiencia para sugerir o recomendar un programa hidráulico determinado, en un momento dado.

Por lo tanto la energía para limpiar el fondo del agujero se reduce necesariamente con el incremento de la profundidad, a pesar de hacer los cambios respectivos de W_b , sin embargo dichos cambios deben ser continuados. "Esta práctica establecería la limpieza requerida para una formación dada a una profundidad dada usando un programa de perforación dado".

Por último, si ocurren cambios en: el tipo de barrena, el tipo de fluido, ó en los programas de W_b y $V_{\text{rotat.}}$, - luego algún cambio en la energía de limpieza puede ser requerido.

Cabe hacer notar que hay un factor definitivo al establecer los requerimientos de limpieza en el fondo del agujero, - el aspec

to económico - ; ciertamente no hay necesidad de usar más energía - hidráulica de la requerida, por lo tanto habrá que hacer un análisis económico comparativo para decidir que alternativa es óptima y al final, éso mismo definirá el tipo de programa hidráulico que debe emplearse.

Luego de lo anterior, podemos contar que el programa hidráulico elegido, será aquel que bajo condiciones similares proporcione - la mayor limpieza del agujero a un menor costo, lo que se puede traducir en una perforación más rápida ó económica.

A continuación se presentan algunas características sobre los dos tipos de programas hidráulicos en estudio, con el objeto de facilitar el criterio de elección de los mismos:

-- El uso de la potencia hidráulica en la barrena, está justificado por el hecho de que la remoción de los cortes se considera dependiente del trabajo realizado por el fluido; este trabajo es equivalente a la suma de energía del fluido gastado en la barrena. En este sentido, la eficiencia ó suma de energía útil es el factor-determinante y, generalmente en la aplicación de la energía hidráulica de esta manera, la eficiencia sería baja.

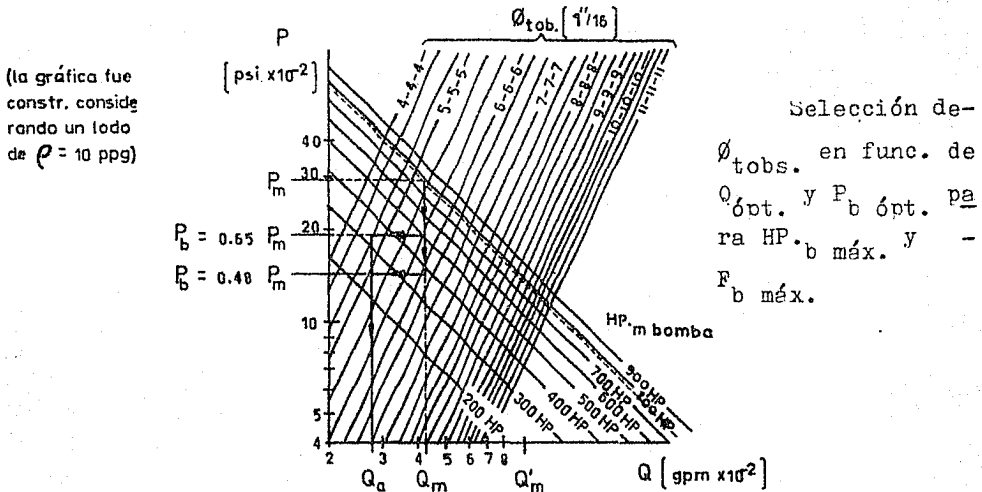
-- El impacto hidráulico está justificado no por considerar ese trabajo directamente sino porque la remoción de los cortes depende del efecto de barrenado del fluido en el fondo del agujero; este efecto es equivalente a la fuerza de impacto del chorro de la barrena con que el fluido golpea precisamente el fondo del agujero.

-- Los valores óptimos de gasto para una profundidad dada, -- son mayores con impacto hidráulico que los obtenidos con máxima potencia hidráulica en la barrena.

-- Las toberas de la barrena generalmente son ajustadas para un determinado impacto máximo del fluido, puesto que al estar operando con una relación $\frac{P_c \text{ ópt.}}{P_m} = \text{cte.}$ e incrementarse la profundidad,

la máxima potencia hidráulica en la barrena implica un mayor - decremento en el diámetro de las tobs. y con éllo, también un correspondiente decremento en la limpieza de agujero.

Lo anterior es facilmente reconocido mediante la siguiente gráfica:



Nota.- Como sucede al principio de la perforación, en la línea del valor de Q_a , los tamaños de boca otra vez tienen que incrementarse con la profundidad.

El comportamiento ó variación del \varnothing_{tobs} . con respecto a la presión aplicada en la barrena (P_b) y al gasto (Q), también se confirma con el análisis de la ecuación (9);

$$P_b = \frac{\rho Q^2}{c^2 A^2}$$

para $Q = \text{cte.}$ y $P_b \downarrow$, $\Rightarrow A \uparrow$

para $P_b = \text{cte.}$ y $Q \downarrow$, $\Rightarrow A \downarrow$

-- Se puede mostrar matematicamente que para máxima potencia-hidráulica en la barrena, la HP_b es 8.5 % mayor que la obtenida cuando se opera en máxima fuerza de impacto del chorro de la barrena, y que en condiciones de máxima fuerza de impacto, la F_b es 7 % mayor que la obtenida para máxima potencia hidráulica en la barrena.

También puede mostrarse que en condiciones de máxima HP_b , -

la P_b es 34.7 % mayor, el gasto Q es 19.5 % menor y la V_{tob} es --
14.3 % mayor que los resultados obtenidos para máxima fuerza de im-
pacto hidráulico en la barrena.

-- Para algunos autores consultados a través de sus escritos,
- basados en observaciones de campo y laboratorio, - concluyen - -
que el mejor método de denominación es el impacto hidráulico.

-- En México, el método que generalmente se utiliza es el de-
potencia hidráulica en la barrena, y desafortunadamente no existe -
una estadística comparativa con el método de fuerza de impacto hi--
dráulico, aunque si con respecto a la barrena convencional.

VIII.- UN NUEVO METODO PRACTICO PARA DISEÑAR PROGRAMAS HIDRAULICOS EN LA PERFORACION ROTATORIA

Básicamente el método consiste en la construcción de una gráfica llamada "gráfica de trabajo".

Se puede considerar a la gráfica compuesta por dos secciones:

a) Sección izquierda.- Está constituida por dos familias de rectas cada una ubicada en su propio sistema de acotación (logarítmico en ambos ejes), y que son datos ya establecidos:

(Utilizando sist. inglés)

-- Una familia corresponde a los diferentes diámetros de tuberías en la barrena $\{1"/32\}$ en un sistema P_b [psi] vs Q [gpm] (la escala de este sistema en ambos ejes está invertida con el objeto de lograr el acoplamiento requerido entre las dos gráficas de la sección, como parte integral de la solución por el método gráfico).

-- La otra familia corresponde a las diferentes densidades del lodo ρ [ppg] (lb_m/gal) en un sistema Q [gpm] vs P_c [psi]. Esta última gráfica está acoplada a la única que constituye la sección derecha con lo cual todo el sistema gráfico para obtener la solución, queda ensamblado.

b) Sección derecha.- Es una gráfica cuyo sistema de coordenadas también es logarítmico en ambos ejes y propiamente es la parte de la gráfica de trabajo que se va a construir sobre un sistema logarítmico Q [gpm] vs P_c [psi], y para ello se presenta el siguiente esquema de procedimiento:

Nota.- En el proceso de la solución se requieren ciertos cálculos, para los cuales son empleadas otras gráficas auxiliares que se describen durante el desarrollo del mismo.

Procedimiento:

FASE I.- Se parte de los siguientes datos.

- | | | |
|---------|---|--|
| Secc.1 | {
-Núm. y tipo de bombas e instalación de las mismas.
-Long. embolada (stroke de operación) [in]
-Máx. SPM (máx. strokes/min) [SPM/bomba]
-Liner bomba (\emptyset camisa de la bomba) [in] | } Características de las bombas |
| Secc.2 | {
- \emptyset agujero [in]
- \emptyset tub. perf. [in]
- v_a mín. (velocidad anular mín.) [ft/min] | } Espacio anul. |
| Secc.3 | {
- P_m (máx. presión de op. del standpipe que implica la $P_{m\acute{a}x.}$ permisible del liner de la bomba) [psi] | } Limitaciones de gasto mín. y pres. máx. |
| Secc.4' | {
- ρ del lodo [pvg] (lb_m/gal)
-Jets (tobs.) de la barrena en el agujero [$1''/32$] --(3 tobs.) | } Características del lodo.
Caract. de la bna. trabajo. |
| Secc.4 | {
Secc.4''
-Tres lecturas P_s [psi] del stand pipe correspondientes a tres diferentes SPM de las bombas, que se registran antes de sacar la bna. gastada del agujero, haciendo circular en cada uno de los SPM y después que el manómetro del standpipe se ha estabilizado para dichos valores. | } Presiones superf. del fl. perf., en el stand pipe (Pérd. de pres. totls. en el sist. incluy. bna.) |

FASE II.- Soluciones:

Diagrama de flujo que representa el desarrollo de la misma:

Secc.1 --> Prof. VIII-1 (A ó B según la longitud de embudo de la bomba) => $\frac{Q_{\text{máx.}}}{Q_{\text{mín.}}} = \frac{Q_{\text{m}}}{Q_{\text{n}}}$

Las gráficas VIII-1 (A y B), son cada una, una familia de rectas que representan los diferentes tamaños de liner de las bombas [in] en un sistema coordenado JFY vs Q [cm].

Secc.2 --> Prof. VIII-2 => $\frac{Q_{\text{máx.}}}{Q_{\text{mín.}}} = \frac{Q_{\text{m}}}{Q_{\text{n}}}$

La gráfica VIII-2 es un campo, zona de velocidades angulares -- [ft/min] vs Q [cm] para diferentes combinaciones de diám. del agujero y de la tub. de perf. [in].

Secc.3 -- Fórmulas a) $H_{\text{D}} = H_{\text{D máx.}} - F_{\text{a}} \Delta t_{\text{a}} - 1.35 F_{\text{m}} \Delta P_{\text{a}} - 0.65 F_{\text{m}} \Delta P_{\text{b}} \Delta t_{\text{a}}$ (a ó b según sea el caso de optimización en el programa)

b) $F_{\text{D máx.}} = F_{\text{D máx.}} - 0.52 F_{\text{m}} \Delta P_{\text{a}} - 0.46 F_{\text{m}} \Delta P_{\text{b}} \Delta t_{\text{a}}$ Hidráulico



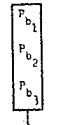
Liner bomba (Secc.1)

Secc.4* (los tres valores de JFY)



Q_1, Q_2, Q_3

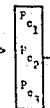
Secc. 1za. de la gráf. de trabajo



P_{b1}, P_{b2}, P_{b3}

Secc.4* (los tres valores de P_{b3})

Fórmulas $P_{b3} = P_{c1} + P_{b3}$
 $P_{c1} = P_{b3} - P_{b3}$



$f(P_{c1}, Q)$
 Función lineal correspondiente a la curva P_{c1} para una prof. dada (prof. del agujero hasta asentamiento).

Nota.- En caso de que los puntos no estén alineados, por interpolación se obtiene un "líneo gobernador", cuya pendiente en un sistema logarítmico siempre deberá ser $n = 1/1.8$ como se demuestra a continuación:

$$P_c = M \cdot Q^n$$

$$\therefore Q = \left(\frac{P_c}{M}\right)^{1/n} \cdot \log$$

$$\log Q = \frac{1}{n} \log \frac{P_c}{M}$$

$$= \frac{1}{n} (\log P_c - \log M)$$

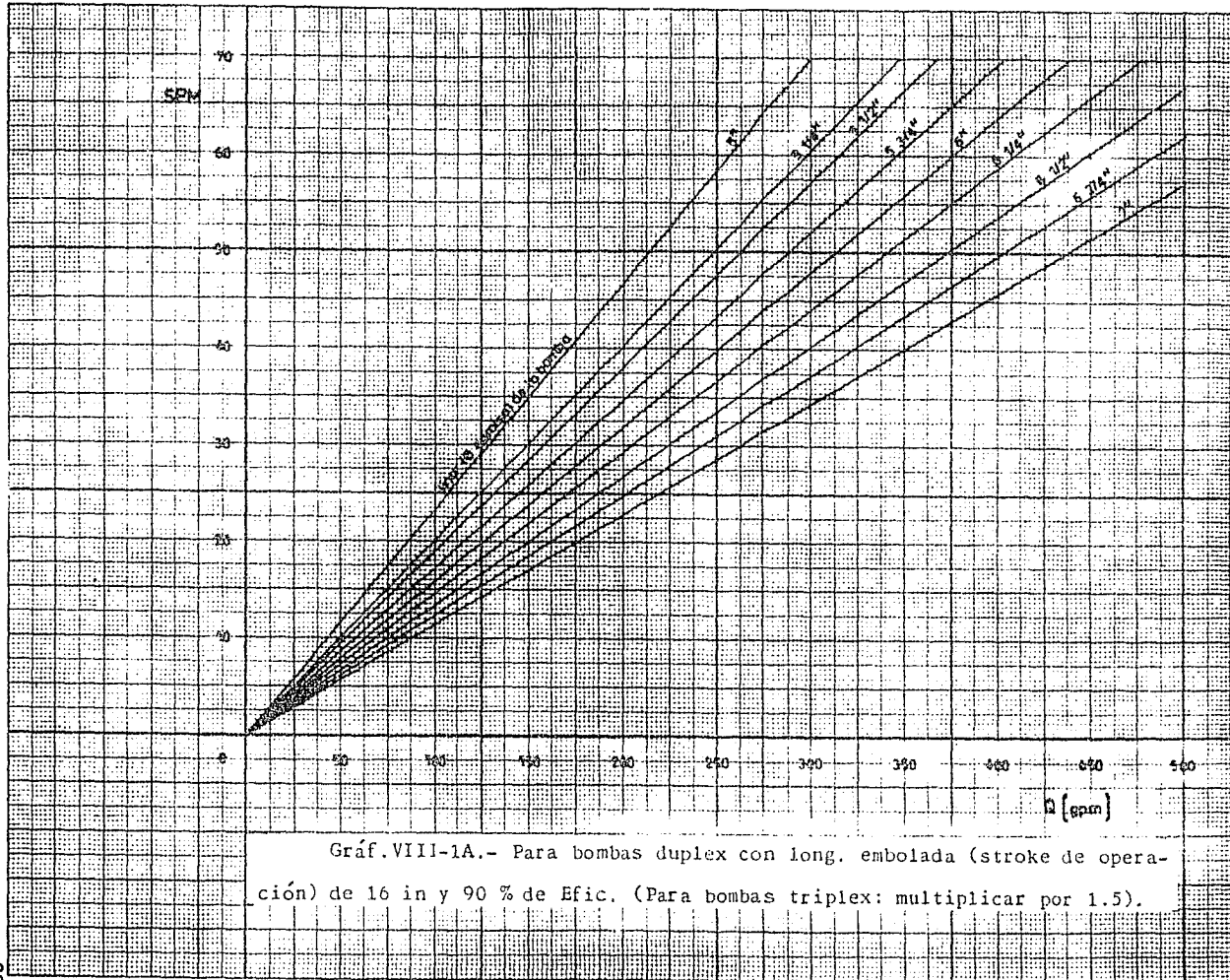
$$\therefore \log Q = \frac{1}{n} \log P_c - \frac{1}{n} \log M$$

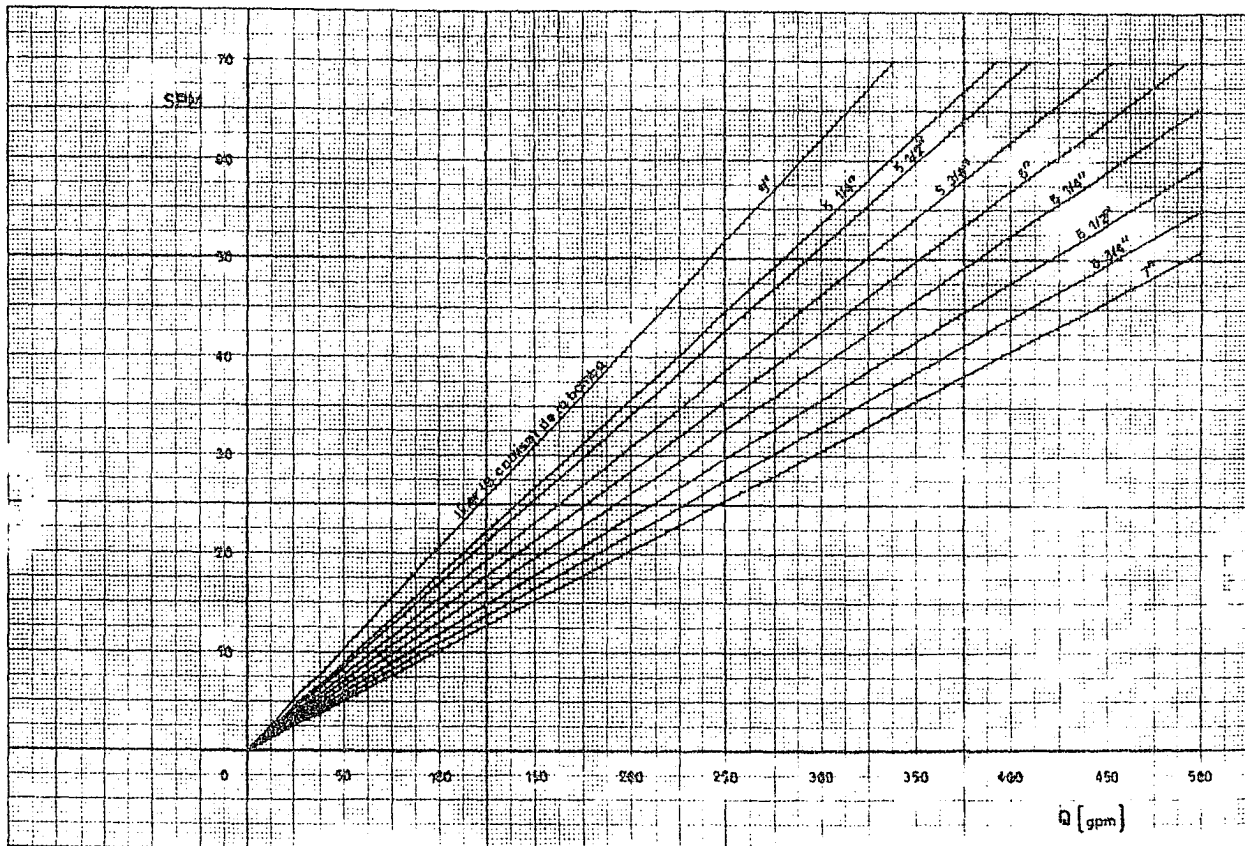
$$y = m \cdot x + b$$

graficar en la secc. derecha

graficar en la secc. izquierda

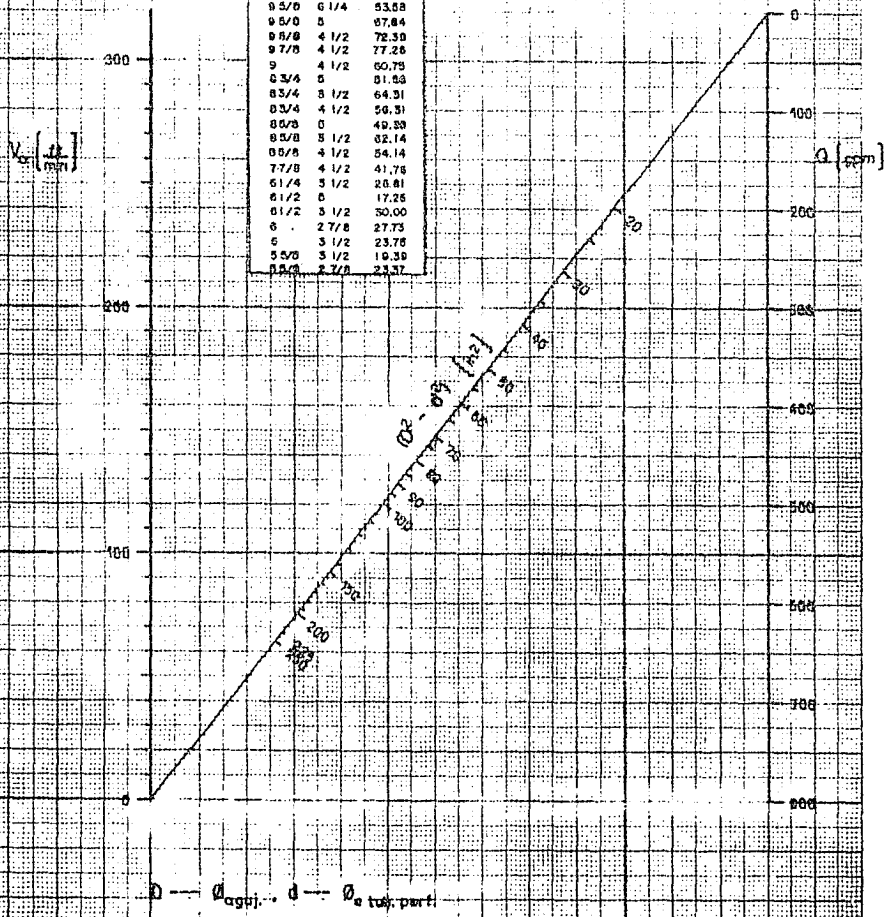






Gráf.VIII-1B.- Para bombas duplex con long. embolada (stroke de operación) de 18 in y 90 % de Efic. (Para bombas triplex: multiplicar por 1.5).

Aguj. D[in]	T. Prof. d[in]	($Q^2 \cdot d^3$)
12 1/4	7	101.08
12 1/4	5	125.08
12 1/4	4 1/2	129.81
9 5/8	6 1/4	53.58
9 5/8	5	57.84
9 5/8	4 1/2	72.39
9 7/8	4 1/2	77.26
9	4 1/2	60.79
8 3/4	5	81.53
8 3/4	3 1/2	64.31
8 3/4	4 1/2	59.31
8 5/8	5	49.29
8 5/8	3 1/2	32.14
8 5/8	4 1/2	54.14
7 7/8	4 1/2	41.76
6 1/4	3 1/2	26.81
6 1/2	5	17.25
6 1/2	3 1/2	30.00
6	2 7/8	27.73
6	3 1/2	23.78
5 5/8	3 1/2	19.39
5 5/8	2 7/8	23.37



Gráf.VIII-2.- Gasto en función de la Velocidad anular y del Area del espacio anular.

De la intersección de $f(P_c, Q)$ con $P_c \text{ ópt.}$, mover horizontalmente a la izquierda hasta la línea correspondiente a la ρ del lodo que se tiene (secc.4): luego verticalmente hacia arriba hasta la línea $P_b \text{ ópt.}$ graficada en la sección izquierda y se lee el tamaño de las tobs. correspondientes a la próxima barrena que se correrá.

Cuando $f(P_c, Q)$ no intercepta a $P_c \text{ ópt.}$ dentro del intervalo $Q_{\text{mín.}}$ a $Q_{\text{máx.}}$, entonces obviamente debe interceptarse ya sea con la línea de $Q_{\text{máx.}}$ ó con la de $Q_{\text{mín.}}$: en este caso la línea $P_c \text{ ópt.}$, deberá desplazarse paralelamente hasta el punto de intersección y por lo tanto adoptará un nuevo valor que se puede leer en la gráfica; ahora bién, se ha hecho variar $P_c \text{ ópt.}$, y por ende deberá variar $P_b \text{ ópt.}$; para ésto el nuevo valor de la última lo obtenemos mediante la fórmula:

$$P_s = P_c + P_b,$$

que para condiciones óptimas es: $P_m = P_c \text{ ópt.} + P_b \text{ ópt.}$

Por lo tanto:

$$P_b \text{ ópt.} = P_m - P_c \text{ ópt.} \quad . \text{ Este resultado}$$

tado de $P_b \text{ ópt.}$, se lleva a la sección izquierda de la gráfica de trabajo, obteniéndose así, una nueva línea $P_b \text{ ópt.}$

De esta manera, se ha realizado una corrección en la gráfica de trabajo para esta etapa del programa hidráulico, de acuerdo al comportamiento observado de las pérdidas de presión totales en el sistema, obtenidas para diferentes gastos desarrollados por las bombas.

Con la gráfica de trabajo corregida, se procede a hacer la selección de tobs. que deberá llevar la próxima barrena del programa.

Nota.- Si la lectura correspondiente al tamaño de las tobs., no coincide precisamente con alguna de las líneas que indican los diferentes tamaños para combinaciones de tres bocas iguales, entonces se elegirá una combinación de dos bocas iguales y una diferente; las dos primeras corresponderán al tamaño que indica la línea más próxima, y la otra a la línea más alejada.

IX.- EJEMPLO ILUSTRATIVO

Datos del problema.- (Utilizando sist. inglés)

Bombas: - Dos bombas D-1 650 en paralelo
- Long. embolada (stroke de operación) = 18 in
- Máx. SPM (máx. strokes/min) = 45 SPM/bomba
- Liners bombas = 6 3/4 in
- P_m (máx. presión de op.) = 3 000 psi = 3 014.7 psia
- HP. máx. aprovechable = 1 435

Conex. superf.: Stand pipe (tub. vertical) 4 in DI -- 45 ft
(caso núm. III) Manguera 3 in DI -- 55 ft
Swivel (unión girat.) 2 1/2 in DI -- 5 ft
Kelly (flecha) 3 1/4 in DI -- 40 ft

Agujero: - $\emptyset = 9 \frac{7}{8}$ in
- Prof. total del pozo = 15 000 ft
- Prof. TR cementada = 2 000 ft

Tub. perf.: 4 1/2 in ($\emptyset_{ext.}$), juntas regulares API, 2 1/2 in ($\emptyset_{int.}$)

Drill collars: 6 3/4 in ($\emptyset_{ext.}$), 2 3/4 in ($\emptyset_{int.}$), 500 ft -- (long.)

$V_{a \text{ mín.}}$: 120 ft/min

Fluido de perforación: Lodo

- $\rho = 10.3$ ppg
- $\mu_p = 40$ cp (viscosidad plást.)
- $\gamma_p = 14$ lb /100 ft³ (pnto. de cedenc.)

Tipo de flujo: Turbulento

a) Mediante método gráfico, diseñar el programa hidráulico en el intervalo de 2 000 a 15 000 ft para cada una de las siguientes profundidades: 2 000 ft, 5 000 ft, 8 000 ft, 10 000 ft y 15 000 ft.

El efecto hidráulico que se desea maximizar es la fuerza de impacto del chorro en la barrena.

b) Considerando que a la profundidad de 11 700 ft hubiera estado trabajando una barrena con toberas: 3-11"/32; utilizando el nuevo método gráfico para diseñar programas hidráulicos, determinar los diámetros de tobs. que deberá llevar la próxima barrena del programa y con la cual se desea obtener la máxima fuerza de impacto.

Las tres lecturas de P_s correspondientes a tres diferentes SPM en esa profundidad, son las siguientes:

SPM	P_c [psi]
25	1 100
31	1 600
41	2 600

SOLUCION:

Correspondiente al inciso a)

I) Para definir la curva $HP_{m\acute{a}x.}$; se calcula Q_m para determinar el punto $P(Q_m, P_m)$ por donde pasa la curva HP_m .

$$HP_m = \frac{P_m [\text{psia}] Q_m [\text{gpm}]}{1\ 714}$$

$$\therefore Q_m [\text{gpm}] = \frac{1\ 714\ HP_m}{P_m [\text{psia}]} = \frac{1\ 714 (1\ 435\ \text{HP})}{3\ 014.7\ \text{psia}}$$

$$Q = 820\ \text{gpm} \Rightarrow \boxed{P(820\ \text{gpm}, 3\ 014.7\ \text{psia})}$$

II) Para definir la familia de curvas P_c ; se determina la serie de puntos (Q_a, P_{c_i}) por donde pasan las curvas P_c . Para esto, primeramente se hace el cálculo de las pérdidas de presión en el sistema de circulación (excluy. barrena) (P_c) para $Q = Q_a$, en cada una de las profundidades asignadas para el diseño del programa:

Proceso:

1.- Se determina Q_a :

$$V_a \text{ mín.} = 120\ \text{ft/min}$$

$$D = \phi_{\text{aguj.}} = 9\ 7/8\ \text{in}$$

$$d = \phi_{\text{e tub. perf.}} = 4\ 1/2\ \text{in}$$

$$\left. \begin{array}{l} D \\ d \end{array} \right\} D^2 - d^2 = 77.26\ \text{in}^2$$

Mediante la gráfica VIII-2, se obtiene $Q_a = 380\ \text{gpm}$

2.- Para obtener P_{cs} :

$$P_{fl. \text{ perf.}} = 10.3 \text{ vpg}$$

Conexs. superf.: caso núm. III

$$Q = Q_a = 380 \text{ gpm}$$

Mediante el nomograma 3 (anexo), se obtiene $P = 200 \text{ psi}/10^3 \text{ ft}$

$$P_{cs} = (\text{fact. según tipo conexs.})P = (0.15) 200 \text{ psi}/10^3 \text{ ft}$$

$$P_{cs} = 30 \text{ psi} = \text{cte. para todas las profs.}$$

3.- Para obtener P_{it} :

$$P_{fl. \text{ perf.}} = 10.3 \text{ vpg}$$

$$d = \emptyset_e \text{ tub. perf.} = 4 \frac{1}{2} \text{ in}$$

$$Q = Q_a = 380 \text{ gpm}$$

Mediante el nomograma 3 (anexo), se obtiene $P = 59 \text{ psi}/10^3 \text{ ft}$

Por lo tanto:

$$\text{para } 2 \text{ 000 ft: } P_{it} = 59 \text{ psi}/10^3 \text{ ft } (1.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 88.5 \text{ psi}$$

$$\text{para } 5 \text{ 000 ft: } P_{it} = 59 \text{ psi}/10^3 \text{ ft } (4.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 265.5 \text{ psi}$$

$$\text{para } 8 \text{ 000 ft: } P_{it} = 59 \text{ psi}/10^3 \text{ ft } (7.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 442.5 \text{ psi}$$

$$\text{para } 10 \text{ 000 ft: } P_{it} = 59 \text{ psi}/10^3 \text{ ft } (9.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 560.5 \text{ psi}$$

$$\text{para } 15 \text{ 000 ft: } P_{it} = 59 \text{ psi}/10^3 \text{ ft } (14.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 855.5 \text{ psi}$$

4.- Para obtener P_{id} :

$$P_{fl. \text{ perf.}} = 10.3 \text{ vpg}$$

$$\emptyset_i \text{ drill collars} = 2 \frac{3}{4} \text{ in}$$

$$Q = Q_a = 380 \text{ gpm}$$

Mediante el nomograma 3 (anexo), se obtiene $P = 290 \text{ psi}/10^3 \text{ ft}$

$$P_{id} = (\text{long. drill collars} \times 10^{-3})P = (0.5 \times 10^3 \text{ ft})290 \text{ psi}/10^3 \text{ ft}$$

$$P_{id} = 145 \text{ psi} = \text{cte. para todas las profs.}$$

5.- Para obtener P_{le} :

$$Y_p = 14 \text{ lb} / 100 \text{ ft}^2$$

$$D = \emptyset_{\text{aguaj.}} = 9 \frac{7}{8} \text{ in}$$

$$d = \emptyset_e \text{ tub. perf.} = 4 \frac{1}{2} \text{ in}$$

$$D - d = 5.37 \text{ in}$$

Mediante el nomograma 4 (anexo), se obtiene $P = 11.5 \text{ psi}/10^3 \text{ ft}$

Por lo tanto:

para 2 000 ft: $P_{le} = 11.5 \text{ psi}/10^3 \text{ ft} (1.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 17.25 \text{ psi}$

para 5 000 ft: $P_{le} = 11.5 \text{ psi}/10^3 \text{ ft} (4.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 51.75 \text{ psi}$

para 8 000 ft: $P_{le} = 11.5 \text{ psi}/10^3 \text{ ft} (7.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 86.25 \text{ psi}$

para 10 000 ft: $P_{le} = 11.5 \text{ psi}/10^3 \text{ ft} (9.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 109.25 \text{ psi}$

para 15 000 ft: $P_{le} = 11.5 \text{ psi}/10^3 \text{ ft} (14.5 \times 10^3 \text{ ft}) = 166.75 \text{ psi}$

6.- Para obtener P_{2e} :

$\mu_o = 40 \text{ cp}$

$D = \phi_{\text{aguj.}} = 9 \frac{7}{8} \text{ in}$

$d = \phi_{\text{e tub. perf.}} = 4 \frac{1}{2} \text{ in}$

$V_a = V_{a \text{ mín.}} = 120 \text{ ft/min} = 2 \text{ ft/seg}$

$(D - d)^2 = 28.84 \text{ in}^2$

Mediante el nomograma 5 (anexo), se obtiene $P = 1.85 \text{ psi}/10^3 \text{ ft}$

$P_{2e} = (\text{long. drill collars} \times 10^{-3})P = (0.5 \times 10^3 \text{ ft})1.85 \text{ psi}/10^3 \text{ ft}$

$P_{2e} = 0.925 \text{ psi} = \text{cte. para todas las profs.}$

7.- Finalmente, para cada profundidad:

$P_c = P_{cs} + P_{it} + P_{id} + P_{le} + P_{2e}$

Por lo tanto:

para 2 000 ft: $P_c = (30 + 88.5 + 145 + 17.25 + 0.925) \text{ psi} = 281.7 \text{ psi}$
 $= 296.4 \text{ psia}$

para 5 000 ft: $P_c = (30 + 265.5 + 145 + 51.75 + 0.925) \text{ psi} = 493.2 \text{ psi}$
 $= 507.9 \text{ psia}$

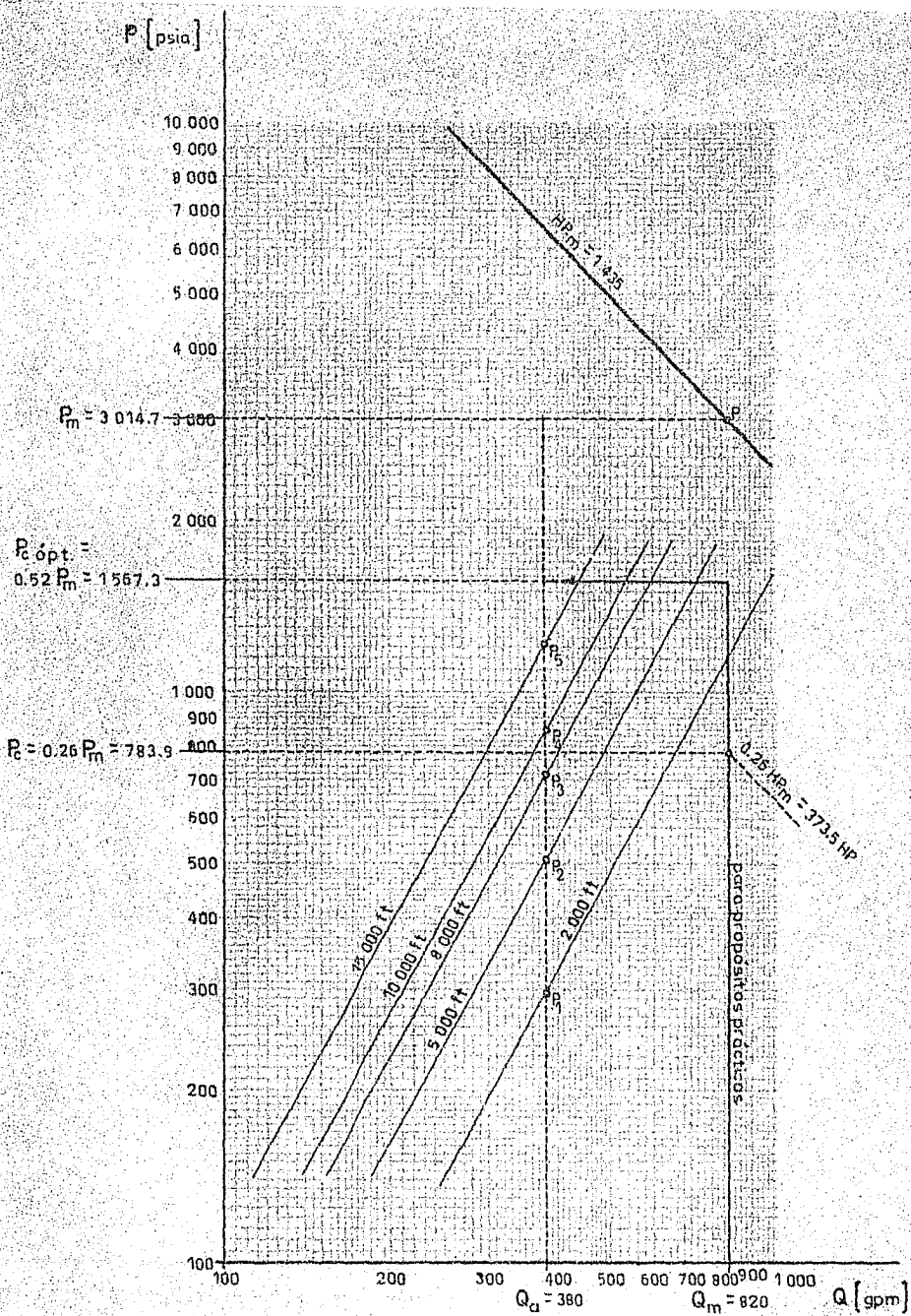
para 8 000 ft: $P_c = (30 + 442.5 + 145 + 86.25 + 0.925) \text{ psi} = 704.7 \text{ psi}$
 $= 719.4 \text{ psia}$

para 10 000 ft: $P_c = (30 + 560.5 + 145 + 109.25 + 0.925) \text{ psi} = 845.7 \text{ psi}$
 $= 860.4 \text{ psia}$

para 15 000 ft: $P_c = (30 + 855.5 + 145 + 166.75 + 0.925) \text{ psi} = 1198.2 \text{ psi}$
 $= 1212.9 \text{ psia}$

Con los valores anteriores de P_c y el de Q_a , se obtienen los siguientes puntos:

para 2 000 ft: P_1 (380 gpm, 296.4 psia)
para 5 000 ft: P_2 (380 gpm, 507.9 psia)
para 8 000 ft: P_3 (380 gpm, 719.4 psia)
para 10 000 ft: P_4 (380 gpm, 860.4 psia)
para 15 000 ft: P_5 (380 gpm, 1 212.9 psia)



Gráfica del programa hidráulico.

Los resultados obtenidos de la gráfica y que constituyen el diseño del programa hidráulico, son los siguientes:

Prof. [ft]	P_c ónt. [psia]	P_b ónt. [psia]	$Q_{\text{ónt.}}$ [gpm]	$\varnothing_{\text{tob.}}$
2 000	1 160	1 854.7	820	3-1"/2
5 000	1 567.3	1 447.4	715	3-1"/2
8 000	1 567.3	1 447.4	593	2-15"/32, 1-7"/16
10 000	1 567.3	1 447.4	535	2-7"/16, 1-13"/32
15 000	1 567.3	1 447.4	440	2-13"/32, 1-3"/8

Nota.- Los $\varnothing_{\text{tob.}}$ se obtienen mediante el nomograma VI-1.

Correspondiente al inciso b)

I) Para definir la línea $Q_{m\text{áx.}}$ (Q_m):

Secc.1 { Dos bombas D-1650 en paralelo
Long. embolada (stroke de operación) = 18 in
Máx. SPM (máx. strokes/min) = 45 SPM/bomba
Líner bomba = 6 3/4 in

Mediante la gráfica VIII-1B, se obtiene $Q_{m\text{áx.}}/\text{bomba} = 410 \text{ gpm}$

$$Q_{m\text{áx.}} = Q_m = (\text{núm. bombas}) Q_{m\text{áx.}}/\text{bomba} = (2)410 \text{ gpm}$$

$$Q_m = 820 \text{ gpm}$$

II) Para definir la línea $Q_{a\text{mín.}}$ (Q_a):

Secc.2 { $\phi_{\text{aguj.}} = 9 \frac{7}{8} \text{ in}$
 $\phi_{\text{e tub. perf.}} = 4 \frac{1}{2} \text{ in}$
 $V_a \text{ mín.} = 120 \text{ ft/min}$

Mediante la gráfica VIII-2, se obtiene $Q_a = 380 \text{ gpm}$

$$Q_a = 380 \text{ gpm}$$

III) Para definir las líneas $P_c \text{ ópt.}$ y $P_b \text{ ópt.}$:

Secc.3 { $P_m = 3 \text{ 000 psi}$

$$\text{Para } F_b \text{ máx. : } P_c \text{ ópt.} = 0.52 P_m \Rightarrow P_b \text{ ópt.} = 0.48 P_m$$

$$\therefore P_c \text{ ópt.} = 0.52(3 \text{ 000 psi}) = 1 \text{ 560 psi}$$

$$P_c \text{ ópt.} = 1 \text{ 560 psi} , \Rightarrow P_b \text{ ópt.} = 1 \text{ 440 psi}$$

IV) Para definir $f(P_c, Q)$: se determinan las coordenadas --

(P_{c_i}, Q_i) de tres puntos que pertenezcan a la función:

Proceso:

1.- Se obtienen tres valores del gasto, que corresponden a diferentes ritmos de circulación en la profundidad dada --
(11 700 ft).

Líner bomba = 6 3/4 in (Secc.1)

Secc.4" { $SPM_1 = 25$
(los 3 vals. SPM) $SPM_2 = 31$
 $SPM_3 = 41$

Mediante la gráfica VIII-1B, se obtiene:

$$Q_1 = 230 \text{ gpm} ; Q_2 = 283 \text{ gpm} ; Q_3 = 375 \text{ gpm}$$

2.- Se obtienen los valores de P_b correspondientes a los tres gastos anteriores:

$$Q_1 = 230 \text{ gpm}$$

$$Q_2 = 283 \text{ gpm}$$

$$Q_3 = 375 \text{ gpm}$$

Secc.4' { P fl. perf. = 10.3 ppg
 Jets (tobs.) de la barrena en el agujero: 3-11"/32

Mediante la secc. izq. de la gráf. de trabajo, se obtiene:

$$P_{b_1} = 740 \text{ psi} ; P_{b_2} = 1\ 050 \text{ psi} ; P_{b_3} = 1\ 800 \text{ psi}$$

Finalmente:

3.- Se obtienen los valores de P_c correspondientes a los tres gastos:

$$P_{b_1} = 740 \text{ psi}$$

$$P_{b_2} = 1\ 050 \text{ psi}$$

$$P_{b_3} = 1\ 800 \text{ psi}$$

$$P_{s_1} = 1\ 100' \text{ psi}$$

$$P_{s_2} = 1\ 600 \text{ psi}$$

$$P_{s_3} = 2\ 600 \text{ psi}$$

Secc.4" (los 3 vats. SPM)

$$\text{Se tiene: } P_s = P_c + P_b$$

$$\therefore P_c = P_s - P_b \quad , \Rightarrow \quad P_{c_i} = P_{s_i} - P_{b_i}$$

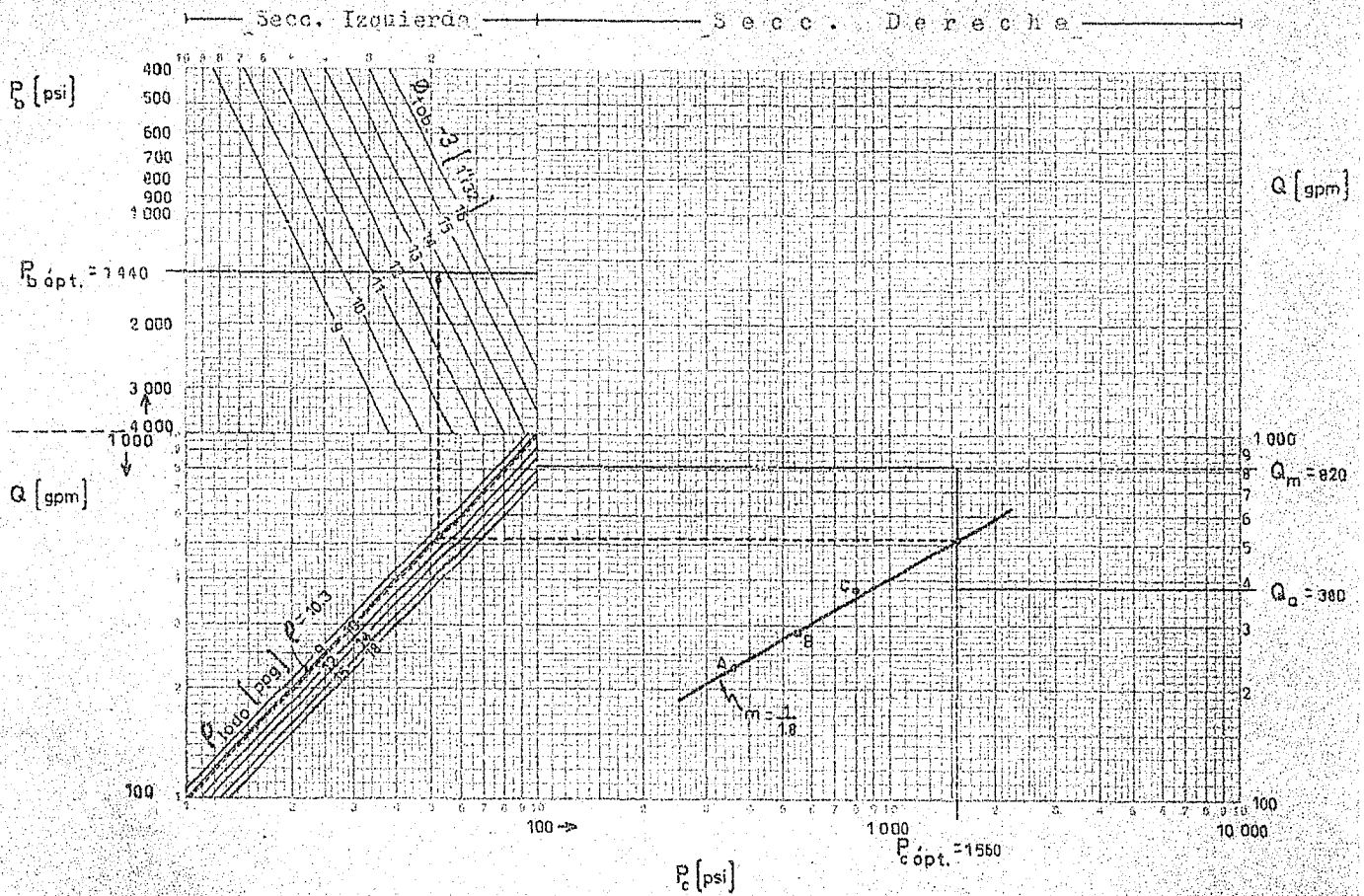
$$\text{luego: } P_{c_1} = 1\ 100 \text{ psi} - 740 \text{ psi} = 360 \text{ psi}$$

$$P_{c_2} = 1\ 600 \text{ psi} - 1\ 050 \text{ psi} = 550 \text{ psi}$$

$$P_{c_3} = 2\ 600 \text{ psi} - 1\ 800 \text{ psi} = 800 \text{ psi}$$

Con los valores anteriores P_{c_i} y sus correspondientes Q_i , se obtienen los tres puntos:

A(360 psi, 230 gpm)
B(550 psi, 283 gpm)
C(800 psi, 375 gpm)



Gráfica de Trabajo.

Los resultados obtenidos de la gráfica son los siguientes:

Prof. [ft]	P_c ópt. [psi]	P_b ópt. [psi]	$Q_{\text{ópt.}}$ [gpm]	$\phi_{\text{tob.}}$
11 700	1 560	1 440	510	2-7"/16, 1-13"/32

Nota.- Los resultados anteriores implican que el método corrige el $\phi_{\text{tob.}}$ aún cuando se haya equivocado el diámetro anterior de las mismas, al estar operando en el intervalo Q_m a Q_E (con una relación -

$\frac{P_c \text{ ópt.}}{P_m} = \text{cte.}$), ya que se supone que en dicho intervalo va decremen-

tándose el tamaño de las tobs. con el incremento de la profundidad.

Además el dato de la profundidad que se tiene hasta ese momento, no es necesario para hacer las determinaciones del $Q_{\text{ópt.}}$ y del $\phi_{\text{tob.}}$ de la próxima barrena que deberá introducirse, sin embargo es conveniente anotarla ó determinarla para mayor facilidad del manejo del programa.

X.- CONCLUSIONES

-- Tanto para máxima potencia hidráulica en la barrena como para máxima fuerza de impacto del chorro de la misma, los tamaños de las toberas en la barrena pueden ser seleccionados en todas las profundidades, de tal manera que se utilice al máximo la P_0 de que se dispone en los valores de gasto especificados.

-- Se considera conveniente, de ser posible se hagan ajustes al programa hidráulico mediante el cambio adecuado de los liners de la bomba; de esta manera se tendría una nueva P_m de operación que puede propiciar una perforación más rápida. Este ajuste puede ser hecho rápidamente usando cualquiera de los dos métodos gráficos expuestos en este trabajo.

-- La importancia de operar con presiones altas para máximos efectos en la barrena, es evidente no solo porque implica el uso de mayores presiones aplicadas en ella (P_b), sino además porque el mantenimiento de las bombas es un problema muy serio bajo tales condiciones, ya que se requiere en forma regular del cambio de piezas del equipo con el objeto de habilitarlo para las condiciones máximas de operación.

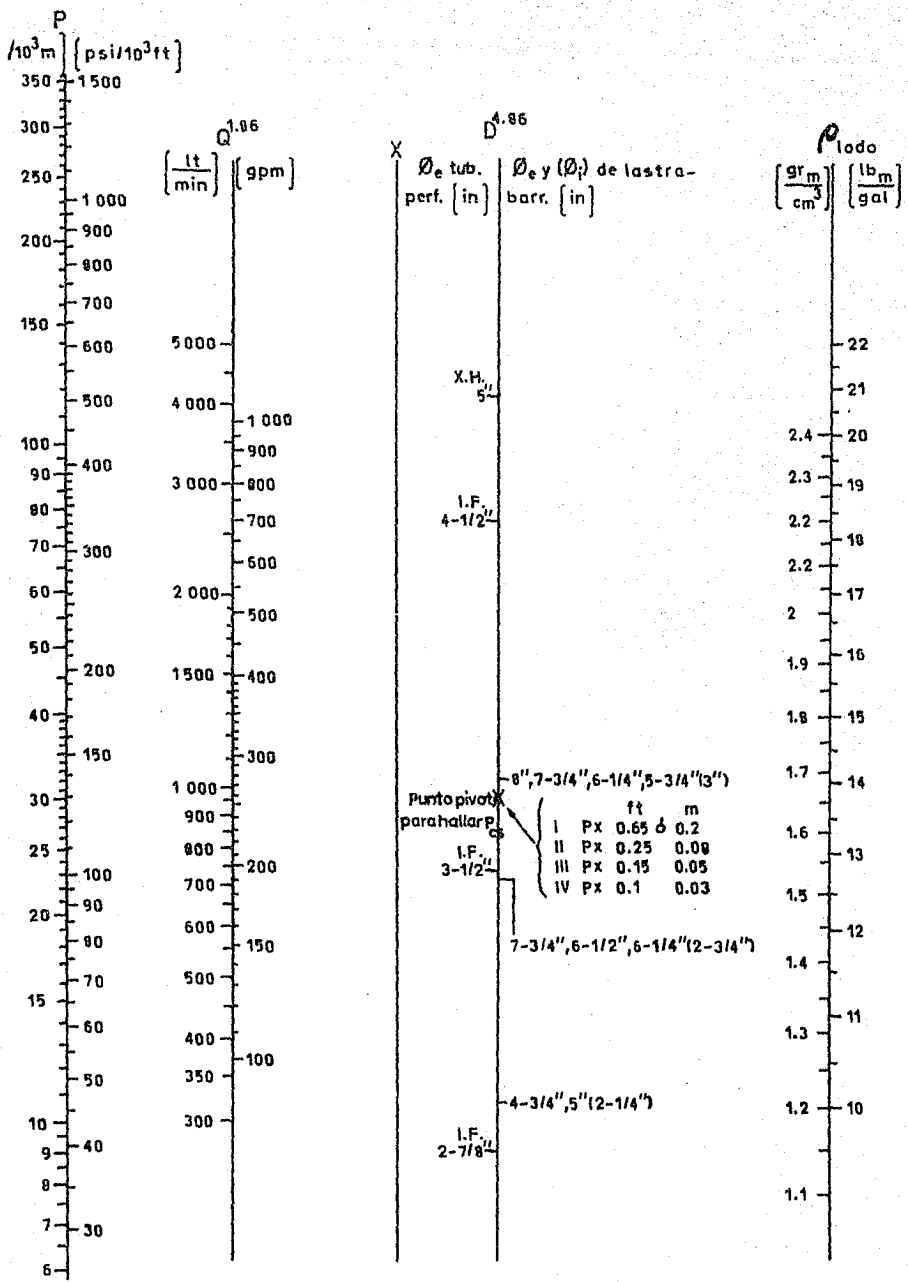
Por lo tanto los costos de operación en la realización de un programa hidráulico tendrán necesariamente que considerarse, y el análisis económico comparativo de los diferentes criterios de optimización será el que determine el programa más adecuado.

-- El nuevo método práctico trata de eliminar posibles errores del diseño de un programa hidráulico, aprovechando datos simultáneos a la misma perforación del pozo; por lo tanto el diseño es parcial conforme va avanzando la operación, a diferencia del otro método en que se programa desde un principio para todas las profundidades del pozo a perforar.

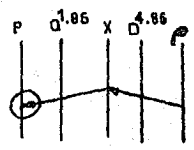
A P E N D I C E

COMBINACION DE CONEXIONES SUPERFICIALES

	CASO I		CASO II		CASO III		CASO IV	
	D.I. longitud equivalente		D.I. Longitud equivalente		D.I Longitud equivalente		D.I. Long. equivalente	
Tub.vert.	3"	x40'(12m)	3-1/2"x40'(12m)	4"	x45'(14m)	4"x45'(14m)		
Manguera	2"	x45'(14m)	2-1/2"x55'(17m)	3"	x55'(17m)	3"x55'(17m)		
Unión girat. y C. de genso	2"	x20'(6 m)	2-1/2"x25'(8 m)	2-1/2"x25'(8 m)	3"x30'(9 m)			
Flecha	2-1/4"x40'(12m)		3-1/4"x40'(12m)	3-1/4"x40'(12m)	4"x40'(12m)			
Long.equivalente - de 3"en m		200		80		50		30



NOMOGRAMA 3.- Pérdidas de presión en el equipo superf., tub. de perf. y lastrabarrenas.



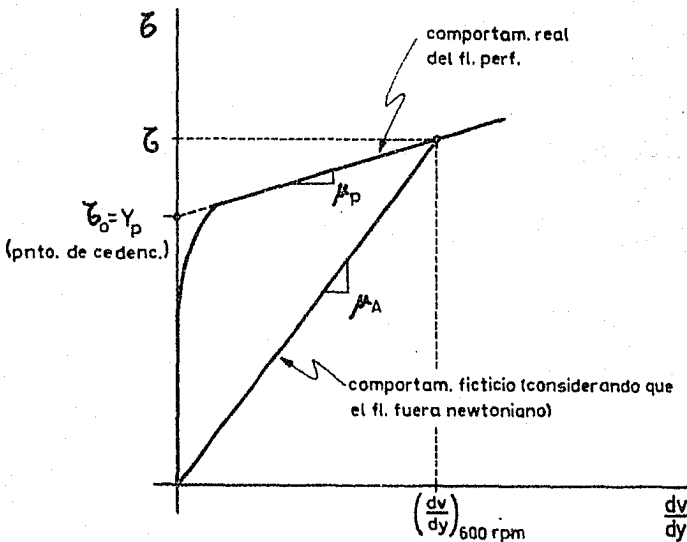
Análisis de las características de viscosidad para un fluido de perforación.-

-- Viscosidad plástica (μ_p).- Se considera suponiendo el comportamiento real de los fluidos de perforación, similar al de un fluido elástico ideal y además, solamente en el rango que permanece constante la viscosidad plástica para éstos.

-- Viscosidad aparente (μ_A).- Es la viscosidad dinám. o abs., que tendría el fluido de perforación si fuera newtoniano, en un punto $(\frac{dv}{dy}, \tau)$ de su comportamiento real. En la Ind. Petrolera se ha establecido un standard para dicho punto y, consiste en la lectura de la viscosidad que proporciona el viscosímetro Fann a 600 rpm, es de cir:

$$\left(\frac{dv}{dy}\right)_{600 \text{ rpm}} \Rightarrow \mu_A$$

Concepto gráfico de μ_p y μ_A .



τ --- tensión ó esfuerzo cort., ó bien, presión que origina flujo
 $\frac{dv}{dy}$ --- vel. de corte, ó bien, vel. de flujo

Nota.- Como puede observarse, la viscosidad plástica (μ_p) y la viscosidad aparente (μ_A) son conceptos mucho muy diferentes, y no es posible establecer comparación alguna entre ambas, no obstante que para $\mu_p = \text{cte.}$, μ_p es parec. a la visc. dinám. o abs. ($\mu = \text{cte.}$), sin embargo no lo es, a diferencia de μ_A .

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Kenneth F. Scott.- A New Practical Approach to Rotary Drilling Hydraulics.- API Paper No. SPE 3 530 (Oct. 3-6, 1971).
- 2.- Preston Moore.- Drilling Operations Manual. (Hydraulics).- Oklahoma University (1970).
- 3.- H. A. Kendall and W. C. Goins.- Design and Operation of Jet Bit Programs for Maximum Hydraulic Horsepower, Impact Force or Jet Velocity.- API Paper present at 34th Annual Fall Meeting of SPE, Dallas, Tex. (Oct. 4-7, 1959).
- 4.- Preston Moore.- Drilling Fluids. (Hydraulics in rotary drilling).- Oklahoma University (1970).
- 5.- Antonio Reyes T.- Aplicación del Programa Hidráulico a la Perforación de pozos Petroleros.- Tesis U.N.A.M., Fac. de Ingeniería, (1971).
- 6.- Eugenio Alvarez H.- Revista Ingeniería Petrolera. (Hidráulica aplicada a los pozos en perforación).- (Agosto, 1970).
- 7.- Mc Gray and Cole.- Tecnología de la Perforación de Pozos Petroleros.- 2a Edic. (Oct., 1963).
- 8.- J. L. Meriam.- Dynamics.- 2a Edic. (Jul., 1966).