



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

7
2 y

**“PROCEDIMIENTO MEJORADO DE DISEÑO
DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTRICO
SUMERGIDO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A:
LUIS JORGE CARRANZA BECERRA



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

" PROCEDIMIENTO MEJORADO DE DISEÑO

DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTRICO SU -

MERGIDO "

INDICE

CAPITULO	RESUMEN	3
I	INTRODUCCION	4
II	INFORMACION QUE SE REQUIERE PARA EL DISEÑO DE UNA UNIDAD DE BOMBEO ELECTRICO SUMERGIDO	9
	(Dimensiones físicas del pozo; Datos de producción del pozo; Propiedades físicas de los fluidos del pozo; Información que no pertenece al pozo, pero es importante en el diseño de la unidad de bombeo eléctrico).	
III	ANTECEDENTES REQUERIDOS PARA REALIZAR EL DISEÑO.	16

	CONCEPTOS IMPORTANTES PARA	16
	EL DISEÑO (Curvas de comporta - miento de la bomba; Número de eta - pas de la bomba;Potencia del motor, Carga dinámica total)	
	CONSIDERACIONES PARA EL DISE - ÑO DE APAREJOS DE BOMBEO -	
	ELECTRICO	24
IV	PROCEDIMIENTO DE CALCULO -	32
	SECUENCIA DE CALCULO	41
	RESUMEN DE LA SECUENCIA - DE CALCULO	63
V	APLICACION DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	66
	RESUMEN DE RESULTADOS	95
VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDA - CIONES.	96
	REFERENCIAS	98

RESUMEN

Hasta la fecha en el diseño de aparejos de bombeo eléctrico se han considerado los efectos del gas libre en la tubería de producción, con lo que se logró reducir considerablemente el número de etapas requerido en la bomba.

En el procedimiento de cálculo que se presenta, se considera la determinación previa de la profundidad de colocación de la bomba y contempla la reducción del volumen de fluidos en el interior de la bomba desde la presión de succión hasta la presión de descarga, lográndose diseñar una bomba constituida por dos o más secciones de etapas que manejan con máxima eficiencia el volumen de fluidos variable en su interior, con lo que también se reduce el número de etapas requerido en la bomba y consecuentemente la potencia del motor, para pozos petroleros que producen simultáneamente aceite, gas y agua. (8)

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

Los sistemas artificiales de producción cobran especial importancia cuando el ritmo de producción de los campos petroleros entra en su fase de declinación y su combinación con los métodos de recuperación secundaria es ventajosa, toda vez que la recuperación de hidrocarburos es a corto plazo y su demanda se incrementa conforme los métodos de mantenimiento de presión, como la inyección de agua, son esenciales para extraer hidrocarburos del yacimiento más eficientemente. Uno de estos sistemas es el de bombeo eléctrico, que se aplica exitosamente cuando existen condiciones propicias para producir altos volúmenes de líquidos, con bajas relaciones gas-líquido.

El sistema de bombeo eléctrico opera sumergido en el fluido del pozo y suspendido en el extremo inferior de -

la tubería de producción, generalmente por arriba de la zona de disparos. Los componentes del equipo de bombeo eléctrico son:

A) SUBSUPERFICIALES.

- 1.- Motor eléctrico.
- 2.- Protector o sección sellante.
- 3.- Bomba centrífuga sumergible.
- 4.- Cable.
- 5.- Separador de gas.

B) SUPERFICIALES.

- 1.- Cabezal (bola colgadora).
- 2.- Tablero de control.
- 3.- Cable superficial.
- 4.- Transformador.
- 5.- Caja de unión.

En la figura I.1 se muestra la forma en que queda instalado un aparejo de bombeo eléctrico en el pozo. La integración de todos estos componentes es indispensable, ya que cada uno ejecuta una función esencial en el sistema para obtener en la superficie el gasto de líquido deseado, manteniendo la presión necesaria en la boca del pozo.

El objetivo de este trabajo es presentar un procedimiento para diseñar aparejos de bombeo eléctrico para pozos que producen simultáneamente aceite, gas y agua. La solución consiste en determinar las presiones de succión y de descarga de la bomba, mediante una correlación de flujo multifásico en tuberías verticales y con la diferencia de dichas presiones, establecer el incremento de presión que la bomba debe suministrar a los fluidos del pozo, para obtener en la superficie el gasto deseado a la presión requerida.

Los cálculos se realizan tomando en cuenta que a la profundidad de colocación de la bomba, existe una cantidad

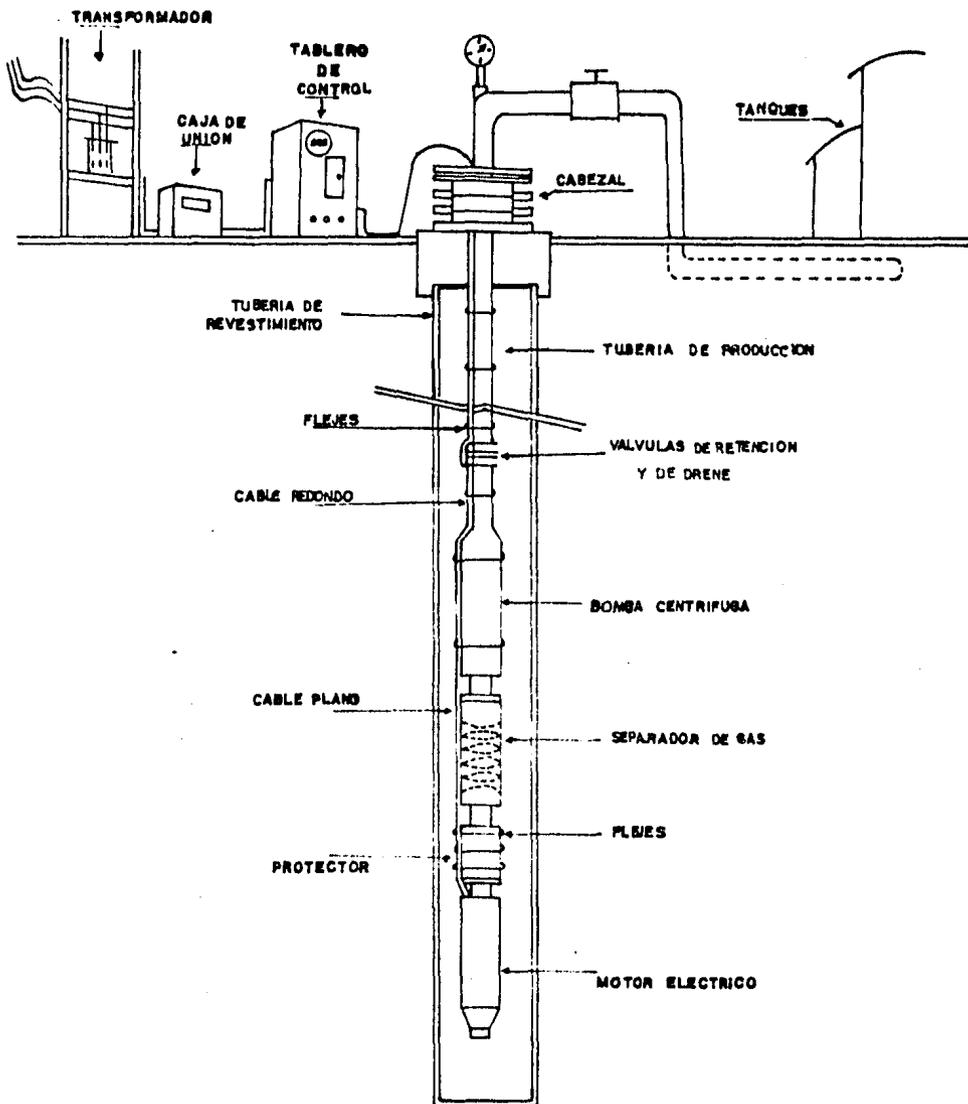


FIGURA I.1.-DISTRIBUCION DE LOS COMPONENTES DE UN APAREJO DE BOMBEO ELECTRICO INSTALADO EN UN POZO PETROLERO

de gas libre que ocupa un volúmen, del cual todo o una parte, pasa al interior de la bomba. Para dimensionar la bomba, se considera que el volúmen de líquido y gas varía constantemente desde la presión de succión hasta la de descarga, lo que permite diseñar la bomba de una, dos o más secciones de las cuales cada una maneja diferentes volúmenes de fluidos, con máxima eficiencia.

Tomar en cuenta las consideraciones mencionadas que implican los efectos del gas libre en la tubería de producción y en el interior de la bomba, da como resultado que se reduzcan considerablemente el número de etapas de la bomba y la potencia requerida del motor para impulsarla.

Se incluye un ejemplo de aplicación, a fin de ilustrar el procedimiento para dimensionar y seleccionar la bomba y el motor apropiados del aparejo de bombeo eléctrico para pozos que producen simultáneamente aceite, gas y agua.

C A P I T U L O II

INFORMACION QUE SE REQUIERE PARA EL DISE-

ÑO DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTRICO SU - -

MERGIDO.

La información para diseñar unidades de bombeo eléctrico sumergido debe ser suficientemente confiable, de tal manera que se pueda asegurar que el aparejo sea del tamaño apropiado y que permita obtener el incremento de presión necesario para elevar los fluidos del fondo a la superficie, manteniendo la presión requerida en la boca del pozo.

Esta información cae dentro de las 4 categorías generales siguientes:

1. - Dimensiones Físicas del Pozo.
 - A) Diámetros de tuberías de revestimiento y de Producción.

El tamaño y peso de la tubería de revestimiento es -

muy importante en el diseño de una instalación de bombeo eléctrico, ya que controla el diámetro máximo de la bomba y el motor que pueden introducirse en el pozo. Generalmente los costos inicial y de operación, resultarán menores, cuando los diámetros de bomba y motor sean más grandes.

El tamaño de la tubería de producción depende del gasto a producir y esta relacionado con el diámetro de la bomba, es decir, mayor diámetro de bomba, mayor diámetro de tubería de producción.

B) Profundidad total del pozo y profundidad media del intervalo disparado.

La profundidad total del pozo y la de los intervalos disparados, determinan respectivamente la máxima profundidad posible de colocación de la bomba y la máxima profundidad a la que pueda colocarse la bomba sin necesitar un motor recubierto. Si las perforaciones quedan arriba del

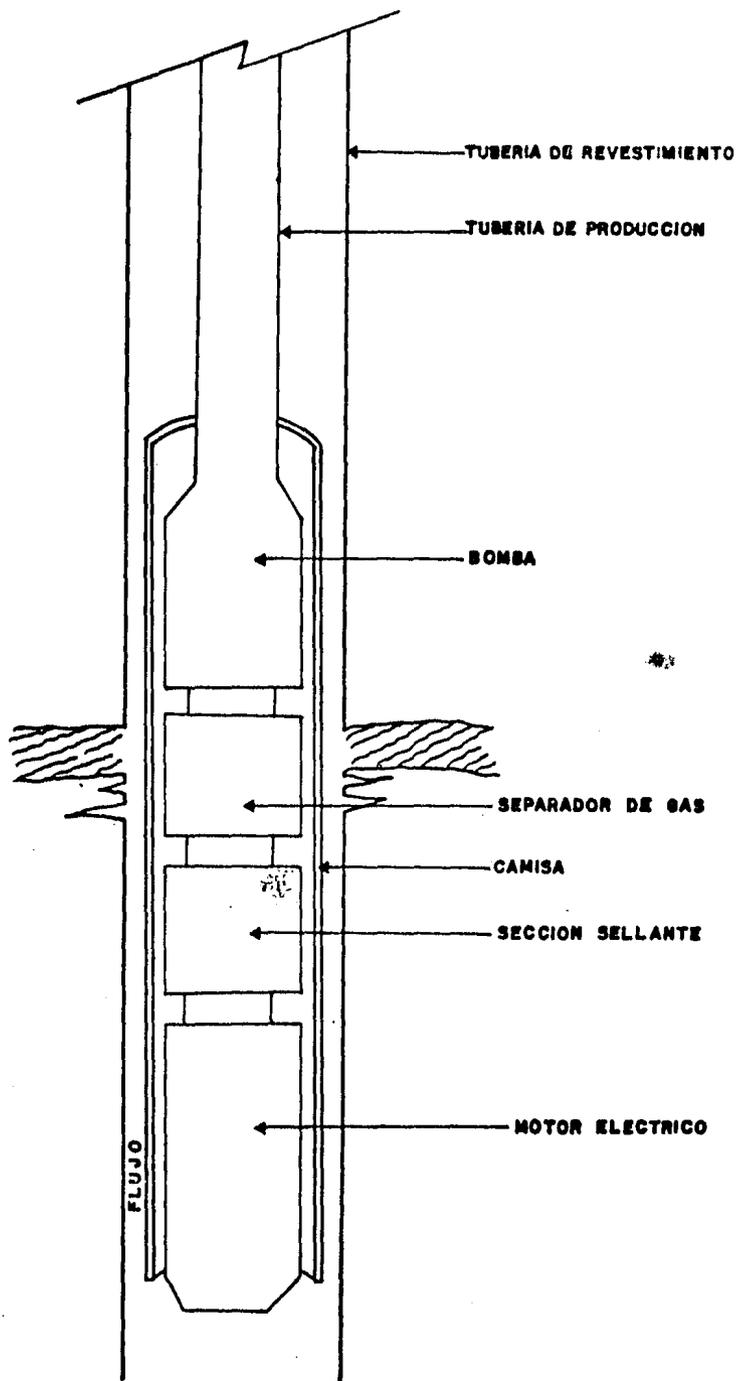


FIGURA No. II. 1: INSTALACION DE UNA UNIDAD DE BOMBEO ELECTRICO CON UNA CAMISA PARA OBLIGAR AL FLUJO A PASAR EXTERNAMENTE POR EL MOTOR, EN UN POZO

motor es necesario usar una camisa para obligar al flujo a que pase externamente por el motor y así lo enfrié (Fig. - II. 1).

2.- Datos de Producción del Pozo.

El índice de productividad del pozo, establece su capacidad máxima de producción y determina la presión de -- fondo fluyendo para cualquier gasto menor que el máximo.

El comportamiento de flujo generalmente se calcula con la presión estática a una profundidad conocida (P_{ws}) y la presión de fondo fluyendo (P_{wf}) correspondiente a un -- gasto conocido (q_o). El índice de productividad (J) es --- constante cuando éste produce con una presión superior a -- la de burbujeo, ya que fluye una sola fase y esta dado por la siguiente relación:

$$J = \frac{q_o}{P_{ws} - P_{wf}}$$

Para evaluar la productividad de un pozo que produce con flujo por abajo de la presión de burbujeo, Vogel (4)

propuso la siguiente ecuación empírica para relacionar - -

q_o con P_{wf}:

$$\frac{q_o}{q_{max.}} = 1.0 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^{-0.8} \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2$$

3.- Propiedades Físicas de los Fluidos del Pozo .

Las densidades específicas y porcentajes de los líquidos y gas que componen la mezcla que se bombea, determinan la potencia del motor. Por lo tanto la densidad específica del agua y del gas, la densidad API del aceite, el porcentaje del agua y relación gas-líquido son datos necesarios.

Además si la viscosidad esta disponible, es necesaria ya que las curvas publicadas de comportamiento de la bomba están basadas en prueba con agua.

La temperatura del fluido cerca del fondo y en la cabeza del pozo son necesarias particularmente si hay gas presente, ya que la cantidad de gas en solución y el volumen de gas libre son sensibles a la temperatura y cambian a lo-

largo del pozo y de la tubería de producción. La temperatura afecta la selección del cable y la vida efectiva del motor; por ejemplo, por cada 18° F de aumento de temperatura por arriba del rango especificado de aislamiento del motor, su vida se reduce en un 50%.

Los datos PVT en forma de presión, relación gas-a-ceite en solución y factor de volúmen de la formación son necesarios si hay gas presente. Si para un caso en particular se desconocen los datos PVT pueden aproximarse mediante correlaciones estándar.

4.- Información que no pertenece al Pozo, pero es importante en el Diseño de la Unidad de Bombeo Eléctrico.

La Información que no pertenece al pozo pero es necesaria a fin de impulsar a la producción a su destino final es: fuente de potencia, voltaje y ciclaje disponibles en la superficie. El voltaje disponible del suministro de potencia, -

determina el tamaño de los transformadores y otros componentes eléctricos. Si es de 50 o 60 ciclos, establece la velocidad y rendimiento de la bomba.

El voltaje superficial requerido se define como la carga de voltaje necesaria en la superficie para satisfacer el voltaje del motor utilizado, mas las pérdidas de voltaje a lo largo del cable y a través de otros componentes eléctricos en el sistema.

El tamaño de la tubería de producción generalmente está relacionado con el diámetro de la bomba y determina las pérdidas de presión por fricción que deben incluirse en la carga dinámica total.

El tamaño y tipo de roscas de la tubería de producción deben conocerse a fin de que la válvula de contrapresión, la válvula de purga, la extensión de la bomba y el cabezal del pozo puedan seleccionarse.

C A P I T U L O III

ANTECEDENTES REQUERIDOS PARA REALIZAR - EL DISEÑO.

1) CONCEPTOS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO

Los antecedentes requeridos para realizar el diseño, de lo que es necesario tener una idea clara, ya que se van a utilizar para determinar el tamaño adecuado de unidades de bombeo eléctrico sumergibles, son los siguientes conceptos:

-Curvas de Comportamiento de la Bomba.

Las curvas de comportamiento de la bomba, las obtiene el fabricante realizando la prueba práctica de cada bomba, haciéndola trabajar a velocidad constante y estrangulando la descarga⁽³⁾. Durante la prueba se miden en varios puntos; el gasto, el incremento de presión a través de la bomba y la potencia al freno. El incremento de presión se convierte a carga y se calcula la eficiencia total de la bomba

ba. Con base en esos datos se dibuja la curva de carga, la de potencia al freno y la de eficiencia en función del gasto manejado (Fig. III. 1).

Las curvas características de la bomba publicadas, están referidas a una velocidad fija en revoluciones por minuto (rpm), utilizando como fluido de prueba agua dulce de densidad específica igual a 1.0 y viscosidad de 1.0 cp. Sin embargo, las bombas se usan en la práctica, para bombear líquidos de densidad específica y viscosidad diferentes, pudiendo operar a diferentes rpm cuando cambia el ciclaje de la corriente con que se alimenta el motor. Por lo tanto, es necesario predecir el comportamiento de la bomba bajo condiciones reales de operación, considerando el efecto del cambio de velocidad, el efecto de la densidad específica y el efecto de cambios de diámetro de impulsor. (5)

Las gráficas de curvas características las proporcionan los fabricantes de las bombas. Se utilizan escogien - -

Curvas Características de la Bomba

100 Etapas DN 3000-60 Hz

Serie 400-3500 RPM

T.R. Mínimo

5.1/2" D.E.

TRW REDA Inc.

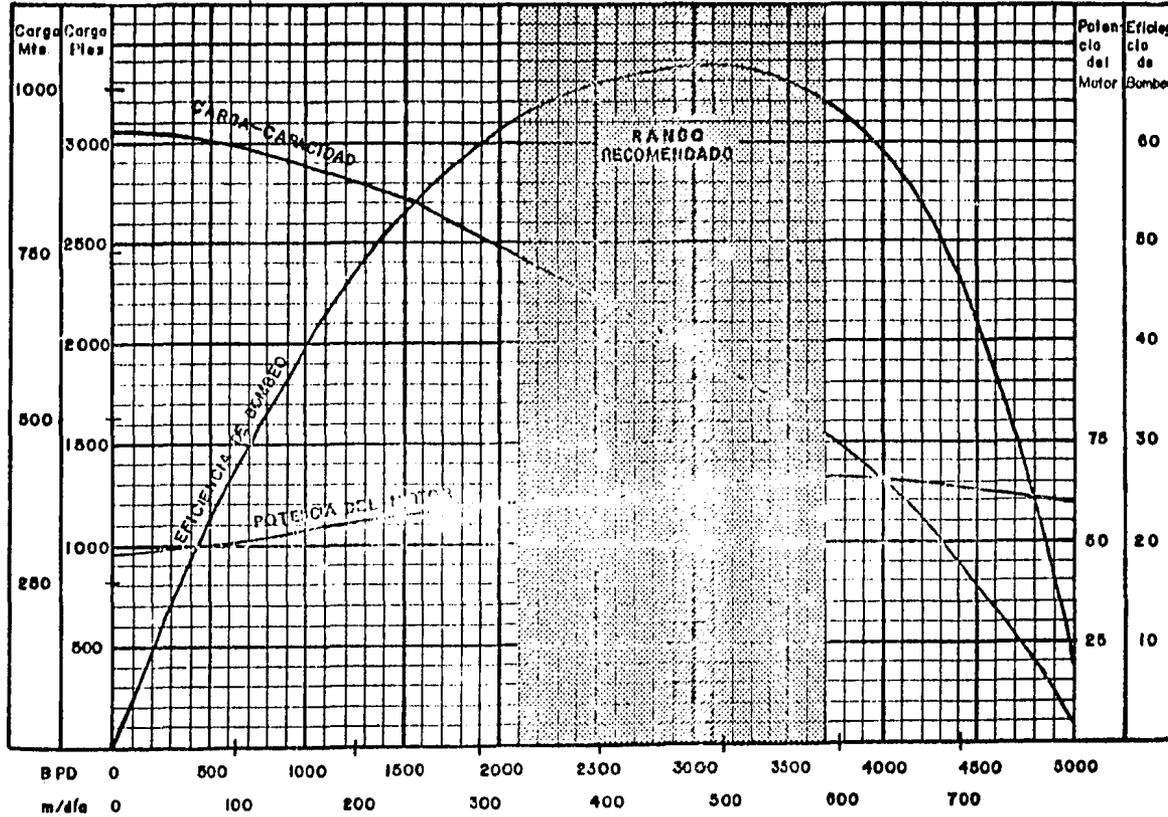


FIGURA III.1

do aquella cuya eficiencia máxima se obtenga con un gasto igual o muy cercano al gasto deseado y que a la vez corresponda a una bomba que se pueda introducir a la tubería de revestimiento existente en el pozo. La figura III.1 ilustra las curvas estándar de comportamiento.

- Uso de las curvas de comportamiento de la bomba.

La curva de capacidad de carga está graficada con la carga en pies y en metros como ordenada, contra capacidad en barriles y en metros cúbicos por día como abscisa.

La carga para una aplicación propuesta puede estar dada en pies y la carga deseada y capacidad se pueden leer directamente de las curvas de agua sin corrección, si la viscosidad del líquido es aproximadamente igual a la del agua.

- Número de Etapas de la Bomba.

Las bombas centrífugas son de múltiples etapas y --

cada una consiste de un impulsor giratorio y un difusor estacionario. El tipo de etapa que se usa determina el volumen de fluido que va a producirse y el número de etapas determina la carga generada y la potencia requerida. (5) El total de etapas requerido se encuentra con la fórmula siguiente:

$$\text{Total de Etapas} = \frac{\text{Carga Dinámica Total (pies)}}{\text{Carga (pies/una etapa)}}$$

—Potencia del Motor.

La potencia del motor se calcula multiplicando la máxima potencia por etapa, obtenida de las curvas de comportamiento de la bomba, por el número de etapas. La potencia mostrada en la curva para el agua se aplicará únicamente a líquidos con densidad específica 1.0 Para otros líquidos la potencia de esta curva para agua debe multiplicarse por la densidad específica del fluido. (5)

$$\text{HP} = \text{HP} / \text{etapa} \times \text{total de etapas} \times \text{Dens. Esp. Fluido}$$

CARGA DINAMICA TOTAL (CDT)

La carga dinámica total (CDT) es simplemente la presión total que se requiere que la bomba produzca - cuando esta bombeando el gasto deseado. Es la diferencia - entre la presión requerida en la descarga de la bomba para impulsar al flujo a su destino final y cualquier presión existente en la succión de la bomba (Fig. III. 2).

Los ingenieros encargados de diseñar aparejos de - bombeo eléctrico sumergido se refieren a la carga dinámica total como la presión en la cabeza del pozo fluyendo expresada en pies, mas la fricción desde la profundidad de la bomba mas la elevación efectiva. La elevación efectiva es - la profundidad a la que la bomba se coloca para producir el gasto deseado, es decir, la profundidad de colocación de la bomba menos la sumergencia.

Mas específicamente, cuando se bombea un líquido - sin gas, la carga dinámica total es la suma de ;

PRESION (lb/ptg)

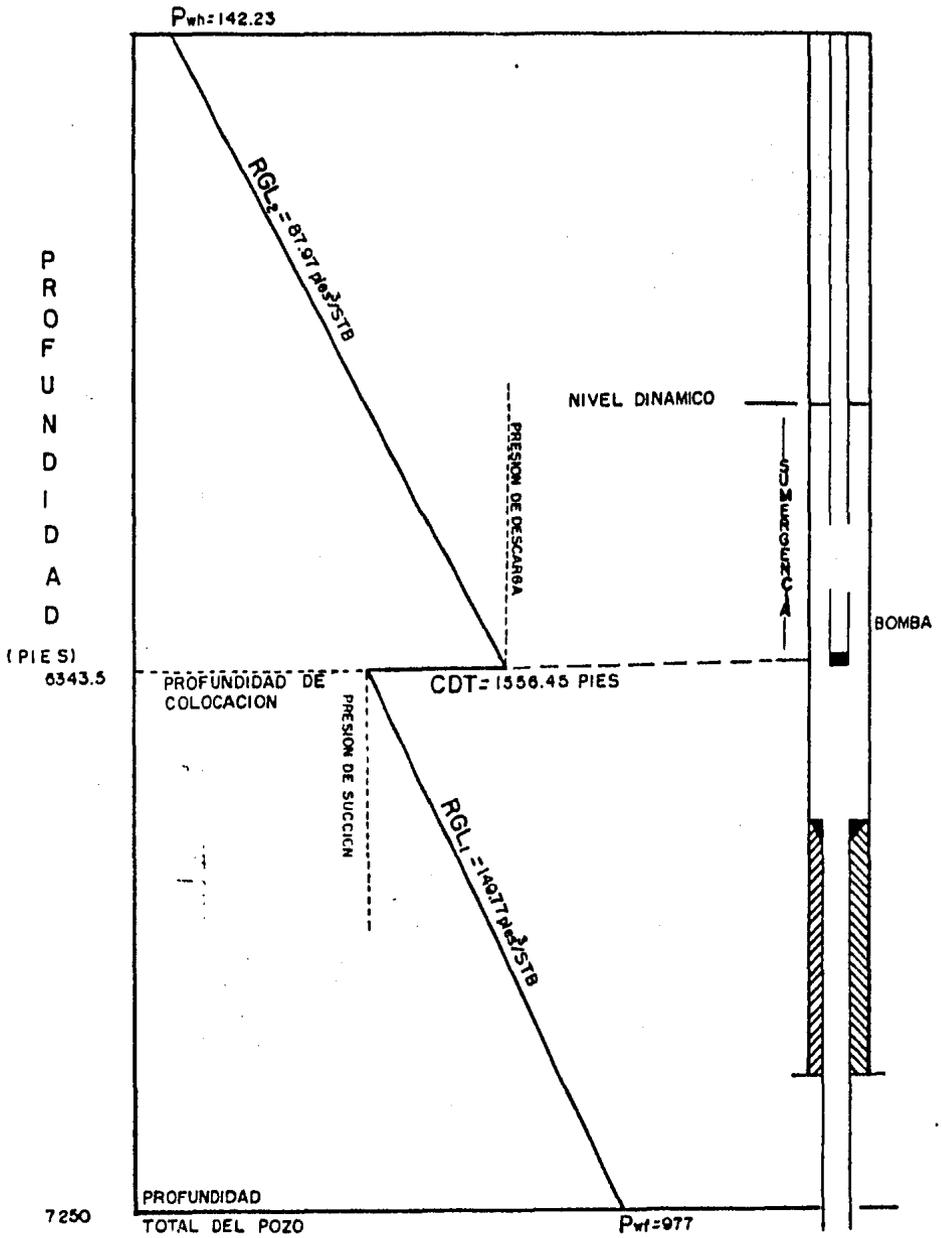


FIGURA No. III.2.- GRADIENTES DE PRESION FLUYENDO CON APAREJO DE BOMBEO ELECTRICO

- 1.- Las pérdidas de presión por fricción en la tubería de producción y línea superficial.
- 2.- La diferencia de elevación entre el destino final del fluido producido y la profundidad de la bomba.
- 3.- Cualquier pérdida significativa en la línea de descarga debido a válvulas, separador, etc.
- 4.- Menos la carga existente en la succión de la bomba debida a la columna de fluido por arriba de la succión.

Estos cálculos pueden hacerse utilizando carga como unidad de presión ya que la densidad del fluido es la misma a través del sistema de bombeo. Sin embargo, cuando hay gas presente en el pozo, la densidad no es la misma a través del sistema y los cálculos deben hacerse en unidades de libras por pulgada cuadrada (lb/pg^2) y convertirse a carga a fin de utilizar las curvas estándar de comportamiento de

la bomba. Con frecuencia para propósitos de diseño, las pérdidas y diferencias de elevación en la línea superficial, son reemplazadas por una presión en la cabeza del pozo, lo cual es suficiente para mover el flujo a través de dicha línea.

2) CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTRICO.

En el diseño de aparejos de bombeo eléctrico para pozos que producen con flujo multifásico, es necesario considerar que la mezcla de fluidos que inicia su trayectoria ascendente en las perforaciones pasando por la bomba hasta que llega a la superficie a través de la tubería de producción, sufre un cambio continuo en su densidad. Esto se debe a que la presión y temperatura varían de un punto a otro a lo largo de la tubería de producción, así mismo, el volumen de gas libre es diferente y la proporción de gas disuelto en la mezcla cambia constantemente ya que está --

siendo liberado.

Este amplio rango de condiciones y cambios de densidad, resulta significativo en la determinación del tamaño de la bomba y su profundidad de colocación en el pozo. Es imposible decir que cualquier criterio sea siempre el mejor para seleccionar la bomba y su localización ya que cada pozo debe ser considerado como un caso individual. Las condiciones del pozo pueden cambiar con el tiempo y otros factores pueden ser diferentes de un pozo a otro.

Una posibilidad ideal es colocar la bomba en un punto donde la presión de succión sea mayor que la de burbujeo, eliminándose así la presencia de gas libre en la succión de la bomba y el volúmen que ésta manejará será simplemente la producción a condiciones superficiales por el factor de volúmen de la formación.

Sin embargo, esta condición es casi imposible de lograr en la mayoría de los casos, pues conforme la bomba -

se coloque más arriba en el pozo, la cantidad de gas libre se incrementa y debe tenerse cuidado de que el flujo que -- llega a la succión no tenga una relación gas-líquido más alta de la que la bomba es capaz de manejar. La eliminación del gas no es necesariamente la forma óptima de bombear los fluidos del pozo, es decir, aunque el volumen total en la succión de la bomba se reduce, la presión de descarga se incrementa debido a la menor cantidad de gas en la columna de fluidos por arriba de la bomba. Cuando la presión estática de fondo esta por abajo de la de burbujeo, fluyen dos fases desde el yacimiento y el gas libre al pasar a través de la bomba, afecta su eficiencia. Generalmente la presencia de gas en la tubería de producción tendrá un efecto benéfico; conforme disminuye la presión en la trayectoria ascendente de la mezcla, su densidad se reduce y la potencia requerida para el motor es menor, pero la bomba deberá manejar un mayor volumen ocupado por el gas libre existente-

en la succión. La capacidad de la bomba se ve afectada por la relación gas libre-líquido que debe manejar; cuanto mas gas este en solución, la bomba se comportará normalmente, es decir, como si bombeára unicamente líquido de baja densidad y así continuará hasta que la relación gas-líquido alcance aproximadamente el valor de $0.1 \text{ m}_g^3 / \text{m}_l^3$, según las recomendaciones de Hicks (2). Arriba de esta cantidad, la bomba empezará a producir una carga menor que la normal y conforme el gas libre se incrementa, eventualmente caerá en el candado de gas y dejará de bombear cantidades apreciables de fluido. La cantidad de gas libre que la bomba puede tolerar, sin que se vean afectadas sus curvas de comportamiento, esta en el rango de 0.1 a $2.0 \text{ m}_g^3 / \text{m}_l^3$.

Entonces la determinación de la profundidad de colocación de la bomba, es un punto muy importante en el diseño de aparejos de bombeo eléctrico y debe calcularse en la siguiente forma: (1)

De acuerdo con la figura III. 3, la profundidad de colocación de la bomba, se determina mediante el cálculo del perfil de presión ascendente a partir de la presión de fondo fluyendo, a la profundidad media del intervalo productor utilizando la relación gas-líquido de la formación, hasta un punto en el que la cantidad de gas libre a condiciones de escurrimiento, menos el porcentaje de gas que el separador envía al espacio anular, es igual a la cantidad de gas libre que tolera la bomba (punto M).

La presión en este punto es la presión de succión de la bomba.

En el punto en que la relación gas libre-líquido a condiciones de escurrimiento es igual a $0.1 \text{ m}^3_{\text{g}} / \text{m}^3_{\text{o}}$, que es la relación máxima permisible en la bomba, se suspende el cálculo del perfil de presión y la profundidad hasta aquí alcanzada determinará la profundidad de colocación de la bomba (DB) punto señalado en la figura III. 3 con la letra A.

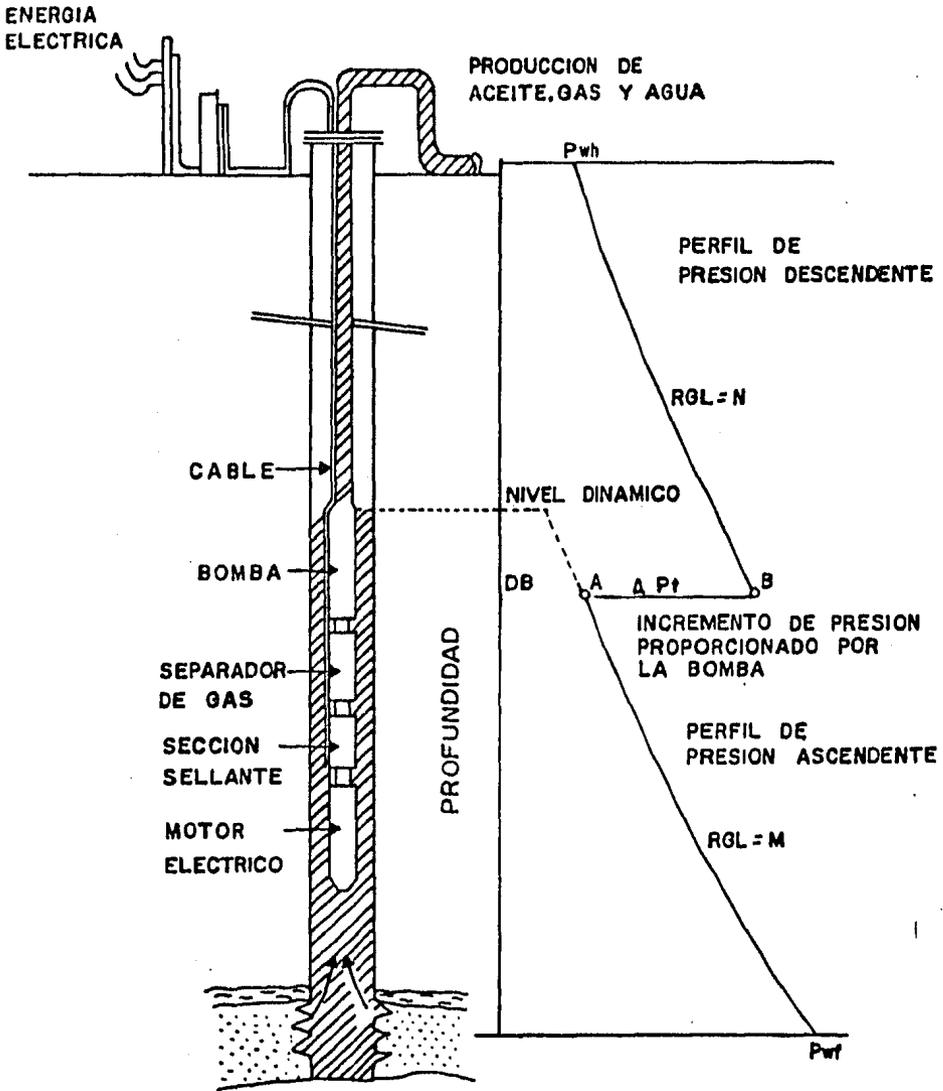


FIGURA No.III.3: DETERMINACION DE LA PROFUNDIDAD DE COLOCACION Y DE LA CARGA DE PRESION DE LA BOMBA

La elevación de presión que la bomba debe --
suministrar a los fluidos del pozo para obtener en la su-
perficie el gasto deseado, también es un punto importante
en el diseño de aparejos de bombeo eléctrico sumergido -
y se calcula de la siguiente forma:

Se determina mediante el cálculo de perfil de
presiones descendente, a partir de la presión requerida en
la boca del pozo y con la relación gas-líquido de la forma-
ción, hasta alcanzar la profundidad de colocación de la bom-
ba (punto N) de la figura III.3. En cada intervalo del nuevo -
perfil se compara la profundidad obtenida con la profundi-
dad ya calculada. El proceso se detiene cuando dichas pro-
fundidades son iguales (punto B) de la figura III.3. La pre-
sión en este punto es la presión de descarga de la bomba.

La diferencia de presión existente entre los dos
perfiles (presión de descarga-presión de succión) represen-
ta la elevación de presión requerida para operar el pozo ba -

jo las condiciones dadas y es el intervalo AB de la misma figura.

El cálculo de los perfiles de presión aludidos se realiza utilizando métodos para determinar caídas de presión en tuberías verticales con flujo multifásico.

C A P I T U L O I V

PROCEDIMIENTO DE CALCULO

En el diseño de aparejos de bombeo eléctrico la selección de la bomba capaz de manejar con máxima eficiencia el volumen de fluidos que generalmente varía desde la succión hasta la descarga, requiere del uso de las curvas características elaboradas para cada bomba, por los fabricantes y clasificadas por grupos de acuerdo con el diámetro mínimo de la tubería de revestimiento en que pueden introducirse, escogiendo aquella cuya eficiencia máxima se obtenga con un gasto igual o muy cercano al gasto deseado. (figura IV. 1).

Debido a que el volumen de fluidos varía de una presión a otra, es importante calcular la magnitud de dicha variación a diferentes incrementos de presión entre la succión y la descarga ya que, si el volumen se reduce considerable

Curvas Características de la Bomba

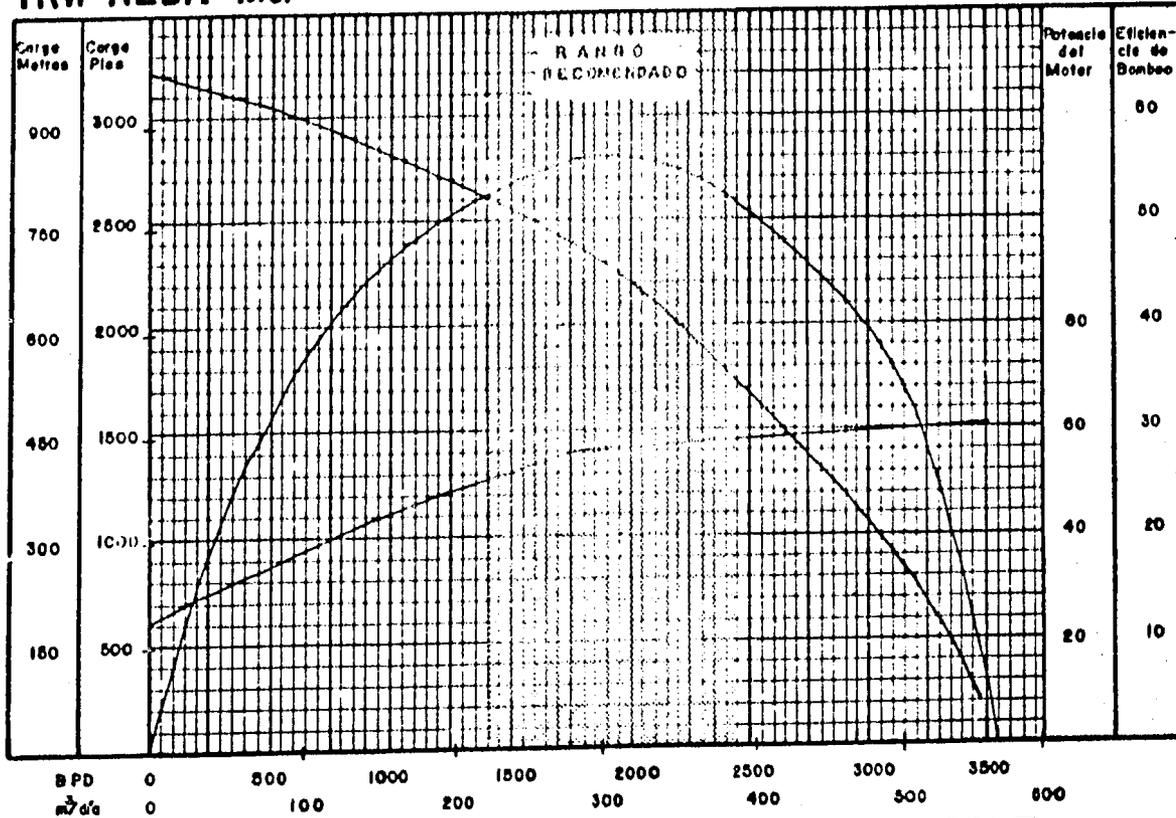
100 Etapas — D65 — 60 Hz

Serie 400 — 3500 RPM

T.R. Mínimo

6 1/2" D.E.

TRW REDA Inc.



CAPACIDAD

FIGURA IV.1

mente en las primeras etapas de la bomba seleccionada y éste cae fuera del rango de máxima eficiencia, será necesario seleccionar una segunda bomba que maneje ese volumen con máxima eficiencia. (figura IV.2).

Esto trae como resultado la selección de una bomba de dos secciones que manejen con máxima eficiencia los diferentes volúmenes existentes en el interior de la bomba. Si la situación descrita se repite más de dos veces, la bomba quedará constituida por más de dos secciones.

La determinación del cambio de volumen de fluidos en el interior de la bomba, es función de la presión y temperatura y requiere conocer los valores del factor de volumen del aceite (B_o) y de la relación gas disuelto aceite (R_s) a diferentes presiones entre las de succión y de descarga. Para este efecto se utilizaron las correlaciones de Standing, considerando la temperatura constante en el interior de la

Q_t -GASTO TOTAL DE LIQUIDOS=1 022.125 bls/día

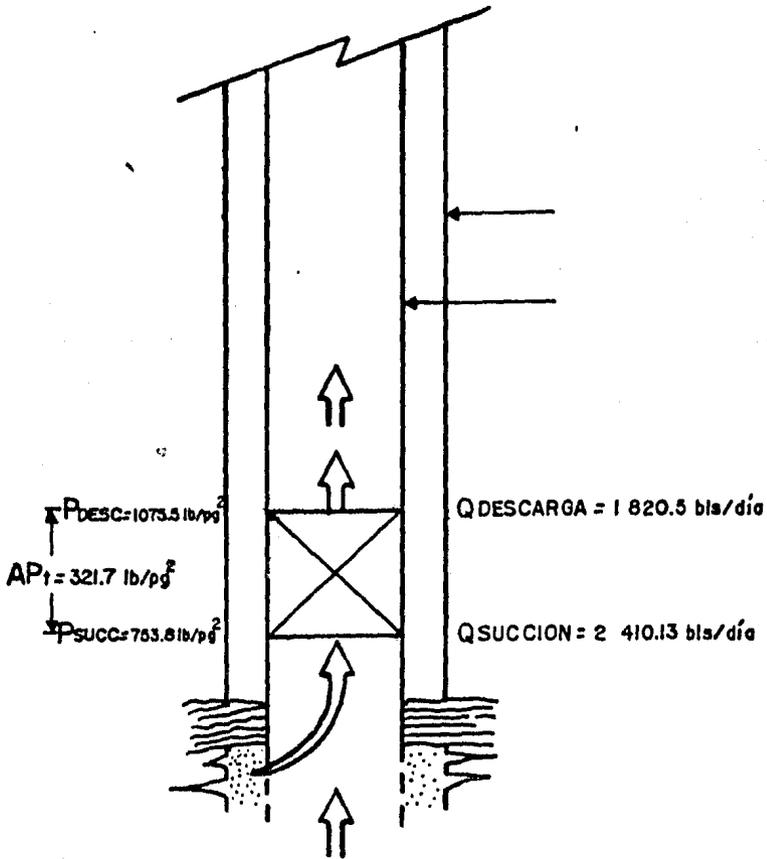


FIGURA No.IX.2.- EL GASTO DE LIQUIDOS OBTENIDO EN LA SUPERFICIE NO ES EL MISMO QUE SE BOMBEA

bomba, debido a que la longitud del aparejo es corta. (figura IV.3).

Las dimensiones de la bomba para obtener el incremento de presión necesario que eleve a los fluidos hasta la superficie, manteniendo la presión requerida en la cabeza del pozo, necesita que el incremento total de presión (presión de descarga - presión de succión) sea dividido en "n" incrementos de presión iguales a fin de calcular el gasto, la masa, la densidad y el gradiente de presión de la mezcla de aceite, gas disuelto, gas libre y agua para las condiciones inicial, media y final de cada intervalo. (Figura IV.4)

Utilizando el grupo de curvas características adecuado, se selecciona entre ellas la de la bomba que maneje con máxima eficiencia el gasto promedio del intervalo "n" y tomando como referencia el mismo gasto, se leen en la gráfica por cada etapa de la bomba, la carga que desarrolla y

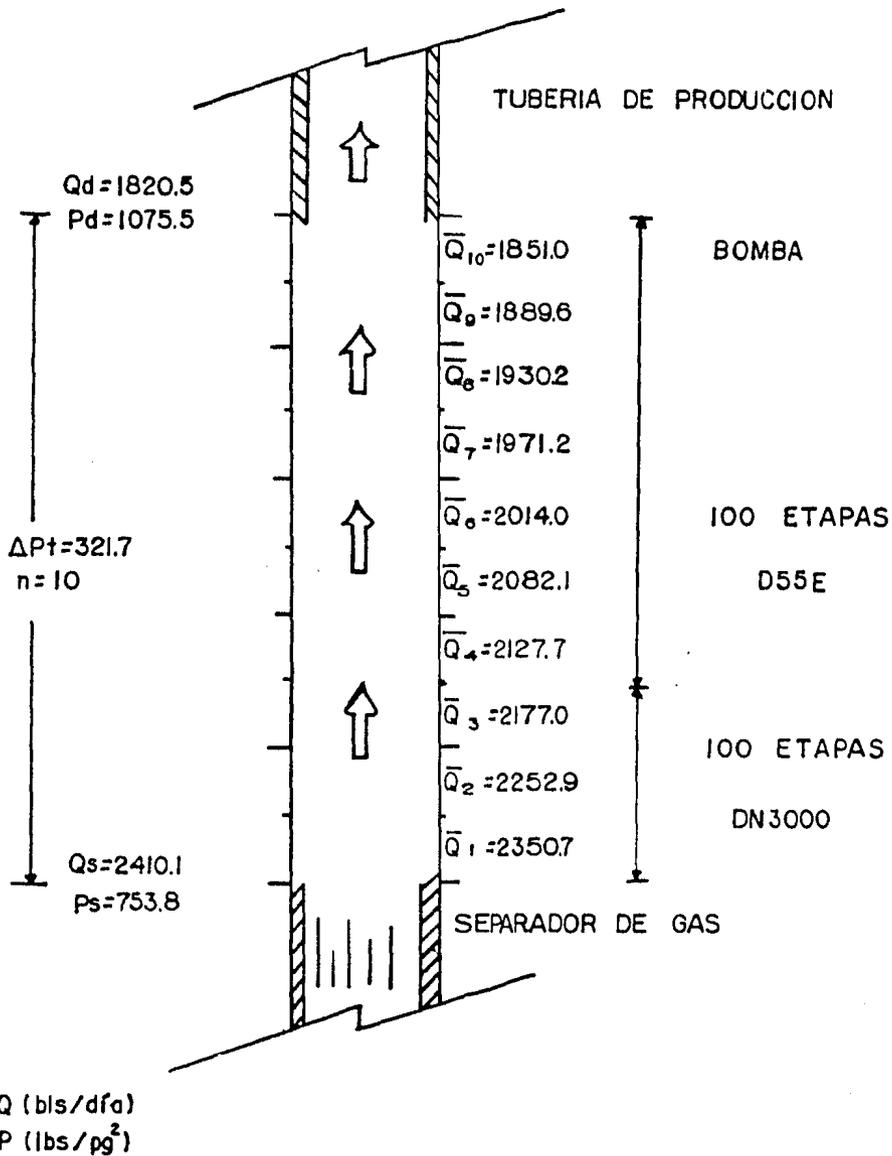


FIGURA No. IV. 3.- BOMBA CONSTITUIDA POR DOS SECCIONES DE ETAPAS.

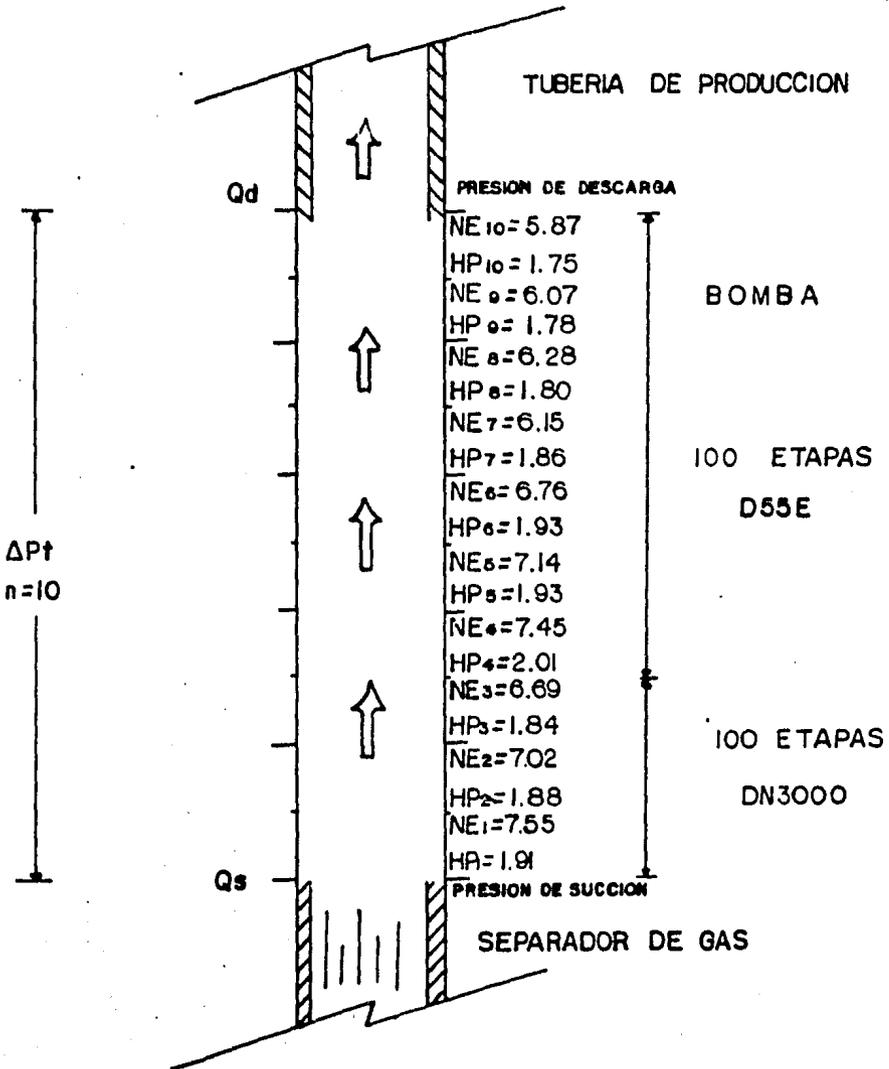


FIGURA No. IV. 4.- NUMERO DE ETAPAS DE LA BOMBA Y POTENCIA REQUERIDA PARA EL MOTOR POR CADA INCREMENTO DE PRESION.

la potencia requerida para impulsarla. Con la información obtenida de la gráfica y los parámetros indicados, se pueden determinar el número de etapas y potencia necesarios entre los incrementos de presión establecidos.

Finalmente, el número total de etapas y potencia, se calculan con la suma respectiva de los valores obtenidos en cada intervalo, desde la presión de succión hasta la de descarga.

Es importante señalar que conforme "n" sea incrementado en los cálculos para un mismo pozo, el número de etapas de la bomba y la potencia requerida para el motor disminuyen. Debe hacerse notar que para "n" grande, los cambios de volumen en el interior de la bomba serán más notables en los primeros incrementos de presión y de menor magnitud a medida que estos se aproximen a la presión de descarga. Así para "n" grande, los cambios de volumen

dejan de ser importantes en los últimos incrementos de --
presión. Por el contrario, para " n " pequeño se omitirán
cálculos de cambio de volumen que pueden ser considerablemente
significativos, en el número de etapas de la bomba -
las cuales tendrán mayor capacidad volumétrica de la necesaria
y la potencia requerida para el motor también se in-
crementará .

Se ha determinado que con valores de $30 \leq n \leq 50$ -
se obtienen resultados satisfactorios.

En resumen: El procedimiento de cálculo contempla
la determinación previa de la profundidad de colocación de
la bomba, que implica el cálculo de la presiones de succión
y de descarga, tomando en cuenta que la unidad lleva inte -
grado un separador de gas. Posteriormente se divide el in-
cremento de presión en " n " partes iguales a fin de calcular
el gasto, masa, la densidad y el gradiente de presión de la -

mezcla a las condiciones medias de cada intervalo, para -
finalmente calcular el número de etapas y la potencia re -
querida para el motor desde la presión de succión hasta -
la de descarga.

SECUENCIA DE CALCULO

A continuación se presenta la secuencia de -
cálculo, que se propone para determinar el número de eta -
pas de la bomba y la potencia requerida para el motor del -
aparejo de bombeo eléctrico.

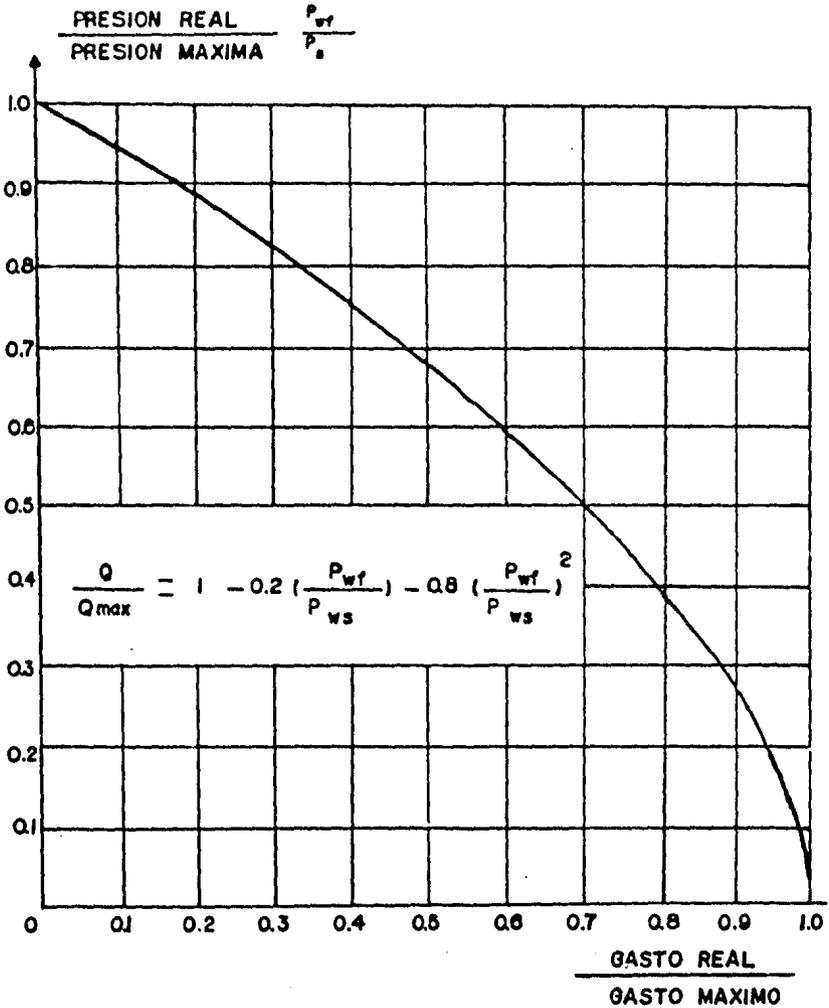
1) A partir de los datos de una prueba de pro -
ducción y el gasto de líquidos deseados en la superficie, se
determina la presión de fondo fluyendo correspondiente, u -
tilizando la correlación propuesta por Vogel (Fig. IV.5)

$$\frac{Q_o}{Q_{max}} = 1.0 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2 \quad - (1)$$

FIGURA No. IV.5

Curva general de IPR (Comportamiento de flujo el pozo)

CURVA DE J. V. VOGEL (J.P.T., Ene 1968)



2) Calcular el perfil de presión ascendente, —
partiendo de la presión de fondo fluyendo y con la relación
gas-líquido natural de la formación, hasta un punto en que
la cantidad de gas libre a condiciones de escurrimiento, me
nos el porcentaje de gas que el separador envía al espacio
anular, es igual a la cantidad de gas libre que tolera la —
bomba. Punto A de la figura III.3.

$$Gl \text{ c.e. } (RGA - R_s) \times B_g / B_o \left(\frac{m^3 \text{ gas c.e.}}{m^3 \text{ aceite c.e.}} \right) \text{---(2)}$$

Si

$$Gl \times (1.0 - Ef.sep.) = Gl_{tb} \text{---(3)}$$

Entonces la presión en este punto es la presión de -
succión de la bomba y la profundidad es la de colocación -
de la misma.

Q_o = Gasto total (bls / día)

Q_{max} = Gasto máximo (bls / día)

P_{wf} = Presión de fondo fluyendo (lb / pg²)

P_{ws} = Presión de fondo estática (lb / pg²)

Gl c.e. = Relación gas libre-aceite a condiciones de escurrimiento (pies³gas / barriles de aceite).

RGA = Relación gas-aceite a condiciones atmosféricas - -
(pies³ gas / barriles de aceite) .

Rs = Relación gas disuelto-aceite a condiciones atmosféricas (pies³ de gas disuelto / barriles de aceite)

B_g = Factor de volumen del gas a condiciones de escurrimiento . $\left(\frac{\text{Pies}^3}{\text{Pies}^3} \right)$

Bo = Factor de volumen del aceite a condiciones de escurrimiento . (barriles / barriles) .

Ef. sep.=Eficiencia del separador de gas.

Gl_{tb} = Relación gas libre-aceite que tolera la bomba a condiciones de escurrimiento (pies³ de gas / barriles de aceite) .

3) Calcular el perfil de presión descendente par

tiendo de la presión requerida en la boca del pozo y con una relación gas-líquido igual a la de la formación, menos la - -

cantidad de gas libre enviado al espacio anular, hasta alcanzar la profundidad de colocación de la bomba. Punto B de la figura III.3, La presión en este punto es la presión de descarga de la bomba.

- 4) Calcular la carga dinámica total (CDT).

$CDT = \text{Presión en la cabeza del pozo (Pwh)} + \text{Diferencia de elevación (Sum) (profundidad de colocación de la bomba-columna de fluido por arriba de la bomba)} + \text{Pérdidas por fricción a lo largo de la tubería de producción (Pf)}.$

$$CDT = Pwh + Sum + Pf \quad - (4)$$

- 5) Calcular el incremento total de presión requerido: La diferencia entre las presiones de descarga y de succión de la bomba es el incremento de presión necesario para obtener en la superficie el gasto deseado (Fig. III.3)

Presión de descarga (P_d) - Presión de succión (P_s) = -
Incremento total de presión (ΔP_t).

$$P_d - P_s = \Delta P_t \quad - (5)$$

6) Dividir el incremento total de presión en --
"n " incrementos iguales.

Incremento total de presión (ΔP_t) \div N = Incrementos de
presión iguales en el interior de la bomba (ΔP_1).

$$\frac{\Delta P_t}{N} = \Delta P_1 \quad - (6)$$

El mayor volumen de fluidos que debe manejar la -
bomba es el que llega a la succión, por lo que las primeras
etapas requieren tener mayor capacidad volumétrica. Enten-
diéndose por capacidad volumétrica, como el rango de gas-
to que una etapa de la bomba maneja con máxima eficiencia.
Está señalado en las curvas características de las bombas -
(Fig. III. 1).

Es importante señalar que el gasto deseado en la superficie está establecido a condiciones de almacenamiento y es únicamente de líquidos, por lo que difiere considerablemente del gasto que se bombea. (Fig. IV. 2).

En cada etapa de la bomba desde la succión hasta la descarga, incrementa sucesivamente la presión de la mezcla reduciendo su volumen.

Cuando dicho volumen se reduce considerablemente y cae fuera del rango de máxima eficiencia de las primeras etapas, las siguientes requieren tener menor capacidad volumétrica. Por lo tanto, la bomba puede quedar constituida por una, dos o más secciones de etapas, las cuales cada una maneja con máxima eficiencia el volumen de fluidos variables en el interior de la bomba (Fig. IV. 3).

A fin de determinar la magnitud de los cambios de volumen y de establecer la necesidad de cambiar o no la ca

pacidad volúmetrica de las etapas, el incremento total de presión se divide en " n " incrementos iguales ⁽⁵⁾. Dependiendo de las características de los fluidos, se ha encontrado que con valores de " n " entre 10 y 20, se obtienen resultados satisfactorios, aunque ésto no es una limitación del procedimiento, ya que " n " puede tener cualquier otro valor.

A continuación iniciando con $n=1$:

7) Calcular el gasto, masa y densidad de la mezcla de aceite, gas y agua a las condiciones de presión inicial y final del incremento " n ".

La realización de estos cálculos requiere conocer los valores del factor de volumen del aceite y de la relación gas disuelto aceite. Para este efecto se utilizaron las correlaciones de Standing ⁽⁶⁾, considerando la temperatura constante a lo largo de la bomba

$$V. \text{aceite} + V. \text{gas} + V. \text{agua} = B_o + GL(B_g) + (\% \text{agua}) B_w = V_t \quad -(7)$$

Gasto de aceite = Gasto total líquido - Gasto de agua

$$q_o = q_t - q_w (\% \text{ agua}) \quad -(8)$$

$$\text{Vol. Aceite producido (Vop)} = q_o \times V_t \quad -(9)$$

Masa de aceite, gas y agua

$$\text{Masa de aceite} = \gamma_o (62.4 \text{ lb/pie}^3) (5.615 \text{ pie}^3/\text{bls}) = M_o$$

$$\text{Masa de gas} = \gamma_g (RGL) (5.615 \text{ pie}^3/\text{bls}) (0.0764 \text{ lb/pie}^3) = M_g$$

$$\text{Masa de agua} = \gamma_w (62.4 \text{ lb/pie}^3) (5.615 \text{ pie}^3/\text{bls}) (\% \text{ agua}) = M_w$$

$$\text{Masa total de fluidos} = M_o + M_g + M_w = M_{tf} \quad -(10)$$

Gasto Másico (GM)

$$GM = M_{tf} \times q_o \quad -(11)$$

Densidad de la Mezcla (γ_m)

$$\gamma_m = \frac{M_{tf}}{V_t (5.615 \text{ pie}^3/\text{bls})} \quad -(12)$$

Densidad Relativa de la Mezcla (γ_{rm})

$$\gamma_{rm} = \frac{\gamma_m}{\gamma_w} \quad -(13)$$

Donde

$$\gamma_w = 62.4 \text{ lb/pie}^3$$

Vt (bls / STB)

qo (bls / dfa)

Vop (bls / dfa)

M_{tf} (lbs / 1 barril)

GM (lbs masa / dfa)

γ_m (lbs masa / pie³)

γ_{rm} (adimensional)

- 8) Calcular la densidad relativa promedio de la mezcla en el intervalo " n " :

$$\bar{\gamma}_{rm} = \frac{\gamma_{rm} (n) + \gamma_{rm} (n + 1)}{2} \quad -(14)$$

- 9) Calcular el gradiente de presión en los puntos inicial y final del incremento " n " y el gradiente de presión promedio entre estos puntos :

$$\text{Gradiente (GR)} = \frac{\gamma_m}{144 (pg^2 / pie^2)} \quad -(15)$$

$$\bar{GR} = \frac{Gr (n) + Gr (n + 1)}{2} \quad -(16)$$

Donde Gr (lbs / pg² / pie)

10) Calcular el gasto promedio en el intervalo -

" n " :

$$\overline{Vop} = \frac{Vop (n) + Vop (n + 1)}{2} \quad -(17)$$

11) Elegir el grupo de curvas características de bombas que ajusten en el interior de la tubería de revestimiento del pozo y de éstas, seleccionar la que maneje el gasto promedio con máxima eficiencia. A medida que se avanza con los incrementos de presión en el interior de la bomba, la gráfica de curvas características seleccionada puede cambiar, lo cual significa que el volumen de la mezcla se ha reducido considerablemente y que la capacidad volumétrica de las primeras etapas cae fuera del rango de máxima eficiencia, por lo que se selecciona otra gráfica que cumpla con este requisito. Esto da lugar a que el diseño de la bomba sea de dos secciones de etapas. Si la situación descrita se repite, la bomba pue-

de tener más de dos secciones.

12) Leer en las curvas características de la --
bomba seleccionada, la carga que desarrolla y la poten-
cia que se requiere por etapa cuando maneja el gasto -
promedio.

13) Determinar el incremento de presión desa-
rrollado por etapa, multiplicando la carga por el gra-
diente promedio:

$$\Delta P_e = \frac{H}{\text{etapa}} \times \text{GF} \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} / \text{pie} \quad -(18)$$

ΔP_e = Incremento de presión desarrollado por etapa.

$$\frac{H}{\text{etapa}} = \text{Carga de columna de fluido desarrollada por eta-}$$

$$\text{pa } \left(\frac{\text{pie}}{\text{etapa}} \right)$$

14) Calcular el número de etapas que se requie-
re para obtener el incremento de presión " n " dividiendo
éste entre la presión por etapa;

$$\text{Número de etapas} = N_e = \frac{\Delta P_i}{\Delta P_e} \quad -(19)$$

15) Calcular la potencia necesaria, multiplicando la potencia por etapa, por el número de etapas y por la densidad relativa promedio calculada en el intervalo " n ".

$$HP = \frac{H^P}{\text{etapa}} \times Ne \times \gamma_{\text{mezcla}} \quad (20)$$

HP= Potencia necesaria para impulsar las etapas del intervalo " n ".

16) Sumar el valor de " n " la unidad y repetir los cálculos señalados a partir del punto 7, hasta que la presión final del incremento " n " sea igual a la presión de descarga de la bomba.

$$\text{Presión de succión} + \sum_{n=1}^n \frac{\Delta P_t}{n} = \text{Presión de descarga.} \quad (21)$$

17) El número total de etapas y la potencia total requerida, se obtienen sumando los valores calculados en los puntos 11 y 12 respectivamente, cada vez que se

repite los cálculos (n veces).

18) Selección del motor y del resto del equipo con los accesorios que se consideran convenientes para asegurar una buena operación del aparejo de bombeo eléctrico. Es necesario recurrir a la literatura que los fabricantes del equipo proporcionan con información consistente en las dimensiones y capacidades de los componentes del aparejo que tienen disponibles en el mercado. ^(δ)

Para seleccionar el motor, se buscará en la tabla de motores disponibles aquél que sea capaz de desarrollar la potencia calculada requerida para impulsar la bomba, cuidando que el voltaje necesario se le pueda suministrar desde la fuente superficial, considerando la caída de voltaje a través del cable (fig. IV.6).

El voltaje del motor dependerá tanto de los voltajes en que se fabrique ese tamaño de motor, como de la ten-

Datos de motores disponibles

Serie 375
(3.75" D.E.)

H. P.	Volts	Amps
7.5	415	13.5
	400	20
10.5	690	12
	330	34
15	415	27
	415	35
19.5	650	22.5
	440	38.5
22.5	750	22.5
	650	29.5
25.5	780	24.5
Motores Tandem		
30*	630	35.5
39*	575	51
45	660	51.5
	740	51.5
51	1000	38
	1250	31
58.5*	860	51
67.5	990	51.5
90	1320	51.5
102	1440	51.5

Serie 450
(4.56 D.E.)

H. P.	Volts	Amps
8.4	415	14.2
	390	21
12.6	455	18
	390	27.6
16.8	415	25.9
	445	30
21	450	29.5
	450	35.5
	465	34.2
25.2	540	29.5
	775	20.5
	450	41.1
29.4	710	26
33.6	415	51
	465	50.7
37.8	585	40.2
	725	32.5
	570	50.3
46.2	705	40.5
	845	34
	670	50
54.5	845	39.5
	670	57.3
63	775	50
	980	39.5
	775	57.3
71.5	880	50.5
Motores Tandem		
109	950	71
126	1080	72
143	840	105

Serie 456
(4.56" D.E.)

H. P.	Volts	Amps
10	440	15
	440	23
15	750	13.5
	460	28
20	760	17
	420	38
25	720	22.5
	440	43.5
30	765	25
	400	55
35	690	32
	800	27.5
	450	57
40	675	38
	900	28.5
	700	45.5
50	840	38
	980	32.5
	670	57
60	840	45.5
	1000	38
	980	45
70	785	57
	1170	38
	900	57
80	1120	46
	1350	38
	1000	57
90	1260	45
	1500	38
100	1120	57
	970	66
	1400	45.5
110	1080	65
	1240	57
	1000	77
120	1170	66
	1350	57
	2300	33.5
Motores Tandem		
140	1080	82.5
	2280	39
160	1270	80
	2160	47.5
180*	2270	50
200	2140	59
220	2275	62
240	2250	70

Serie 540
(5.43" D.E.)

H. P.	Volts	Amps
20	445	29
	762	17
30	445	44
	720	27.5
	445	59
40	670	39
	740	36
	890	30
50	430	75
	740	44
	920	35
	445	87
60	665	58
	755	52
	890	44
70	775	58
	880	51
	1035	44
	685	76
80	770	68
	890	58
	1185	44
	740	83
100	855	74
	960	66
	1100	58
120	770	98
	890	85
	1330	57
130	835	98
	965	84
150	965	97
160	1015	99
180	1000	113
	1160	108
200	2200	57
	1200	120
225	2300	62.5
Motores Tandem		
240*	2060	70
260*	2250	67.5
300*	2150	83
320	2230	88.5
400	2200	115
480	2475	122

SERIE 714
(7.14" D.E.)

H. P.	Volts	Amps
200	2300	94
	1350	101
220	2300	99
	2300	65
240	2300	70
Motores Tandem		
300*	2500	108
440*	2000	136
440*	2200	135
520*	2300	140

* DISPONIBLE EN PEDIDO ESPECIAL

FIGURA No. IV.-6.- CARACTERISTICAS DE DIVERSOS MOTORES

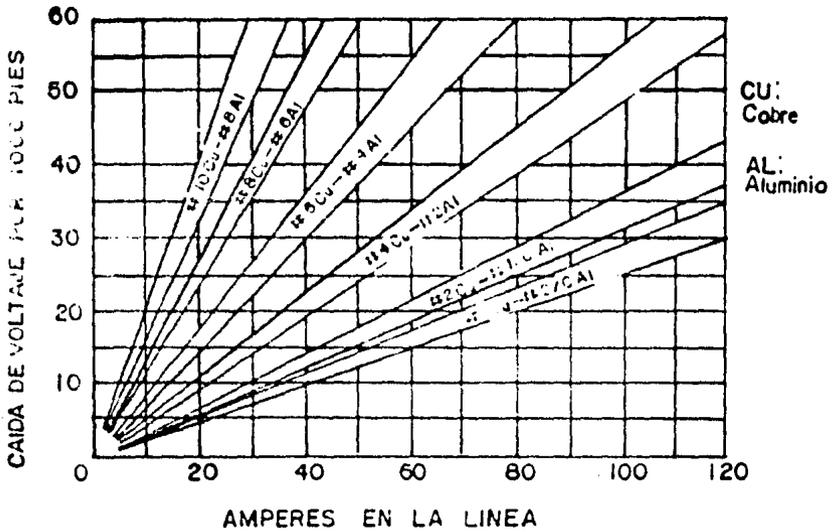
sión eléctrica disponible en la superficie y del espacio libre entre la unidad de bombeo y la tubería de revestimiento. Este espacio libre, definirá el calibre máximo que se pueda emplear para el cable eléctrico, ya que éste, debe cumplir con la condición de que la caída de voltaje a través de él, no sea mayor que el de 20% del voltaje del motor aproximadamente.

Los fabricantes han elaborado nomogramas que pueden aprovecharse para determinar rápidamente el voltaje del motor, el calibre del cable eléctrico y la caída de voltaje a través del mismo (figs. IV.7, IV.8).

El tamaño y tipo de cable que se seleccione para una aplicación, queda determinado por la capacidad de conducción de corriente del cable y por el medio ambiente en el que éste va a trabajar como la temperatura y la presión ,

FIGURA No. IV.7

Pérdida de voltaje a lo largo del cable eléctrico



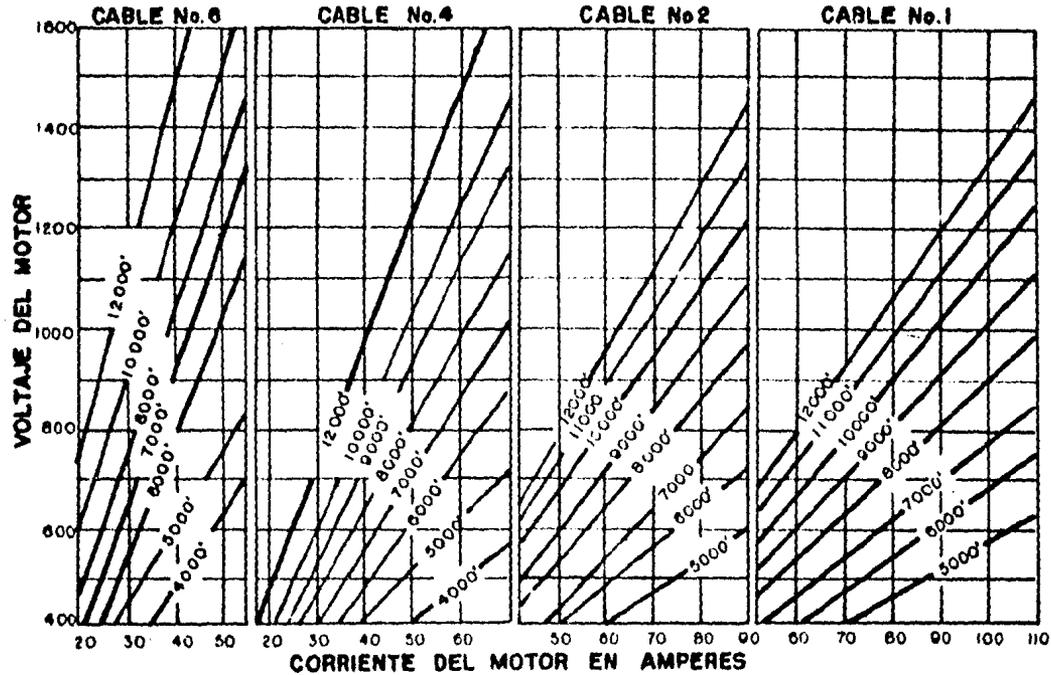
tamaño del cable

caída de voltaje por ampere por
1000 pies @ 100% pf y 149°F

#12 Cu	ó	#10 AL	3.907
#10 "		#8 "	2.447
#8 "		#6 "	1.553
#6 "		#4 "	0.998
#4 "		#2 "	0.624
#2 "		#1/0 "	0.390
#1 "		#2/0 "	0.307

FIGURA No. IV. 8

Longitudes Maximas De Cable Recomendado Para Motores Con
Varias Relaciones Volts/Amperes



Algunos diseñadores prefieren utilizar motores de alto voltaje y tableros de control grandes, anticipándose a incrementos de producción posteriores. También los motores de alto voltaje con bajo amperaje, deben utilizarse en pozos profundos, donde el tamaño de la tubería de revestimiento limita el tamaño del cable que pueda utilizarse y por lo tanto limita el amperaje del motor.

En caso de que el voltaje de operación del motor difiera considerablemente del disponible en la superficie, deberá instalarse un transformador que proporcione el voltaje de operación necesario.

Para dimensionar un autotransformador, un transformador trifásico ó un conjunto de tres transformadores de una fase se utiliza la siguiente ecuación:

$$Kva = V_s \times I_m \times 1.73 / 1000 \quad -(22)$$

donde;

Kva = Kilovolts. amps.

V_s = Voltaje superficial requerido (voltaje del motor -
más la caída de voltaje a través del cable eléctrico).
co).

A_m = Amperaje nominal del motor ó amperaje que será
utilizado.

A continuación se seleccionará un protector o sección sellante, con un diámetro adecuado al resto de la instalación; también se escogerá un separador de gas de fondo de pozo, para facilitar la eliminación del gas libre en la succión de la bomba.

Determinar el tipo de tablero de control que es necesario instalar en la superficie, el cuál deberá proyectarse para manejar el voltaje de operación. Su capacidad en caballos de fuerza, debe ser cuando menos igual -

a la potencia del motor.

Todos los componentes subsuperficiales deberán tener un diámetro exterior, tal que, puedan introducirse en la tubería de revestimiento del pozo, dejando espacio libre suficiente para que el cable flejado en el exterior del aparejo de bombeo no se dañe por fricción.

El tipo de información y control que se desee obtener en la superficie, determinará la clase de equipo que debe instalarse en el tablero de control, el cuál puede -- ser sencillo; interruptor manual, botón de arranque y relevador de sobrecarga; ó muy elaborado; dispositivo para operación intermitente, relevador de baja corriente, amperímetro registrador, etc. También se escogerá un cabezal de diseño especial, que permita el paso del cable eléctrico y que sea adecuado para las tuberías instaladas en el pozo.

Además deberán seleccionarse flejes metálicos -
en cantidad y tamaño conveniente para sujetar el cable -
eléctrico a la tubería de producción, a la bomba y al --
protector; se recomienda que los flejes se dispongan a
intervalos de 5 metros en la tubería y que sean utiliza-
dos unos 25 flejes para sujetar el cable a lo largo de la -
bomba y de la sección sellante.

Por último, se seleccionará una serie de acceso-
rios que faciliten el transporte, instalación y operación
de la unidad, tales como : carretes para cable, válvulas
de retención y de drene, cajas metálicas para traslado-
de la bomba y el motor, etc.

RESUMEN DE LA SECUENCIA DE CALCULO

Para dimensionar una unidad de bombeo eléctrico sumergible se proporciona el siguiente resumen:

- 1) Recopilar y analizar información del pozo, - producción, fluidos y datos eléctricos.

- 2) Determinar la capacidad de producción del - pozo a la profundidad de colocación de la bomba ó determinar la profundidad de colocación al gasto deseado. Esto incluye determinar la presión de succión de la bomba, misma que se usará para el diseño y el volumen que se - va a bombear para obtener los barriles de líquidos deseados a condiciones de tanque.

- 3) Calcular la carga dinámica total (CDT)=(Pérdidas por fricción)+(P resión del sistema)+(Elevación -- vertical).

- 4) Para el cálculo de la capacidad y carga total, seleccionar de entra las curvas características, la del -

tipo de bomba que tenga la más alta eficiencia para la aplicación. La bomba seleccionada también debe ser de diámetro exterior que ajuste en el interior de la tubería de revestimiento del pozo.

5) Calcular para el tipo de bomba seleccionada, el número de etapas requerido para suministrar la carga necesaria para producir el gasto deseado.

6) Determinar la potencia requerida para el motor, usando la densidad específica mas alta del fluido -- que encuentre para estos cálculos. El tipo de protector -- generalmente se selecciona de la serie del motor determinado. (5)

7) Seleccionar el tamaño y tipo de cable más -- económico para la aplicación, de los datos técnicos disponibles (5).

8) Determinar la pérdida de voltaje en el cable --

y el voltaje superficial requerido. Este valor establece el tamaño de tablero de control. (5)

9) Calcular los requerimientos de kilovolts amps. a fin de dimensionar los transformadores (5).

10) Seleccionar los accesorios adecuados tales - como:

A) Tamaño y tipo de cabezal para tubería de producción - (bola colgadora).

B) Equipo de servicio requerido para terminar la instalación .

C) Equipo opcional. (5)

11) Determinar que otras etapas se requieren -- para asegurar buenas operaciones; Cubrir el equipo con protecciones anticorrosivas o el uso de materiales inhibidores de corrosión. Así mismo usar, si se requiere, cubierta en forma de camisa en el aparejo (5).

CAPITULO V

APLICACION DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

DATOS:

POZO No. PR- 55

Profundidad total = 2210.36 mts = 7250 pies

Presión estática (Pws) = $159.66 \text{ Kg/cm}^2 = 2270.8 \text{ lb/pg}^2$

Gasto total = $162.50 \text{ m}^3/\text{día} = 1022.125 \text{ bls/día}$

Índice de productividad total = $1.787 \text{ m}^3/\text{día}/\text{Kg/cm}^2 = 0.79 \text{ bls/día/lb/pg}^2$

Porcentaje de agua = 8.000 %

Relación gas líquido (RGL) = $149.77 \text{ pies}^3/\text{bl}$

Temperatura en la boca del pozo = $28.88^\circ\text{C} = 83.984^\circ\text{F} = 543.984^\circ\text{R}$

Temperatura de fondo $87.77^\circ\text{C} = 189.986^\circ\text{F} = 649.986^\circ\text{R}$

Presión requerida en la boca del pozo (Pwh) = $10 \text{ Kg/cm}^2 = 142.23 \text{ lb/pg}^2$

Densidad relativa del aceite (γ_{ro}) = 0.8760 (agua = 1.000)

Densidad relativa del gas (γ_{rg}) = 0.9000 (aire = 1.000)

Densidad relativa del agua = (γ_{rw}) = 1.0200

Eficiencia del separador de gas = 50% = 0.50

Relación gas fluido permisible en la bomba = 1.00

CONSTANTES UTILIZADAS

Densidad del agua @ c.s = 62.4 lb/pie³

Densidad del aire @ c.s = 0.0765 lb/pie³

Carga hidrostática de 1 pie de agua a 60°F

$$\frac{62.4 \text{ lb/pie}^3}{144 \text{ pg}^2/\text{pie}^2} = 0.433 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

Factor de conversión 62.4 lb/ pie³ x 5.615 pie³ = 350.351bs

Longitud

1 mt = 3.281 pies

1 cm = 0.3937 pulgadas

1 cm = 0.0328 pies

Presión

1 Kg/cm² = 14.223 lb/pg²

Volumen

1 bl = 5.6146 pies³

Temperatura

°F = 1.8°C + 32

$$1 \text{ m}^3 = 6.2898 \text{ bls}$$

$$^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$1 \text{ m}^3 = 35.314 \text{ pies}^3$$

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460$$

Masa

Densidad

$$1 \text{ lb} = 453.59 \text{ gr.}$$

$$1 \text{ gr}/\text{cm}^3 = 62.428 \text{ lb}/\text{pie}^3$$

$$1 \text{ Kg} = 2.2046 \text{ lb.}$$

$$1 \text{ gr} / \text{cm}^3 = 350.63 \text{ lb}/\text{bl}$$

$$1 \text{ lb}/\text{ft}^3 = 5.6166 \text{ lb}/\text{bl}$$

GRADIENTE DE PRESION

$$1 \text{ Kg}/\text{cm}^2/\text{m} = 4.33 \text{ lb}/\text{pg}^2/\text{pie}$$

$$1 \text{ lb}/\text{pg}^2/\text{pie} = 0.23094 \text{ Kg}/\text{cm}^2/\text{m}$$

CONVERSION DE lb/pg² DE PRESION A pie DE CARGA

$$P (\text{lb}/\text{pg}^2) \times 2.31 (\text{pie} / \text{lb}/\text{pg}^2) = 2.31 \text{ pie}$$

1) A partir de los datos de una prueba de producción

y el gasto de líquidos que se desea obtener en la superfi-

cie, se determina la presión de fondo fluyendo, utilizando

la correlación propuesta por Vogel.

$$J = \frac{q_o}{P_{ws} - P_{wf}}$$

$$P_{wf} = P_{ws} - \frac{q_o}{J}$$

$$J = \frac{0.79 \text{ bls/dfa}}{\text{lb/pg}^2}$$

$$q_0 = 1022.125 \text{ bls/dfa}$$

$$P_s = 2270.8 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{wf} = 2270.8 - \frac{1022.125}{0.79} = 977 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{wf} = 977 \text{ lb/pg}^2 = 68.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{Q_0}{Q_{\max}} = 1.0 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2 \quad (1)$$

Sustituyendo valores:

$$\frac{1022.125}{Q_{\max}} = 1.0 - 0.2(976.97/2270.8) - 0.8(976.97/2270.8)^2$$

$$Q_{\max} = 1334.3668 \text{ bls/dfa} = 212.141 \text{ m}^3/\text{día}$$

- 2) Calcular el perfil de presión ascendente partiendo de la presión de fondo fluyendo y con la relación gas-líquido natural de la formación, hasta un punto en que la cantidad de gas libre a condiciones de escurrimiento, menos el porcentaje de gas que el separador envía el espa -

cio anular, es igual a la cantidad de gas libre que tolera la -
bomba.

$$G_l \text{ a c. e} = (RGA - R_s) \times B_g / B_o \quad -(2)$$

$$G_l \text{ tb a c. e} = G_l \times (1 - E_f \text{ separ.}) (\text{pies}^3 \text{ gas/bls aceite}) \quad -(3)$$

$G_l \text{ a c. e}$ = Relación gas libre - aceite ($\text{pies}^3 \text{ gas/bls aceite}$)

RGA = Relación gas - aceite ($\text{pies}^3 / \text{bls}$) a c. atm = 149.77

R_s = Relación gas disuelto - aceite ($\text{pies}^3 / \text{bl}$) a c. atm = 25.1474

B_g = Factor volumen del gas a c. e = 0.021482 ($\text{pie}^3 / \text{pie}^3$)

B_o = Factor volumen del aceite a c. e = 1.1346 (bl/bl)

Relación gas fluido permisible en la bomba = 1.0 ($\text{pies}^3 / \text{bl}$)

$$G_l \text{ a c. e} = (149.77 - 25.1474) 0.021482 / 1.1346$$

$$G_l \text{ a c. e} = 2.3785 (\text{pies}^3 / \text{bl})$$

$E_f \text{ separ.}$ = Eficiencia del separador de gas = 0.5

$G_l \text{ tb}$ = Relación gas libre - aceite que tolera la bomba a c. e

$$G_l \text{ tb} = 2.3785 \times (1 - 0.5)$$

$$G_{ltb} = 1.18925 \text{ (pies}^3/\text{bl)}$$

Punto A de la Figura III.3.

La presión en este punto es :

$$\text{Presión succión} = 53 \text{ Kg/cm}^2 = 753.819 \text{ lb/pg}^2$$

Y la profundidad en este punto es :

$$\text{Prof. coloc. de la bomba} = 1933.41 \text{ mts} = 6343.5 \text{ pies}$$

3) Calcular el perfil de presión descendente, partiendo de la presión requerida en la boca del pozo y con una relación gas-líquido igual a la de la formación, menos la cantidad de gas libre enviado al espacio anular, hasta alcanzar la profundidad de colocación de la bomba.

Ver figura III.3(Punto B).

La presión en este punto es :

$$\text{Presión de descarga} = 75.62 \text{ Kg/cm}^2 = 1075.541 \text{ lb/pg}^2$$

El cálculo de los perfiles ascendente y descendente

(incisos 2 y 3) se realizó utilizando métodos para determi

minar caídas de presión en tuberías verticales con flujo -
multifásico.

El método más apropiado para este procedimiento
es el de Orkiszewski ya que se ajusta al comparar los va-
lores de presión calculados valores de presión medidos -
directamente en las tuberías de producción de los pozos.

La carga dinámica total esta calculada también en
base a este método, ya que este, incluye las pérdidas por
fricción en la T.P y línea superficial, la diferencia de -
elevación entre el destino final del fluido producido y la -
profundidad de la bomba. toda pérdida en la línea de des-
carga (válvulas, separador, etc.) y si hay carga de suc_
ción de la bomba debida a la columna de fluido por arri -
ba de la succión. (7)

En la figura ~~4.1~~ se presenta la distribución de los -
perfiles de los incisos 2 y 3 .

4) Cálculo de la carga dinámica total (CDT)

Dens. Relat. en la succión de la mezcla = 0.41097 ($\bar{\gamma}_{rs}$)

Dens. Relat. en la descarga de la mezcla = 0.5440 ($\bar{\gamma}_{rd}$)

Dens. Relat. media en la bomba ($\bar{\gamma}_{rB}$)

$$\bar{\gamma}_{rB} = \frac{\bar{\gamma}_{r \text{ succión}} + \bar{\gamma}_{r \text{ descarga}}}{2} = \frac{0.41097 + 0.5440}{2}$$

$$\bar{\gamma}_{rB} = 0.477485$$

La carga dinámica total (CDT) es:

$$CDT = \frac{AP_t \times 2.31}{\bar{\gamma}_{rB}} \quad (4)$$

$$CDT = \frac{321.7243 \times 2.31}{0.477485} \quad (\text{pies})$$

$$CDT = 1556.45 \quad \text{pies}$$

5) Calcular el incremento total de presión requerido;

La diferencia entre las presiones de descarga y -
succión de la bomba es el incremento de presión neces-

rio para obtener en la superficie el gasto deseado.

$$P_d - P_s = \Delta P_t \quad - (5)$$

$$75.62 - 53 = 22.62$$

$$\Delta P_t = 22.62 \text{ Kg/cm}^2 = 321.7243 \text{ lb/pg}^2$$

6) Dividir el incremento total de presión en " n " - incrementos iguales con el fin de determinar la magnitud de los cambios de volumen y de establecer la necesidad de cambiar o no la capacidad volumétrica de las etapas.

Incremento total de presión (ΔP_t) \div n = Incremento de

$$\frac{\Delta P_t}{n} = \Delta P_i \quad - (6) \quad \text{presión iguales}$$

en el interior de

Para n = 10

la bomba (ΔP_i)

$$\frac{22.62}{10} = 2.262$$

$$\Delta P_i = 2.262 \text{ Kg/cm}^2 = 32.17243 \text{ lb/pg}^2$$

Las densidades específicas de cada incremento -

de presión en el interior de la bomba para el aceite y para el gas -
son distintas.

Cálculo de la RGL_2 existente en el perfil de presión des -
cendente después de que la cantidad de gas libre es mandada al es -
pacio anular por el separador del aparejo.

$$RGL_2 = (Gltb / Bg) Bo + Rs = (1.1895 / 0.021482) 1.1318 + 25.1474$$

$$RGL_2 = 87.97 \text{ (pies}^3\text{/bls)}$$

De la figura IV.4 para cada incremento de presión -
 $\Delta Pi/n = 32.1724 \text{ lb/pg}^2$ obtenemos Bo a c. e (bls/bls) Bg a c. e -
($\text{pies}^3 / \text{pies}^3$) y Rs a c. e ($\text{pie}^3\text{/bls}$) desde la presión de succión
hasta la de descarga.

N	Presión (lb/ pg^2)	Bo	Bg	Rs
	Succión = 753.819	1.1318	0.021482	25.1474
1	785.991	1.1370	0.020000	27.0660
2	818.164	1.1410	0.019000	28.3820
3	850.336	1.1450	0.018000	29.7080

4	882.509	1.1480	0.018000	31.0450
5	914.681	1.1520	0.017000	32.3910
6	946.854	1.1560	0.016000	33.7470
7	979.026	1.1600	0.016000	35.1120
8	1011.198	1.1640	0.015000	36.4870
9	1043.371	1.1680	0.015000	37.8700
10 Descarga=	1075.543	1.1720	0.014000	39.2620

Tabla. I

De la correlación de Standing se obtuvieron los valores del factor de volumen del aceite (B_o) y la relación gas disuelto-aceite (R_s). Se consideró la temperatura constante a lo largo de la bomba.

El factor de volumen del gas (B_g), se obtuvo a partir de la ecuación de gases reales.

$$B_g = 0.00504 \frac{ZT}{P} \text{ (pie}^3 \text{ pie}^3 \text{)}$$

7) Iniciando con $n=1$ hasta $n=10$

Calcular el gasto, masa y densidad de la mezcla de aceite, gas y agua a las condiciones de presión inicial y final del incremento de presión (ΔP_i) " n ".

La realización de estos cálculos requiere conocer los valores de B_o y R_s (Tabla I)

Iniciando con $n=1$ (desde la succión a $n=1$)

Datos:

Succión	$n=1$
$B_o = 1.1318 \text{ bls/bls}$	$B_o = 1.137 \text{ bls/bls}$
$B_g = 0.021482 \text{ pies}^3 / \text{pies}^3$	$B_g = 0.02 \text{ pies}^3 / \text{pies}^3$
$R_s = 25.1474 \text{ pies}^3/\text{bls}$	$R_s = 27.066 \text{ pies}^3 / \text{bls}$
$q_t = 1022.125 \text{ bls/día}$	Porcentaje agua = $8.000\% = 0.08$

Relación gas líquido (RGL₂) = $87.97 \text{ pies}^3/\text{bls}$

$\gamma_o = 0.8760$ $\gamma_g = 0.9000$ $\gamma_w = 1.0200$

Solución.

Succión:

$$\text{Gas libre} = 87.97 - 25.1474 = 62.8226 \text{ pies}^3/\text{bl}$$

Volumen de aceite, agua y gas libre a condiciones de succión asociado con 1 STB (barril estándar)

Aplicando la ecuación 7:

$$\text{Vol. aceite} + \text{Vol. agua} + \text{Vol. gas} = 1.1318 + 0.08(1.02) + 62.8226(0.021482)$$

$$= 2.563 \text{ bls/STB}$$

$n=1$

$$\text{Gas libre} = 87.97 - 27.066 = 60.904 \text{ pies}^3/\text{bl}$$

Volumen de aceite, agua y gas libre a condiciones para $n=1$ asociado con 1 STB (barril estándar)

Aplicando la ecuación 7:

$$\text{Vol. aceite} + \text{Vol. agua} + \text{Vol. gas} = 1.137 + 0.08(1.02) + 60.904(0.02)$$

$$= 2.437 \text{ bls/STB}$$

De la ecuación 8 el gasto de aceite es :

$$q_o = q_t - q_w = 1022.125 - 0.08(1022.125) = 940.355 \text{ bls/día}$$

De la ecuación 9 el volumen total producido es :

$$\text{Succión} = 940.355 \times 2.563 = 2410.13 \text{ bls/día} = 383.17 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{En } n=1 \text{ es } = 940.355 \times 2.437 = 2291.34 \text{ bl/día} = 364.284 \text{ m}^3/\text{día}$$

De la ecuación 10 la masa de aceite, agua y gas por 1 STB:

$$\text{Masa aceite} = o(62.4 \text{ lb/pie}^3)(5.615 \text{ pie}^3/\text{bls}) = 0.8760(350) = 306.6 \text{ lb/STB}$$

$$\begin{aligned} \text{Masa de agua} &= w(62.4 \text{ lb/pie}^3)(5.615 \text{ pie}^3/\text{bls})(0.08) = 1.02(0.08)(350) \\ &= 28.56 \text{ lbs/STB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Masa de gas} &= g(\text{RGL}_2 \text{ pie}^3/\text{bl})(0.0764 \text{ lb/pie}^3)(5.615 \text{ pie}^3/\text{bls}) \\ &= 0.9(87.97)(0.428986) = 33.96 \text{ lbs/STB} \end{aligned}$$

Masa total de la mezcla es igual a la masa de aceite + masa de agua +

$$\text{masa de gas} = 306.6 + 28.56 + 33.96 = 369.12 \text{ lbs/STB}$$

De la ecuación 11 el gasto másico (GM) es:

$$\text{GM} = 369.12 \text{ lbs/bl} \times 940.355 \text{ bl/día} = 347103.83 \text{ lbs masa / día}$$

De la ecuación 12 la densidad de la mezcla (γ_m)

$$\gamma_m = \text{Masa} / \text{Volumen}$$

$$\text{Para la succión es } = 369.12 / (2.563)(5.615) = 25.645 \text{ lbm/pie}^3$$

$$\text{Para } n=1 \text{ es } = 369.12 / (2.437)(5.615) = 26.971 \text{ lbm/pie}^3$$

De la ecuación 13 la densidad relativa de la mezcla (γ_{rm}):

$$\text{Para la succión es } = 25.645 / 62.4 = 0.41097$$

Para $n=1$ es $= 26.971/62.4 = 0.4322$

8) Densidad relativa promedio de la mezcla en el intervalo desde la succión hasta $n=1$.

De la ecuación 14 la $\overline{\gamma}_{rm}$ es :

$$\overline{\gamma}_{rm} = 0.41097 + 0.4322/2 = 0.4216$$

9) Calcular el gradiente de presión en los puntos -- inicial y final del incremento "n" (ΔP_i) y el gradiente de presión promedio entre estos puntos.

De las ecuaciones 15 y 16 G_r y $\overline{G_r}$ son :

En la succión $G_r = 25.645/144 = 0.1781 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$

Para $n=1$ $G_r = 26.971 / 144 = 0.1873 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$

$$\overline{G_r} = 0.1781 + 0.1873 / 2 = 0.1827 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

10) Calcular el gasto promedio en el intervalo "n".

De la ecuación 17 :

$$\overline{q}_{\text{producido}} = 2410.13 + 2291.34 / 2 = 2350.74 \text{ bls/d}^{\text{d}}\text{a}$$

$$\overline{q}_{\text{producido}} = 2350.74 \text{ bls/d}^{\text{d}}\text{a} = 373.73 \text{ m}^3/\text{d}^{\text{d}}\text{a}$$

11) Elegir el grupo de curvas características de bombas que ajustan en el interior de la tubería de revestimiento del pozo ($5 \frac{1}{2}$ PG) y de estas, seleccionar la que maneje el gasto promedio con máxima eficiencia.

Para efectos de simplificación de este trabajo se presentan únicamente los resultados de los incrementos de presión $n=2$ y $n=3$. Para $n=4$ cambia y se presentan los cálculos completos. Para el resto de los incrementos desde $n=5$ hasta $n=10$; solamente se presentan los resultados. A medida que se avanza con los incrementos de depresión en el interior de la bomba, la gráfica de curvas características seleccionada puede cambiar, lo cual significa que el volumen de la mezcla se ha reducido considerablemente y que la capacidad volumétrica de las primeras etapas cae fuera del rango de máxima eficiencia, por lo que se selecciona otra gráfica que cumpla con este requisito.

Esto da lugar a que el diseño de la bomba sea de dos sec
ciones de etapas. Si la situación descrita se repite, la -
bomba puede tener más de dos secciones.

El gasto de la bomba debe manejar = 2350.74 bls/día

Diámetro de la T.R es 5.5 pulgadas

La curva de comportamiento seleccionada es:

Bomba Reda de 100 etapas

No. Identificación de bomba DN 3000 - 60 Hz

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpm

El valor nominal de la densidad específica es =1.0

12) Leer en la curva característica elegida de la bom

ba, la carga que desarrolla y la potencia que requiere por

etapa cuando maneja el gasto promedio producido figura III.1.

La eficiencia de la bomba es de 64.5 %

La potencia para el gasto promedio es de 60 HP

La capacidad de carga es de 2330 pies

13) Determinar el incremento de presión desarrollada por etapa, multiplicando la carga por el gradiente promedio.

Con \bar{G}_r y la capacidad de carga .

$$REDA = 2330 \text{ pies}/100 \text{ etapas} = 23.3 \text{ pies}/\text{etapa}$$

Este valor es el de la carga de columna de fluido desarrollado por etapa. De la ecuación 18 se tiene:

$$\Delta Pe = 23.3 \text{ pie}/\text{etapa} \times 0.1827 \text{ lb}/\text{pg}^2/\text{pie} = 4.257 \text{ lb}/\text{pg}^2/\text{etapa}$$

ΔPe = Incremento de presión desarrollada por etapa.

14) Calcular el número de etapas que se requiere para obtener el incremento de presión " n " dividiendo este entre la presión por etapa:

De la ecuación 19 se tiene:

$$NE = 32.17243 / 4.262 = 7.558$$

15) Calcular la potencia necesaria, multiplicando la potencia por etapa, por el número de etapas y por la den

sidad relativa promedio del intervalo "n".

De la ecuación 20 se tiene:

$$\text{REDA} = 60 \text{ HP} / 100 \text{ etapas} = 0.6 \text{ HP/etapa}$$

$$\text{HP} = 0.6 \text{ HP/etapa} \times 7.558 \times 0.4216 = 1.9118$$

6) Incremento de presión desde $n=1$ hasta $n=2$

$$\underline{\underline{n=1}}$$

$$V_t = 2.437 \text{ bls/STB}$$

$$V_{op} = 2291.34 \text{ bls/dfa}$$

$$\gamma_m = 26.971 \text{ lbm/pie}^3$$

$$\gamma_{rm} = 0.4322$$

$$Gr = 0.1873 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\underline{\underline{n=2}}$$

$$V_t = 2.355 \text{ bls/STB}$$

$$V_{op} = 2214.54 \text{ bls/dfa}$$

$$\gamma_m = 27.91 \text{ lbm/pie}^3$$

$$\gamma_{rm} = 0.4473$$

$$Gr = 0.1938 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\overline{\gamma}_{rm} = 0.43975$$

$$\overline{Gr} = 0.1906 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

El gasto que la bomba debe manejar $\overline{Vop} = 2252.94$ bls/dña

No. de Identificación de bomba; DN 3000

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpm

La eficiencia de la bomba es de 63.3%

La potencia para el gasto promedio es de 61 HP

La capacidad de carga es de 2403 pies

$$NE = 7.0244$$

$$HP = 1.8843$$

Incremento de presión desde $n=2$ hasta $n=3$

$n=3$

$$Vt = 2.275 \text{ bls/STB}$$

$$Vop = 2139.6 \text{ bls/dña}$$

$$\gamma_m = 28.89 \text{ lbm/pie}^3$$

$$\gamma_{rm} = 0.463$$

$$Gr = 0.2006 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\overline{\gamma}_{rm} = 0.45515$$

$$\overline{Gr} = 0.19722 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\overline{Vop} = 2177 \text{ bl/dña}$$

No. de identificación de bomba: DN 3000

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpm

La eficiencia de la bomba es de 63%

La potencia para el gasto promedio es de 60.6 HP

La capacidad de carga es de 2435 pies

NE = 6.699

HP = 1.8477

Incremento de presión desde n=3 hasta n=4

DATOS:

n=3

n=4

Bo=1.145 bls/bls

Bo=1.148 bls/bls

Bg = 0.018 pies³ / pies³

Bg = 0.018 pies³ / pies³

Rs= 29.708 pies³ / STB

Rs= 31.045 pies³ / STB

qt =1022.125 bls/día

Porcentaje de agua=8

RGL₂ =87.97 pies³ /STB

q_o = 940.355 bls/día

$\gamma_o = 0.876$

$\gamma_g = 0.900$

$\gamma_w = 1.020$

Solución:

$$n=3;$$

$$\text{Gas libre} = 87.97 - 29.708 = 58.262 \text{ pies}^3/\text{STB}$$

$$V_t = 1.145 + 0.08(1.02) + 58.262(0.018) = 2.275 \text{ bls}/\text{STB}$$

$$n=4;$$

$$\text{Gas libre} = 87.97 - 31.045 = 56.925 \text{ pies}^3/\text{STB}$$

$$V_t = 1.148 + 0.08(1.02) + 56.925(0.018) = 2.25 \text{ bls}/\text{STB}$$

$$V_{op} = 940.355(2.275) = 2139.6 \text{ bls}/\text{día} \text{ en } n=3$$

$$V_{op} = 940.355(2.25) = 2115.8 \text{ bls}/\text{día} \text{ en } n=4$$

$$\text{Masa total} = 369.12 \text{ lsm}/\text{STB}$$

$$n=3$$

$$n=4$$

$$\gamma_m = 369.12 / 2.275(5.615)$$

$$\gamma_m = 369.12 / 2.25(5.615)$$

$$= 28.89 \text{ lsm}/\text{pie}^3$$

$$= 29.212 \text{ lsm}/\text{pie}^3$$

$$\gamma_{rm} = 28.89 / 62.4 = 0.463$$

$$\gamma_{rm} = 29.212 / 62.4 = 0.46814$$

$$Gr = 28.89 / 144 = 0.2006 \text{ (lb/pg}^2/\text{pie)} \quad Gr = 29.212 / 144 = 0.20286$$

$$\overline{\gamma_{rm}} = 0.46557$$

$$\overline{Gr} = 0.20175$$

$$\overline{V_{op}} = 2127.7 \text{ bls}/\text{día}$$

$$\text{(lb/pg}^2/\text{pie)}$$

El gasto que la bomba debe manejar es=2127.7 bls/dfa

El diámetro de la T.R es de 5.5 pulgadas.

La curva de comportamiento seleccionada para la bomba es de 100 etapas figura IV.1.

No. de Identificación de bomba ; D 55E -60 Hz

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpm.

La eficiencia de la bomba es de 56%

La potencia para el gasto producido promedio es 58 HP

La capacidad de carga es de 2140 pies.

De la curva de comportamiento:

REDA = 2140 pies/100 etapas = 21.4 pie/etapa

$\Delta P_e = 21.4 \text{ pie/etapa} \times 0.20175 \text{ lb/pg}^2/\text{pie} = 4.3174 \text{ lb/pg}^2/\text{eta}$

NE = $32.17243/4.3174 = 7.45$

De la curva de comportamiento:

REDA= 58 HP/100 etapas = 0.58HP/etapa

HP = 0.58 HP/etapa X 7.45 etapas X 0.46557=2.012

Incremento de presión desde $n=4$ hasta $n=5$

$n=5$

$$V_t = 2.178 \text{ bls/STB}$$

$$V_{op} = 2048.5 \text{ bls/día}$$

$$\gamma_m = 30.178 \text{ lbm/pie}^3$$

$$\gamma_{rm} = 0.4836$$

$$Gr = 0.2096 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\overline{\gamma}_{rm} = 0.47588$$

$$\overline{Gr} = 0.2062 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

El gasto que la bomba debe manejar $\overline{V}_{op} = 2082.15 \text{ bls/día}$

No. de Identificación de bomba ; D55E -60 Hz

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpm

La eficiencia de la bomba es de 56%

La potencia para el gasto promedio es de 57 HP

La capacidad de carga es de 2185 pies

$$NE = 7.14$$

$$HP = 1.937$$

Incremento de presión desde $n=5$ hasta $n=6$

n=6

$$V_t = 2.105 \text{ bls/STB}$$

$$V_{op} = 1979.6 \text{ bls/dfa}$$

$$\gamma_m = 31.22 \text{ lbm/pie}^3$$

$$\gamma_{rm} = .5004$$

$$Gr = 0.21684 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\overline{\gamma}_{rm} = 0.492$$

$$\overline{Gr} = 0.21322 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

El gasto que la bomba debe manejar $V_{op}=2014 \text{ bls/dfa}$

No. de Identificación de bomba: D55E-60 Hz

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpm

La eficiencia de la bomba es de 56%

La potencia para el gasto promedio es de 58 HP

La capacidad de carga es de 2230 pies

$$NE = 6.766$$

$$HP = 1.93$$

Incremento de presión desde $n=6$ hasta $n=7$

n=7

$$V_t = 2.087 \text{ bls/STB}$$

$$V_{op} = 1962.83 \text{ bls/dfa}$$

$$\gamma_m = 31.494 \text{ lbm/pt}^3$$

$$\gamma_{rm} = 0.5047$$

$$Gr = 0.2187 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\overline{\gamma}_{rm} = 0.502554$$

$$\overline{Gr} = 0.21777 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

El gasto que la bomba debe manejar $\overline{V}_{op} = 1971.215 \text{ bls/dfa}$

No. de Identificación de bomba : D55E-60 Hz

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpm

La eficiencia de la bomba es de 56%

La potencia para el gasto promedio es de 57 HP

La capacidad de carga es de 2267 pies

$$NE = 6.5$$

$$HP = 1.867$$

Incremento de presión desde $n=7$ hasta $n=8$

$$\underline{\underline{n=8}}$$

$$V_t = 2.018 \text{ bls/STB}$$

$$V_{op} = 1897.5 \text{ bls/día}$$

$$\gamma_m = 32.57 \text{ lbm/pie}^3$$

$$\gamma_{rm} = 0.522$$

$$Gr = 0.226185 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\overline{\gamma}_{rm} = 0.5133$$

$$\overline{Gr} = 0.2224 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

El gasto que la bomba debe manejar $V_{op} = 1930.2 \text{ bls/día}$

No. de Identificación de bomba: D55E-60 Hz

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpm

La eficiencia de la bomba es de 56%

La potencia para el gasto promedio es de 56 HP

La capacidad de carga es de 2302 pies

$$NE = 6.283$$

$$HP = 1.806$$

Incremento de presión desde $n=8$ hasta $n=9$

$$\underline{n=9}$$

$$V_t = 2.001 \text{ bls/STB}$$

$$V_{op} = 1881.74 \text{ bls/día}$$

$$\gamma_m = 32.846 \text{ lbm/pie}^3$$

$$\gamma_{rm} = 0.5264$$

$$Gr = 0.2281 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\overline{\gamma}_{rm} = 0.5242$$

$$\overline{Gr} = 0.2271 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

El gasto que la bomba debe manejar $\overline{V}_{op} = 1889.6 \text{ bls/d}^{\text{a}}$

No. de Identificación de bomba: D55E-60 Hz

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpr

La eficiencia de la bomba es de 56%

La potencia para el gasto promedio es de 56 HP

La capacidad de carga es de 2334 pies

$$NE = 6.07$$

$$HP = 1.78$$

Incremento de presión desde $n=9$ hasta $n=10$ ó descarga

$n=10$

$$V_t = 1.936 \text{ bls/STB}$$

$$V_{op} = 1820.5 \text{ bls/d}^{\text{a}}$$

$$\gamma_m = 33.95 \text{ lbm/pie}^3$$

$$f_{rm} = 0.544$$

$$Gr = 0.2358 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\overline{f_{rm}} = 0.5352$$

$$\overline{Gr} = 0.2319 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

El gasto que la bomba debe manejar $V_{op} = 1851 \text{ bls/dra}$

No. de Identificación de bomba: D55E-60 Hz

La bomba seleccionada es de la serie 400-3500 rpm

La eficiencia de la bomba es de 56%

La potencia para el gasto promedio es de 55.8 HP

La capacidad de carga es de 2363 pies

$$NE = 5.87$$

$$HP = 1.753$$

17) Sumar de cada incremento el número total de eta

pas y la potencia total requerida de los incisos 13 y 14:

$$\begin{aligned} \text{No. total de etapas} &= 7.558 + 7.02 + 6.699 + 7.45 + 7.14 + 6.766 + \\ & 6.15 + 6.283 + 6.07 + 5.87 = 67.357 \text{ eta.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia total requerida} &= 1.9118 + 1.884 + 1.8477 + 2.012 + \\ & 1.937 + 1.93 + 1.867 + 1.806 + 1.73 \\ & + 1.753 = 18.7285 \text{ HP} \end{aligned}$$

La tabla II es un resumen de resultados del ejercicio de -
aplicación.

N	Vl bls/STB	Vop bls/día	γ _m lbm/pla ³	γ _{rm} o dim.	Gr lb/pg ³ /pla	γ _{rm}	Gr	Vop	CURVA DE COMPORTAMIENTO SELECCIONADA	EFIC. (%)	POT. REQ. (hp)	CAP. CARGA (pies)	N	E	H	P
						a dim.	lb/pg ³ /pie	bls/día								
S	2.663	2410	26.648	0.4109	0.1761				BOMBA REDA							
						0.4216	0.1827	2351	100 ETAPAS	64.6	60.0	2330	7.558		1.9118	
1	2.437	2291	26.971	0.4332	0.1873				NUM.DE IDENTIF.							
						0.4397	0.1906	2253	DE BOMBA	63.3	61.0	2403	7.024		1.6643	
2	2.386	2216	27.91	0.4473	0.1938				DN3000-60Hz							
						0.4551	0.1972	2177	SERIE	63.3	60.6	2435	6.699		1.6477	
3	2.275	2140	28.89	0.4630	0.2009				400-3500 RPM							
						0.4656	0.2017	2128	BOMBA REDA	56.0	58.0	2140	7.450		2.0120	
4	2.250	2116	29.21	0.4681	0.2028											
						0.4759	0.2062	2082	100 ETAPAS	56.0	57.0	2185	7.140		1.9370	
5	2.178	2049	30.16	0.4836	0.2096											
						0.4920	0.2132	2014	NUMERO DE	56.0	58.0	2230	6.766		1.9800	
6	2.105	1980	31.22	0.5004	0.2168											
						0.5025	0.2177	1971	IDENTIFICACION	56.0	57.0	2267	6.500		1.6670	
7	2.067	1963	31.49	0.5047	0.2187											
						0.5133	0.2224	1930	DE BOMBA	56.0	56.0	2302	6.283		1.6060	
8	2.018	1898	32.57	0.5220	0.2262											
						0.5242	0.2271	1890	D55E-60Hz	56.0	58.0	2334	6.070		1.7800	
9	2.001	1882	32.86	0.5264	0.2281											
						0.5352	0.2319	1851	SERIE	56.0	56.6	2363	5.870		1.7530	
10	1.936	1821	33.95	0.5440	0.2358											
D									400-3500RPM	No.TOTAL ETAPAS 67.387			POTENCIA TOTAL REQUERIDA 16.7266			

$GI_{fb} = 1.189 \text{ pies}^3/\text{bl}$
 $RGL_1 = 149.77 \text{ pies}^3/\text{bl}$
 $RGL_2 = 87.97 \text{ pies}^3/\text{bl}$
 $CDT = 556.45 \text{ pies}$

$Q_T = 1022 \text{ bls/día}$
 $Q_o = 940 \text{ bls/día}$
 Masa Total Mezcla = 369.12 lbm/bl
 Gasto Mésico = 347103.8 lbm/día

DISEÑO DE LA BOMBA DE DOS
 SECCIONES DE ETAPAS

TABLA III

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) La aplicación del procedimiento de diseño de aparatos de bombeo eléctrico propuesto, considera los efectos del gas libre en la tubería de producción y en el interior de la bomba, dando como resultado que se reduzcan considerablemente el número de etapas de la bomba y la potencia requerida del motor para impulsarla.
- 2) La consideración de la reducción sucesiva del volumen de fluidos desde la presión de succión hasta la presión de descarga, trae como resultado el diseño de una bomba constituida por dos o más secciones de etapas, de las cuales cada una maneja con máxima eficiencia el volumen de fluidos variable en el interior de la bomba.
- 3) A fin de facilitar los cálculos del diseño para pozos candidatos a producir con bombeo eléctrico, se recomienda automatizarlos mediante un programa de cómputo que inclu-

ya la selección de las curvas características de la sección o secciones de la bomba y que permita analizar diferentes opciones de diseño al variar la presión de fondo fluyendo, la relación gas-líquido, el porcentaje de agua producida y la geometría de los aparejos de producción.

4) Para complementar la aplicación del procedimiento de diseño de aparejos de bombeo eléctrico para pozos petroleros, se menciona la selección del motor y del resto del equipo, con el fin de asegurar una buena operación del mismo.

REFERENCIAS

- 1.- Villa J.E. y Acuña R. A. " Bombeo Centrifugo -
en pozos con flujo multifásico" Revista I.M.P.-
Abril , 1971.
- 2.- Hicks, Tyler G. " Pump Selection and Applica-
tion" Mc Graw Hill Book Co. (1957) New York,
N. Y.
- 3.- T.R.W. Reda Pumps. Service Manual , Nov. —
1978.
- 4.- Vogel. J.V. "Inflow Performance Relationship-
for Solution Gas Drive Wells". J.P.T., (Jan.,
1978).
- 5.- K.E. Brown. " The Technology of Artificial lift
Methods". Vol. 2a. University of Tulsa. Penn -
well Publishin, Co. 1980. Tulsa, Ok.

- 6.- Standing M. B. " A General Pressure-Volume -
Temperature Correlation for Mixtures of Cali -
fornia Oils and Greases " . Drill and Prod. Prac.
API (1974). 275.
- 7.- Orkiszewski, J. " Predicting Two-Phase Pressur
e Drops in Vertical Pipes " J. P. T. (June, 1967).
- 8.- Diaz Z. H. y Poblano O.R. " Revista de Ingenier
ía Petrolera " Pag's. 18-27 julio de 1984.