

22  
x y



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**"COMBINACION DE SISTEMAS ARTIFICIALES  
PARA LA EXPLOTACION DE UN  
POZO PETROLERO"**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A**

**SILVESTRE RAMIREZ QUINTANAR**



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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## I N D I C E

### INTRODUCCION

#### CAPITULO I

PAGINA

I.0	BOMBEO NEUMATICO	1
I.1	BOMBEO NEUMATICO CONTINUO	2
I.2	BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE	3
I.3	DESCRIPCION DEL EQUIPO	4
I.4	CAPACIDAD PRODUCTORA DEL POZO	7
I.5	ESPACIAMIENTO DE VALVULAS	9

#### CAPITULO II

II.0	BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO	14
II.1	COMPONENTES DEL SISTEMA	14
II.2	DESCRIPCION DEL EQUIPO	15
II.3	GENERALIDADES DEL DISEÑO	23
II.4	PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO	25
II.5	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	31

#### CAPITULO III

III.0	SISTEMA COMBINADO	32
III.1	EJEMPLO ILUSTRATIVO	32
III.2	LIMITACIONES Y VENTAJAS	33

## INTRODUCCION

La cantidad de hidrocarburos que pueden ser recuperados de un yacimiento, depende de las características del sistema roca-fluidos, es decir para que haya producción de hidrocarburos es necesario que la energía del yacimiento, sea superior a las pérdidas de presión que se tienen en el recorrido del fluido, desde el yacimiento hasta la superficie.

Durante la vida productiva de un pozo, éste pasa por diferentes etapas de producción, en su etapa final cuando la presión del yacimiento es insuficiente para expulsar a los fluidos hasta la superficie ó cuando el volumen de fluidos producidos es muy bajo y se desea incrementarlo, es entonces cuando el pozo se hace candidato para la instalación de un sistema de producción artificial, el cual debe seleccionarse cuidadosamente de acuerdo a las condiciones particulares de cada pozo.

En la selección de un sistema es prudente considerar todos los parámetros que intervienen en la producción del pozo, uno de los factores más importantes que intervienen en la selección del equipo a utilizar, es el factor económico, que se concentra en la obtención de un sistema de extracción al mínimo costo.

Este trabajo presenta como posible alternativa la utilización de los sistemas de bombeo electrocentrífugo y neumático en forma combinada, a fin de obtener un sistema de extracción más eficiente y económico.

## I. BOMBEO NEUMATICO.

El bombeo neumático es un sistema de producción artificial, que se utiliza para la extracción de los hidrocarburos contenidos en el pozo, cuando la energía del yacimiento no es suficiente para expulsar los fluidos contenidos en él hasta la superficie.

Este sistema utiliza la energía contenida en el gas de inyección en forma de presión, que al penetrar en la tubería de producción mediante dispositivos de control que la comunican con el espacio anular, eleva los fluidos hasta la superficie. La función de la inyección de gas es la de aerear la columna de líquido en la tubería de producción, para que con una presión menor que la presión de fondo fluyendo puedan salir los fluidos hasta la superficie.

Para que se tenga en el sistema una máxima eficiencia es necesario analizar debidamente cada uno de los siguientes factores

- a) Comportamiento de la presión del yacimiento.
- b) Diámetro de la tubería de producción y de la tubería, de revestimiento.
- c) Características de los fluidos.
- d) Presión disponible de gas.
- e) Relación gas-aceite. (RGA)
- f) Presión de gas de inyección.
- g) Relación agua-aceite.
- h) Disponibilidad de gas.

El bombeo neumático debido a su mecanismo de funcionamiento se clasifica en:

- a) Bombeo Neumático Continuo.

## b) Bombeo Neumático Intermitente.

### I.I. BOMBEO NEUMATICO CONTINUO.

Este sistema consiste en forzar gas comprimido en el espacio anular en forma continua hacia la tubería de producción, con una presión ligeramente mayor que la de la columna de líquido -- contenida en ella, con el propósito de hacerla menos densa, y de esa forma impulsar el flujo del fluido a la superficie.

Otra alternativa es la de inyectar gas en forma continua -- por el extremo superior de la tubería de producción, haciendo -- fluir a los líquidos por el espacio anular hasta la superficie. El gas introducido así dentro de la corriente ascendente del --- fluido aligera la columna de aceite, y en su esfuerzo por expandirse lo arrastra hacia la superficie.

#### I.I.I. APLICACION DEL BOMBEO NEUMATICO CONTINUO.

Este sistema ha tenido gran aceptación debido a que bajo -- ciertas condiciones su uso resulta más ventajoso que el de los - demás sistemas convencionales de producción artificial.

- a) Se aplica en pozos que por alguna razón dejaron de fluir.
- b) Se aplica en pozos que han declinado notablemente su producción.
- c) En pozos productores de gas para quitar algún tapón de líquido que impida el flujo.

#### I.I.2 VENTAJAS

- a) Su uso es conveniente en pozos profundos.
- b) Se tiene flexibilidad en su rango de operación.

- c) El material abrasivo contenido en los fluidos producidos lo -  
afecta poco.
- d) Es aplicable a pozos desviados.
- e) Se tienen bajos costos de operación.
- f) El tiempo de operación depende del equipo que se tenga instala-  
lado.
- g) Su uso es conveniente en pozos con una alta relación gas-acei-  
te.

### I.1.3 DESVENTAJAS

- a) Los rangos de la presión de operación son altos.
- b) La Tubería de producción y la tubería de revestimiento debenen-  
de estar acorde con las condiciones de trabajo de la línea de  
inyección.
- c) En circuito abierto de gas se tienen pérdidas de gas y de --  
energía.
- d) Para pocos pozos los costos de operación se incrementan.

### I.2 BOMBEO NEUMÁTICO INTERMITENTE

Cuando el volumen de gas inyectado en forma continua es ex-  
cesivo y la relación del volumen de líquido producido-gas inyec-  
tado es alta, es cuando se utiliza el bombeo neumático intermi-  
tente. Este sistema consiste en la inyección periódica de gas -  
por el espacio anular hacia la tubería de producción debido a la  
baja presión del pozo y a la baja aportación de fluidos, por par-  
te del yacimiento.

En la parte inferior del aparejo van instaladas cámaras de-  
acumulación, que son dispositivos para almacenar el fluido, a --  
fin de tener un volumen mayor de fluido con la misma presión del  
pozo.

La inyección del bache de gas se realiza cuando la cámara - de acumulación se encuentra llena de aceite después, se espera - otro intervalo de tiempo hasta que la cámara tenga el mismo volumen que el anterior y se inyecta otra cantidad igual de gas.

Durante el recorrido del bache hasta la superficie éste, es penetrado parcialmente por el gas, lo que provoca un colgamiento del líquido que reduce la eficiencia del equipo.

### I.2.1 VENTAJAS

- a) Para producciones de 150 a 300 barriles por día el gas requerido es de 30 a 50% menos que operando con bombeo neumático - continuo.
- b) Con relaciones promedio mas bajas de gas de salida aceite, -- hay menos arrastre de fracciones ligeras de fluido.
- c) Con cada ciclo, el aceite en su mayor parte es elevado delante del gas y por lo tanto hay menos aereación.

### I.2.2 DESVENTAJAS

- a) La presión de operación aumenta con la profundidad.
- b) La eficiencia disminuye con la profundidad.

### I.3 DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo de bombeo neumático esta integrado básicamente -- por:

- a) Compresoras.
- b) Válvulas de inyección.
- c) Cámaras de acumulación.
- d) Tubería de producción.

### 1.3.1 COMPRESORAS

Es la parte del sistema que proporciona el gas a las condiciones requeridas de trabajo, la capacidad de las plantas compresoras esta en función del número de pozos que se tengan para la inyección de gas, de la presión de inyección, del tipo de bombeo neumático que se tenga instalado y del espaciamento de los --- pozos

### 1.3.2.VALVULAS DE INYECCION

Son dispositivos de control que se instalan a intervalos -- previamente calculados hasta una profundidad ya determinada. La función de las válvulas es la de permitir y regular el flujo de gas inyectado en el espacio anular hacia la tubería de producción, con el propósito de aerear la columna de líquido y ayudarla a fluir hacia la superficie.

Para lograr este propósito las válvulas se construyen sensibles a los cambios de presión, tanto en el espacio anular como - en la tubería de producción.

#### 1.3.2.1.CLASIFICACION DE LAS VALVULAS

Estas son clasificadas según el mecanismo de funcionamiento y operación.

- a) Válvulas de fuelle cargadas con nitrógeno con sección piloto- y sección matriz.
- b) Válvulas de fuelle cargadas con nitrógeno y sección matriz.
- c) Válvulas de resorte con sección matriz.
- d) Válvula de resorte con sección piloto y sección matriz.

### I.3.2.2. COMPONENTES PRINCIPALES DE LAS VALVULAS

- 1.- Cuerpo de la válvula.
- 2.- Asiento de la válvula.
- 3.- Domo.
- 4.- Vástago.

El diseño de las válvulas de inyección se hace en base a las condiciones de operación, dependiendo del tipo de bombeo. En el bombeo neumático continuo las válvulas operan semicerradas, a fin de tener el gradiente de presión deseado en la tubería de producción, mientras que en el bombeo neumático intermitente las válvulas operan por periodos permitiendo el paso de grandes volúmenes de gas.

Cualquier daño en alguno de los componentes de las válvulas provoca un funcionamiento deficiente, factor que repercute en una baja en la producción de fluidos con un aumento en el volumen de gas inyectado. Durante la vida útil de una válvula puede afectarse por condiciones desfavorables que se presentan durante la explotación como son:

- a) Incrustación de materiales depositados en el orificio de entrada. (Carbonatos y parafinas)
- b) Entrada de agentes corrosivos (H<sub>2</sub>S)
- c) Entrada de agentes abrasivos (arenamientos)

Sin embargo con información obtenida en pruebas de daño se pueden seleccionar válvulas que minimicen éstos.

### I.3.3. CAMARAS DE ACUMULACION

Son dispositivos que se utilizan en bombeo neumático inter-

mitante donde se tienen bajas presiones de fondo, con el propósito de incrementar la extracción de aceite y reducir la relación de gas inyectado- líquido. La ventaja principal de esta herramienta estriba en el hecho de que para un mismo volumen de líquido, el nivel de éste es menor en la cámara mencionada que en la tubería de producción. Lo anterior reduce la presión sobre el intervalo productor favoreciendo a la aportación de fluidos.

#### I.3.4. TUBERIA DE PRODUCCION

Es la parte del equipo que hace la función de conducir el fluido hasta la superficie, además en ella son instaladas las válvulas de bombeo neumático.

#### I.4 CAPACIDAD PRODUCTORA DEL POZO

Para cuando no se tiene la información sobre la capacidad de producción del pozo, ésta puede ser obtenida determinando el índice de productividad del pozo (J).

##### I.4.1 INDICE DE PRODUCTIVIDAD

El índice de productividad se define como: la medida del potencial del pozo o de su capacidad para producir, y es una propiedad comunmente medida de los pozos. Esta se obtiene después de un período de cierre del pozo suficientemente largo a fin de tener un equilibrio en la presión del yacimiento. Empleando un medidor de fondo se determina la presión de fondo estática ( $P_{ws}$ ) después el pozo se pone a producir durante un tiempo estabilizado para medir la presión de fondo fluyendo ( $P_{wf}$ ). A la diferencia de presiones se le denomina presión diferencial o caída de presión ( $P_{ws}-P_{wf}$ ). El gasto se determina midiendolo en la superficie en los tanques de almacenamiento.

$$J = \frac{Q_0}{(P_{ws} - P_{wf})}$$

I.1

Para el caso en que el yacimiento se tenga una presión mayor que la presión de saturación ( $P_{yac} > P_{sat}$ ), el índice de productividad tendrá una variación lineal, con lo cual puede obtenerse una variable en función de la otra. ( Q vs p).

Cuando la presión del yacimiento esta por abajo de la presión de saturación, el comportamiento del índice de productividad no sigue una variación lineal, y para obtener el gasto en función de la presión se utiliza el método propuesto por Vogel - en el cual se tiene una gráfica que tiene como ejes coordenados:

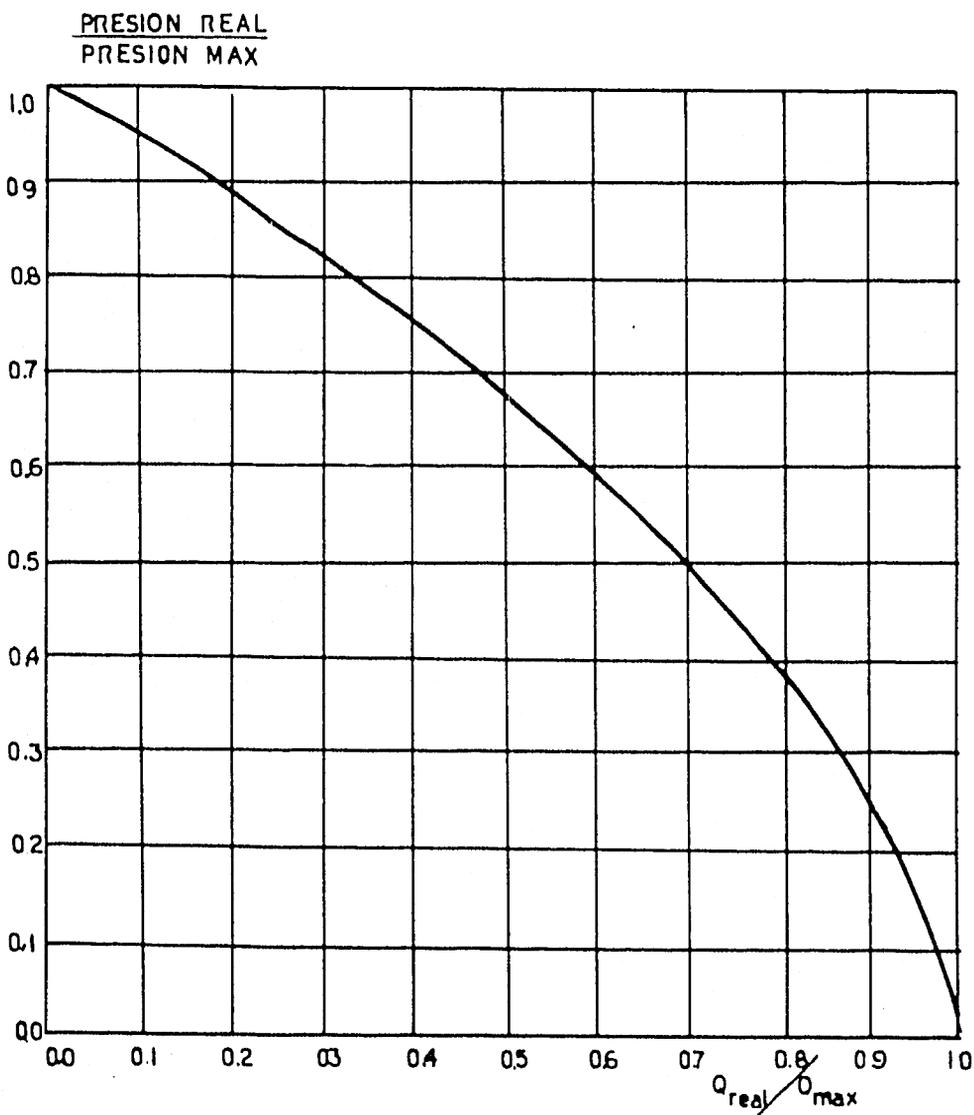
$$\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \text{ vs } \frac{Q_0}{Q_{max}}$$

#### I.4.2. USO DE LA GRAFICA DEL VOGEL. (FIG. 1)

- 1.- Se determina el valor de ( $P_{wf}/P_{ws}$ )
- 2.- Con este valor, se entra en la ordenada de la gráfica y se traza una línea horizontal hasta encontrar la curva.
- 3.- A partir del punto obtenido en el paso anterior se baja una línea vertical, hasta la abscisa y se determina el valor de ( $Q_0/Q_{max}$ )=  $Q_v$ , el valor de  $Q_{max}$  queda fijo para cualquier pronóstico del gasto a la presión de fondo fluyendo.

Una ecuación empírica que se ajusta al comportamiento de la gráfica en Vogel es:

$$\frac{Q_0}{Q_{max}} = 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2 \quad I.2$$



CURVA DE J V VOGEL

FIG. Nº 1,1

## I. 5 ESPACIAMIENTO DE VALVULAS

Es la separación que deben tener las válvulas en el aparejo de bombeo neumático, con el propósito de que la presión del espacio anular sea un poco mayor que la presión ejercida por la columna hidrostática del fluido, y así de esa forma proporcionar el gradiente de presión requerido a fin de que los fluidos puedan llegar hasta la superficie.

El espaciamiento de las válvulas depende principalmente de los siguientes factores:

- a) Tipo de válvula a usar.
- b) Si el pozo descarga o no los fluidos a la superficie.
- c) Si se tiene o no una presión de arranque disponible.
- d) Si el suministro de gas es ilimitado.

Para obtener el espaciamiento óptimo de las válvulas en el aparejo, existen dos métodos.

### I.5.1 METODO ANALITICO

Este tipo de diseño se recomienda cuando no se tiene a disposición la información de la presión del fondo del pozo y del índice de productividad. La ventaja de este método es de que se obtiene rápidamente la localización del sitio de colocación de las válvulas.

El cálculo del espaciamiento de las válvulas se determina por la siguiente fórmula:

$$DvI = \frac{(pk_0 - 50) - P_{sup} \text{ t.p.}}{G_s} \quad I.3$$

Para obtener la profundidad de las siguientes válvulas se utiliza la fórmula:

$$Dv_n = Dn-I + \frac{G_u (Dv_n-I) + P_{son-I} - P_{sup} \text{ t.p.}}{G_s} \quad I.4$$

La presión  $P_n$  de cada válvula debe de ser cuando menos 15 lb/pg<sup>2</sup> menor a la de la válvula anterior, y para la última la diferencia aumenta a 50 lb/pg<sup>2</sup>.

Para obtener la presión en la tubería de revestimiento a la profundidad de la válvula se usa la siguiente fórmula.

$$P_2 = P_1 e^{\frac{0.01875 \gamma_g h}{ZT}} \quad I.5$$

#### I.5.2 METODO GRAFICO

Este método sirve como una guía para obtener el espaciamiento de las válvulas de inyección de una manera gráfica.

Se considera que las válvulas no son afectadas por la presión de la tubería de producción.

#### SECUENCIA PARA EL DISEÑO DE UNA INSTALACION DE BOMBEO NEUMATICO CONTINUO

- 1.- Fijar escalas de presión, temperatura y profundidad: las primeras en el eje horizontal y la última en el eje vertical.
- 2.- Trazar una línea de referencia horizontal a la profundidad media del intervalo.
- 3.- A partir de la presión máxima superficial de gas de inyec-

ción y el gradiente correspondiente trazar el comportamiento de presión en el espacio anular (fig. A-2 K. Brown.)

- 4.- Determinar y fijar en la gráfica la presión del fondo fluyendo, aplicando el método de Vogel, a partir de la presión de fondo estática y el gasto deseado.
- 5.- Determinar y dibujar el comportamiento de presiones en la tubería de producción a partir de la presión del espacio anular (punto de equilibrio). La profundidad del punto de inyección se localiza sobre la curva de presiones de la tubería de producción, donde ésta sea  $100 \text{ lb/pg}^2$  menor a la del punto de equilibrio.
- 6.- Fijar la presión superficial de la tubería de producción requerida para desplazar a los fluidos del pozo a la batería de separación.
- 7.- A partir del par ordenado (0,0) de presión vs profundidad, dibujar el comportamiento de la presión en la tubería, de producción, con el correspondiente gradiente de control.
- 8.- A partir de la presión fijada en el paso número 6 usando el gradiente de descarga mínimo, determinado de la fig. A-3 (K. Brown.), para el gasto de diámetro de la tubería de producción, correspondiente, dibujar la recta de presión en la tubería de producción vs profundidad.
- 9.- Con la figura 6.27 pag. 418 del libro Craft and Holden, determinar el gradiente de temperatura del fluido por la tubería de producción en función del gradiente geotérmico, el gasto y el diámetro de la tubería. El gradiente de temperatura de flujo así determinado es aproximado al del espacio anular.

- 10.- A partir de la temperatura del yacimiento, dibuje el perfil de temperatura en el espacio anular, usando el gradiente de terminado anteriormente.
- 11.- Obtención de la profundidad y presión de la primera válvula. Donde se corten las líneas que nos dan el comportamiento de la presión en la tubería de producción, determinando en el paso 7, con el del espacio anular obtenido en el paso 3, -- queda localizada la primera válvula.
- 12.- Profundidad y presiones de las siguientes válvulas. A partir del punto localizado en el paso II, moverse horizontalmente hasta cortar el gradiente de diseño determinado en el paso 3, de este punto dibujar una paralela al gradiente del fluido de control hasta que se corte con la presión de tubería de revestimiento, reducida  $15 \text{ lb/pg}^2$ . A esta profundidad queda localizada la segunda válvula con su correspondiente presión; así se continúa espaciando las válvulas hasta alcanzar la profundidad determinada en el paso 5.
- 13.- Temperatura de cada válvula.  
Esta se determina moviéndose horizontalmente a la profundidad de la válvula hasta que corte con la línea que nos representa el comportamiento de la temperatura.
- 14.- Registrar la siguiente información.
- a) Profundidad de la válvula.
  - b) Presión de gas a la profundidad de la válvula.
  - c) Temperatura a la profundidad de la válvula.
  - d) Presión superficial de gas en cada válvula.
  - e) Presión del domo a condiciones de temperatura de taller--  
Usar fig. B.24 (a), B.24 (b) del K. Brown.

Para fijar la presión de taller o su equivalente resorte se

presentan cuatro alternativas:

- 1.- Válvula con domo a presión (14 e)
- 2.- Válvula con resorte (domo sin presión). La fuerza del resorte debe de ser equivalente a la presión de la tubería de revestimiento a la profundidad de la válvula.
- 3.- Válvula combinada (domo y resorte). Con la presión del espacio anular a la profundidad de la válvula; reducida a la presión equivalente del resorte, se determina la presión de calibración del domo a condiciones de temperatura del taller - (14 e).
- 4.- Válvulas operadas con fluido.  
Para determinar la presión del domo a la profundidad de la - válvula se hace el siguiente balance de fuerza.

$$P_t = \frac{P_c (A_b - A_s) - F_r + P_d (A_b)}{A_s} \quad 1.6$$

donde se tiene que  $P_d$  es:

$$P_d = \frac{P_t A_s + P_c (A_b - A_s) - F_r}{A_b} \quad 1.7$$

La presión de calibración del fuelle a la temperatura de -- taller se determina como en la alternativa 3.

## CAPITULO II

### II.0 BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

De los sistemas de bombeo artificial para pozos petroleros que se emplean en la actualidad, el bombeo electrocentrífugo su mergido presenta características que le dan ventajas sobre los demás sistemas bajo ciertas condiciones.

En la fig. (II.I), se muestra la forma en que normalmente se dispone en el pozo, una unidad de bombeo electrocentrífugo - los componentes principales son:

#### II.1 COMPONENTES DEL SISTEMA

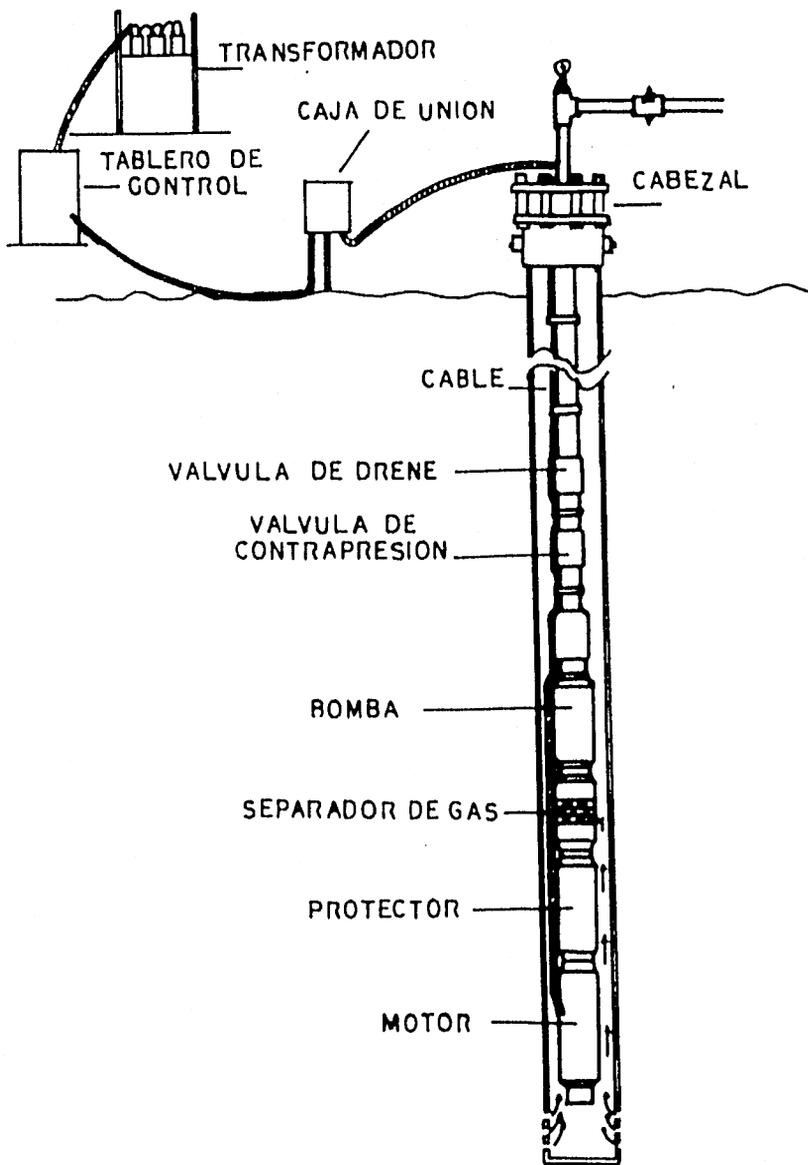
##### a) Equipo Subsuperficial

- 1.- Motor Eléctrico
- 2.- Protector
- 3.- Separador de Gas
- 4.- Bomba
- 5.- Cable Conductor

##### b) Equipo Superficial

- 6.- Tablero de Control
- 7.- Transformador
- 8.- Cabezal
- 9.- Accesorios

El motor eléctrico se coloca en la parte inferior del aparejo, y recibe mediante un cable eléctrico energía proveniente de una fuente superficial, la bomba queda suspendida del extremo inferior de la tubería de producción, y descarga en ella los fluidos que bombea. La bomba a su vez recibe el impulso del motor mediante la flecha conectora del protector, y si las condi ciones del fluido lo requieren, puede instalarse en la succión de la bomba un separador de gas. Todos los componentes menciona dos van rigidamente unidos.



INSTALACION TIPICA DE UN SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO SUMERGIDO FIG.(11.1)

## II.2 DESCRIPCION DEL EQUIPO

### II.2.1 MOTOR

Es la parte del sistema que suministra la fuerza impulsora que hace girar a la bomba. El motor que se utiliza en operaciones de bombeo eléctrico es: Bipolar, trifásico, de inducción, - tipo jaula de ardilla y opera a una velocidad relativamente - constante de 3500 Rpm a 60 ciclos por segundo (cps).

Normalmente se coloca en el extremo inferior del aparejo; y se llena con un aceite mineral altamente refinado que tiene alta resistencia dieléctrica, proporciona lubricación a los cojinetes que soportan la carga de los rotores del motor y buena conductividad térmica para transferir el calor generado por el motor a la carcasa y éste a su vez es transferido a los fluidos del pozo que pasan por la superficie externa del motor, por lo tanto el motor nunca se coloca abajo de las perforaciones de la tubería de revestimiento.

El tamaño y potencia de algunos motores disponibles en el mercado para introducirse en diferentes diámetros nominales de tubería de revestimiento (T.R.) son:

Diámetro de T.R. (pg)	Potencia (Hp a 60 cps)
4 1/2	125.5
5 1/2	240.0
7	600.0
3 5/8	720.0

El motor sencillo más largo es de aproximadamente 30 pies y de una potencia de 200 a 250 Hp. mientras que motores en tandem pueden tener 100 pies de longitud y alcanzar 1000 Hp.

## II.2.2 PROTECTOR O SECCION SELLANTE

Las funciones básicas de la sección sellante son: evitar la contaminación del lubricante del motor con los fluidos del pozo, compensar la expansión o contracción del lubricante debido al calentamiento o enfriamiento del motor, cuando la unidad separa o trabaja, absorber los empujes axiales desarrollados por la bomba mediante un sistema de cojinetes y conectar la flecha impulsora del motor a la flecha de la bomba.

## II.2.3 SEPARADOR DE GAS

Es una sección del aparejo que sirve como succión de la bomba y se coloca entre ésta y el protector.

La función de este dispositivo es separar el gas libre contenido en el fluido producido por el pozo y desviarlo al espacio anular a fin de ayudar a el cundado de gas, con el propósito de que el bombeo sea eficiente en los pozos gasificados.

En la fig. II.2a se muestra el bosquejo del funcionamiento del separador; la separación se inicia en las aberturas segadas, el líquido se precipita hacia el fondo de éste, a tiempo de que parte del gas libre sube por el espacio anular.

El líquido se acumula en el depósito que está en el fondo del separador, donde por fuerza centrífuga la propela del separador lo impulsa hacia la primera etapa de la bomba.

Existen varios diseños en que las aberturas puedan ser de diferente forma y tener crestas o tazones con el objeto de incrementar la separación.

El separador puede ser efectivo, pero es difícil determinar su eficiencia.

## II.2.4 BOMBA

Es del tipo centrífugo, constituida por un conjunto de bombas individuales llamadas etapas, por las que el fluido pasa aumentando sucesivamente la presión hasta alcanzar el in--

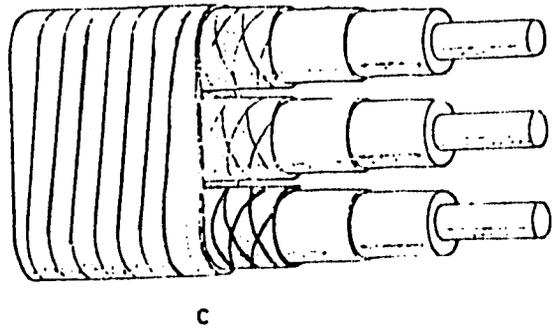
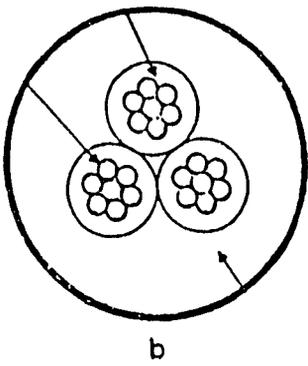
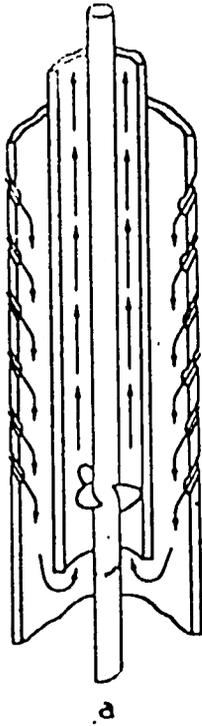


fig 11.2

cremento de presión necesaria para elevar los fluidos a la superficie, mantener la presión requerida en la boca del pozo.

La bomba se coloca en el fondo del pozo de tal manera que a las condiciones de operación, queda sumergida en el fluido - para asegurar una alimentación ininterrumpida a fin de evitar que trabaje en vacío. Además, es importante que las dimensiones de la bomba sean adecuadas para manejar el gasto deseado, - y que ésta opere entre el 75 y 125% del punto de mayor eficiencia indicado en las curvas características de las bombas <sup>(4)</sup>.

#### II.2.5. CABLE (FIG. II.2b)

La energía eléctrica que requiere el motor, se le suministra mediante un cable conductor, desde una fuente proveniente de la superficie. Los cables existentes en el mercado son de dos tipos: Planos y Redondos, con conductores de cobre o aluminio y con diferente tipo de aislamiento; para instalarse en pozos con temperaturas superiores a los 148° C. El aislamiento del cable debe resistir las temperaturas y presiones existentes en el pozo. Sin embargo, existen limitaciones para los cables utilizados actualmente, debido a las limitaciones del material usado para su construcción. La vida útil de un cable estándar operando a 167°F puede ser hasta de 10 años y se reduce a la mitad por cada 15°F arriba del máximo <sup>(4)</sup>.

#### II.2.6. TABLERO DE CONTROL

Son unidades estándar a prueba de agua, de diferente tamaño y van acompañadas de diferentes accesorios, para ajustarse a cualquier instalación de bombeo eléctrico. Los hay desde muy simple con botón magnético de arranque y protección de sobre carga, hasta muy complejos con fusibles de desconexión, amperímetro, protector de baja carga, luces, relojes para bombeo intermitente e instrumentos para operación automática o a control remoto. Su función permite controlar la operación del equipo subsuperficial.

## II.2.7 TRANSFORMADOR

La instalación de un transformador se hace necesaria, -- cuando el voltaje disponible en la línea primaria no es compatible con el voltaje que requiere el motor para su operación -- en el fondo del pozo.

Estas unidades en conjuntos de tres transformadores de -- una fase o como transformadores trifásicos convierten el volta je de la línea primaria al voltaje requerido del motor.

## II.2.8 ACCESORIOS

Son una serie de dispositivos que complementan el aparejo a fin de tener un mejor funcionamiento y una rápida maniobrabi lidad en caso de falla del equipo, los accesorios son:

Cabezal.- Es el soporte del equipo subsuperficial y se -- instala en la cabeza del pozo sobre la tubería de revestimien- to, para proporcionar un sello alrededor de la tubería de pro- ducción y del cable, a fin de evitar la fuga de los fluidos ha cia la superficie.

Caja de unión.- Este dispositivo se localiza entre el ca- bezal del pozo y el tablero de control por razones de seguri-- dad, ya que el gas puede viajar a través del cable superficial hasta el transformador y producir un incendio o explosión. La caja proporciona una barrera contra la migración del gas.

Válvula de Contrapresión.- Se instala de 1 a 3 tramos so- bre la bomba para mantener llena la tubería de producción, en- caso de que se pare la unidad, y a fin de evitar la rotación - inversa de la bomba que sería ocasionada por el peso del líqui do que se encuentra en la tubería de producción, efecto que da ña considerablemente a la bomba<sup>(5)</sup>.

Válvula de Drene.- Se instala para vaciar la tubería de - producción cuando se requiere sacar el aparejo del pozo. Gene-

ralmente se coloca de 1 a 10 tramos de la válvula de contraprg  
sión.

Centradores.- Se instalan para mantener centrada la tube-  
ría de producción, con el propósito de evitar daños en el ca--  
ble debido a la fricción de este con la tubería de revestimiento  
to, durante la introducción del aparejo al pozo.

Flejes.- Son cintas de acero que se instalan para mante--  
ner fijo el cable a la tubería de producción, a la bomba y a -  
la sección sellante.

## GENERALIDADES DEL DISEÑO

En la mayoría de las aplicaciones el diseño del bombeo electrocentrífugo sumergido es simple, cuando se han entendido los fundamentos básicos del equipo y su relación con los datos del pozo. Cada aplicación es una situación individual debido a las condiciones variantes de cada pozo y al tipo de fluidos -- que se bombean. Desde el punto de vista, la aplicación más simple es para un pozo productor de agua, ya que no pasa gas libre a través de la bomba. La siguiente aplicación más simple es para un pozo que produce con baja relación gas-aceite, donde el gas puede o no pasar a través de la bomba. La tercera -- aplicación es para un pozo que produce bastante gas de manera que todo o un porcentaje del gas libre debe de bombearse. En este último caso el problema de diseño se complica debido a -- que la presión y la temperatura no son iguales en ningún punto del interior del pozo, el volumen de gas tampoco es el mismo y su proporción en la mezcla de fluido no es igual ya que está -- siendo liberado. Esto resulta en un cambio constante de densidad conforme la mezcla del fluido y gas pasan de las perforaciones a la bomba y a la superficie a través de la tubería de producción.

A fin de familiarizar al lector con las gráficas que se -- utilizan para el diseño de unidades de bombeo eléctrico a continuación se hace una breve descripción de estas:

Curvas características.- En la fig. II.4 se muestran las curvas características típicas de una bomba.

La carga total generada por la bomba, la fuerza requerida para moverla y la eficiencia resultante varían con el gasto, -- estas interrelaciones de gasto, carga, fuerza y eficiencia se denominan características de la bomba, y al ser graficadas estas, se llaman "GRÁFICAS DE CURVAS CARACTERÍSTICAS" y existe -- una para cada bomba.

La carga, fuerza y eficiencia generalmente se trazan contra el gasto a velocidad constante. La curva H-Q muestra la relación entre gasto y la carga total, a esta curva se le llama de capacidad de carga. La curva P-Q relaciona la toma de fuerza y el gasto de la bomba y se le denomina curva de potencia - de freno. La curva N-Q muestra la relación entre la eficiencia y el gasto, comunmente se le llama curva de eficiencia.

El fluido utilizado en las pruebas de las bombas para elaborar las gráficas, es agua de densidad específica igual a -- uno. De estas curvas se obtienen los valores de carga que desarrolla la bomba por etapa y de potencia requerida para impulsar cada etapa, a fin de calcular el número de etapas y potencia para una aplicación.

El total de etapas que requiere la bomba a fin de obtener la carga necesaria para producir el gasto deseado, ésta se tiene a partir de la carga que suministra la bomba por etapa.

$$N.e = \frac{CDT}{\text{Carga/etapa}} \quad \text{II.1}$$

Esta se obtiene en la intersección de la línea del gasto que se bombea y la curva de carga para leer la carga por etapa en la escala de la izquierda.

La potencia se obtiene multiplicando la potencia requerida por etapa, que se obtiene en la intersección de la línea - del gasto que se bombea y la curva de potencia para leer en la escala de la derecha, por el total de etapas que constituyen - la bomba y por la densidad específica del fluido que se bombea

$$HP = HP/etapa \times N.e. \times S.G. \quad \text{II.2}$$

La carga dinamica total (CDT). Esta se define como la carga de presión que la bomba debe suministrar a los fluidos del pozo a fin de obtener en la superficie el gasto deseado.

La carga dinámica total es la suma de: La altura neta de succión, la perdida de carga por fricción y de la contrapre---

si6n superficial, todas 6stas expresadas en altura de columna del fluido del pozo.

(CDT)=(perdida de presi6n por fricci6n)+(presi6n del sistema)+(elevaci6n vertical).

La altura neta de succi6n se define como la altura que hay desde el nivel din6mico del fluido en el pozo hasta la superficie.

Las p6rdidas de carga por fricci6n, se definen como las p6rdidas de presi6n debido a la oposici6n al flujo por parte de la tuberfa. La magnitud de estas p6rdidas se pueden obtener directamente de gr6ficas, una de estas se basa en la f6rmula de HAZZEN WILLIAMS<sup>(5)</sup>.

La contrapresi6n tambi6n llamada presi6n de descarga, es la presi6n que se requiere en la boca del pozo a fin de vencer todas las p6rdidas de presi6n que se tengan en las lfnas superficiales para poder descargar el fluido a la presi6n de separaci6n.

La ecuaci6n para expresar la presi6n en su equivalente de columna de fluido es:

$$CDT \text{ (pies)} = \frac{\text{Presi6n (lb/pg}^2) \times 2.3 \frac{\text{pg}^2/\text{pie}^2}{\text{lb/pie}}}{\text{Sp. Gr.}}$$

### II.3.1 INFORMACION REQUERIDA PARA EL DISEÑO DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTRICO.

La informaci6n requerida para dise±ar el aparejo debe ser real para asegurar que el dise±o de la unidad de bombeo sea el adecuado. Los datos requeridos son de cuatro categorfas generales:

- 1.- Comportamiento de flujo del pozo y yacimiento
- 2.- Dimensiones ffsicas del pozo
- 3.- Caracterfsticas de los fluidos del pozo
- 4.- Objetivos de dise±o y requerimientos de suministro de pozo

tencia.

1.- Con el comportamiento de flujo del pozo generalmente se -- establece la capacidad máxima de producción del pozo que es - indispensable para diseñar la unidad adecuada, los datos requereidos son: Presión estática de fondo, presión de fondo fluyendo y el gasto.

Los datos del nivel del fluido pueden algunas veces ser - usados como substitutos de la presión estática de fondo y de - la presión de fondo fluyendo en pozos de aceite con poco o nada de gas. Los datos de presiones engañosas pueden interferir - en los datos del nivel verdadero del líquido, lo cual es oca-- sionado por el aceite espumoso o por la tendencia del aceite a ser desplazado por agua del yacimiento<sup>(5)</sup>.

La mayoría de los pozos no exhiben una verdadera relación del índice de productividad, debido a la interferencia del gas o a la turbulencia del fluido en el fondo del pozo y a la medi-- ción errónea de los parametros que lo determinan. Vogel<sup>(1)</sup> reco-- mienda un procedimiento que se usa para obtener el índice de - productividad cuando la presión del yacimiento cae por debajo - de la presión de burbujeo en el flujo hacia el pozo, originan-- do que el gas se libere y fluya en dos fases.

La curva que propone Vogel está corregida por interferen-- cia de gas en el fondo, y proporciona una mejor indicación del potencial del pozo.

2.- El diametro y profundidad de la tubería de revestimiento - determinan el diámetro máximo del motor y de la bomba que pue-- de introducirse en el pozo.

La profundidad total determina la máxima profundidad de - colocación de la bomba.

3.- Las características de los fluidos del pozo son:

a).- La densidad específica del aceite, del agua, del gas y - sus porcentajes en la succión de la bomba determinan la poten-- cia del motor. Por lo tanto, la densidad específica del agua , del gas, la densidad API del aceite, el porcentaje del agua y

la relación gas-aceite son datos necesarios.

b).- Viscosidad.- Los fluidos viscosos tienden a disminuir la capacidad de la bomba y su eficiencia, además de incrementar las pérdidas por fricción en la línea de conducción, por lo que se hace conveniente utilizar un factor que compense los efectos de la viscosidad. En la práctica se ha comprobado que las curvas características de las bombas para la mezcla agua-aceite, no requieren corrección por dichos efectos a menos que ésta exceda de 100 SSU a condiciones de succión<sup>(2)</sup>.

c).- Temperatura.- Es necesario conocer la temperatura a la que el motor va a operar, ya que una temperatura de operación alta disminuya la vida del motor, por ejemplo: Cada 18<sup>o</sup>F de aumento por arriba del rango de aislamiento del motor, la vida de éste se reduce a la mitad, además de ser también un factor importante en la selección del cable. La temperatura del fluido cerca del fondo y en la cabeza del pozo son datos necesarios 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 de la tubería de producción.

d).- Datos PVT ( $R_s, B_o, P$ ).- Es importante disponer de esta información especialmente si se maneja gas, ya que son parámetros que influyen en la selección del motor, de la bomba y del separador de gas. Estos datos se obtienen en pruebas de laboratorio, o bien, si no se dispone de esta información, se puede obtener por medio de las correlaciones de STANDING<sup>(4)</sup>.

4.- Los objetivos de diseño y requerimiento de suministro de potencia, indican las condiciones mínimas que deben cumplir los componentes del sistema, a fin de evitar el funcionamiento deficiente del aparejo y de obtener en la superficie el gasto y presión deseados.

## II.4 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO

A continuación se presenta una secuencia a seguir para el diseño de una unidad de bombeo electrocentrífugo.

- 1.- Recopilar y analizar la información necesaria para el diseño del equipo.
- 2.- Determinar la capacidad de producción del pozo a la profundidad de colocación de la bomba para el gasto deseado, incluyendo la presión de succión de la bomba y el volumen que se va a bombear.
- 3.- Determinar la carga dinámica total (CDT)
- 4.- El paso siguiente es determinar el tipo de bomba y motor requeridos:

Se selecciona entre las curvas características de las bombas la de aquella cuya eficiencia máxima, se tenga con un gasto igual o muy cercano al gasto deseado y que a la vez que corresponda a una bomba que pueda introducirse, en la tubería de revestimiento existente en el pozo.

- 5.- Calcular para la bomba seleccionada el número de etapas necesarias que permitan la carga requerida para lograr el gasto deseado en la superficie.
- 6.- Determinar la potencia para el motor, utilizando la densidad específica del fluido que se bombea. El protector generalmente se selecciona de la misma serie que el motor.
- 7.- Determinar el tamaño y tipo de cable a utilizar, este puede ser obtenido a partir de los requerimientos de voltaje del motor, de las condiciones del fluido producido por el pozo y del espacio disponible entre la tubería de producción y la de revestimiento.
- 8.- Determinar el voltaje superficial de operación. Este se define como la suma de las pérdidas de voltaje en la línea de conducción más el voltaje requerido por el motor.
- 9.- Determinar la capacidad del transformador. Esta se obtiene a partir del voltaje de operación del motor y del voltaje disponible en la línea de suministro superficial.

La capacidad del transformador se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$KVA = \frac{V \times I \times 1.73}{1000} \quad II.3$$

10.- Seleccionar los accesorios tales como: Tamaño y tipo de cabezal, equipo requerido para terminar la instalación y el -- equipo opcional.

## II.4.1 EJEMPLO ILUSTRATIVO

A fin de ilustrar el procedimiento de diseño descrito para unidades de bombeo eléctrico, a continuación se presenta un ejemplo numérico hipotético, mismo que será utilizado posteriormente en el diseño del sistema combinado de bombeo eléctrico y neumático.

### I. INFORMACION

Fecha	28 Agosto 1982
Pozo	SRQ No.1
Presión estática de fondo	2000 lb/pg <sup>2</sup>
Índice de productividad	3 bl/día/lb/pg <sup>2</sup>
Presión requerida en la boca del pozo	100 lb/pg <sup>2</sup>
Gasto	1500 bl/día
Profundidad total	8000 pies
Intervalo disparado	7900-8000 pies
Diámetro de la tubería de producción	2 3/8 pg
Diámetro interior de la t.p.	1.995 pg
Temperatura en la boca del pozo	100 °F
Diámetro de la tubería de revestimiento	7 pg
Relación agua-aceite	2.8 pies <sup>3</sup> /bl
Relación gas-aceite	600 pies <sup>3</sup> /bl
Temperatura de fondo de pozo	340 °F
Densidad específica del fluido del pozo	0.90 (agua=1)
Densidad específica del gas	0.65 (aire=1)
Relación gas libre líquido permisible en la bomba	0.10
Eficiencia del separador	85 %

2.- A partir de la presión estática de fondo ( $P_{ws}$ ), del gasto deseado y del índice de productividad, calcular la presión de fondo fluyendo ( $P_{wf}$ ), utilizando la ecuación (I.1).

$$P_{wf} = 2000 - \frac{1500}{3} = 1500 \text{ lb/pg}^2$$

Siguiendo el procedimiento propuesto por POETTMAN y CARPENTER<sup>(6)</sup> para el flujo multifásico, a partir de la presión de fondo fluyendo a la profundidad media del intervalo productor se calcula el perfil de presión ascendente en la tubería vertical, representado por la curva A de la figura II.3.

A medida que avanza el perfil, se determina en cada intervalo del mismo, el volumen de gas libre a condiciones de escape por volumen de aceite medido a condiciones de superficie mediante la siguiente ecuación.

$$R_f = (R - R_s) \frac{P_d T z}{P T_a} \quad \text{II.4}$$

A la cantidad obtenida se le resta el 85 % de la misma, - cantidad que representa el volumen de gas desviado por el separador, el resultado obtenido se compara con el volumen ocupado por los líquidos a las mismas condiciones, es decir con:

$$F_{lo} = RAA \times B_w + B_o \quad \text{II.5}$$

En el punto en que la relación gas libre-líquido ( $F_{lo}$ ) es igual a 0.10 que es la relación permisible en la bomba<sup>(7)</sup>, se suspende el cálculo del perfil, la profundidad hasta aquí obtenida es la profundidad de colocación de la bomba como se muestra en el punto M de la figura II.3. A continuación se determina la carga de presión que la bomba debe suministrar a los - - fluidos, para obtener en la superficie la presión y gasto deseados.

La forma de determinar la carga de presión que debe suministrar la bomba es calculando un segundo perfil, con el método antes mencionado, a partir de la presión requerida en la boca del pozo y utilizando una RGA igual a la producida por la - - formación, menos la parte correspondiente al volumen de gas - - desviado al espacio anular. Este perfil descendente está representado por la curva B de la figura II.3. En cada intervalo - - del nuevo perfil se compara la profundidad obtenida con la profundidad de colocación de la bomba, el proceso se detiene, - -

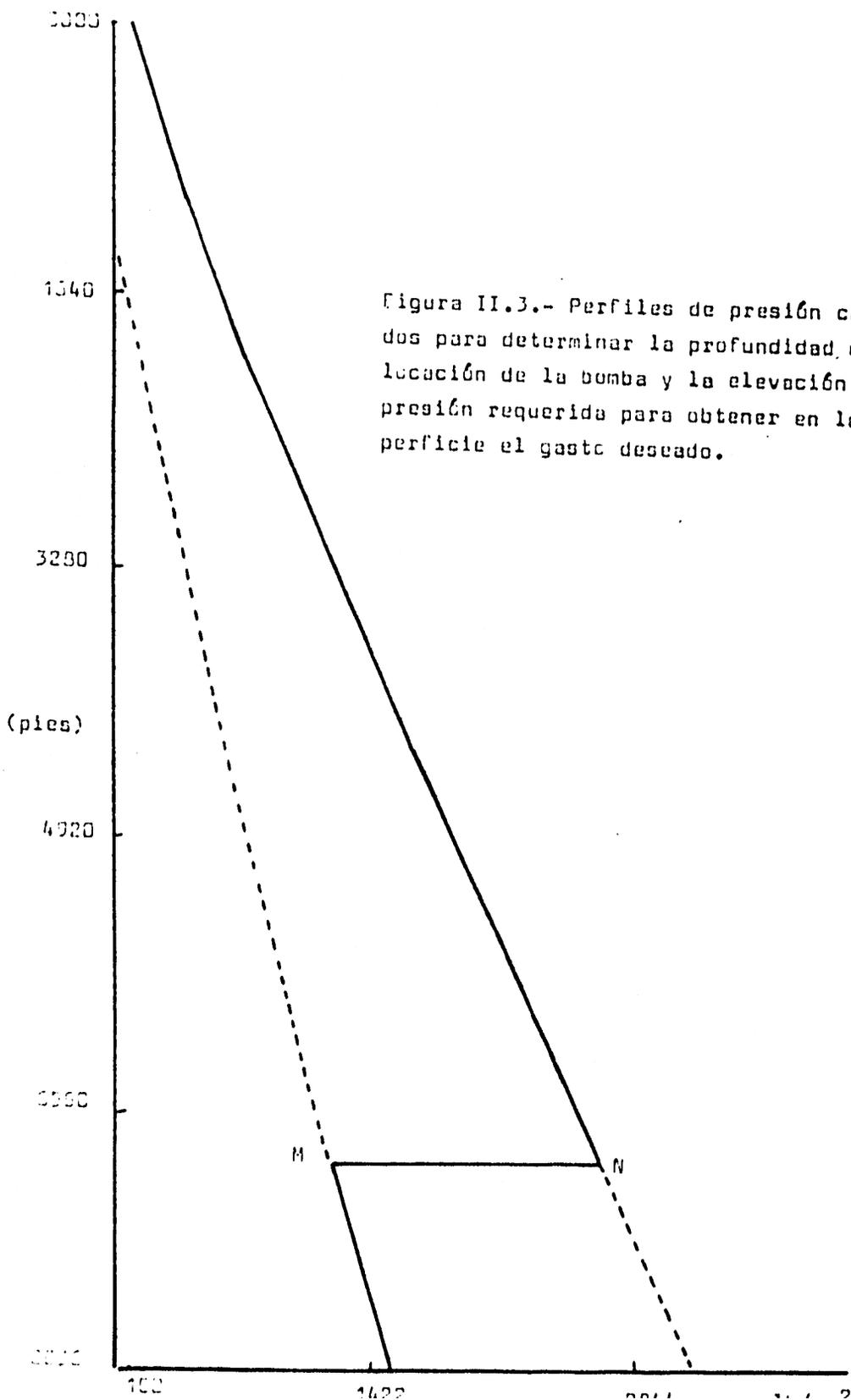


Figura II.3.- Perfiles de presión calculados para determinar la profundidad de colocación de la bomba y la elevación de presión requerida para obtener en la superficie el gasto deseado.

cuando estas dos profundidades son iguales (punto N). La diferencia de presión entre los puntos MN a la profundidad de la colocación de la bomba, es la presión que debe suministrar la bomba a los fluidos para obtener en la superficie el gasto deseado.

Esta diferencia de presiones expresada como longitud de columna de fluido es la carga dinámica total (CDT).

A fin de facilitar la solución del problema propuesto se recurrió al uso de un programa de cómputo, con el cual se obtuvieron los siguientes resultados<sup>#</sup>.

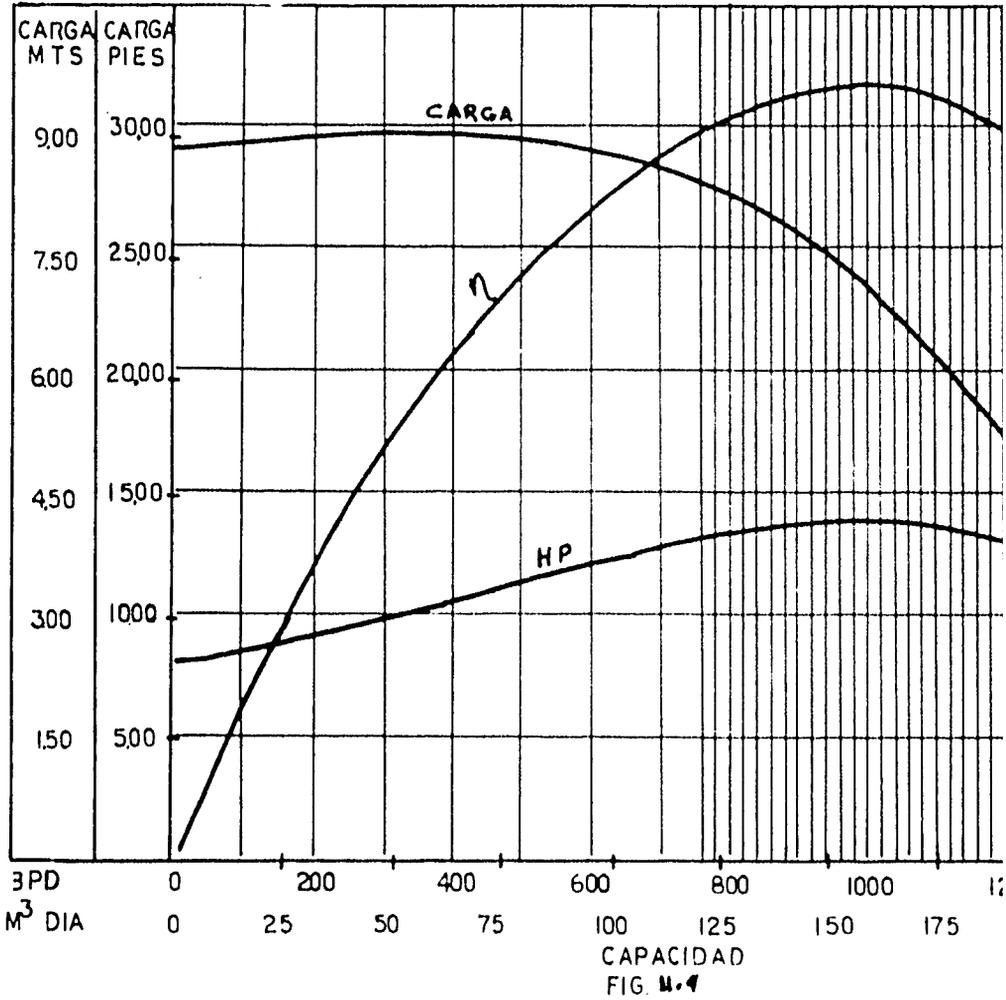
Profundidad de succión	6830.80	pies
Presión de succión	1137.60	lb/pg <sup>2</sup>
Presión de descarga	2602.24	lb/pg <sup>2</sup>
Elevación de presión requerida	1474.66	lb/pg <sup>2</sup>
Densidad en la succión	28.53	lb/pie <sup>3</sup>
Densidad en la descarga	28.05	lb/pie <sup>3</sup>
Densidad media en la bomba	26.77	lb/pie <sup>3</sup>
Gasto de aceite a condiciones de bomba	880	bl/día
Factor de volumen de aceite	1.175	
Gasto de aceite y gas a condiciones de bomba	1055	bl/día

La elevación de presión requerida, convertida a longitud de columna de fluido es la carga dinámica total:

$$CDT = \frac{1474 \times 2.31}{.43} = 7918.5 \text{ pies}$$

En la referencia No.(5) se encuentra que la bomba serie 400 para tubería de revestimiento de 5 1/2 pg de diámetro interior es la adecuada, notese que el tamaño óptimo en la serie 400 es la bomba DN-1000, la cual tiene una eficiencia de 63 % al gasto deseado.

<sup>#</sup> Los perfiles obtenidos con el programa de cómputo, se muestran en el apéndice A.



3.- En la figura II.4 Se muestran las curvas de comportamiento de la bomba DN-1000<sup>(5)</sup>, en la que para el gasto de 1055 - - bl/día se obtienen 22 pies de carga por etapa, de manera que - el número total de etapas requeridas por la bomba es:

$$N.e = \frac{7918.5 \text{ pies}}{22 \text{ pies/etapa}} = 360 \text{ etapas}$$

4.- Potencia requerida. En la figura II.4 se obtiene una lectura de 0.275 HP/etapa y la potencia requerida entonces es:

$$HP = .275 \text{ HP/etapa} \times 360 \text{ etapas} \times 0.43 = 42 \text{ HP}$$

El motor de la serie 544 es el adecuado, el cual tiene un voltaje de operación de 1250 volts.

5.- Cable. De acuerdo a la capacidad de conducción de los cables se selecciona el cable del No. 2 con 90 amperes. de la -- gráfica A.6 (Apendice B), la pérdida de voltaje para este tipo de cable es de 27 volts por 1000 pies de longitud a 150 °F y - 80 amperes.

La caída de voltaje en 8000 pies en el cable del No.2 es:

$$\text{Caída de voltaje} = 8000 \text{ pies} \times 27 \frac{\text{volts}}{1000 \text{ pies}} = 216 \text{ volts}$$

El voltaje superficial requerido es:

$$V_s = 1250 + 216 = 1466 \text{ volts}$$

6.- Tablero de control. Se selecciona en base al rango máximo de voltaje de operación, corriente y potencia, con las debidas consideraciones de operaciones futuras.

7.- Transformador. Mediante el uso de la ecuación II.3 se calcula el total de kilo-volts-amperes requeridos.

$$KVA = \frac{1466 \text{ volts} \times 90 \text{ amperes} \times 1.73}{1000} = 202$$

Tres transformadores de 70 KVA de una sola fase dan los - KVA necesarios, pero para una unidad mas grande se requerirá - diseñarlo nuevamente y cambiarlo.

La selección recomendada es de tres transformadores de 80

KVA de una sola fase, con rangos de voltaje de 7200 a 12740 -- volts primarios y 400 a 500 volts secundarios.

#### Accesorios.

- a).- Cabezal.- El cabezal para tubería de revestimiento de 7 - pg de diámetro exterior, tubería de producción de 2 7/8 pg y - cable del número 2 es el requerido.
- b).- Caja de unión.- Esta debe cumplir con todas las condiciones de trabajo adecuadamente.
- c).- Los accesorios tales como válvula de contrapresión y niple de circulación se ordenan con las mismas especificaciones de - diámetro y rosca de la tubería de producción.

## II.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA

### Ventajas.

- a).- Se obtienen grandes gastos de fluido.
- b).- Ocupa poco espacio superficial.
- c).- Tiene bajos costos de operación.
- d).- Lo afectan poco el arenamiento y las parafinas.
- e).- Tiene amplio rango de utilización a diferentes profundidades.
- f).- Se utiliza para la extracción y reinyección de agua al - mismo tiempo.
- g).- En problemas de parafinas , el equipo puede ser reparado sin que éste se pare.

### Desventajas.

- a).- Tiene alto costo inicial
- b).- Su funcionamiento es deficiente en pozos que tienen altas temperaturas.
- c).- Limitado a diámetros pequeños de tubería de revestimiento.

### III SISTEMA COMBINADO

Este sistema de explotación artificial como su nombre lo indica, combina el bombeo electrocentrífugo con el bombeo neumático, a fin de aprovechar la energía contenida en el gas de formación para elevar los fluidos del pozo hasta la superficie.

Por las características de la bomba centrífuga del bombeo eléctrico es indispensable separar el gas contenido en el aceite, lo que se logra con un separador, el gas separado es enviado por el espacio anular hasta la superficie, donde por medio de una válvula unidireccional conectada a la línea de descarga se integra nuevamente al fluido producido por el pozo.

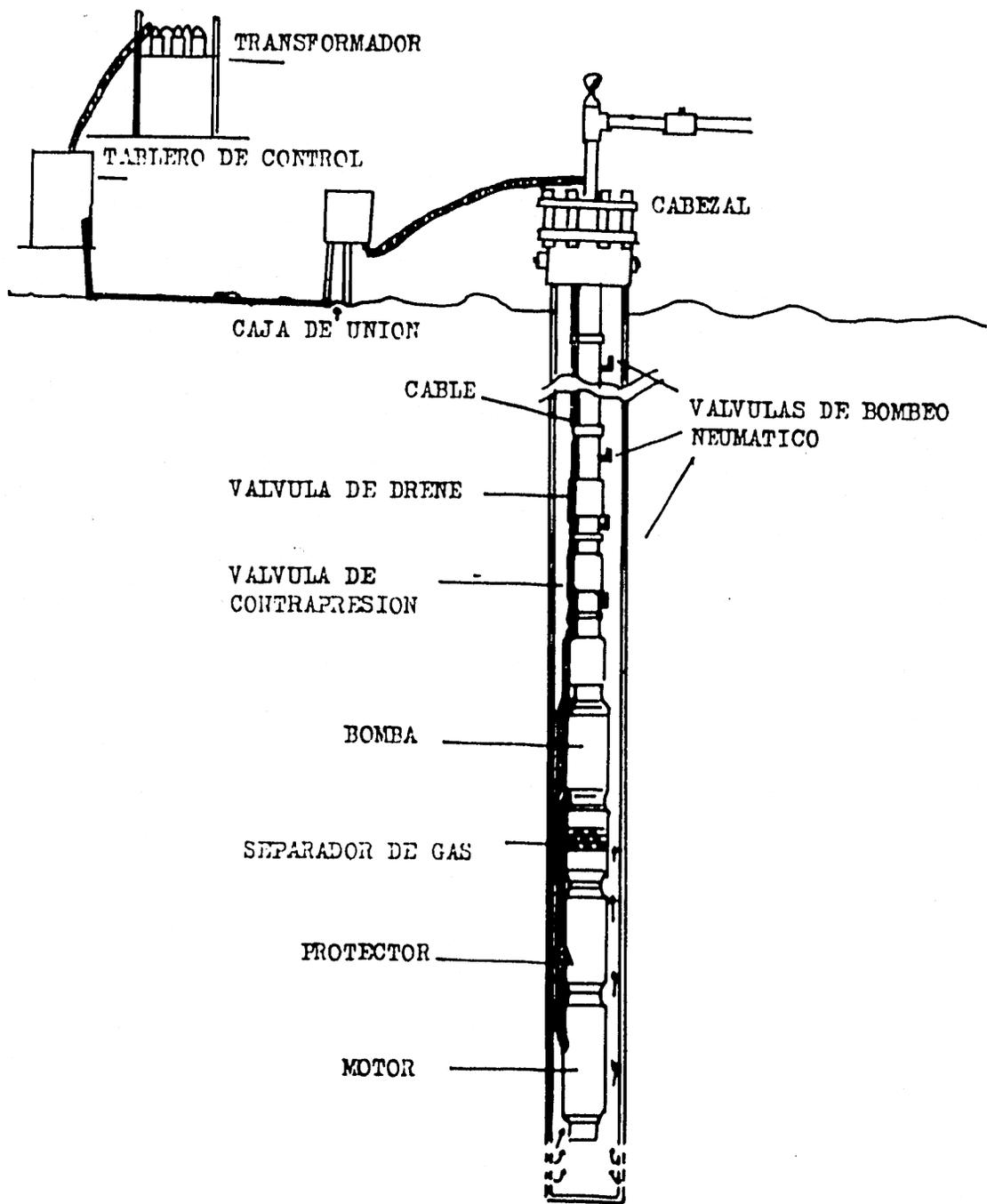
En el sistema mixto se permite que el gas eleve su presión manteniendo cerrada la descarga del espacio anular, una vez que se alcanza la presión de operación de las válvulas de bombeo neumático, éstas se abren y el gas pasa a la tubería de producción.

Durante a la inducción a producción del pozo, es necesario tener una red de gas que proporcione el gas a la presión deseada y en cantidad suficiente, a fin de aerar la columna de fluido y evitar el daño al motor, debido a el exceso de carga manejada por la bomba. Una vez que se ha alcanzado la presión de trabajo con el gas proporcionado por la formación, el suministro de gas es retirado.

En la fig. III.1 se ilustra la distribución típica del del equipo, en un pozo que produce por el sistema combinado.

#### III.1 EJEMPLO ILUSTRATIVO

A fin de mostrar el diseño del sistema combinado, a continuación se presenta un ejemplo numérico, en el cual se aprovechan los resultados obtenidos en el ejemplo de bombeo eléctrico realizado en el capítulo II, también mediante el programa de --



INSTALACION TIPICA DE UN SISTEMA DE BOMBEO MIXTO FIG(III.I)

cómputo antes mencionado se calcula un tercer perfil, el cual corresponde a las condiciones de presión y gasto del fluido producido en la superficie, conteniendo el 100% de su gas disuelto original. Los puntos y gráfica de este perfil se muestran en la tabla C y curva C en el apéndice A. Una vez obtenida esta información, se escoge la presión de boca del pozo en el espacio anular, la cual depende de la presión de succión disponible y que sirve para hacer el diseño del espaciamiento de válvulas de bombeo neumático.

Para el ejemplo se escoge una presión de boca de pozo en el espacio anular de 300 lb/pg<sup>2</sup>.

## II.1a DISEÑO DEL APAREJO DE BOMBEO NEUMÁTICO

### Datos

1.- Profundidad media del intervalo productor	7950	pies
2.- Diámetro de la tubería de producción	2 3/8	pg
3.- Presión de descarga	100	lb/pg <sup>2</sup>
4.- Presión en el espacio anular	800	lb/pg <sup>2</sup>
5.- Presión de fondo fluyendo	1500	lb/pg <sup>2</sup>
6.- Presión de fondo estático	2000	lb/pg <sup>2</sup>
7.- Gasto de Aceite	1500	bl/día
8.- Presión de succión	1137	lb/pg <sup>2</sup>
9.- Elevación de presión requerida	1464	lb/pg <sup>2</sup>
10.- Profundidad de succión	6827	pies
11.- Densidad del gas de inyección (aire=1)	0.65	
12.- Temperatura de flujo superficial	100	°F
13.- Temperatura de fondo de pozo	340	°F
14.- Temperatura media del taller	60	°F
15.- Gradiente del fluido de control	0.5	$\frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}}$

1.- Siguiendo la secuencia para el diseño de una instalación de bombeo neumático, utilizando el método gráfico (cap I),

y con la ayuda de las gráficas que se anexan en el apéndice B, al final de este trabajo, se obtiene el espaciamiento de las válvulas como se muestra en la fig. III.2.

La información requerida que se obtiene al efectuar el diseño del espaciamiento de válvula se muestra en la siguiente tabla.

Válvula (No.)	Profundidad (pies)	Temp. Media (°F)	Pres. de Operación (lb/pg <sup>2</sup> )
1	1646	149.5	830
2	2696	181.0	820
3	3350	200.5	840
4	3850	215.5	842
5	4200	226.0	810
6	4400	232.0	820

2.- Del resultado obtenido en el diseño del espaciamiento de válvulas se tiene que la profundidad de la válvula operante es de 4400 pies, la cual al llevarla a la figura III.3 indica que el perfil C a partir de esta profundidad hasta el nivel de colocación de la bomba (6830 pies) tiene un comportamiento similar al del perfil A de la misma figura.

En el perfil C se muestra el comportamiento del gradiente del fluido teniendo colocadas la bomba a 6830 pies y la válvula operante a 4400 pies.

En el perfil A de la fig. III.3 se tiene que la presión requerida para elevar el aceite que contiene una relación gas-aceite de 10% con respecto del original, es de 2604 lb/pg<sup>2</sup> y una vez que se han instalado las válvulas de bombeo neumáticas de 1950 lb/pg<sup>2</sup>.

Debido a que la presión de succión disponible es de 1137 lb/pg<sup>2</sup> y la presión requerida por la bomba es de 1465 lb/pg<sup>2</sup>, el ahorro de energía es de 654 lb/pg<sup>2</sup> y representandolo en - -

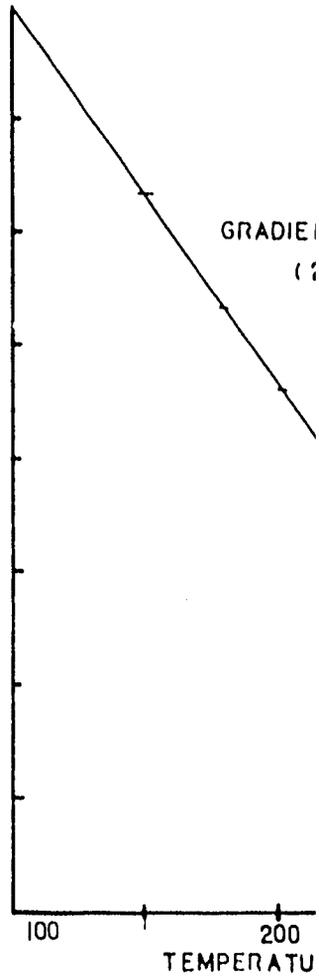
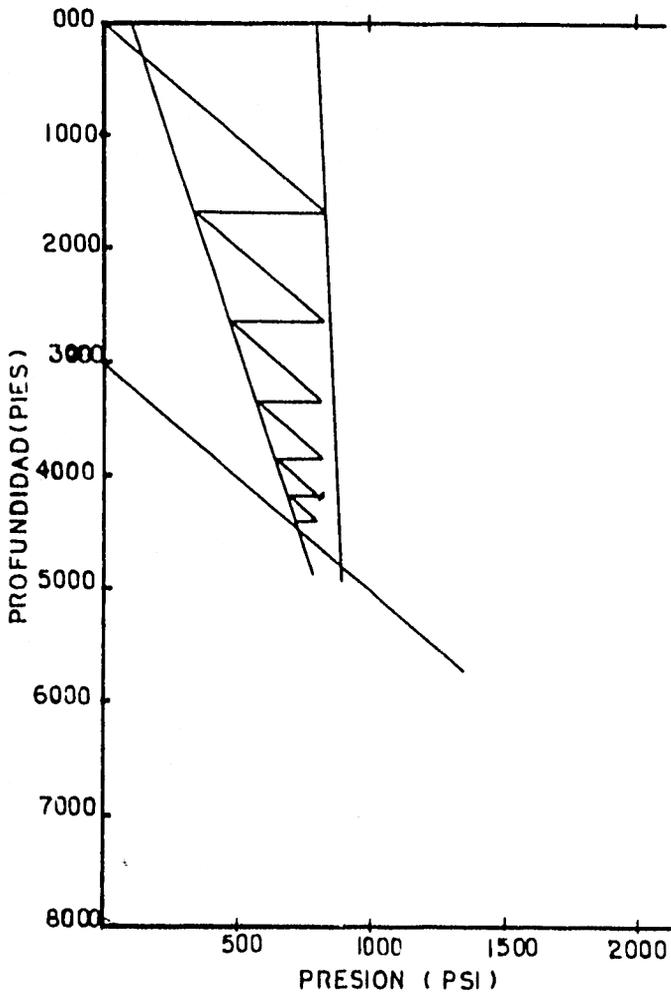
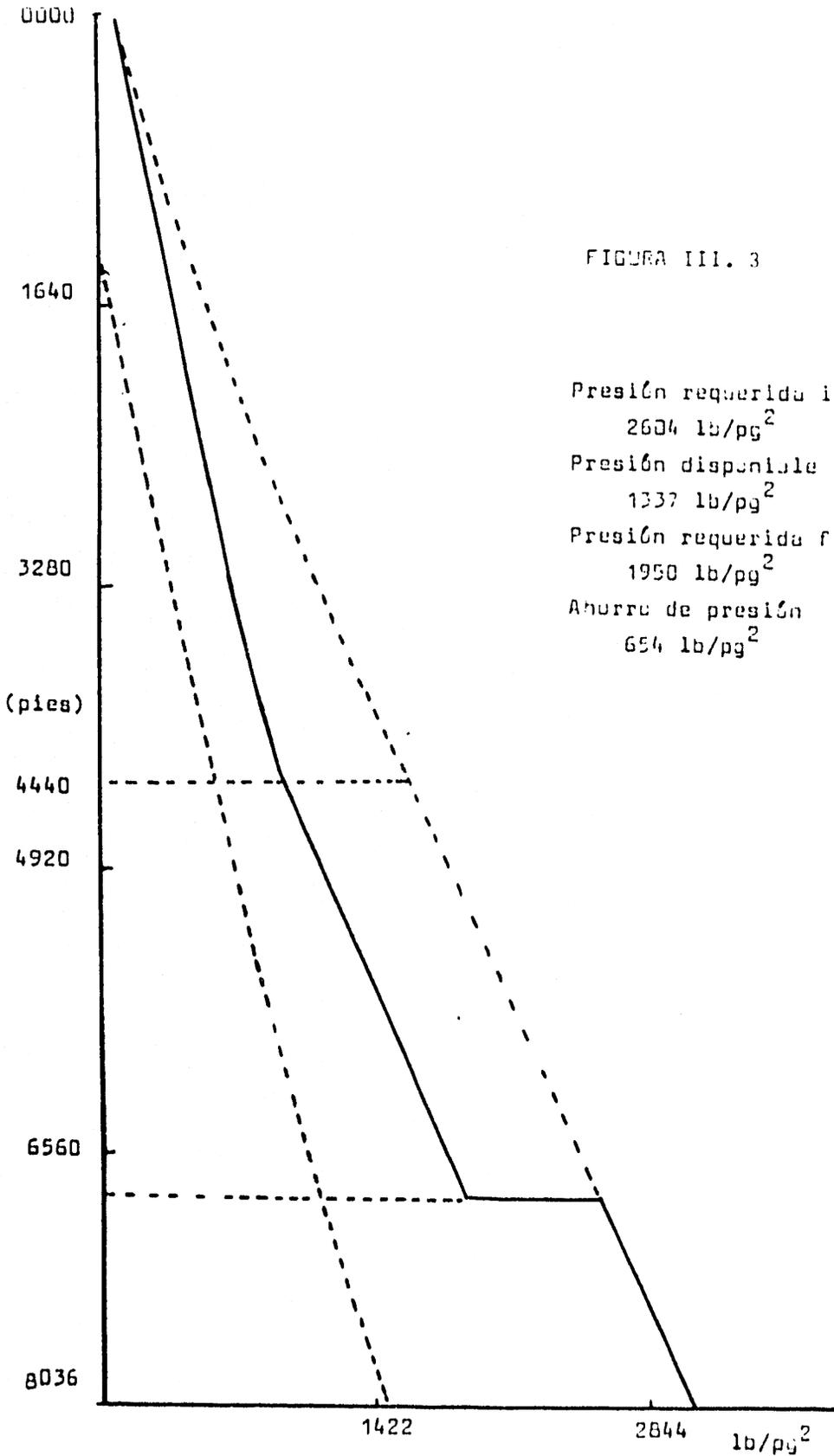


FIG N° III-2



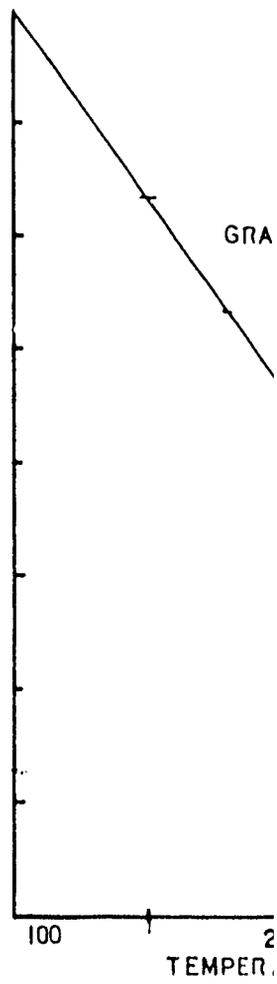
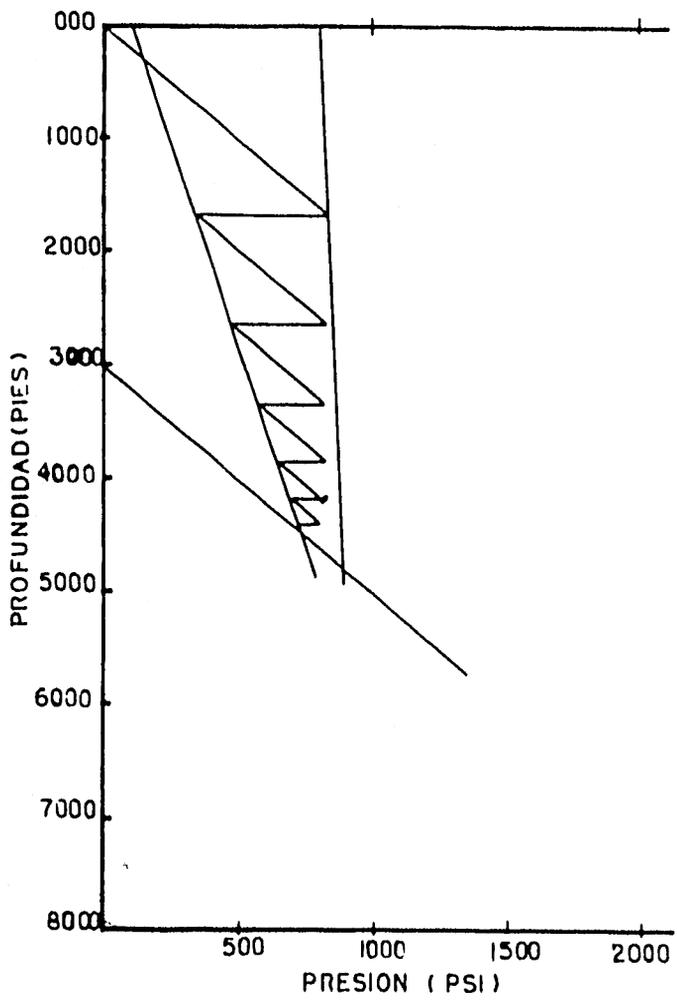


FIG N° III-2

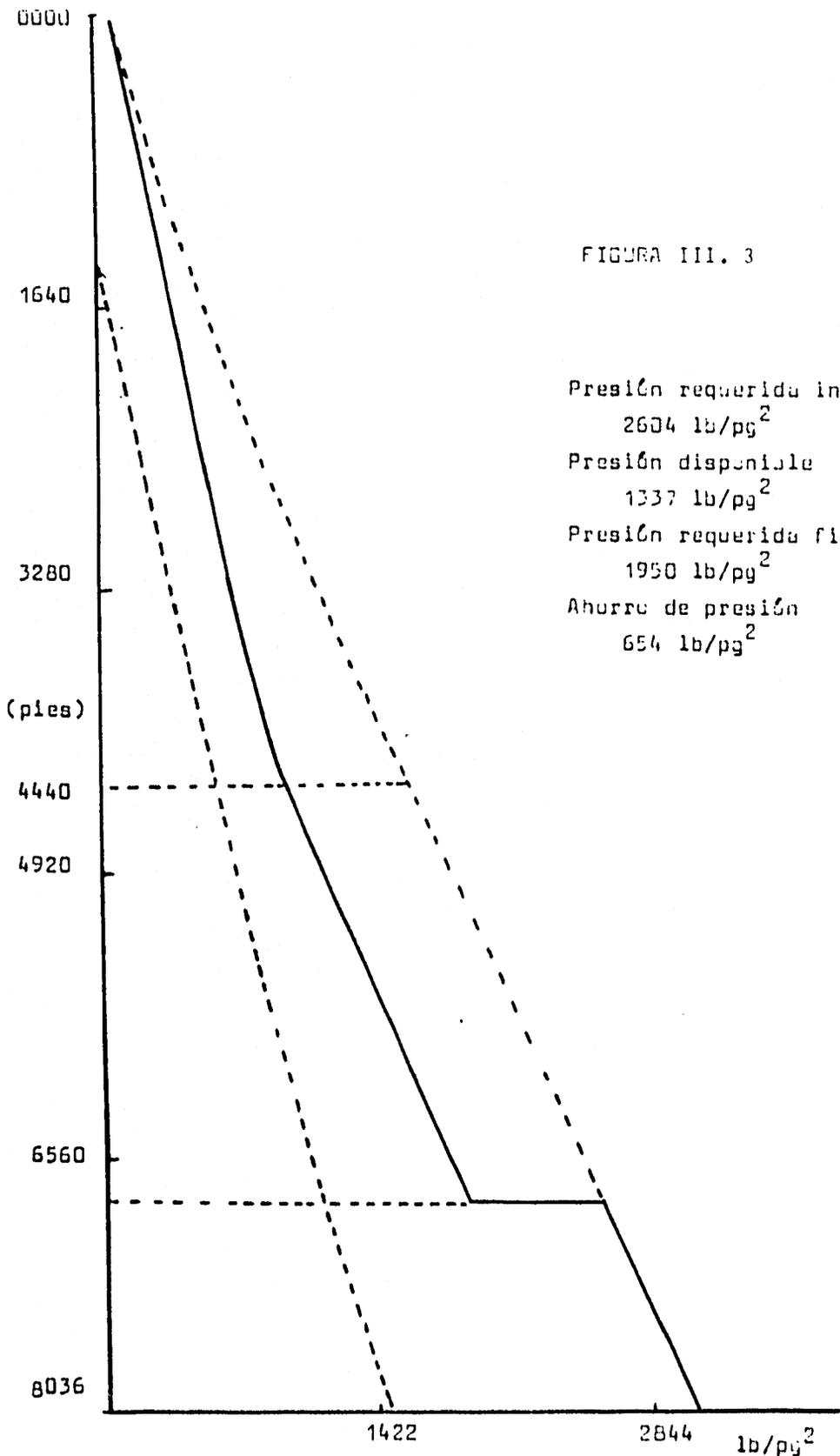


FIGURA III. 3

Presión requerida inicial  
 2604 lb/pg<sup>2</sup>  
 Presión disponible  
 1337 lb/pg<sup>2</sup>  
 Presión requerida final  
 1950 lb/pg<sup>2</sup>  
 Ahorro de presión  
 654 lb/pg<sup>2</sup>

porcentaje se tiene:

$$\text{Ahorro(\%)} = \frac{654}{1465} \times 100 = 44$$

### III.2 LIMITACIONES DEL SISTEMA COMBINADO

Para la implantación de un sistema mixto se deben de tener en cuenta las siguientes características:

- 1.- El pozo debe tener alta relación gas-aceite (RGA), mayores de 800 pies<sup>3</sup>/bl.
- 2.- La distribución de las válvulas es de acuerdo a la presión del espacio anular preestablecida.
- 3.- El espaciado de las válvulas se obtiene utilizando los métodos para el diseño de un aparejo de bombeo neumático continuo.
- 4.- Se debe de conectar a una red de distribución de gas.

Ventajas.

- 1.- En caso de falla en el sistema eléctrico, el pozo puede seguir produciendo por bombeo neumático.
- 2.- El ahorro de energía en el sistema puede incrementarse hasta un 50% conforme la relación gas-aceite aumenta.

## CONCLUSION:

Una vez que se han descrito los sistemas de bombeo electrocentrífugo y bombeo neumático por separado, al analizar sus respectivas ventajas y desventajas, se ha optado por trabajarlos como un sistema combinado.

En la actualidad el bombeo eléctrico presenta dificultades para su empleo debido a la poca flexibilidad que permite a los - parámetros involucrados en el diseño, por lo tanto se concluye - que el sistema combinado de bombeo eléctrico y bombeo neumático - es factible, pero se intuye que al efectuar esta combinación se - tendrán problemas en la operación e instalación además de que la supervisión debe ser mas minuciosa.

APENDICE A

En el presente apéndice se dan a conocer la gráfica y resultados obtenidos al resolver el diseño del aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido propuesto en el capítulo II, mediante el uso de un programa de cómputo.

#### PERFIL A

Este perfil muestra el comportamiento del gradiente de presión del fluido, a partir de la presión de descarga requerida en la boca del pozo, conteniendo el 10% del gas disuelto original = cantidad que es la máxima permisible por la bomba.

presión <sub>2</sub> (lb/pg <sub>2</sub> )	profund. (pies)	temp media (° R)	Z media	B <sub>o</sub>	B <sub>g</sub>	R <sub>s</sub>
1493	8000	794.46	.9621	1.20	.0143	24.9
1436	7815	788.46	.9611	1.20	.0150	23.6
1380	7629	783.39	.9603	1.19	.0158	23.2
1322	7442	777.80	.9596	1.19	.0161	22.4
1294	7350	775.95	.9593	1.18	.0162	21.1
1237	6970	763.65	.9583	1.17	.0173	20.2
1180	6806	758.12	.9581	1.17	.0176	19.8
1109	6710	755.81	.9578	1.17	.0180	19.1
1052	6474	748.71	.9571	1.16	.0190	18.3
995	6235	741.54	.9569	1.15	.0199	17.4
938	5992	734.29	.9568	1.15	.0209	16.5
881	5746	726.95	.9569	1.14	.0220	15.6
824	5500	719.50	.9572	1.13	.0230	14.7
767	5249	711.95	.9586	1.12	.0226	13.76
711	5005	704.65	.9589	1.11	.0270	12.78
654	4756	697.17	.9595	1.11	.0286	11.7
597	4496	689.48	.9610	1.10	.0310	10.7
540	4234	687.56	.9626	1.10	.0340	9.7
483	3962	673.38	.9640	1.09	.0370	8.6
426	3680	656.13	.9668	1.08	.0420	7.6
369	3384	647.02	.9694	1.08	.0480	6.5
255	2768	637.59	.9761	1.05	.0860	3.4
113	1971	613.72	.9876	1.04	.1487	1.7

PERFIL B

Este perfil, representa el comportamiento real del fluido - del pozo, con su gas disuelto original y presión de fondo flu - yendo antes de que se instale el bombeo artificial.

presión (lb/pg <sup>2</sup> )	profund. (pies)	temp media (°R)	Z media	Bo	Bg	Rs
100	0000	564.7	0.9813	1.02	0.120	2.31
185	344	574.6	0.9700	1.03	0.07	4.16
270	663	584.2	0.9615	1.03	0.05	6.09
356	964	593.2	0.9735	1.04	0.04	8.06
441	1252	601.9	0.9466	1.05	0.03	10.04
526	1535	610.4	0.9400	1.06	0.02	12.02
611	1811	618.6	0.9350	1.07	0.02	13.99
692	2080	626.7	0.9315	1.08	0.02	15.93
782	2329	634.2	0.9280	1.09	0.02	17.87
867	2548	640.5	0.9240	1.10	0.01	19.84
953	2762	647.1	0.9220	1.10	0.01	21.78
1038	2972	653.5	0.9190	1.11	0.01	23.70
1123	3182	659.8	0.9184	1.12	0.01	25.59
1209	3390	666.0	0.9184	1.13	0.01	27.45
1294	3597	672.2	0.9178	1.14	0.01	29.29
1322	3801	678.41	0.9168	1.15	0.01	31.09
1465	4008	684.5	0.9171	1.15	0.01	32.86
1550	4213	690.7	0.9180	1.16	0.01	32.90
1721	4628	703.2	0.9200	1.16	0.01	32.90
1891	5044	715.6	0.9251	1.17	0.000	32.90
2061	5461	728.2	0.9305	1.17	0.000	32.90
2233	5881	740.8	0.9368	1.18	0.000	32.90
2403	6304	753.5	0.9400	1.18	0.000	32.90
2488	6517	759.5	0.9400	1.19	0.000	32.90
2574	6730	766.2	0.9400	1.19	0.000	32.90
2603	6802	768.4	0.9400	1.19	0.000	32.90

### PERFIL C

Este perfil representa el comportamiento del gradiente de presión del fluido a partir de la presión requerida en la boca del pozo de  $100 \text{ lb/pg}^2$ , conteniendo el 100 % del gas disuelto original.

punto	presión ( $\text{lb/pg}^2$ )	profund. (pies)	temp. media ( $^{\circ}\text{R}$ )
1	100	0000	564.75
2	142	328	573.02
3	200	721	586.22
4	284	1082	596.12
5	355	1541	610.42
6	426	1935	621.15
7	498	2296	627.45
8	569	2624	642.28
9	639	2952	653.02
10	711	3280	662.21
11	782	3640	674.71
12	853	3936	681.21
13	924	4329	692.42
14	995	4592	703.28
15	1066	4982	714.67
16	1137	5248	721.24
17	1209	5543	729.13
18	1280	5805	737.28
19	1351	6133	744.28
20	1422	6396	750.19
21	1500	6756	755.01
22	1564	6986	763.31
23	1635	7216	770.11
24	1706	7478	777.12
25	1778	7708	785.14
26	1849	7986	793.18

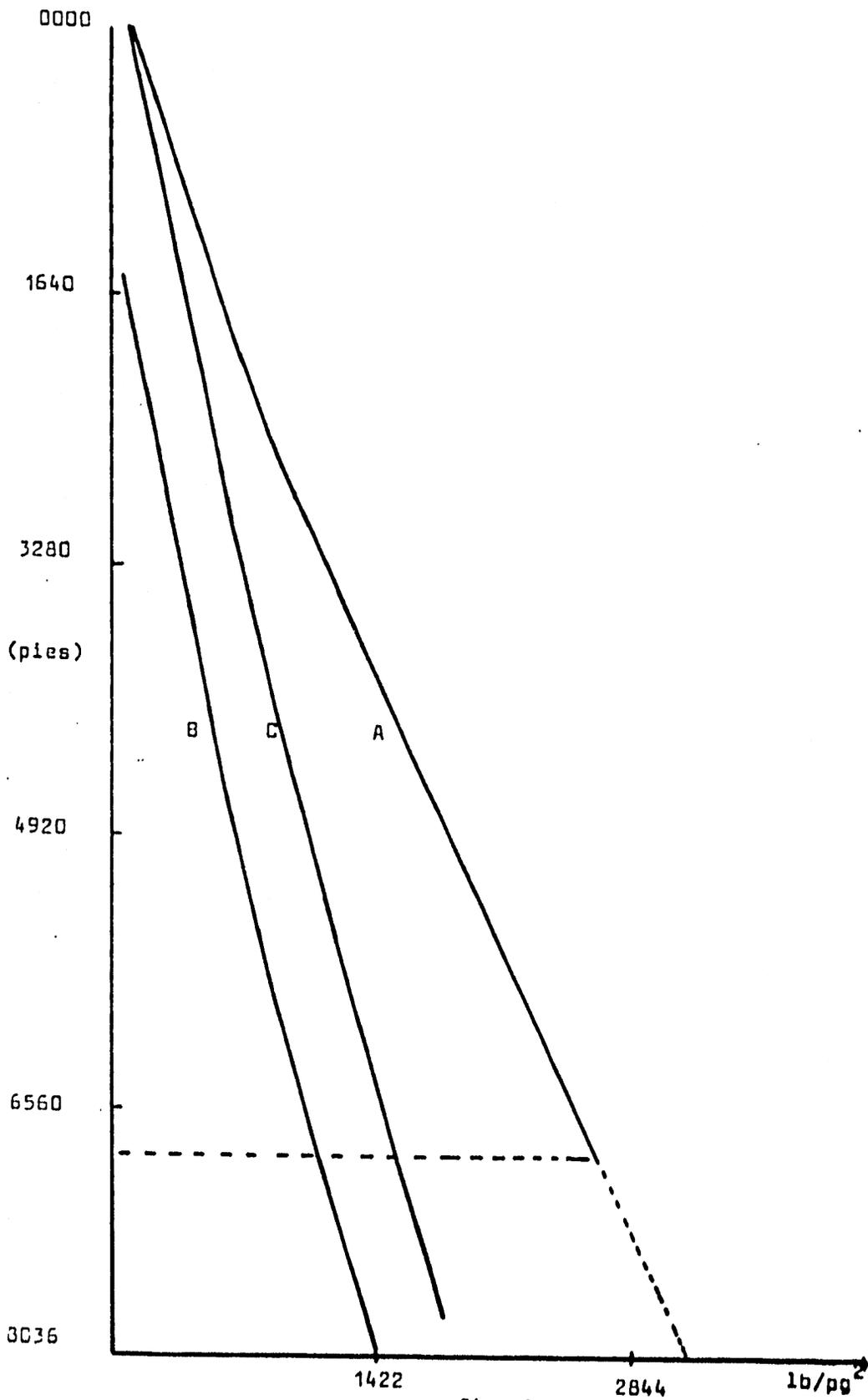


fig. A

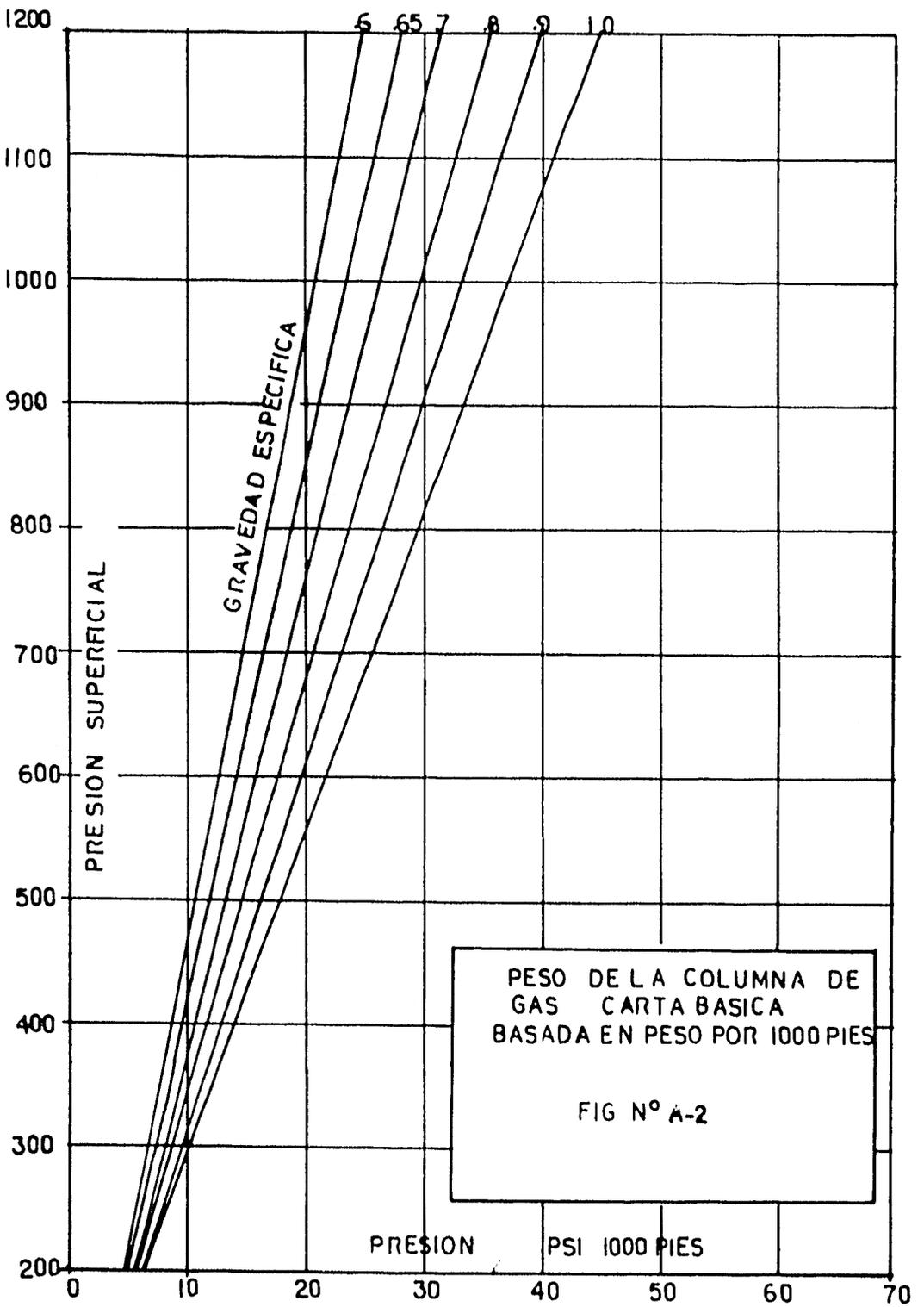
los demas resultados obtenidos mediante el programa de -  
cómputo antes mencionados son:

Profundidad de succión	6830.7 pies
Presión de succión	1137.6 lb/pg <sup>2</sup>
Presión de descarga	2612.6 lb/pg <sup>2</sup>
Elevación de presión requerida	1475 lb/pg <sup>2</sup>
Densidad en la succión	25.53 lb/pie <sup>3</sup>
Densidad en la descarga	28.04 lb/pie <sup>3</sup>
Densidad media en la bomba	28.53 lb/pie <sup>3</sup>
Carga dinámica total	7939.3 pies
Factor de volumen del aceite	1.17
Gasto de aceite a condiciones de bomba	1055 bl/día

A P E N D I C E

9

GRAFICAS QUE SE UTILIZAN EN EL DISEÑO DEL APAREJO



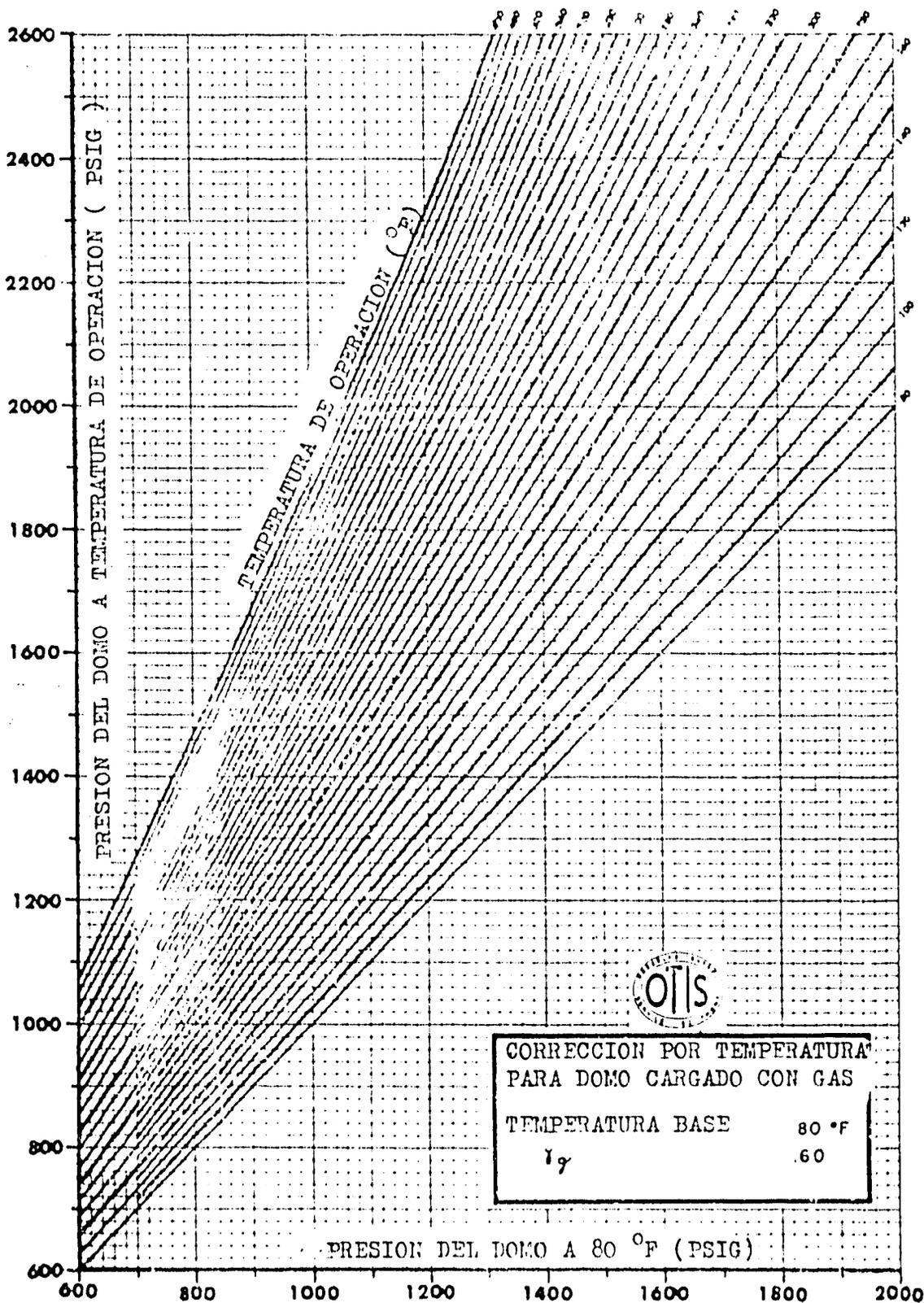


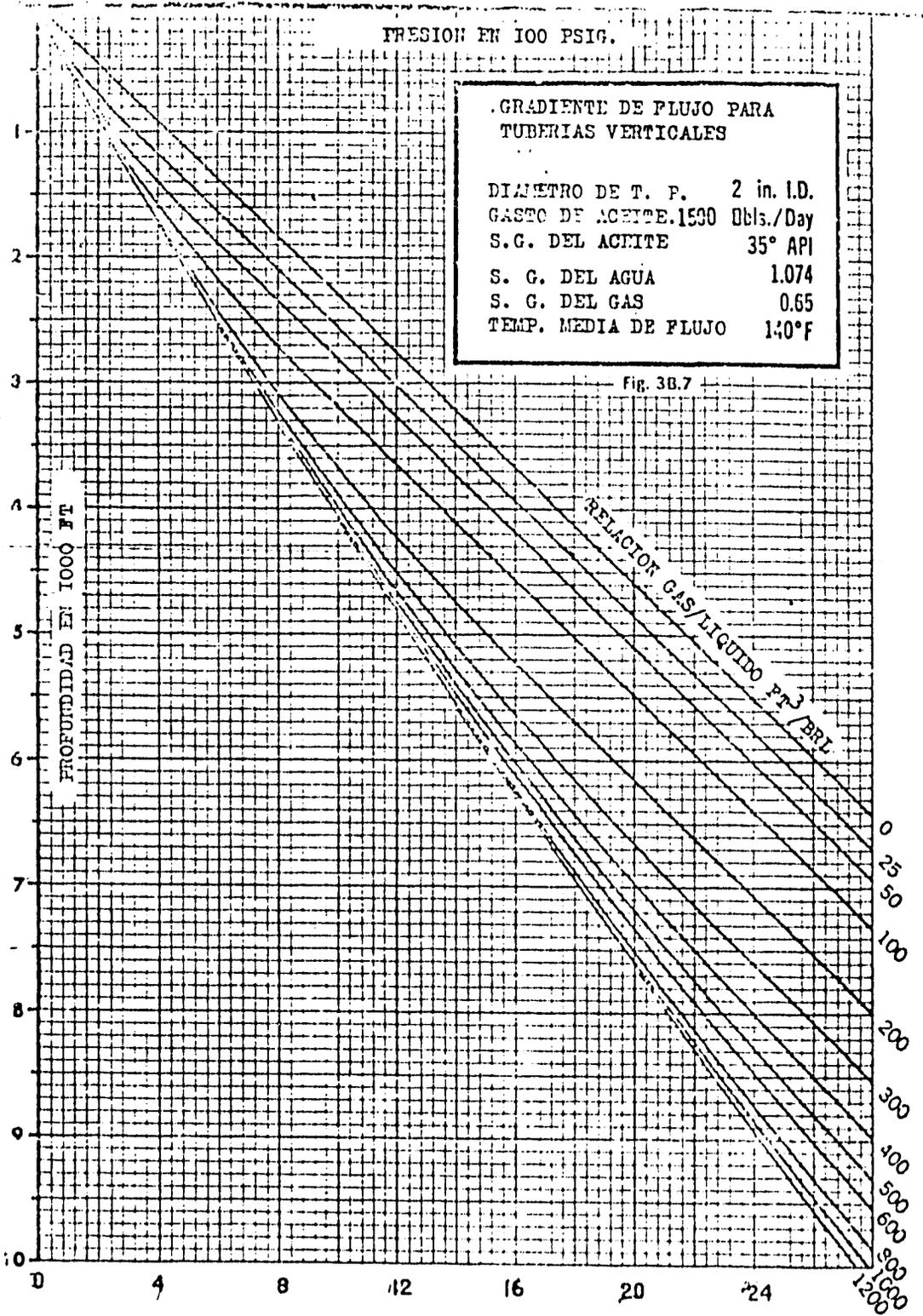
Fig. 30-8 (Courtesy Otis Engineering Corp.)

PRESION EN 100 PSIG.

GRADIENTE DE FLUJO PARA  
TUBERIAS VERTICALES

DIAMETRO DE T. P. 2 in. I.D.  
GASTO DE ACEITE. 1590 bbls./Day  
S.G. DEL ACEITE 35° API  
S. G. DEL AGUA 1.074  
S. G. DEL GAS 0.65  
TEMP. MEDIA DE FLUJO 140°F

Fig. 3B.7



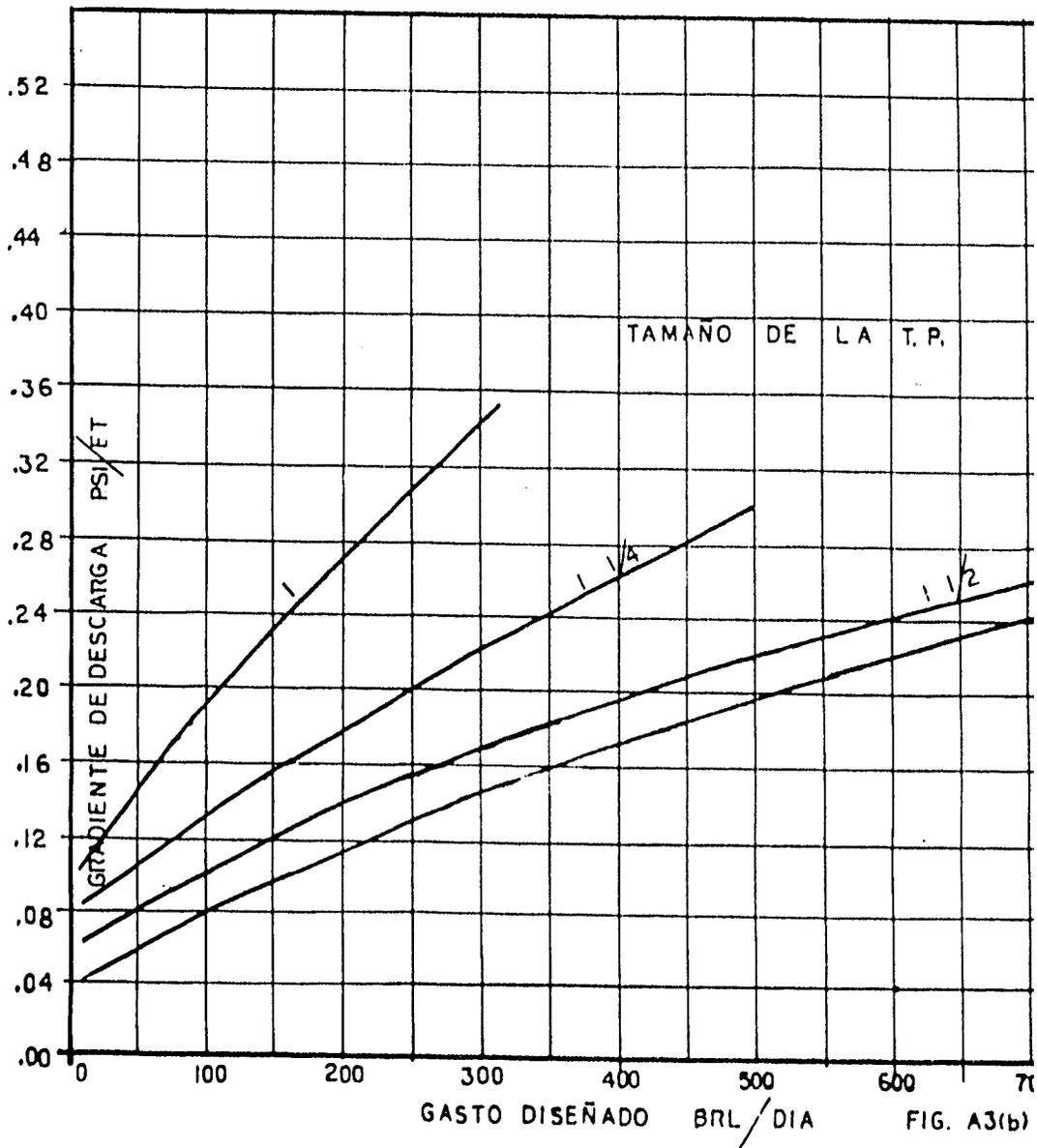
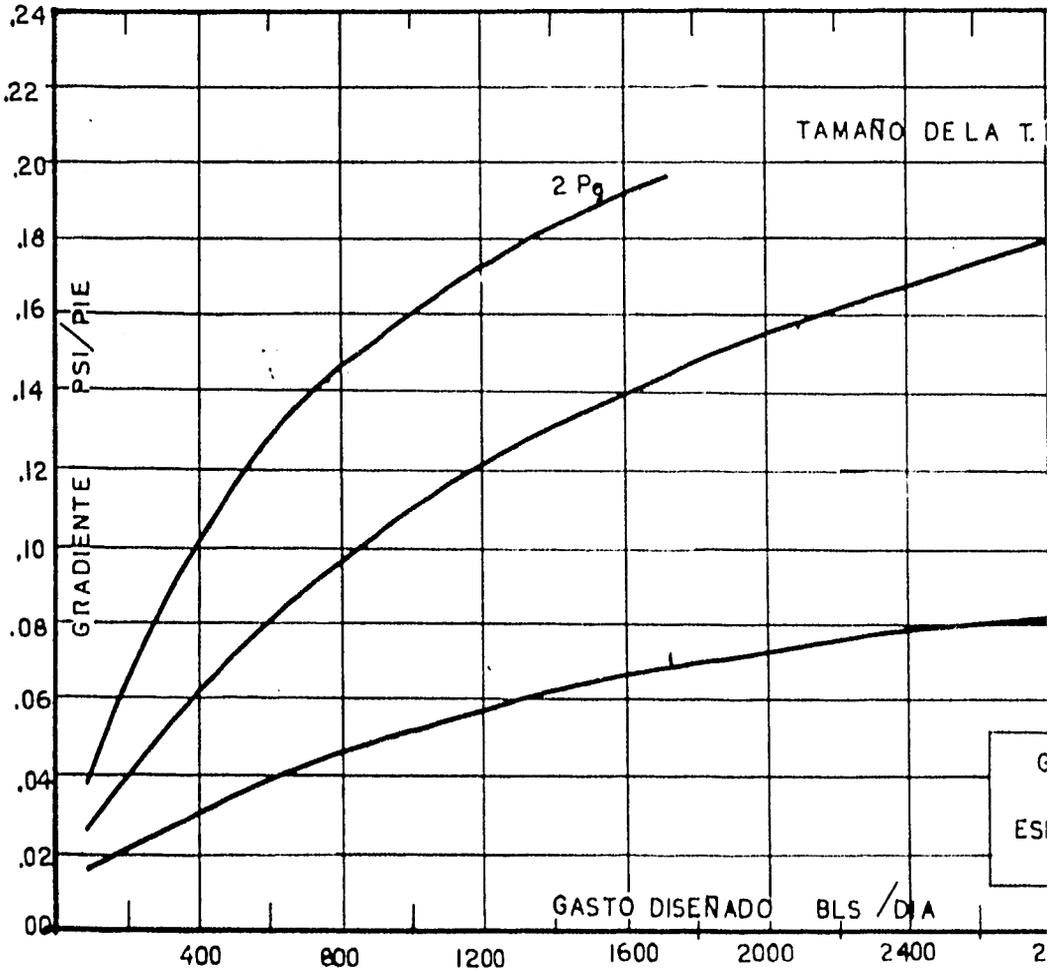
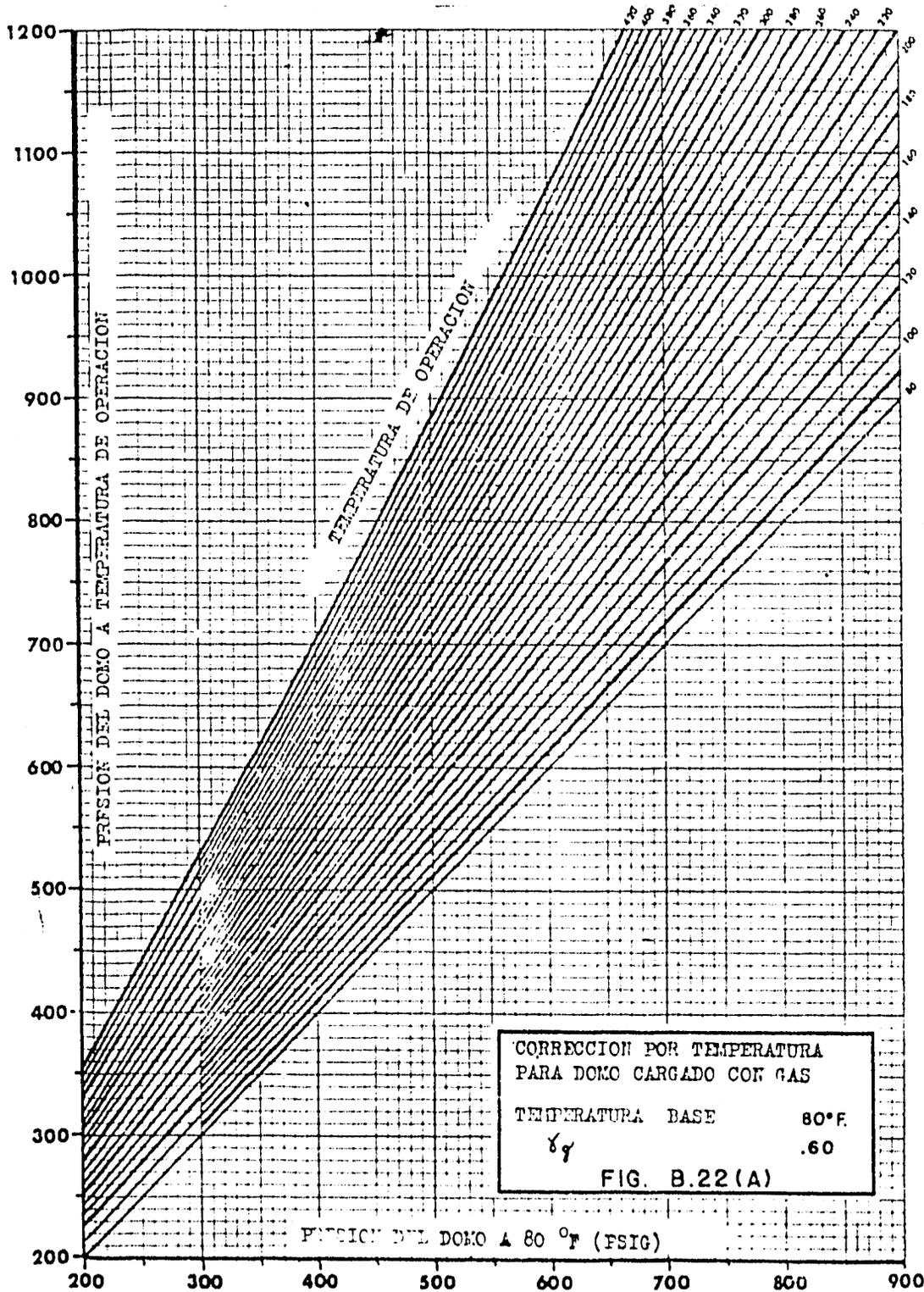
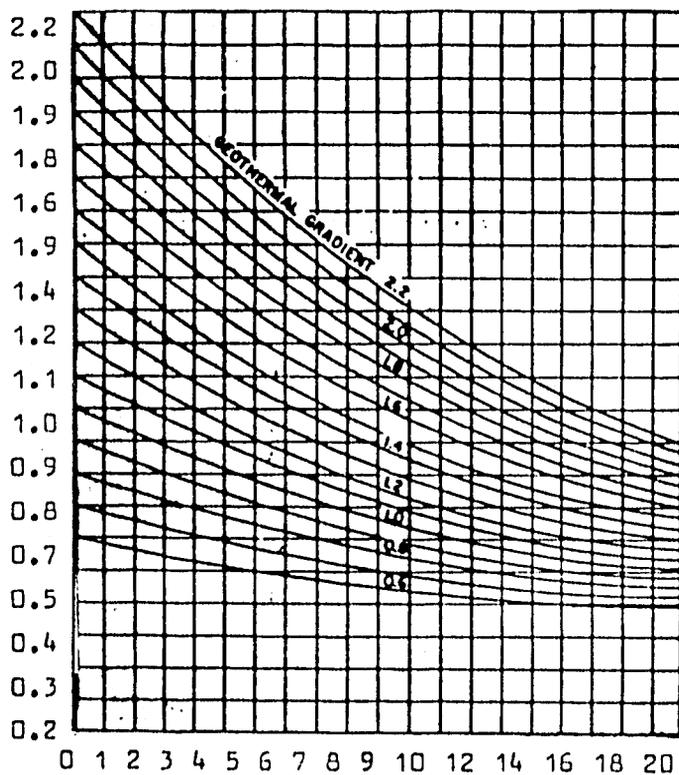


FIG. A3(b)







Gasto de fluido. (100 brl/día)

Gradiente de temperatura de flujo para diferentes gastos, gradientes geotermicos y tamaño de la tubería de producción.

(Kirkpatrick división de producción API).

Carta para ser usada directamente en T.P. de 2 1/2, para T.P. de 2 se multiplica el gasto actual por 2 y para T.P. de 3" se divide el flujo actual por 1.5

Fig. 6.27

PERDIDAS DE CARGA DEBIDO A LA FRICCION  
 BASADA EN LA TABLAS DE HAZEN Y WILLIAMS

NUEVA-CEDULA 40 TUBERIA NUEVA USADA-CEDULA 40 10 AÑOS

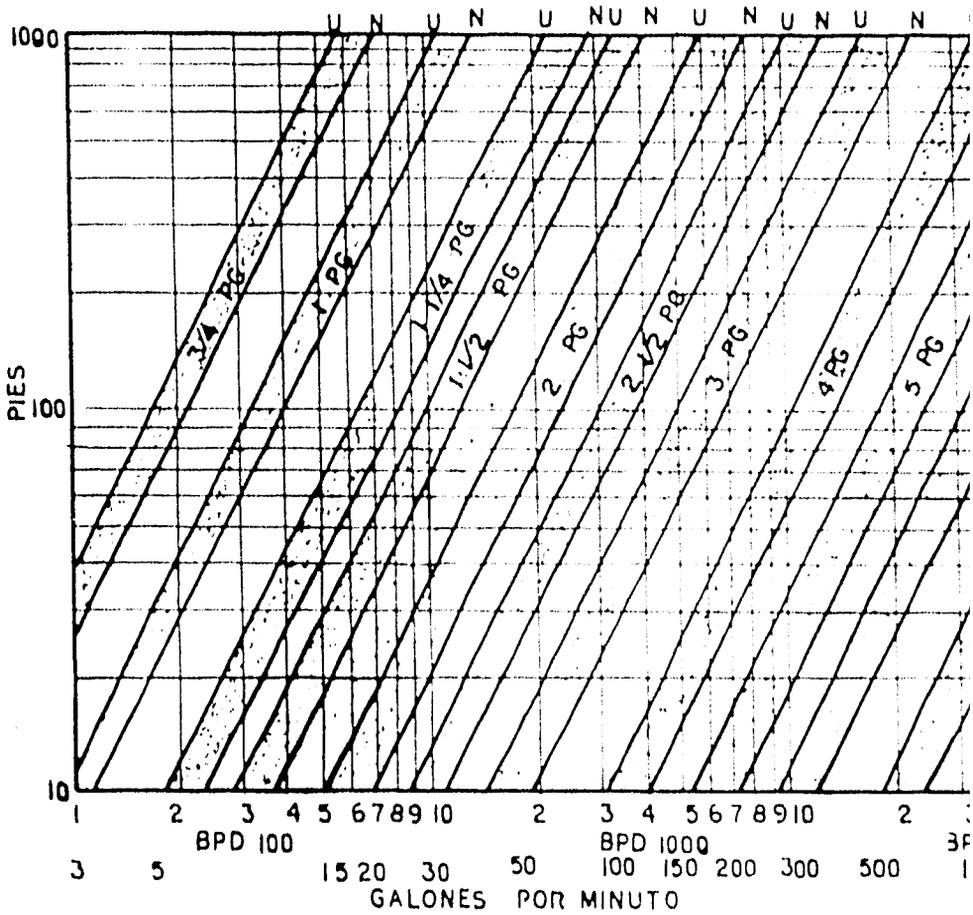


FIG. A5

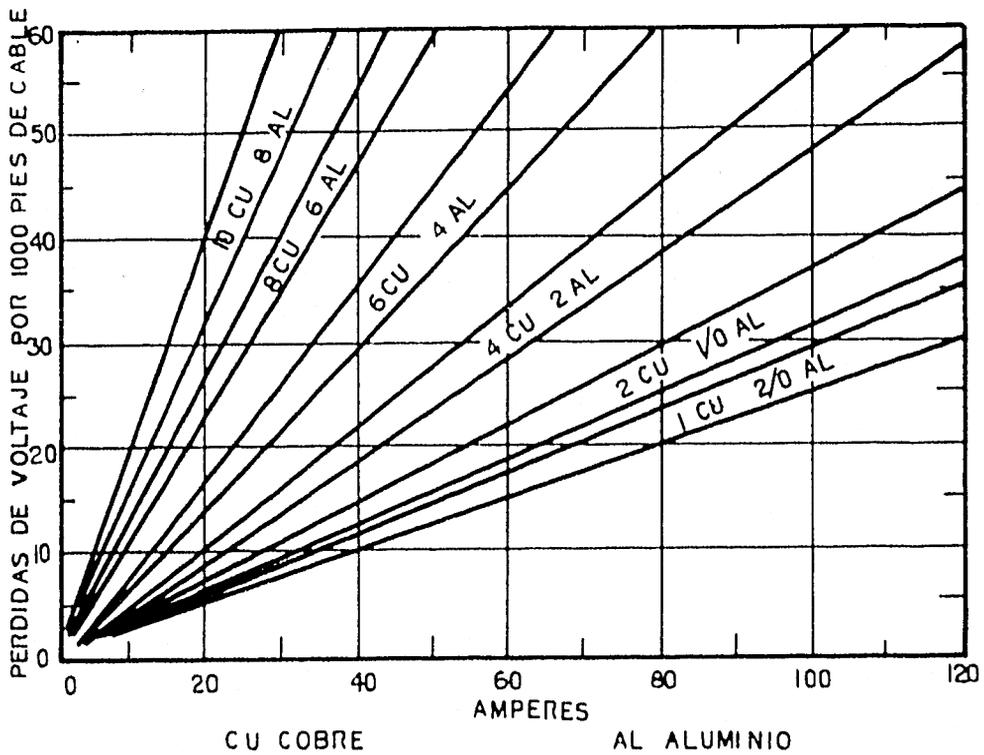


FIG. N° A 6

## NOMENCLATURA

J	=índice de productividad	bl/día/lb/pg <sup>2</sup>
Q <sub>max</sub>	=gasto máximo	bl/día
Q	=gasto de aceite medido a condiciones estandar	bl/día
P <sub>ws</sub>	=presión de fondo estático	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>wf</sub>	=presión de fondo fluyendo	lb/pg <sup>2</sup>
Dv1	=profundidad desde la superficie hasta la primera válvula	(pies)
Pko	=presión de gas disponible para el arranque	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>sup t.p.</sub>	=contrapresión en la superficie sobre la tubería de producción	lb/pg <sup>2</sup>
Ga	=gradiente del fluido	lb/pg <sup>2</sup> /pie
Gu	=gradiente de diseño en función de la tubería	lb/pg <sup>2</sup> /pie
Dvn	=profundidad de la válvula n	(pies)
Dvn-1	=profundidad de la válvula anterior	(pies)
P1	=presión a profundidad de la válvula	lb/pg <sup>2</sup>
Hv	=altura vertical	(pies)
	=peso específico	lb/pie <sup>3</sup>
S.G.	=gravedad específica	
Z	=factor de compresibilidad del gas	
T	=temperatura media del intervalo productor	°F
P	=presión media de cada intervalo	lb/pg <sup>2</sup>
Ta	=temperatura ambiente	°F
Pa	=presión atmosférica	lb/pg <sup>2</sup>
Pd	=presión del domo a la profundidad de la válvula	lb/pg <sup>2</sup>
Pt	=presión ejercida por la columna de fluido de la tubería de producción.	lb/pg <sup>2</sup>
Pc	=presión en el espacio anular a la profundidad de la válvula	lb/pg <sup>2</sup>
Ab	=area del fuelle	pg <sup>2</sup>
As	=area sobre la cual actua la presión de la tubería de producción	pg <sup>2</sup>
Fr	=fuerza del resorte	lbf
Rf	=volumen de gas libre medido a condiciones de escurrimiento por volumen de aceite a condiciones de superficie	

- R =relación gas-aceite producida  $\frac{Vg \text{ a cond. estandar}}{Vo \text{ a condiciones estanda}}$
- R<sub>B</sub> =relación gas-aceite disuelta  $\frac{Vg \text{ a cond.estandar}}{Vo \text{ a cond. de yac.}}$
- Flo =volumen ocupado por el líquido medido a condiciones de escurrimiento por volumen de líquido a las condiciones estandar.
- RAA =relación agua-aceite
- Bw =factor de volumen del agua
- Bo =factor de volumen del aceite
- KVA =capacidad del transformador (kilo-volts-amperes)
- V =voltaje de operación (volts)
- I =intensidad de la corriente (amperes)
- Vs =voltaje superficial requerido (volts)
- N.e =número de etapas
- Hp =potencia en caballos de fuerza.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- J.V. Vogel  
"Inflow performance relationships for solution gas drive wells"  
SPE January 1968 pag.1476.
- 2.- K.E. Brown  
"Gas Lift Theory and Practice"  
The Petroleum Publishing Co, Tulsa Oklahoma.
- 3.- Benítez Rubio Gustavo  
"Apuntes del curso Métodos Artificiales de Producción"  
Fac. de Ing. 1981.
- 4.- M.B. Standing  
"Volumetric and phase Behavior of oil field hydrocarbon systems"  
Rainhold Publishing Corporation, 1952.
- 5.- Reda Pumps Company  
"Oil Well Price And Data Book"  
Battersville, Oklahoma. (August of 1980)
- 6.- Poettmann F.H. and Carpenter P.G.  
"The Multiphase flow of gas, oil and water Through --  
vertical flow strings with application to the design-  
of gas-lift installation".  
API. Drilling and production Practica (1952) PP 257-  
317.
- 7.- Batchelder Max L  
"Aquí tiene lo básico en bombas electrocentrifugas de  
subsuelo"  
Petroleum Interamericano (Dic. 1965 - May. 1966)

8.- Hicks, Tyler G"

"pump selection and Application"

Mc Graw-Hill Book company, Inc. (1975)

(New York, N.Y)