

24  
6



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**OPTIMIZACION DE INSTALACIONES DE  
BOMBEO NEUMATICO CONTINUO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A N :

RAFAEL BARRAGAN MONTEERRUBIO  
PAULA JUAREZ CORONA

MEXICO D.F.  
Tesis con  
FALLA DE ORIGEN

1989



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 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.

## I N D I C E

INTRODUCCION	PAGINA	
CAPITULO I	CONCEPTOS FUNDAMENTALES	1
	Gas Ideal y Gas Real	3
	Gradiente de Presión de una Columna de Gas	9
	Gradiente Geotérmico.	12
CAPITULO II	BOMBEO NEUMATICO CONTINUO	16
	Clasificación de las Válvulas de Bombeo Neumático Continuo	21
	Diseño de Instalaciones de Bombeo Neumático Continuo	38
	Producción de Aceite Obtenida en Función del Volumen de Gas Inyectado	43
CAPITULO III	OPTIMIZACION DE LA RELACION GAS TOTAL LIQUIDO	51
	Método Simplificado para Obtener la Relación Gas Total Líquido más Económica	62
	Determinación de la RGTL más Económica para pth Variable.	76
	Descripción del Método de Pendiente Económica	77
	Método de Utilidad sobre el Aceite contra Costo de Gas Inyectado.	85
	Ejemplo de Diseño de Bombeo Neumático Continuo más Económico para pth variable	95
CAPITULO IV	ANALISIS ECONOMICO	123
	Ejemplo de un Análisis Económico	124
CAPITULO V	PROGRAMA DE COMPUTO	141
	Generalidades	141
	Enfoque en el Desarrollo de las Correlaciones	142
	Diagrama de Flujo del Programa de Cómputo	148
	Listado del Programa de Cómputo	151
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		157
NOMENCLATURA		159
BIBLIOGRAFIA		161

## INTRODUCCION

Para que un pozo fluya, es necesario que la energía del yacimiento en forma de presión, sea superior a las caídas de presión - que se tienen desde el fondo hasta la superficie; antes de que la presión del yacimiento decline hasta un valor tal que la producción de los pozos se encuentre cerca al límite económico se deben implantar sistemas artificiales de producción para proporcionar la energía necesaria para hacer llegar los fluidos a la superficie. Uno de los sistemas más usuales es el bombeo neumático continuo.

Este sistema consiste en suministrar energía al fluido mediante la inyección de gas a una presión relativamente alta (250 lb/pg<sup>2</sup> mínima) en pozos con alto índice de productividad, del orden de 0.5 bl/día/bl/pg<sup>2</sup> o más, y una presión de fondo fluyendo relativamente alta (columna hidrostática del orden del 50% o más en relación a la profundidad del pozo). El gas se hace pasar del espacio anular a la tubería de producción en forma continua, a través de válvulas colocadas en uno o más puntos de inyección.

Este trabajo se enfoca principalmente a la optimización de la relación gas total líquido que será manejado en la instalación de bombeo neumático continuo, para ello se presentan los siguientes métodos: pendiente económica y utilidad sobre el aceite.

Una instalación de bombeo neumático continuo comprende tanto equipo superficial como subsuperficial; es labor del Ingeniero

Petrolero realizar el diseño de estas instalaciones.

Debido al creciente uso de las computadoras fue necesario desarrollar un programa de cómputo que permite analizar y diseñar las instalaciones de bombeo neumático continuo obteniéndose resultados con un alto grado de confiabilidad, en un tiempo relativamente corto.

El programa de cómputo presentado, es una herramienta útil y necesaria para el Ingeniero de Producción, ya que simplifica notablemente su labor en lo referente al diseño de instalaciones de bombeo neumático continuo.

## CAPITULO I

## CONCEPTOS FUNDAMENTALES

## DEFINICIONES

## PESO MOLECULAR DE UNA SUBSTANCIA

Es la suma de los pesos atómicos de los elementos que la forman.

## PESO MOLECULAR DE UNA MEZCLA DE GASES

Es el peso molecular resultante de efectuar la sumatoria de los pesos moleculares de las sustancias que la forman, afectados cada uno de ellos por la concentración que tengan en la mezcla.

## PESO MOLECULAR DEL AIRE

Según la proporción de los elementos que la integran, el peso molecular del aire tiene un valor de:

$$M_{\text{aire}} = 28.97 \text{ lb/mol.}$$

## UNIDAD DE MASA MOL

Mol es la masa (cantidad de sustancia) de un gas, cuyo peso es numéricamente igual a su peso molecular. Según el sistema de unidades empleado se tendrá:

Mol-lb en sistema inglés (pic-lb-seg)

Mol-gr en sistema métrico (cm-gr-seg)

Esta cantidad de substancia es independiente de las condiciones de presión y temperatura a que se encuentre el gas.

Así una mol-lb de metano pesa 16.042 lb

Demostración

Fórmula del metano  $\text{CH}_4$

Peso atómico del carbón 12

Peso atómico del hidrógeno 1

Peso molecular del metano =  $12 + 4(1) = 16$

#### VOLUMEN MOLAR

Es el volumen que ocupa una mol a determinadas condiciones de presión y temperatura. Una propiedad importante de los gases, de gran aplicación en la solución de problemas, es que independientemente de su composición una mol-lb ocupa un volumen de  $379 \text{ pic}^3$  a condiciones estándar de presión y temperatura ( $P=1 \text{ atm}$ ,  $T=60 \text{ }^\circ\text{F}$ ).

#### DENSIDAD DE UN GAS A UNA PRESION Y TEMPERATURA DADAS

Este concepto queda definido como el cociente de su peso entre el volumen que ocupa a esas condiciones de presión y temperatura.

Así se tiene que para el aire:

En los gases ideales, el volumen ocupado por las moléculas es insignificante en comparación con el volumen total, esto es válido para todas las presiones y temperaturas; además, la atracción intermolecular es mínima bajo cualquier condición. Resulta claro que un gas ideal es hipotético, ya que cualquier gas debe tener moléculas que ocupen un volumen definido y ejercer atracción entre sí.

Todo gas que satisfaga la ecuación de estado:

$$PV = RT$$

--- I.1)

Se denomina gas ideal. En donde R es la constante universal para los gases, cuyo valor dependerá de las unidades en que estén expresados, el volumen, la presión y la temperatura.

Valor de la constante universal de los gases {R}, en unidades inglesas.

Sabiendo que el volumen de 1 mole-lb de gas medido a condiciones estándar ( $P=14.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$ ,  $T=60^\circ\text{F}$ ) es de  $379.4 \text{ pie}^3$

$$PV = nRT$$

$$R = \frac{PV}{nT}$$

$$R = \frac{14.7 \left( \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right) \times 379.4 \left( \text{pie}^3 \right)}{1 \text{ mole-lb} \times (60 + 460) \text{ } ^\circ\text{R}}$$

$$R = 10.73 \frac{\text{lb/pg}^2 - \text{pie}^3}{\text{mole-lb} - ^\circ\text{R}}$$



El gas real, es el gas cuyo volumen se reduce a la mitad de su volumen original cuando la presión es menor de dos veces la presión inicial; es decir, el gas real es más compresible que el gas ideal, debido a que estos gases presentan dos tendencias:

- 1.- Se apartan entre sí por su constante movimiento cinético.
- 2.- Se atraen por fuerzas eléctricas existentes entre las moléculas.

La ecuación de estado para los gases reales es:

$$PV = ZnRT$$

Para el diseño y análisis de los aparatos de bombeo neumático es necesario conocer las leyes que rigen el comportamiento de los gases y la interrelación entre la presión, el volumen y la temperatura.

Como los gases reales a altas presiones presentan una desviación respecto al comportamiento de un gas ideal es necesario introducir un factor de ajuste, llamado factor de compresibilidad (Z).

El comportamiento (P,V,T) para un gas real es:

$$\frac{PV}{TZ} = \text{Cte.}$$

$$Z = \frac{V_{\text{real}}}{V_{\text{ideal}}}$$

El factor de compresibilidad (Z) está en función a la densidad del gas, de la presión y temperatura; para determinar su valor es necesario recurrir a las condiciones críticas de presión y temperatura, estas pueden obtenerse mediante ecuaciones o gráficas (fig. 1.1).

$$T_{pc} = 167 + 376.67 \gamma_g$$

$$P_{pc} = 702.5 - 50 \gamma_g$$

Las condiciones pseudoreducidas se determinan con las expresiones siguientes:

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}}$$

$$T_{pr} = \frac{T + 460}{T_{pc}}$$

El factor de compresibilidad (Z) se obtiene mediante correlaciones o gráficas que relacionan la presión pseudoreducida (P<sub>pr</sub>) y la temperatura pseudoreducida (T<sub>pr</sub>).

Con la fig. 1.2 y las condiciones pseudoreducidas se determina el factor de compresibilidad (Z), también se calcula por ensaye y error mediante del procedimiento siguiente:

$$p_r = 0.27 P_{pr} / Z T_{pr}$$

$$Z = \frac{\{A1 + A2/T_{pr} + A3/T_{pr}^3\} p_r + \{A4 + A5/T_{pr}\} p_r^2 + \{A5 + A6 p_r^5\} / T_{pr} + \{A7 p_r^2 / T_{pr}^3\} \{1 + A8 p_r^2\} \{\exp[-A8 p_r^2]\} + 1}{\quad \quad \quad \text{--- 1.3}}$$

Donde:

A1 = 0.31506	A2 = 1.0467	A3 = 0.5783	A4 = 0.5353
A5 = 0.6123	A6 = 0.10489	A7 = 0.68157	A8 = 0.68446

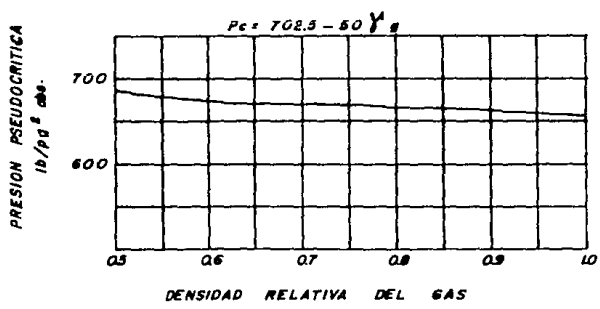
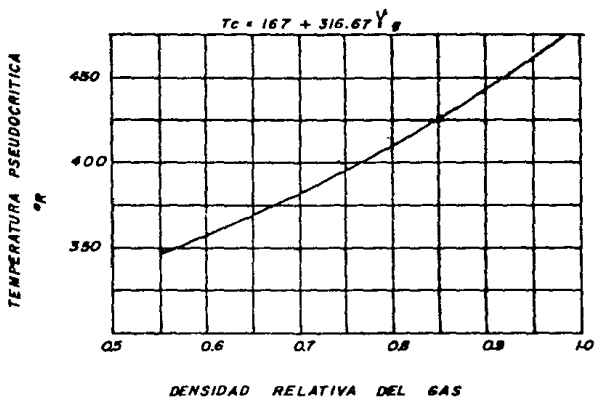


FIG. 1.1 PROPIEDADES PSEUDOCRITICAS DE LOS GASES NATURALES

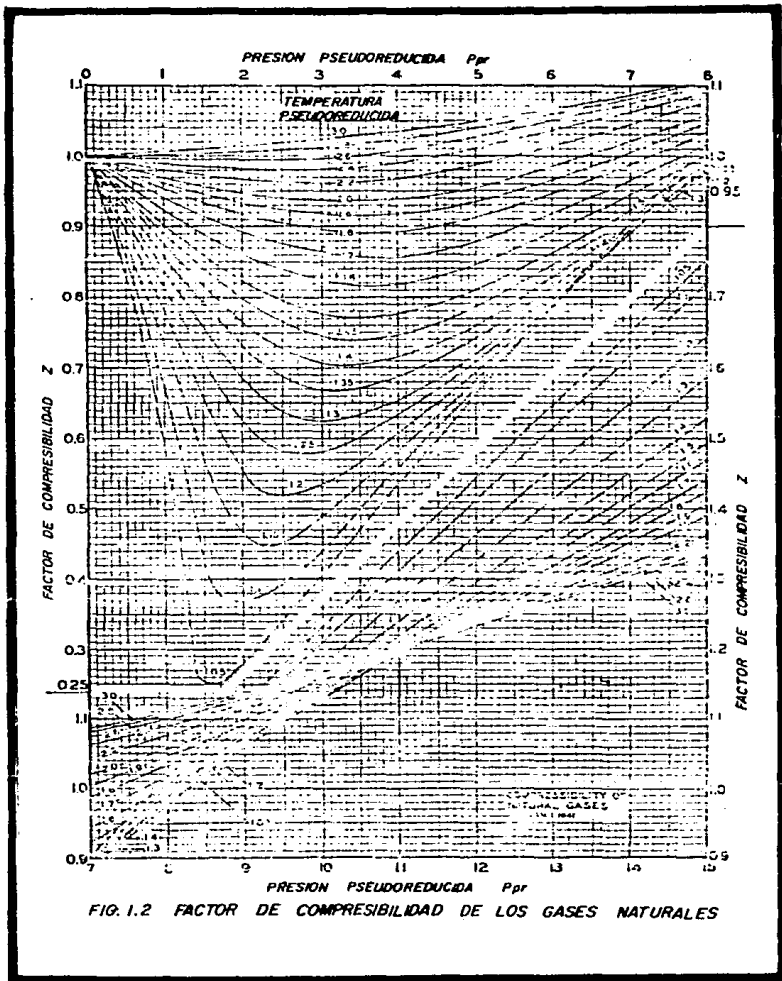


FIG. 1.2 FACTOR DE COMPRESIBILIDAD DE LOS GASES NATURALES

Este procedimiento consiste en suponer un valor de  $Z$  y obtener la densidad relativa ( $\rho_r$ ) para ese valor supuesto. Se calcula ( $Z$ ) con la ecuación 1.3 y se compara con el supuesto, si no coinciden estos valores, se supone para la siguiente iteración el valor de  $Z$  calculado. El procedimiento se repite hasta caer dentro de una tolerancia preestablecida ( $Tol < 0.001$ ).

#### GRADIENTE DE PRESION EN UNA COLUMNA DE GAS

El cambio de presión en una columna de gas está en función de la densidad, la presión y la temperatura. La estimación del gradiente de la columna de gas a partir de mediciones superficiales solamente incluye el cálculo de la presión adicional ejercida por el peso de la columna estática del fluido

Mediante la expresión se obtiene la presión que ejerce una columna de gas a una profundidad dada.

$$\frac{(0.01875 \text{ g H})}{ZT}$$

$$P_2 = P_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$

--- 1.4)

donde:

$P$  = Presión (lb/pg<sup>2</sup>)

$V$  = Volumen (pie<sup>3</sup>)

$n$  = Número de moles

$m_g$  = Masa del gas (lb)

$M_g$  = Peso molecular del gas

$M_a$  = Peso molecular del aire (28.97)

$\rho_g$  = Densidad del gas (lb/pie<sup>3</sup>)

$\rho_a$  = Densidad del aire (lb/pie<sup>3</sup>)

$\gamma_g$  = Densidad relativa del gas (adm.)

$H$  = Profundidad (pie)

La ecuación 1.4 involucra una solución de ensayo y error, en la cual  $Z$  depende de la presión de fondo y viceversa. Por esta razón, se han desarrollado gráficas que proporcionan buenos resultados basados en la ecuación 1.4.

Una de estas gráficas se muestra en la fig. 1.3.

Para presiones y temperaturas normales, la presión se incrementa con la profundidad (gradiente de presión) en forma aproximadamente constante para una presión superficial dada.

Otra manera de calcular la presión que ejerce el peso de la columna del gas, es mediante las siguientes ecuaciones empíricas.

$$P_2 = P_1 \left( 1 + \frac{H \cdot \gamma_g}{100} \right) \quad \text{--- 1.5}$$

Donde:

$P_2$  = Presión de fondo (lb/pg<sup>2</sup>)

$P_1$  = Presión de superficie (lb/pg<sup>2</sup>)

$H$  = Profundidad (miles de pie)

$$P_2 = P_1 + 0.25 \left( \frac{H}{100} \times \frac{P_1}{100} \right) \quad \text{--- 1.6}$$

Donde:

$H$  = Profundidad (pie)

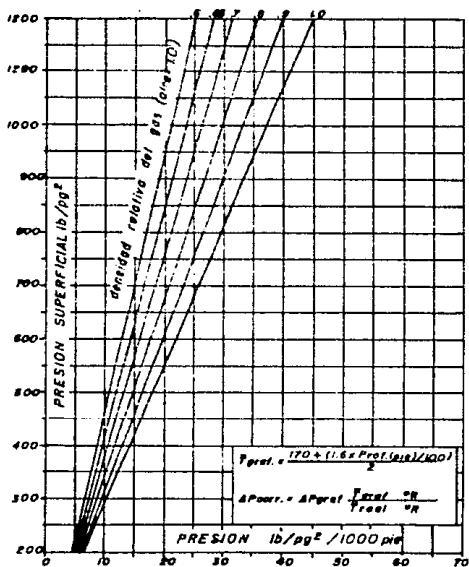


FIG. 1.3 GRADIENTES DE LA COLUMNA DE GAS

## GRADIENTE GEOTERMICO

El gradiente geotérmico se define como la variación de la temperatura con respecto a la profundidad, el cual depende de las propiedades de la formación de cada región.

El flujo de calor en estado estable a través de la tierra puede ser tratado considerando un medio de conductividad uniforme con un flujo de calor constante, dirigido hacia arriba a grandes profundidades. La temperatura de superficie ( $T_{sup}$ ) es constante, por lo tanto, se tiene:

$$T_{fondo} = T_{sup} + GIH$$

Donde:

GI = Es el gradiente geotérmico

H = Es la profundidad

## GRADIENTE FLUYENTE DE TEMPERATURA

El gradiente fluyente de temperatura está en función del gasto de líquido y de la relación gas-líquido.

Kirkpatrick's preparó una correlación para predecir la temperatura en función del gradiente geotérmico y del gasto de líquidos (ver fig. 1.4). Esta correlación es válida únicamente para tuberías de 2, 2 1/2 y 3 pg. de diámetro, y gastos menores de 2,000



bls/día, conociendo la temperatura de fondo, diámetro de tubería, y gradiente geotérmico se obtiene el gradiente de temperatura fluyente, del cual se puede encontrar la temperatura fluyente en la superficie, esta solución considera una línea recta entre la temperatura de fondo y la de superficie.

#### Ejemplo 1.1

Dados:

$$q = 700 \text{ bl/día}$$

$$\phi TP = 2 \text{ pg.}$$

$$H = 5,500 \text{ pie}$$

Gradiente geotérmico para el área + 1.9 °F/100 pie

Temperatura de fondo = 175 °F

Determinar la temperatura fluyente de superficie

#### Solución

Paso 1.- Para 700 bl/día y TP de 2 pg. el gasto es aproximadamente equivalente a 1,400 bl/día para un diámetro de TP de 2 1/2 pg.

Paso 2.- A la intersección del gasto con la curva de gradiente geotérmico se traza una línea horizontal, se lee el valor del gradiente de temperatura fluyente en (°F/100 pie).

Paso 3.- Se calcula la temperatura fluyente con la siguiente expresión:

Temperatura fluyente en superficie = Temperatura de fondo

- Grad. Tem. Fluyente  $\frac{(\text{prof.})}{100}$

Temperatura fluyente en superficie =  $175 - \frac{1.01 (5500)}{100}$

Temperatura fluyente en superficie = 120 °F

La figura 1.4 se utiliza directamente para tuberías de 2 1/2 pg. de diámetro interior.

Para tubería de 2 pg. de D.I. multiplicar el gasto del líquido por 2.

Para tubería de 3 pg. de D.I., dividir el gasto del líquido entre 1.5.

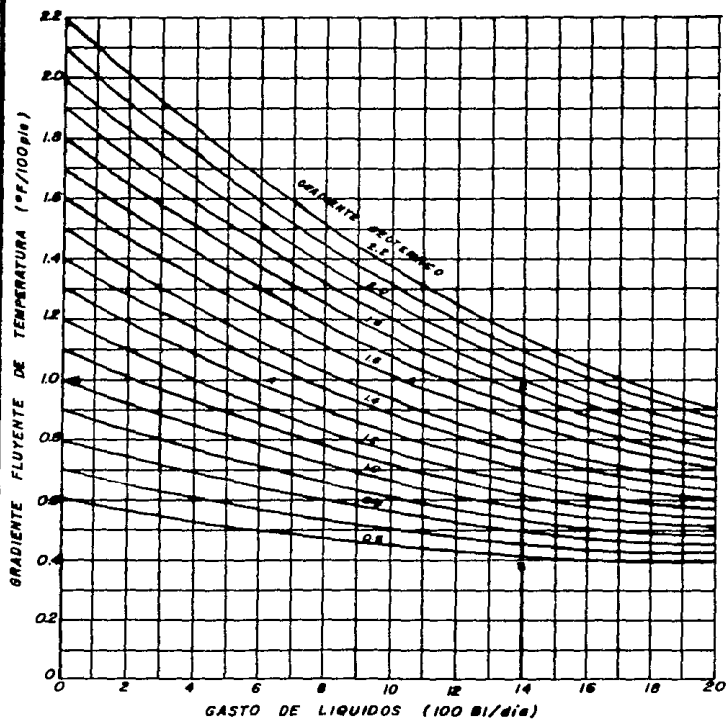


FIG. 1.4 GRADIENTE FLUYENTE DE TEMPERATURA

## CAPITULO II

## BOMBEO NEUMATICO CONTINUO

Para que el método de bombeo neumático llegara al desarrollo en que se encuentra en la actualidad fue necesario ir resolviendo diferentes problemas, y con ello variando las formas de diseño.

Este método tiene su comienzo a principios del siglo XIX en la extracción de agua en las minas inundadas de Arizona, California, y la primera patente corresponde al Dr. J. G. Pohle que usaba el aire en lugar de gas.

Para la extracción de aceite se usó inicialmente aire comprimido, como sustancia de trabajo en los campos de Pensilvania, E.U. por el año de 1865.

Posteriormente fue introducido en Bakú, U.R.S.S. en 1899; en el campo de Spind Letop, en el estado de Texas en 1901.

En Cat Canyon, estado de California, se usó en la inyección primeramente aire, y en 1911 se inyectó gas, y a partir de esta fecha se continúa usando este como sustancia de trabajo debido a los incendios que tuvieron con el uso del aire.

Este sistema utiliza la energía del gas de inyección en forma de presión, que al penetrar en la tubería de producción, eleva los fluidos producidos a la superficie.

En el bombeo neumático continuo un volumen controlado de gas a alta presión (250 lb/pg<sup>2</sup> mínima), se introduce a determinada profundidad en la tubería de producción con el fin de aligerar la columna de fluido y reducir la presión de fondo fluyendo del pozo, originando con esto una diferencia mayor entre esta presión (Pwf), y la presión del yacimiento (Pws), permitiendo obtener el gasto de aceite deseado.

El gas de inyección es controlado desde la superficie por una válvula reguladora de flujo con orificio variable y es introducido al espacio anular formado por la tubería de producción y la tubería de revestimiento. A determinada profundidad el gas se inyecta a la tubería de producción a través de una válvula de bombeo neumático seleccionada específicamente para manejar el volumen de gas deseado.

El bombeo neumático continuo se aplica en pozos con alto índice de productividad (mayor a 0.5  $\frac{\text{bl}}{\text{día}}$ ), y razonablemente alta presión de fondo fluyendo (columna hidrostática del orden del 50% o más en relación a la profundidad del pozo).

Con este sistema artificial, la producción de fluido puede caer en el rango de 200 a 20,000 bl/día a través de santas de tubería de diámetro normal. En flujo a través de la tubería de revestimiento es posible obtener gastos del orden de 50,000 bl/día.

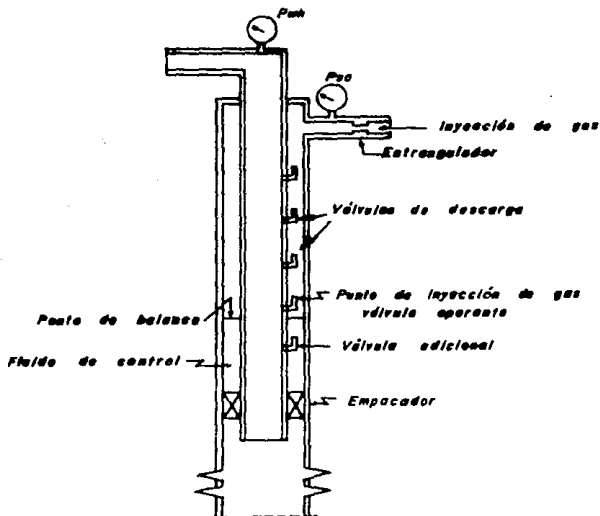
El diámetro interno de la tubería de producción gobierna la cantidad de flujo, si el índice de productividad, la presión de fondo, el volumen y la presión del gas y las condiciones mecánicas son ideales.

En instalaciones para flujo continuo, la válvula más profunda no es siempre la válvula operante. Generalmente se instala una o hasta dos válvulas por debajo de la válvula operante (sin llegar a la profundidad del empacador), con el fin de tenerlas disponibles para cuando decline la presión del pozo, y sea necesario profundizar la inyección del gas.

El costo de una o dos válvulas adicionales siempre será menor que el costo que significa el tener que recuperar un aparejo de producción con el fin de reespaciar las válvulas.

En la figura 2.1 se muestra una instalación típica de bombeo neumático, y en ella se observa un total de 5 válvulas de inyección de gas instaladas. Las 3 primeras se utilizan para descargar el fluido de control contenido en el espacio anular en el momento de iniciar la operación del pozo y alcanzar la cuarta válvula operante (profundidad del punto de inyección del gas). Se observó la quinta válvula previendo posibles variaciones en las condiciones del pozo.

En la figura 2.2 se muestra un diagrama de la misma instalación, ilustrando la configuración de los gradientes de presión, y presiones involucradas en el pozo. Puede resumirse que el propósito fun



**FIG-2-1 INSTALACION TIPICA DE BOMBEO  
NEUMATICO CONTINUO**

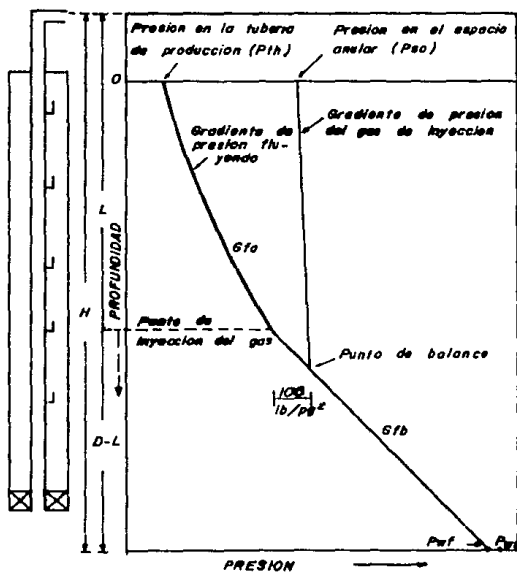


FIG. 2.2 GRADIENTES DE PRESION EN UNA INSTALACION DE BOMBEO NEUMATICO CONTINUO



damental del bombeo neumático continuo, es crear la presión de fondo fluyendo necesaria que permita al pozo producir el gasto deseado. Esto se logra mediante la inyección regulada del gas a alta presión, a una profundidad tal que pueda obtenerse dicha presión de fondo.

#### VALVULAS DE INYECCION

Una válvula de inyección de gas es un dispositivo que nos permite tener un control del volumen y gasto de gas que pasa del espacio anular a la tubería de producción con la finalidad de aligerar la columna de aceite. Para lograr este propósito las válvulas son sensibles a los cambios de presión, tanto del espacio anular como de la tubería de producción.

Las válvulas de bombeo neumático se clasifican en:

##### I.- Válvulas balanceadas

Una válvula de presión balanceada no está influenciada por la presión de la tubería de producción cuando está en posición abierta. En esta válvula se tiene que la presión de la T.R. actúa en el área del fuelle durante todo el tiempo. Esto significa que la válvula abre y cierra a la misma presión [Pd].

##### II.- Válvulas desbalanceadas

Las válvulas de presión desbalanceadas son aquellas que tienen un rango de presión limitado por una presión superior de apertura y

por una presión inferior de cierre determinada por las condiciones de trabajo del pozo; es decir, las válvulas desbalanceadas se -- abren a una presión determinada y se cierran a una presión más ba ja.

*Válvula operadora por presión del gas de inyección.*

Generalmente se conoce como válvula de presión, esta válvula es de 50 a 100% sensible a la presión en la T.R. en la posición ce rrada, y el 100% sensible en la posición abierta. Se requiere un aumento de presión en el espacio anular para abrir y una reducción de presión en la T.R. para cerrar la válvula.

Una válvula para flujo continuo debe ser sensible a la presión en la T.P. cuando está en posición de apertura, es decir, res- pondera proporcionalmente al incremento y decremento de presión en la T.P. Cuando la presión se reduce la válvula debe empezar a regular el cierre para disminuir el paso del gas.

Cuando la presión en la T.P. se incrementa, la válvula debe re- gular la apertura en la cual se incrementa el flujo de gas a - través de la misma.

Estas respuestas de la válvula mantienen estabilizada la presión en la T.P. o tienden a mantener la presión constante, en la figu- ra 2.3 se muestra la respuesta a la inyección del gas de una vál- vula de bombeo neumático para flujo continuo.

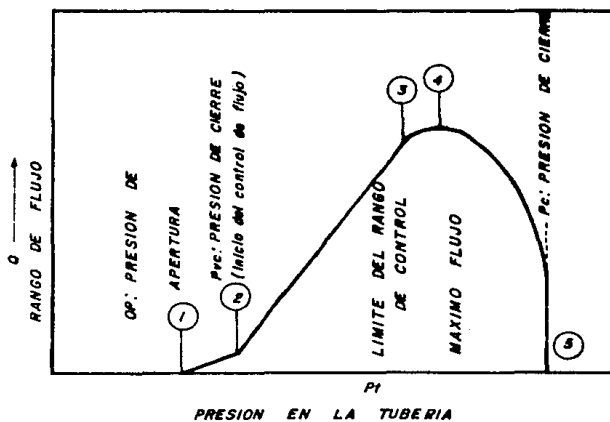


FIG. 2.3 CURVA DE RESPUESTA A LA TRAYECTORIA DEL GAS

*Válvula operada por presión del gas de inyección.*

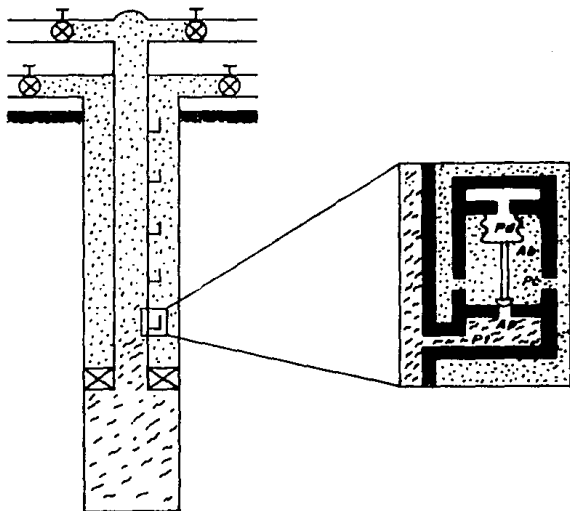
a) *Válvula desbalanceada con domo cargado a presión como elemento de carga.*

*Esta es una válvula con un solo elemento de carga (gas, nitrógeno o aire). El elemento de respuesta es el fuelle, el cual permite que el vástago mueva la válvula sobre y fuera de su asiento. Con esto la presión en la tubería de producción actúa en el área de asiento proporcionando una fuerza de apertura. Consecuentemente debido a la forma en que se comporta de acuerdo a las presiones que se ejercen en sus componentes se le denomina válvula de presión desbalanceada ( $P_{vo} > P_{vc}$ )*

*Presión de apertura bajo condiciones de operación.*

*Dado que la válvula de presión es sensible a la presión en el espacio anular, la presión de apertura se define como la presión en la tubería de revestimiento requerida para abrir la válvula bajo condiciones de operación*

*En la figura 2.4 se muestra una válvula actuando bajo condiciones de operación. En esta se muestran las fuerzas que actúan en la válvula según las presiones que se apliquen en cada área. Para derivar una ecuación de balance de fuerzas, se puede hacer cuando la válvula está en posición cerrada a unos instantes antes de tener su apertura en ese momento las fuerzas, que están actuando pa*



**FIG. 2.4 VALVULA DE PRESION BAJO CONDICIONES DE OPERACION**

ra abrir la válvula son iguales a las fuerzas que actúan para cerrarla.

Para ese instante se puede establecer la siguiente ecuación:

$$F_o = F_c \quad \text{--- 2.1)}$$

Donde:

$F_o$  = Suma de fuerzas que tratan de abrir la válvula

$F_c$  = Suma de fuerzas que tratan de cerrar la válvula

Por lo tanto

$$F_c = P_d A_b \quad \text{--- 2.2)}$$

$$F_o = P_c (A_b - A_p) + P_t A_p \quad \text{--- 2.3)}$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.2, 2.3 en la ecuación 2.1, se tiene:

$$P_c (A_b - A_p) + P_t A_p = P_d A_b \quad \text{--- 2.4}$$

Despejando  $P_c$  de la ecuación 2.4

$$P_c = \frac{P_d A_b - P_t A_p}{A_b - A_p} \quad \text{--- 2.5}$$

Dividiendo cada término por  $A_b$  haciendo  $R = A_p/A_b$ , se tiene:

$$P_c = \frac{P_d - P_t R}{1 - R} \quad \text{--- 2.6)}$$

La ecuación 2.6 define la presión que se requiere en la tubería de revestimiento para abrir la válvula bajo condiciones de operación.

Para determinar el efecto que tiene la presión de la T.P. para abrir la válvula se utiliza la ecuación 2.6 de la siguiente forma:

$$P_c = \frac{P_d}{1 - R} - \frac{P_t R}{1 - R} \quad \text{--- 2.7}$$

En la ecuación 2.7 se observa, que a medida que la presión de la T.P. se incrementa, la presión en la T.R. requerida para abrir la válvula disminuye. El término que se resta en la ecuación 2.7 es llamado "efecto de T.P."

$$T.E. = P_t \{ R / (1 - R) \} \quad \text{--- 2.8}$$

La relación  $R / (1 - R)$  es llamado factor de efecto de T.P. y es manejado generalmente como porcentaje.

$$T.E.F. = R / (1 - R) \quad \text{--- 2.9}$$

Sustituyendo la ecuación 2.9 en la ecuación 2.8, se tiene:

$$T.E. = P_t \{ T.E.F. \}$$

Presión de cierre de la válvula bajo condiciones de operación.

Efectuando un balance de fuerzas semejante al de la presión de apertura, puede establecerse la relación de fuerzas, pero ahora considerando a la válvula en la posición abierta a un instante antes de cerrarla.

La figura 2.5 muestra una válvula actuando bajo condiciones de operación. Todas las áreas y presiones son iguales a las de la válvula considerada para efectuar la presión de apertura, excepto que ahora la presión bajo la válvula es afectada por la presión en la T.R. y no por la presión en la T.P. Para un tiempo antes de cerrar la válvula se puede desarrollar las ecuaciones siguientes:

$$F_o = F_c \quad \text{--- 2.1)}$$

Donde:

$$F_c = P_d A_b \quad \text{--- 2.2)}$$

$$F_o = P_c (A_b - A_p) + P_c A_p \quad \text{--- 2.11)}$$

Se observa que la  $P_c$  se substituyó por  $P_t$  en la ecuación 2.3. Substituyendo la ecuación 2.2 y 2.11 en 2.1, se tiene:

$$P_c (A_b - A_p) + P_c A_p = P_d A_b \quad \text{--- 2.12)}$$

Haciendo  $P_c = P_{vc}$ , donde:

$P_{vc}$  = Presión en el espacio anular para cerrar la válvula a condiciones de operación.

$$P_{vc} (A_b - A_p) + P_{vc} A_p = P_d A_b \quad \text{--- 2.13)}$$

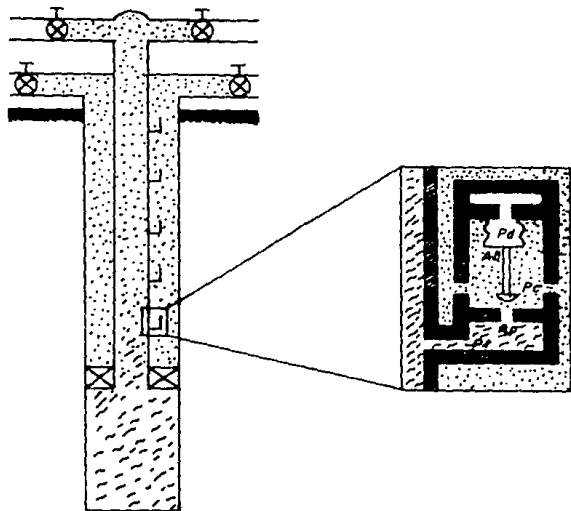
$$P_{vc} A_b - P_{vc} A_p + P_{vc} A_p = P_d A_b$$

$P_c$ : Lo tanto

$$P_{vc} = P_d \quad \text{--- 2.14)}$$

La ecuación 2.14 muestra que la presión en la T.R. debe ser igual a la presión del domo para cerrar la válvula a una determinada profundidad.





**FIG. 2.3 VALVULA DE PRESION BAJO CONDICIONES DE OPERACION**

### Amplitud de la válvula

La diferencia entre la presión de apertura y la de cierre de una válvula es llamada "amplitud de la válvula". Para determinar la amplitud, la presión de cierre se resta a la presión de apertura, es decir:

$$\text{Amplitud} = \Delta P$$

$$\Delta P = \frac{P_d - P_t R}{1 - R} - P_{vc} \quad \text{--- 2.15}$$

$$\Delta P = \frac{P_d - P_t R}{1 - R} - \frac{P_d(1 - R)}{1 - R} = \frac{P_d - P_t R - P_d + P_d R}{1 - R} = \frac{R}{1 - R} (P_d - P_t)$$

Como T.E.F. =  $R/(1 - R)$ , la amplitud de la válvula se define como:

$$\Delta P = \text{T.E.F.} (P_d - P_t) \quad \text{--- 2.16}$$

La ecuación anterior muestra que la amplitud de la válvula está controlada por dos factores, T.E.F. y  $P_t$ , que son el factor de efecto de la tubería y la presión en la tubería de producción, respectivamente. Para un determinado asiento de la válvula la mínima amplitud ( $\Delta P_{\min}$ ) ocurre cuando la presión en la tubería de producción es igual a la presión en el domo, es decir,  $P_t = P_d$

La máxima amplitud de la válvula ocurre cuando la presión en la T.P. es igual a cero ( $P_t = 0$ ), de acuerdo a la ecuación 2.16 se deduce que:

$$\text{Máxima amplitud} = \Delta P_{\text{max}} = T.E.F(P_d)$$

Presión de apertura en el taller ( $P_{\text{tro}}$ )

Cuando la presión de cierre y la de apertura se han establecido para el diseño, la válvula debe calibrarse en el taller a una presión que corresponda a la presión de apertura deseada dentro del pozo. Esta es la presión de apertura en el taller ( $P_{\text{tro}}$ ). En una prueba de taller la presión en la tubería de producción ( $P_t$ ) es cero  $\text{lb/pg}^2$ . Sustituyendo  $P_t$  igual a cero en la ecuación 2.6, se tiene:

$$P_{\text{vo}} = \frac{P_d}{1 - R} \quad \text{--- 2.17)}$$

Para calcular la presión de apertura en el taller, la presión del domo a la profundidad de colocación de la válvula debe ser corregida a  $60^\circ\text{F}$  u  $80^\circ\text{F}$ . Por lo tanto la ecuación utilizada para la apertura en el taller ( $P_{\text{tro}}$ ) es la siguiente:

$$P_{\text{tro}} = \frac{P_d @ 60^\circ\text{F u } 80^\circ\text{F}}{1 - R}$$

Para corregir la presión del domo ( $P_d$ ), es mediante la siguiente ecuación:

$$C_t = \frac{P_d @ 60^\circ\text{F}}{P_d @ T.V.}$$

Donde:

$C_t$  es el factor de corrección por temperatura el cual se determina utilizando la ecuación empírica siguiente:

$$C_t = \frac{1}{1 + 0.00215(T_{\text{v}} - 60)} \quad \text{--- 2.19}$$

Donde:

$T_{\text{v}}$  es la temperatura a la profundidad de la válvula.

b) Válvula desbalanceada con doble elemento de carga (domo y resorte).

Este tipo de válvula es llamada válvula de doble elemento, porque tiene dos formas de carga: del resorte y la presión de carga en el domo. La figura 2.6 muestra una válvula bajo condiciones de operación; se ilustran las fuerzas que actúan sobre la válvula - debidas a las presiones que se ejercen en cada área.

Presión de apertura de la válvula bajo condiciones de operación.

Se puede establecer una ecuación de balance de fuerzas para una válvula en la posición cerrada, a unos instantes antes de abrir. A este tiempo, las fuerzas que actúan para abrir la válvula son exactamente iguales a las fuerzas que actúan para cerrarla. Se tiene:

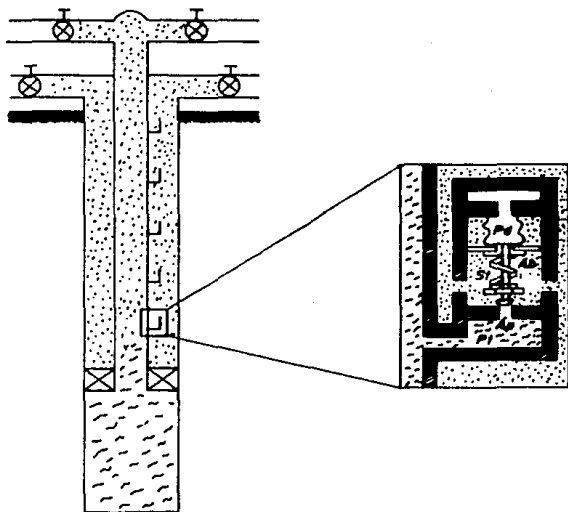


FIG. 2.6 VALVULA DESBALANCEADA CON DOBLE  
ELEMENTO DE CARGA

$$F_o = F_c \quad \text{--- 2.1)}$$

Donde:

$$F_o = P_vo(A_b - A_p) + P_t A_p \quad \text{--- 2.20)}$$

$$F_c = P_d(A_b + S_t(A_b - A_p)) \quad \text{--- 2.21)}$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.20, 2.21 en la ecuación 2.1, se tiene:

$$P_vo(A_b - A_p) + P_t A_p = P_d A_b + S_t(A_b - A_p)$$

Dividiendo ambos términos por  $A_b$  y haciendo  $R = A_p/A_b$

$$P_vo(1-R) + P_t R = P_d + S_t(1-R)$$

Despejando  $P_vo$  y dividiendo por  $(1 - R)$ , se tiene:

$$P_vo = \frac{P_d}{1-R} + S_t - \frac{P_t R}{1-R} \quad \text{--- 2.22)}$$

La ecuación 2.22 es similar a la ecuación 2.6, excepto por la suma del término  $S_t$  debido al resorte. Cuando no se tiene carga en el domo, toda la fuerza para cerrar la válvula proviene del resorte, por lo tanto, la ecuación anterior se reduce a:

$$P_vo = S_t - \frac{P_t R}{1-R} \quad \text{--- 2.23)}$$

Presión de cierre de la válvula bajo condiciones de operación.

La figura 2.7 muestra una válvula actuando bajo condiciones de operación. Un instante antes de cerrar la válvula, se tiene el siguiente balance de fuerzas:

$$F_o = F_c \quad \text{--- 2.1)}$$

Donde:

$$F_o = P_c(A_b - A_p) + P_c A_p \quad \text{--- 2.24)}$$

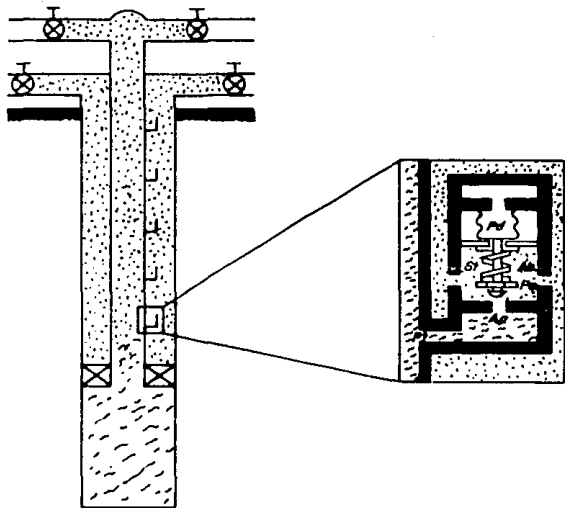


FIG.2.7 VALVULA BAJO CONDICIONES DE OPERACION

$$F_c = P_d A_b + S_t(A_b - A_p) \quad \text{--- 2.25)}$$

Sustituyendo la ecuación 2.24 y 2.25 en la ecuación 2.1, se tiene:

$$P_c(A_b - A_p) + P_c A_p = P_d A_b + S_t(A_b - A_p)$$

o

$$P_c A_b = P_d A_b + S_t(A_b - A_p)$$

Sustituyendo  $P_c$  por  $P_{vc}$  y despejando esta misma:

$$P_{vc} = P_d + S_t(1 - R) \quad \text{--- 2.26)}$$

Amplitud de la válvula

La amplitud de la válvula se determina restando la presión de cierre (ecuación 2.26) de la presión de apertura (ecuación 2.22).

$$\text{Amplitud de la válvula} = \Delta P = P_{vo} - P_{vc}$$

$$\Delta P = \frac{P_d}{1-R} + S_t - \frac{P_t R}{1-R} - (P_d + S_t(1 - R))$$

$$\Delta P = T.E.F. P_d + S_t(1-R) - P_t \quad \text{--- 2.27)}$$

Las razones para emplear válvulas de bombeo neumático son:

- 1) Descargar los fluidos del pozo e inyectar el gas en un punto óptimo de la tubería de producción.
- 2) Crear la presión de fondo fluyendo necesaria para que el pozo pueda producir el gasto deseado, controlando el gas de inyección en la superficie y el gas producido.



El espaciamiento de las válvulas de bombeo neumático en el punto óptimo está influenciado por:

- a) La presión del gas disponible para descargar el pozo.
- b) La densidad del fluido o gradiente de los fluidos en el pozo a un determinado tiempo de descarga.
- c) El comportamiento de afluencia al pozo durante el tiempo de descarga.
- d) La presión a la boca del pozo (contrapresión entre el pozo y la central de recolección) que hace posible que los fluidos puedan ser producidos o descargados.
- e) El nivel de fluido en la T.P. (espacion anular) ya sea que el pozo haya sido cargado con fluido de control o prescindido de él.
- f) La presión de fondo fluyendo y las características de los fluidos producidos del pozo.

Las variables afectan los gastos de producción en una instalación de bombeo neumático continuo se clasifican en dos grupos.

- 1) Aquellos variables posibles de ser controladas.
  - a) El diámetro y longitud de tubería de producción.
  - b) El diámetro y longitud de la tubería de descarga.
  - c) La Presión disponible del gas de inyección, etc.

II) Aquellas sobre las cuales se puede ejercer un pequeño control o el control es nulo.

- a) Las propiedades de los fluidos
- b) La presión del yacimiento, etc.

En la determinación del gasto posible en una instalación de bombeo neumático continuo, deberán considerarse dos gradientes de presión fluyendo ya que el gas se inyecta a cierta profundidad, lo que ocasionará un incremento en la relación gas-líquido a partir de esa profundidad hacia la superficie (se logrará un gradiente más ligero al gradiente fluyente natural). De esa forma, la relación gas total líquido en la superficie será la suma de la relación gas inyectado líquido y la relación gas-líquido de formación.

#### METODO GRAFICO PARA EL ESPACIAMIENTO Y CALIBRACION DE LA VALVULA DESBALANCEADA.

Después de determinar el punto de inyección mediante, el procedimiento descrito anteriormente, el espaciamiento de válvulas - desbalanceadas se lleva a cabo mediante el procedimiento siguiente:

1.- Adicionar  $200 \text{ lb/pg}^2$  a la presión en la TP fluyendo en la cabeza del pozo y marcar este punto a la profundidad de cero. Tra

zar una línea recta desde este punto, al correspondiente punto de inyección del gas, esta línea representa la presión en TP de diseño.

2.- Trazar la línea de gradiente del flujo de control partiendo de una presión cero o de la presión fluyendo en la "boca" del pozo, ya sea que el pozo descargue al quemador o al separador, hasta intersectar la línea de gradiente que corresponde a la presión disponible del gas de inyección, este punto determina la profundidad de la primera válvula.

3.- Trazar una línea horizontal, desde el punto determinado en el paso anterior, hasta intersectar la línea que corresponde a la presión en la TP de diseño.

4.- Desde la intersección anterior, trazar una paralela a la línea de gradiente del fluido de control hasta intersectar la línea correspondiente a la presión de operación del gas de inyección. Este punto determina la profundidad de la segunda válvula.

5.- Repitiendo el paso anterior a partir de la localización de la última profundidad encontrada, se obtendrá la profundidad de las válvulas restantes hasta alcanzar la profundidad del punto de inyección.

6.- Dado que generalmente no coincide la profundidad de la última válvula con la profundidad del punto de inyección del gas, es necesario reespaciar las válvulas cercanas al punto de inyección con el fin de instalar una válvula en este punto. Además depen-

diendo de las características del pozo tales como decremento de la presión media del yacimiento, etc. una válvula adicional por abajo del punto de inyección puede requerirse. Para efectuar este reespaciamiento se recomienda que el espaciamiento máximo en las cercanías del punto de inyección sea de 250 pies.

7.- Determinar la temperatura de operación de cada válvula. Sobre la misma gráfica y utilizando el extremo derecho del eje horizontal, situar la escala de temperatura. Marcar la temperatura fluyendo en la boca del pozo a profundidad media del intervalo productor. Unir ambos puntos con una línea recta y obtener el gradiente de temperatura a lo largo del pozo. Dependiendo de la profundidad de cada válvula, obtener la temperatura de operación de cada una de ellas.

8.- Determinar la presión en TP de cada válvula a la profundidad correspondiente.

9.- Tabular la presión en TP de diseño y la presión fluyendo en TP real para cada válvula a la profundidad correspondiente.

10.- Fijar la presión superficial de apertura de la primera válvula a 50 lb/pg<sup>2</sup> abajo de la presión disponible del gas de inyección.

11.- Seleccionar las presiones superficiales de apertura del resto de las válvulas dejando una diferencia de 10 lb/pg<sup>2</sup> entre válvula y válvula, en forma decreciente y partiendo de la presión -

superficial de apertura de la primera válvula.

12.- Determinar la presión de apertura, de cada válvula (Pvo) a la profundidad correspondiente, sumándole el peso de la columna de gas a cada válvula.

13.- Utilizando la presión en la TP de diseño, la presión de apertura de cada válvula y el diámetro del orificio seleccionado, calcular la presión de cierre frente a la válvula (Pvc), la cual es también la presión del domo (Pd).

14.- Determinar la presión del domo de cada válvula a 60 u 80 °F utilizando la ecuación 2.19.

15.- Calcular la presión de apertura en el probador (taller) para cada válvula de 60 °F utilizando la siguiente expresión:

$$P_{tro} = \frac{Pd @ 60 \text{ } ^\circ F}{1 - R}$$

16.- Determinar la presión de apertura Pvo de cada válvula a la profundidad correspondiente, utilizando la presión de flujo real en la T.P.:

$$P_{vo} = \frac{Pd - P_f R}{1 - R}$$

17.- Determinar la presión superficial de apertura de cada válvula bajo condiciones reales de operación; previendo de que no habrá interferencia entre válvulas.

18.- Hacer cualquier ajuste necesario.

19.- Preparar en forma tabulada todos los resultados.

a) Válvula No.

b) Profundidad, pie.

c)  $P_t$ , (diseño).

d)  $P_t$ , fluyendo.

e)  $P_{so}$ , (diseño).

f)  $P_{vo}$ , (diseño).

g)  $P_d @ T_v$

h)  $P_{sc}$

i)  $P_d @ 60^\circ F$

j)  $P_{tro}$

k)  $P_{vo}$  real

l)  $P_{so}$  real

El mismo procedimiento se sigue cuando las presiones de calibración de las válvulas se seleccionan en otra forma. Por ejemplo, se puede diseñar la instalación a una misma profundidad de cierre para todas las válvulas o disminuyendo la presión superficial de cierre en  $10 \text{ lb/pg}^2$  entre válvula y válvula.

En la figura 2.8 se muestra el diseño gráfico con los gradientes y parámetros que intervienen en una instalación de bombeo neumático continuo con válvulas desbalanceadas.

#### PRODUCCION DE ACEITE OBTENIDA EN FUNCION DEL VOLUMEN DE GAS INYECTADO.

En la figura 2.9 se muestra el comportamiento del gasto de aceite en función del volumen de gas inyectado. De ella se observa que la producción del pozo aumenta a medida que se incrementa el volumen de gas inyectado, hasta un valor máximo a partir del cual disminuye. Es de esperarse que exista un volumen determinado de gas al cual le corresponde la producción máxima de aceite, ya que para mayores volúmenes de inyección las pérdidas por fricción aumentan considerablemente, provocando mayores caídas de presión en la tubería de producción.

También puede observarse que los incrementos en la producción disminuyen a medida que aumenta el volumen de gas inyectado. Por lo que es evidente que exista un gasto óptimo arriba del cual no se justifican, desde el punto de vista económico, incrementos en la producción.

El gasto óptimo en una instalación de bombeo neumático, depende del valor del aceite y el gas en el mercado petrolero y de otros costos como: tratamiento, compresión, y distribución del gas, - costos operativos y de mantenimiento de las instalaciones, etc.

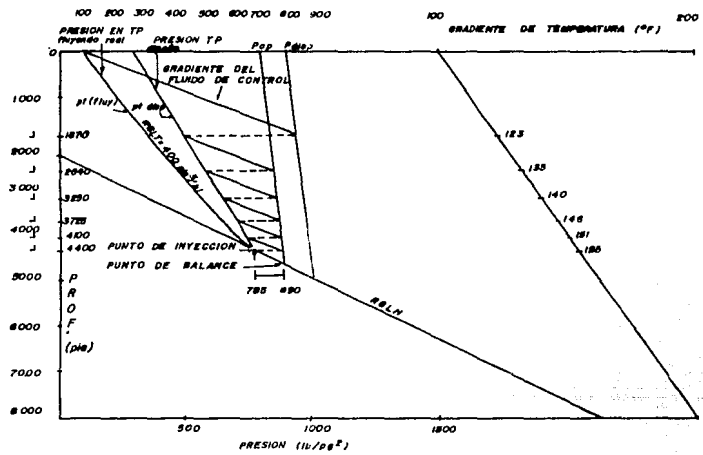


FIG. 2. ● DISEÑO GRAFICO DE BN CONTINUO CON VALVULAS DESBALANCEADAS



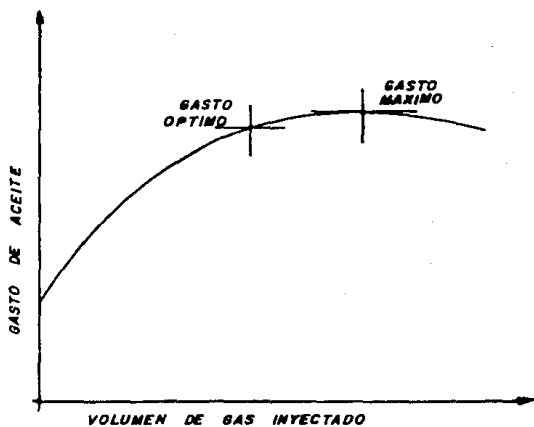


FIG. 2.9 COMPORTAMIENTO DE UN POZO CON BOMBEO NEUMÁTICO EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN DE GAS INYECTADO

En la figura 2.10 se muestra el comportamiento que se obtiene al graficar el gasto de aceite en función del volumen de gas inyectado para diferentes presiones superficiales de operación del gas de inyección.

Cuando se dispone de mayor presión del gas de inyección, es posible profundizar el punto de inyección. Con esto, se crea un gradiente de presión fluyendo más ligero desde una profundidad mayor a través de la tubería de producción, originando una menor presión de fondo fluyendo y como consecuencia un mayor gasto de aceite.

Sin embargo, la presión de inyección no podrá incrementarse indefinidamente, con el propósito de incrementar el gasto. En la figura 2.10 se observa que al continuar incrementando la presión del gas de inyección, los incrementos en la producción de aceite son cada vez menores. Esto significa que se llega a un valor tal de presión para el cual ya no se tienen incrementos en la producción de aceite y este valor se obtiene cuando la profundidad del punto de inyección alcanza la profundidad total del pozo.

En la figura 2.11 se muestra el comportamiento del gasto de aceite en función del volumen de gas inyectado para diferentes diámetros de tubería de producción. Al incrementar el diámetro de la tubería de producción, se incrementa el gasto de aceite. Sin embargo, si se continúa incrementando el diámetro, los incrementos en el gasto de aceite son cada vez menores. Por lo tanto existe un diámetro de tubería a partir del cual ya no se incrementa el

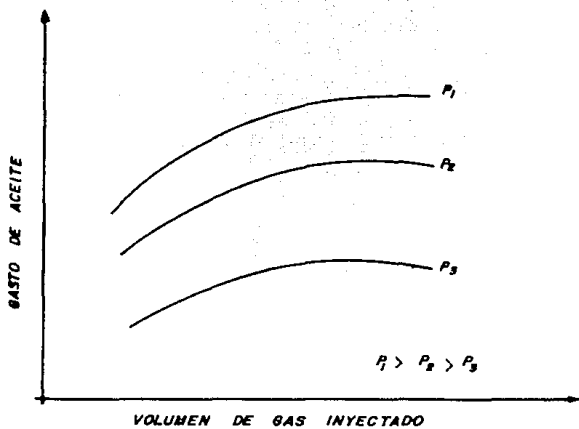


FIG. 2.10 COMPORTAMIENTO DE UN POZO CON BOMBEO NEUMÁTICO PARA DIFERENTES PRESIONES DEL GAS DE INYECCION

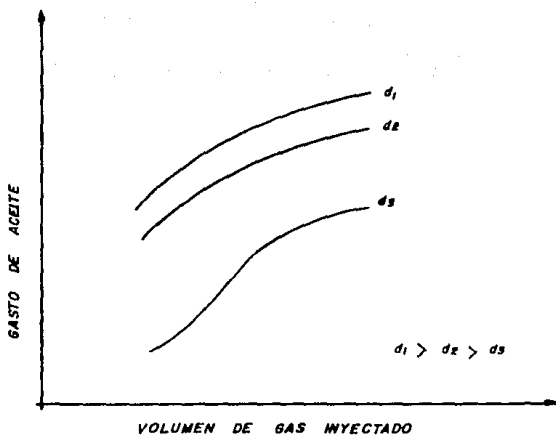


FIG. 2.11 COMPORTAMIENTO DE UN POZO CON BOMBEO NEUMÁTICO PARA DIFERENTES DIÁMETROS DE LA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN

gasto de aceite y por lo contrario este disminuye. Lo anterior se debe al incremento en el colgamiento del líquido en la tubería de producción, ocasionando mayores caídas de presión en dicha tubería.

En la figura 2.12 se muestra que al incrementar el diámetro de la tubería de descarga, se incrementa el gasto de aceite como consecuencia de una disminución de la contrapresión del pozo.

Otro parámetro que permite variar la contrapresión en la boca del pozo, es la presión de separación. Si la presión de separación disminuye, habrá un incremento en la producción del pozo.

Los parámetros analizados en este capítulo, se consideran sumamente importantes en la optimización de instalaciones de bombeo neumático continuo.

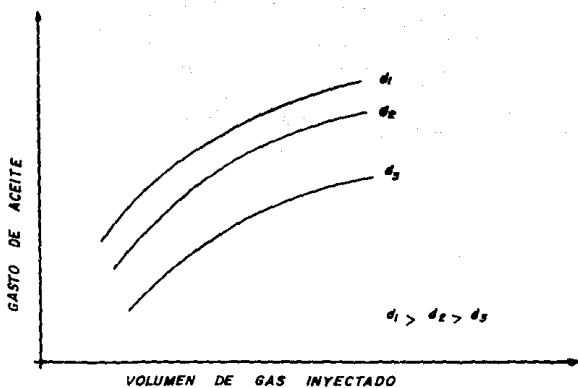


FIG. 2.12 COMPORTAMIENTO DE UN POZO CON BOMBEO NEUMÁTICO PARA DIFERENTES DIÁMETROS DE TUBERÍA DE DESCARGA

### CAPITULO III

#### OPTIMIZACIÓN DE LA RELACION GAS TOTAL LIQUIDO

El diagrama utilizado en el diseño de bombeo neumático se basa en gráficas de presión contra relación total líquido para diferentes profundidades. Este puede ser tomado en curvas de gradiente existentes o por correlaciones de flujo multifásico calculadas.

Es necesario elaborar una figura para cada gasto como se muestra en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 para gastos de 1500, 2000 y 2500 bl/dla respectivamente.

La figura 3.4 muestra una gráfica que es utilizada para el diseño de bombeo neumático más económico. Esta comprende cuatro gráficas, las cuales son elaboradas sobre papel transparente.

La figura 3.4 (A) muestra una gráfica de presión contra profundidad la cual considera los efectos del peso de la columna de gas y determina la presión de fondo por medio de la extensión de las curvas de gradiente a la profundidad del pozo después de haber obtenido el punto de inyección.

La figura 3.4 (B) muestra una gráfica de presión contra relación -- gas total líquido (RGTI) en la cual se interrelacionan la profundidad, el gasto y la RGTI más económica.

La figura 3.4 (C) muestra un diagrama de presión contra gasto donde la presión de fondo determinada en las gráficas 3.4 (A) y 3.4 (B) - es graficada contra la línea de comportamiento de afluencia [IPO].

La figura 3.4 (D) muestra una gráfica de presión contra gasto donde

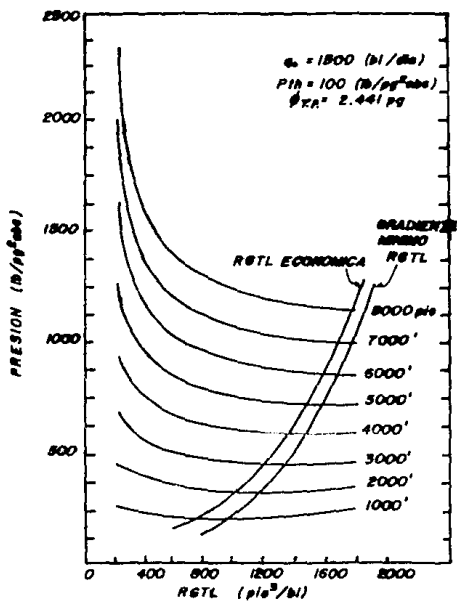


FIG. 3.1 CURVAS DE PRESION CONTRA RGTL



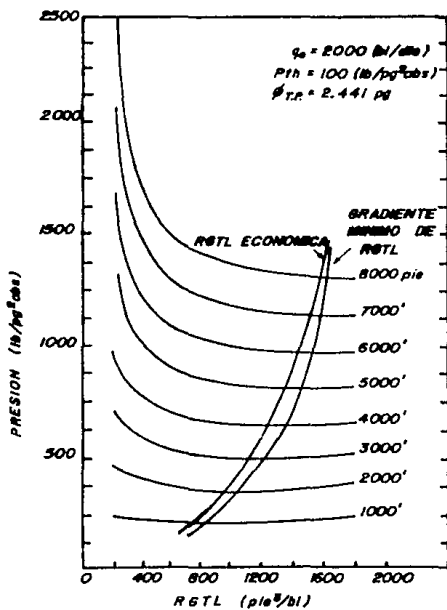


FIG. 3.2 CURVAS DE PRESION CONTRA RGL

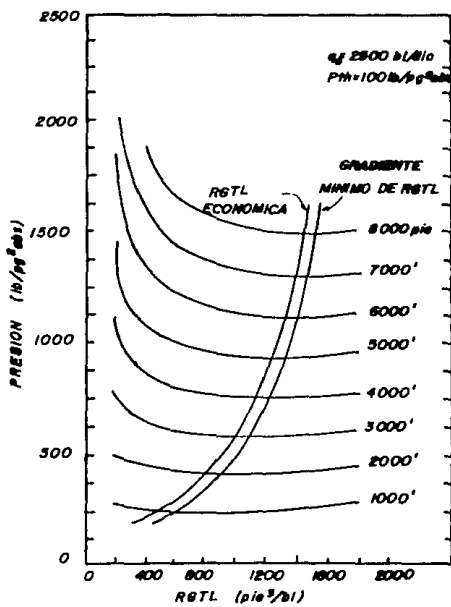


FIG.3.3 CURVAS DE PRESION CONTRA RGTL

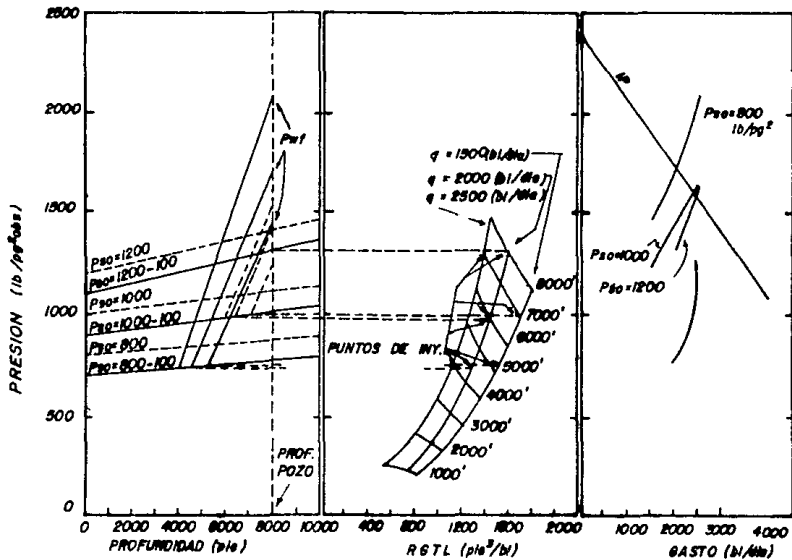


FIG. 3.4 DIAGRAMAS SOBREPUESTOS PARA DISEÑAR EL BOMBEO NEUMÁTICO MÁS ECONÓMICO

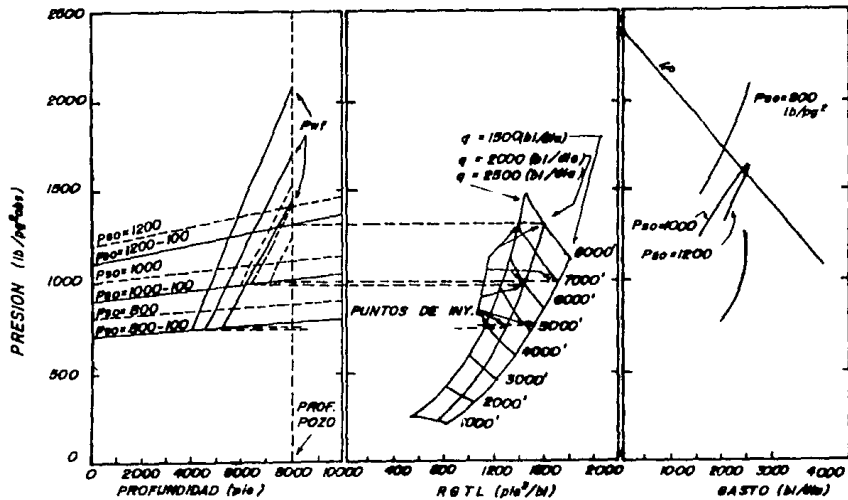


FIG. 3.4 DIAGRAMAS SOBREPUESTOS PARA DISEÑAR EL BOMBEO NEUMÁTICO MAS ECONOMICO

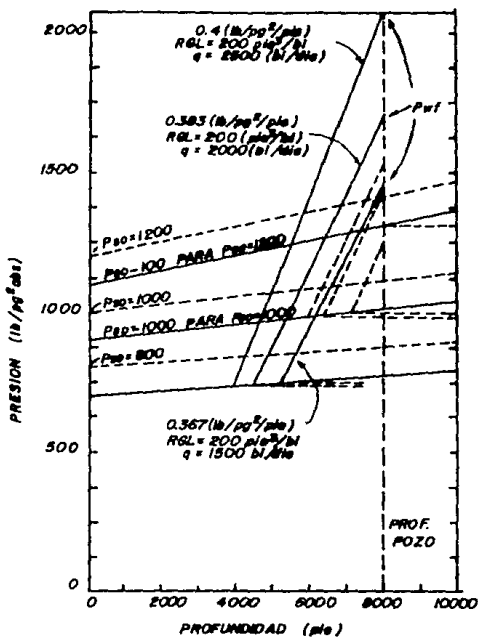


FIG. 3.4A GRAFICA DE PRESION CONTRA PROFUNDIDAD

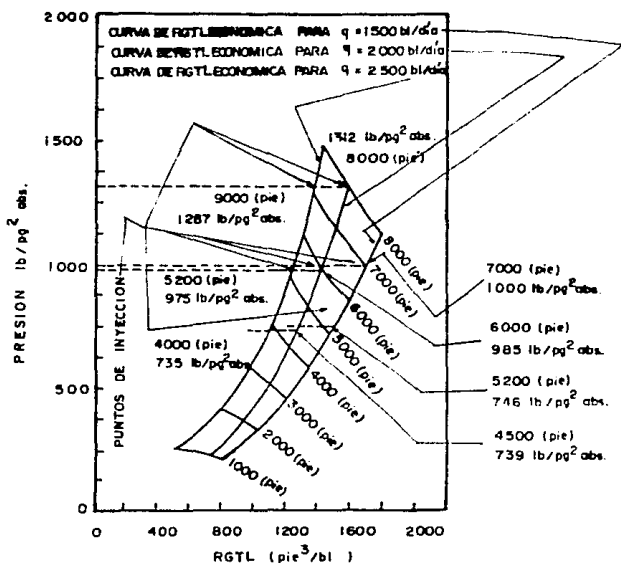


FIG. 3.4(B) PRESION CONTRA RGTL ECONOMICA

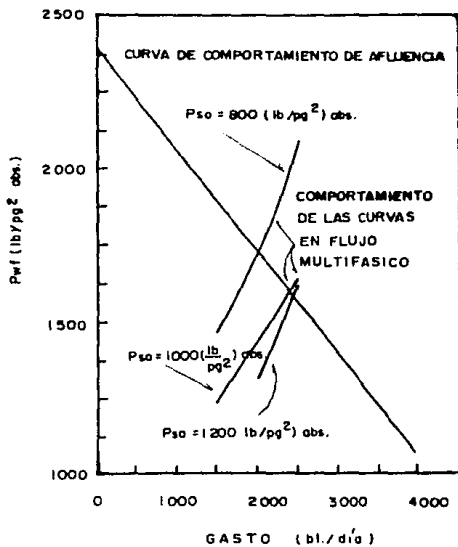


FIG. 3.4 (C) PRESION DE FONDO FLUYENDO CONTRA GASTO

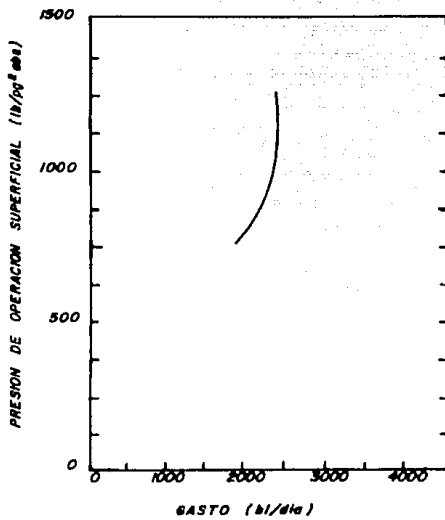


FIG. 3.4D PRESION DE OPERACION SUPERFICIAL  
CONTRA GASTO



Los valores de  $P_{so}$  son graficados contra el gasto. Estos valores - se determinan, primero obteniendo la  $P_{wf}$  de la figura 3.4 (C) y posteriormente determinando los valores correspondientes de  $P_{th}$ .

El siguiente procedimiento se aplica al método de diseño más económico para diferentes valores de  $P_{so}$ . Esto permite la selección de volúmenes de gas más económicos, los cuales se utilizan como parámetros de diseño en el bombeo neumático.

1.- Preparar la gráfica de presión contra RGTL para diferentes profundidades y determinar la RGTL máxima y económica utilizando - correlaciones de flujo multifásico como sigue:

- a) Suponer varios gastos.
- b) Graficar la presión sobre la ordenada y la RGTL sobre la abscisa para diferentes profundidades y gastos supuestos, como se -- muestra en las figuras 3.4 (A), 3.4 (B) y 3.4 (C).
- c) Determinar el gradiente mínimo cuando las pendientes de las curvas de presión contra RGTL son cero. Estos puntos se unen como en las curvas de RGTL máxima.
- d) Calcular la pendiente económica ( $qG/JP$ ), y determinar la curva de RGTL económica en la gráfica de presión contra RGTL. La curva de RGTL más económica se obtiene uniendo los puntos de RGTL - más económica determinados para cada profundidad.

2.-

- a) Con la presión en el eje de las ordenadas y la profundidad en - el eje de las abscisas graficar la presión disponible a la profundidad cero y extenderla hasta la profundidad del pozo (figu-

ra 3.4 (A); incluyendo el peso de la columna de gas, trazar una línea paralela a la anterior empezando con un valor de (Presión disponible -  $100 \text{ lb/pg}^2$ ) a la profundidad cero y extenderla hasta la profundidad del pozo. Esta es la línea de presión de operación del gas de inyección. La diferencia de  $100 \text{ lb/pg}^2$  se debe a la caída de presión que ocurre durante el flujo de gas a través de la válvula de bombeo neumático y representa la presión de la T.P. disponible en cualquier punto de inyección en el pozo.

- b) Con la presión en el eje de las ordenadas y la RGTL sobre el eje de las abscisas trazar como se muestra en la figura 3.4 (B) las curvas de RGTL más económicas para cada gasto supuesto del paso 1.

Marcar las profundidades cada 1000 pie hasta la profundidad total del pozo para cada gasto supuesto sobre las curvas de RGTL más económicas. Unir los puntos de igual profundidad.

Como las escalas de las gráficas de presión contra profundidad, y presión contra RGTL más económica de las figuras 3.4 (A) y 3.4 (B), son las mismas, trazar una línea recta entre las dos curvas, y determinar la profundidad de inyección y la presión de inyección.

Con el punto de inyección localizado sobre la línea de operación del gas de inyección (figura 3.4 (A)), las gradientes de presión abajo del punto de inyección se determinan mediante correlaciones de flujo multifásico, utilizando la  $RG_i$  de formación y los gastos supuestos.

Las presiones de fondo pueden ser determinadas para cada gasto-

supuesto, trazando una curva de gradiente de la RGL de formación, partiendo desde el punto de inyección hasta la profundidad del pozo. Las presiones de fondo determinadas son las presiones requeridas para los gastos supuestos; tabular los resultados de Pso, gasto, presión de inyección y RGTL.

### 3.-

- a) Elaborar una gráfica de presión contra gasto, graficando la presión sobre la ordenada y el gasto sobre la abscisa, figura -- 3.4 (C).

Trazar la curva de IPR ( $Pwf$  contra  $q$ ). Una de las muchas maneras de obtener el IPR puede considerarse Vogel, Standing, Weller y Fetkovitch o  $J$  constante.

- b) Graficar las presiones de fondo obtenidas del paso 2(B) contra gastos supuestos como se muestra en la figura 3.4 (C) para una Pso seleccionada.

La intersección de las curvas de los pasos 3(a) y 3(b) representan el gasto de aceite más económico para esa Pso.

- c) Otros valores de Pso pueden ser supuestos y los pasos 2(a) a -- 3(b) se repiten obteniéndose gastos económicos para cada Pso su puesta. Posteriormente graficar el gasto contra la presión de superficie, manteniendo constante la RGTL más económica como se muestra en la figura 3.4 (D).

### METODO SIMPLIFICADO PARA DETERMINAR LA RELACION GAS TOTAL LIQUIDO - MAS ECONOMICA.

Determinar la relación gas total líquido más económica, puede ser muy difícil y costoso en tiempo en algunos casos. Como un resulta-

do acertado, se elaboró el método simplificado para determinar la RGTL más económica.

La curva de presión contra RGTL para una profundidad dada, como se muestra en la figura 3.5, indica que iniciando con una RGTL de cero, la presión decrece con el incremento de RGTL hasta un gradiente mínimo, a partir de éste la presión empieza a incrementarse al aumentar la RGTL. El gradiente mínimo corresponde a un gradiente mínimo y ocurre cuando cualquier incremento de RGTL a la profundidad dada resulta un incremento en la caída de presión con lo cual disminuye la producción del pozo. Este punto se muestra sobre la curva de presión contra RGTL como el punto de pendiente cero, el cual, puede ser observado fácilmente.

Las curvas de presión contra RGTL para un gasto y diámetro de tubería dados (figura 3.5) muestran que el gradiente mínimo ocurre a valores diferentes de RGTL para diferentes profundidades, los gradientes mínimos de RGTL se incrementan al incrementarse la profundidad.

La RGTL económica siempre es menor que el gradiente mínimo de la RGTL.

Un programa de cómputo debe ser elaborado, para generar curvas de presión contra RGTL para diferentes gastos y diámetros de tubería e interpolar estas curvas para valores específicos de pendiente.

La diferencia en RGTL requerido para cambiar un gradiente mínimo de RGTL a una RGTL económica se calcula de la siguiente manera:

La tabla 3.1 muestra los resultados típicos para una T.P. de 31 pg. y un gasto de 3500 bl/día.

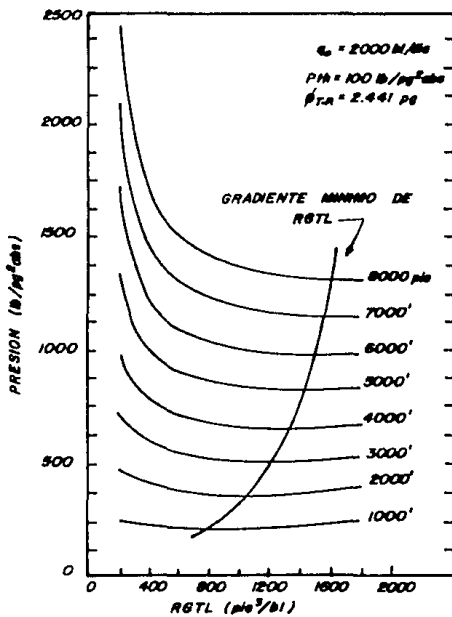


FIG. 3.5 CURVAS DE PRESION CONTRA RGL

La RGTL económica para una profundidad de inyección dada, ocurre sobre la curva de presión contra RGTL donde la pendiente es igual al valor de  $(qG/JP)$ .

Los resultados de la tabla 3.1 indican la diferencia entre el gradiente mínimo de RGTL y la RGTL económica para cada profundidad. Por ejemplo, a una pendiente de 0.01 la diferencia en RGTL varía de  $104 \text{ pie}^3/\text{bl}$  a 1000 pie, y de  $57 \text{ pie}^3/\text{bl}$  a 10,000 pie; a una pendiente de 0.05, la diferencia en RGTL es de  $353 \text{ pie}^3/\text{bl}$  a 1000 pie comparado a  $278 \text{ pie}^3/\text{bl}$  a 10,000 pie. La diferencia en RGTL entre el gradiente mínimo y las RGTL's más económicas cambian más rápidamente al cambiar los valores de pendiente que al cambiar los valores de profundidad. Por lo tanto sólo un valor de la diferencia de RGTL puede ser utilizado para todas las profundidades. La intersección de las curvas de RGTL's siempre son paralelas a la intersección de las curvas de gradiente mínimo de RGTL.

Utilizando esta aproximación de pendientes paralelas, fue preparada la tabla 3.2 la cual refleja la diferencia de las curvas de RGTL's más económica y las curvas de gradiente mínimo de RGTL para diferentes valores de pendiente.

Utilizando el método simplificado, calcular la RGTL económica con el ejemplo siguiente:

Diámetro de la T.P. = 24 pg.

$$P_{th} = 100 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$q_o = 2,000 \text{ bl/dla.}$$

$$J = 1.0 \text{ bl/dla/lb/pg}^2$$

TABLA 3.1  
 DIFERENCIA ENTRE GRADIENTE MÍNIMO DE RGTL  
 Y RGTL MAS ECONOMICA CON LA PROFUNDIDAD

$\Delta$ RGTL = gradiente mínimo de RGTL (pie<sup>3</sup>/bl)  
 pendiente económica de RGTL (pie<sup>3</sup>  
 /bl). Para pendientes de:

Profundidad de inyección pie	RGTL máxima pie <sup>3</sup> /bl	0.01	0.05	0.1	0.15	0.20	0.25
1,000	873	104	353	520	594	624	654
2,000	1,100	100	360	510	634	750	805
3,000	1,258	91	340	537	633	717	793
4,000	1,415	87	337	551	687	771	842
5,000	1,518	67	329	538	675	768	853
6,000	1,595	56	281	502	682	761	832
7,000	1,688	79	277	510	665	800	558
8,000	1,760	69	276	490	651	788	882
9,000	1,818	63	276	469	643	763	884
10,000	1,867	57	278	453	630	747	848

Utilidad del aceite	=	4 \$/bl
Costo de gas (G)	=	0.2 \$/1,000 pie <sup>3</sup>
Porcentaje de agua.	=	0.0
Profundidad de iny.	=	5,000 pie

Determinar la RGTL más económica para este pozo.

#### SOLUCION

Trazar la curva de presión contra RGTL como se muestra en la figura 3.5 y determinar los puntos de pendiente cero para una profundidad de 5,000 pie que será de 1,450 pie<sup>3</sup>/bl.

Determinar la pendiente más económica:

$$\begin{aligned} \text{Pendiente} &= q \times G / J \times P \\ &= \frac{2,000 \times 0.2/1,000}{1.0 \times 4} \\ x &= 0.1 \frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}^3/\text{bl}} \end{aligned}$$

De la tabla 3.2, la diferencia entre la RGTL a la pendiente económica y el gradiente mínimo, es de 450 pie<sup>3</sup>/bl. Por lo tanto, la RGTL económica ocurre a 1,450 - 450 = 1,000 pie<sup>3</sup>/bl.

#### EJEMPLO PARA ILUSTRAR EL DISEÑO DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO.

Datos:

Diámetro interior de T.P.	=	2.441 pg.
Profundidad	=	8,000 pie
Pws	=	2,400 lb/pg <sup>2</sup>
Pth	=	100 lb/pg <sup>2</sup>
°API	=	30



R <sub>s</sub>	= 200 pie <sup>3</sup> /bL
P <sub>so</sub>	= 800, 1,000 y 1,200 lb/pg <sup>2</sup>
J	= 3.0 bL/día/lb/pg <sup>2</sup> (constante)
Utilidad del aceite	= 6 \$/bL
Costo de gas (G)	= 0.1 \$/1,000 pie <sup>3</sup>

Determinar los gastos posibles y la RGTL más económica para los diferentes valores de P<sub>so</sub>.

### SOLUCION

1.- Suponer gastos de aceite de 1,500, 2,000 y 2,500 bL/día y graficar los datos en las curvas de presión contra RGTL para incrementos de 1,000 pie de profundidad del pozo, referidas en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3. Marcar los puntos de pendiente cero para las curvas graficadas en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3. Estos puntos se determinan por observación en este caso.

1. (a).- Dibujar la curva de gradiente mínimo para cada gasto supuesto mediante la unión de los puntos de pendiente cero. Las RGTL's económicas se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Costo de gas (G)} = 0.1 \text{ \$/1,000 pie}^3$$

$$\text{Utilidad del aceite} = 6.0 \text{ \$/bL}$$

Como previamente fue descrito, la pendiente económica es:

$$X = q \times G / J \times P$$

Sustituyendo:

$$X = \frac{1,500 \times 0.1/1,000}{3 \times 6}$$

$$X = 0.008 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}^3/\text{bL}$$

Las pendientes económicas para los gastos de 2,000 y 2,500 bl/día - son calculadas de manera similar, Estos son de 0.01 y 0.12 bl/pg<sup>2</sup> / pie<sup>3</sup> / bl respectivamente.

Las tangentes de igual pendiente de los valores de pendiente económica arriba determinadas se dibujan en las curvas de presión contra RGTL para cada gasto y profundidad correspondiente.

Esto se realiza por triangulación. Una curva es dibujada a través de estos puntos.

La tabla 3.2 (método simplificado) muestra una RGTL económica de -- 50 pie<sup>3</sup>/bl menor que el gradiente mínimo de RGTL para un gasto de 2,500 bl/día y una pendiente de 0.01. La curva de RGTL económica da la relación entre la presión, RGTL económica y la profundidad. Por ejemplo, a un gasto de 2,500 bl/día y suponiendo un punto en la T.P. donde la presión es de 500 lb/pg<sup>2</sup>, la RGTL más económica requerida es de 920 pie<sup>3</sup>/bl a una profundidad de inyección de 2,500 pie. Esto significa que la presión del gas en la válvula de bombeo neumático a través de la T.P. es de 500 lb/pg<sup>2</sup> abs. y en la T.R. es de 600 lb/pg<sup>2</sup> abs. Para una profundidad de inyección de 5,000 pie y una RGTL de 1,230 pie<sup>3</sup>/bl es necesaria una presión en la T.P. de -- 925 lb/pg<sup>2</sup> abs. o una presión de gas en la T.R. de 1,025 lb/pg<sup>2</sup> abs. Hasta este punto las propiedades de afluencia al pozo no han sido consideradas.

2 (a).- En la gráfica de presión contra profundidad, de la figura 3.4 (A), graficar las Pso (1,200, 1,000, 800 lb/pg<sup>2</sup> abs.) a la profundidad cero. Trazar los gradientes de gas hasta la profundidad del pozo. Los gradientes de gas son: 26.1, 23.6 y 19.0 -

TABLA 3.2  
 DETERMINACION DE LA RGTL ECONOMICA  
 A PARTIR DEL GRADIENTE MINIMO DE RGTL

Gradiente mínimo de la RGTL ( $\text{pie}^3/\text{bl}$ ) - pendientes económicas de RGTL ( $\text{pie}^3/\text{bl}$ ).

Diámetro Interior pg	Gasto bl/día	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
1.995	500	200	600	850	950	1,150	1,200
	500	100	200	350	450	500	600
	1,500	50	150	250	300	350	400
	2,000	50	50	200	250	300	300
	2,500	50	50	100	150	200	200
	3,000	50	50	100	100	150	150
2.441	1,000	200	700	950	1,150	1,250	1,350
	1,500	100	400	600	750	850	950
	2,000	100	300	450	550	600	700
	2,500	50	200	350	450	550	600
	3,000	50	200	250	300	400	450
	3,500	50	150	200	250	300	300
	4,000	50	100	150	200	250	300
	5,000	50	100	100	150	200	200
2.952	1,500	400	1,100	1,350	1,450	1,700	1,900
	2,000	250	750	1,000	1,150	1,250	1,350
	2,500	200	500	750	950	1,050	1,100
	3,000	100	400	600	750	850	950

## (Continuación Tabla 3.2)

Diámetro Interior pg	Gasto bl/dla	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
2.952	3,500	100	350	500	600	700	800
	4,000	100	300	450	550	650	700
	5,000	50	200	300	400	500	600
	6,000	50	100	200	300	350	400
3.548	2,500	600	1,500	1,800	2,100	2,200	2,400
	3,000	350	1,300	1,500	1,600	1,700	1,800
	3,500	300	850	1,100	1,200	1,300	1,400
	4,000	200	700	900	1,050	1,150	1,250
	5,000	100	500	700	800	900	1,000
	6,000	100	400	550	650	700	800
	7,000	100	300	450	550	650	700
	8,000	50	250	350	450	500	600
3.958	2,500	1,100	2,500	2,800	2,900	3,000	3,100
	3,000	1,000	1,900	2,300	2,500	2,700	2,700
	3,500	1,000	1,900	2,300	2,500	2,700	2,700
	4,000	450	1,100	1,350	1,600	1,700	1,900
	5,000	200	700	1,050	1,150	1,250	1,400
	6,000	200	600	850	950	1,000	1,100
	7,000	100	450	650	750	850	950
	8,000	100	350	550	650	750	800
	9,000	100	300	450	550	650	700

$lb/pg^2/1,000$  pie respectivamente para los valores de Pso de - - 1,200, 1,000 y 800  $lb/pg^2$  abs. Graficar las presiones del gas de 1,409, 1,189 y 952  $lb/pg^2$  abs. respectivamente. Dibujar las líneas de presión de operación del gas graficando (Pdis - 100  $lb/pg^2$  abs. a la profundidad cero. Estas son líneas continuas, - ver figura 3.4 (A)

- 2 (b).- En la gráfica de presión contra RGTL (figura 3.4 (B)), trazar las curvas de RGTL económicas obtenidas en el paso 1, y graficar en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 para cada gasto supuesto. - Esté seguro de que las escalas de presión y RGTL coincidan.

Unir los puntos de igual profundidad como se muestra en las figuras 3.4 (A) y 3.4 (B), manteniendo la misma presión de operación del gas de inyección de las figuras 3.4 (A) y 3.4 (B), mover verticalmente hasta que la profundidad en la figura 3.4 (A) corresponda a la profundidad en la figura 3.4 (B). Marcar la - profundidad de inyección de estos puntos y la presión requerida para que las presiones de flujo que ocurran corriente arriba -- del punto de inyección correspondan a la RGTL económica.

- 2 (c).- Determinar el gradiente de presión abajo del punto de inyección. Este gradiente se determina de las curvas de presión contra RGTL, figuras 3.1, 3.2 y 3.3. Para una RGL igual a la RGL de formación (200  $pie^3 bl$ ) y un gasto de 1,500  $bl/día$  (figura -- 3.1), calcular la presión a 8,000 pie, la cual será de 2,350  $lb/pg^2$  abs. y la presión a la profundidad de inyección aproximadamente de 5,000 pie que será de 1,250  $lb/pg^2$  abs. El gradiente de presión abajo del punto de inyección para 1,500  $lb/día$  es de 0.367  $lb/pg^2/pie$ . Los gradientes para 2,000 y 2,500 se determi

nan de la misma manera y serán de 0.383 y 0.400 lb/pg<sup>2</sup>/pie respectivamente. Si se requiere más precisión en la curva de presión-profundidad para una RGL puede calcularse por computadora o trazada de curvas de gradiente, empezando del punto de inyección y extendiéndose hasta la profundidad de la formación. El punto de intersección de la curva de gradiente fluyente y la línea de profundidad del pozo dan el valor de la  $P_{wf}$  requerida para satisfacer los requerimientos de flujo multifásico a la RGL económica. Repetir el procedimiento para cada gasto supuesto y presión de inyección. Tabular los gastos,  $P_{so}$ , profundidad de inyección, presión de inyección y RGL como se muestra en la tabla 3.3.

- 3 (a).- En el diagrama de presión contra gasto, figura 3.4 (C), se grafica el comportamiento de afluencia, presión de fondo fluyendo contra gasto. Graficar 2,400 lb/pg<sup>2</sup> abs. a un gasto cero. - A 1,000 bl/día y para un  $J = 3$  bl/día/lb/pg<sup>2</sup>, la caída de presión es de 333 lb/pg<sup>2</sup> abs. Por lo tanto, graficar 2,400 - 333 = 2,067 lb/pg<sup>2</sup> abs. para un gasto de 1,000 lb/día. Unir estos dos puntos con una línea recta hasta intersectar el gasto de 4,000 bl/día.
- 3 (b).- Graficar los valores de  $P_{wf}$  contra los gastos determinados en el paso 2 y figura 3.4 (A) para cada valor de  $P_{so}$  y gasto -- supuesto. Unir los puntos de  $P_{wf}$  contra gasto. Estos dan una curva de  $P_{wf}$  contra gasto para cada valor de  $P_{so}$ . La intersección de estas curvas con la curva de comportamiento de afluencia determinan la producción posible del pozo para cada valor de  $P_{so}$ .

Los resultados de la figura 3.4 muestran que 2,030, 2,400 y 2,450 bl/día son los gastos posibles de este pozo para los valores de Pso supuestos. Si las presiones de inyección son 800, 1,000 y 1,200 lb/pg<sup>2</sup> abs. respectivamente. Los resultados se grafican en la figura 3.4 (D). Ahora el diseño puede evaluarse para efectos de Pso. La profundidad y la presión de inyección se obtienen por procedimientos semejantes como se mostró en la gráfica 3.4 (D).

- 4 (a).- Utilizar el mayor gasto y determinar la Pso de la figura 3.4 (D), alternadamente, de la Pso determinar el gasto posible de la misma figura.
- 5 (a).- Mover verticalmente la figura 3.4 (C) hasta intersectar la curva de afluencia y determinar la Pwf.
- 6 (a).- Mover horizontalmente la figura 3.4 (A) hasta intersectar la línea vertical correspondiente a la profundidad del pozo. A la curva de gradiente fluyente abajo del punto de inyección le corresponde un gasto que será utilizado para intersectar la línea de operación del gas correspondiente a la Pso seleccionada en el paso 2 (a).  
La intersección de la curva de gradiente fluyente con la línea de operación del gas da el punto de inyección. La profundidad y la presión pueden ser leídas de la figura 3.4 (A).
- 7 (a).- Mover horizontalmente la figura 3.4 (B) al punto de igual presión-profundidad o a la curva interpolada para el gasto considerado en el paso 4. La RGTI económica puede leerse de la figura 3.4 (B). La gráfica que muestra la intersección en la fig. 3.4 (D) para valores de Pso mayores de 1000 lb/pg<sup>2</sup> abs.

TABLA 3.3  
 RESULTADOS DE LA GRAFICA ECONOMICA

RGTL de - formación	$Pws$ $lb/pg^2$	$Pth$ $lb/pg^2$	$Pso$ $lb/pg^2$	$q$ $lb/dca$	Progr. iny. pie	$(Pt)iny$ $lb/pg^2$	$Pwf$ $lb/pg^2$	RGTL $pie^3/bl$
200	2,400	100	800	1,500	5,200	746	1,456	1,520
200	2,400	100	800	2,000	4,500	739	1,705	1,300
200	2,400	100	800	2,500	4,000	755	2,087	1,120
200	2,400	100	1,000	1,500	7,000	1,000	1,230	1,700
200	2,400	100	1,000	2,000	6,000	985	1,450	1,440
200	2,400	100	1,000	2,500	5,200	975	1,655	1,250
200	2,400	100	1,200	1,500	---	---	---	---
200	2,400	100	1,200	2,000	8,000	1,512	1,312	1,600
200	2,400	100	1,200	2,500	7,000	1,287	1,625	1,380



el gasto y la RGTL económica no se incrementan. Esta gráfica supone varios costos de gas para todos los valores de Pso. Esto no puede ser verdad en la práctica para ambas etapas de compresión. La intersección de la gráfica económica determina el valor de RGTL más económica para algunos gastos supuestos dentro del rango y algunas profundidades o presiones de inyección.

#### DETERMINACION DE LA RGTL MAS ECONOMICA PARA Pth VARIABLE

Pacheco propuso dos procedimientos para la determinación de la RGTL más económica para diseños de bombeo neumático. El extendió el trabajo de Mitchell e incluyó el efecto de líneas de flujo horizontal; por lo tanto, esta solución es para una Pth variable.

El primer método utiliza las curvas de presión contra RGTL de flujo multifásico vertical para diferentes profundidades, para determinar la RGTL más económica basado en el concepto de pendiente económica.

El segundo método utiliza el programa de bombeo neumático continuo para determinar la producción máxima de líquido, donde la pendiente de la curva de comportamiento de bombeo neumático es igual a cero - hasta un punto en el cual el costo de inyección del gas se incrementa a tal grado que sea igual a la recuperación adicional de aceite. Este punto corresponde a la RGTL más económica.

Para este estudio se utilizaron las correlaciones de flujo multifásico vertical de Poettman y Carpenter, y de flujo multifásico horizontal de Bertuzzi, Tek y Poettman.

En el diseño de instalaciones de bombeo neumático continuo para una Pth variable existe una RGTL óptima con la cual se obtiene la pro-

ducción máxima; esta será probablemente menor que la relación requerida para crear un gradiente fluyente mínimo en la T.P.

En algunas instalaciones de bombeo neumático el gasto de inyección de gas más económico se obtiene cuando la recuperación de aceite -- adicional es igual al costo de inyección de gas.

#### DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE LA PENDIENTE ECONÓMICA.

Mitchell discutió el método de la pendiente económica para el caso de  $P_{th}$  constante. Generalmente la producción máxima se diseña suponiendo que el gradiente mínimo puede alcanzarse en la sarta de producción. Esto es poco probable, excepto para líneas superficiales de longitudes muy grandes. Los valores bajos de presión superficial en las líneas de flujo no pueden manejar gran volumen de gas expandido sin el incremento de la  $P_{th}$ .

La presión de fondo fluyendo se incrementa y la producción decrece antes de alcanzar el gradiente mínimo. Por lo tanto, el método de Mitchell de la pendiente económica fue modificado para la aplicación de  $P_{th}$  variable.

La figura 3.6 muestra una gráfica de presión contra RGTL. La curva de presión contra RGTL a la profundidad de inyección, da como resultado la presión en la T.P. a la profundidad de inyección  $(P_t)_{iny}$ .

Suponiendo que la RGTL más económica ocurre en un punto sobre la -- curva de RGTL contra presión de inyección, donde la pendiente económica es:

$$X \text{ (lb/pg}^2/\text{pie}^3/\text{bl)}.$$

$$\text{Entonces: } X = \frac{d(P_t)_{iny}}{dRGTL} \quad \text{----- 3.1)}$$

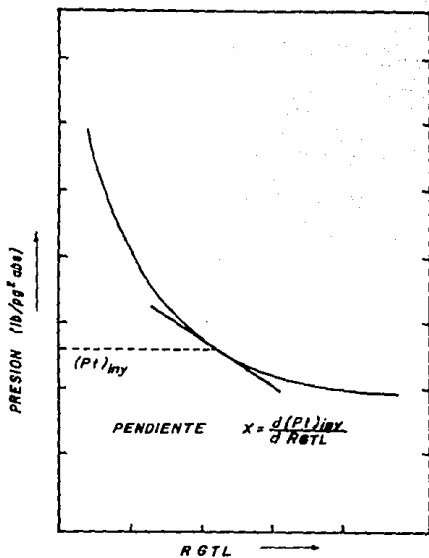


FIG. 3.6 CURVA DE PRESION CONTRA RGL

Para un gasto  $q$  (bl/dla), el índice de productividad  $J$  (bl/dla/lb/pg<sup>2</sup>) puede representarse como un gasto superficial de líquidos por-calda de presión de fondo fluyendo en la T.P. ( $dq/dPwf$ ).

La calda de presión en la T.P. en el punto de inyección causado por un incremento en RGTL está asociado con el decremento neto en la  $Pwf$  a la profundidad de la formación, la cual da como resultado pequeños incrementos en la afluencia del pozo ( $dq$ ). Por lo tanto:

$$X \cdot J = \frac{d(Pt)iny.}{d \text{ RGTL}} \times \frac{dq}{d Pwf} \quad \text{----- 3.2)}$$

A un gasto de inyección más económico, el costo de un incremento en RGTL ( $d\text{RGTL} = 1$ ) es igual a la utilidad obtenida de la producción de aceite ( $dq$ ). El gas inyectado por incremento de RGTL es  $q$  (bl/dla)  $\times 1$  (pie<sup>3</sup>/bl) =  $qg$ . Si el costo de gas es  $G$  (\$/Mpie<sup>3</sup>) y la utilidad del aceite es  $P$  (\$/bl), entonces el punto económico es:

$$dq \times P = q \times G$$

o

$$dq = q \times G/P$$

Sustituyendo por  $d\text{RGTL} = 1$

$$X \times J = \frac{q \times G}{P} \times \frac{d(Pt)iny.}{d Pwf} \quad \text{----- 3.3)}$$

Suponiendo que la calda de presión en T.P. al punto de inyección -- causado por el incremento en la RGTL es aproximadamente igual al de-cremento en la  $Pwf$  a la profundidad de la formación, la pendiente más económica se expresa de la siguiente forma:

$$X = q \times G / J \times P \quad \text{----- 3.4)}$$

Entonces si la tangente de pendiente  $X$  se ajusta a la curva de  $(Pt)iny$  contra RGTL, el punto de tangencia define la pendiente más eco-

nómica. La tangente de pendiente cero ajustada a esta curva, también define la RGTL máxima, es decir, cuando la producción máxima es alcanzada.

La figura 3.7 (A) muestra una gráfica de presión contra RGTL para diferentes profundidades. Utilizando el valor de la pendiente económica dada por la ecuación 3.4 la RGTL económica puede determinarse a cada profundidad. La curva que une los puntos de RGTL económica, define la curva de RGTL más económica.

La curva que une los puntos de pendiente cero, también define la curva de RGTL máxima. Aplicando el procedimiento de diseño más económico variando valores de  $P_{so}$  se tiene:

- 1.- Suponer varios gastos.
- 2.- Suponer valores de RGTL.
- 3.- Suponer valores de profundidad del pozo.
- 4.- Con el valor del gasto supuesto en el paso 1, determinar la  $P_{th}$  para un sólo valor de RGTL supuesto en el paso 2.
- 5.- Determinar la  $P_{wf}$  para los valores de  $P_{th}$  calculados en el paso 4 y profundidades del paso 3.
- 6.- Repetir los pasos 4 y 5 para todos los valores de RGTL.
- 7.- Calcular la pendiente económica con la ecuación 3.4.
- 8.- Con la presión en la ordenada y RGTL en la abscisa, graficar los valores de  $P_{wf}$  y RGTL del paso 5 para varias profundidades como se muestra en la figura 3.7 (A).
- 9.- Determinar la RGTL más económica y la  $P_{wf}$  correspondiente a la pendiente económica calculada en el paso 7. Situar la pendiente más económica a la curva de RGTL contra  $P_{wf}$  dibujada en el paso 8 para cada profundidad. Determinar la RGTL máxima corres

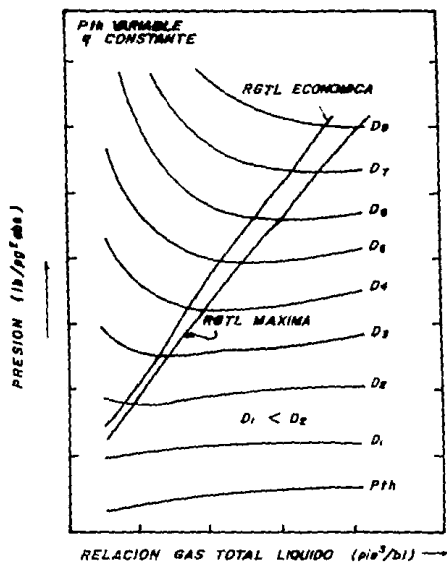


FIG. 3.7A CURVAS DE PRESION CONTRA RGTL

pendiente a un valor de pendiente cero en el mismo caso.

- 10.- En la figura 3.7 (A), dibujar la curva de RGTL económica, uniendo los puntos de RGTL más económicos determinados en el paso 9 para cada profundidad. Determinar la curva de RGTL máxima - uniendo los puntos de RGTL máxima.
- 11.- Repetir los pasos de 4 a 10 para varios valores de gastos.
- 12.- Suponer varias Pso.
- 13.- Calcular la presión del gas a la profundidad del pozo, incluyendo los efectos del peso de la columna del gas para cada Pso.
- 14.- Con la presión sobre la ordenada y la profundidad sobre la abscisa, graficar los valores de Pso-100 lb/pg<sup>2</sup> a la profundidad cero; graficar los valores de la presión del gas calculadas en el paso 13 a la profundidad del pozo. La línea que una los puntos para la misma Pso, define la línea de operación del gas, figura 3.7 (B).
- 15.- En la figura 3.7 (B) se muestran los valores de Pwf correspondientes a la RGTL económica calculada en el paso 9 para un sólo gasto. Repetir el procedimiento para todos los gastos y trazar una línea que una todos los puntos del mismo gasto. La intersección de esta con la línea de operación del gas define la profundidad de inyección y la presión de inyección para el gasto y la presión de operación dados.
- 16.- Con la presión en la ordenada y la RGTL en la abscisa graficar los valores de RGTL económicas, calculadas en el paso 9 para cada gasto y profundidad como se muestra en la figura 3.7 (C). Dibujar una curva uniendo los puntos de la misma profundidad. Esta gráfica puede utilizarse para el cálculo de la RGTL más económica dado el gasto, profundidad y presión de inyección de

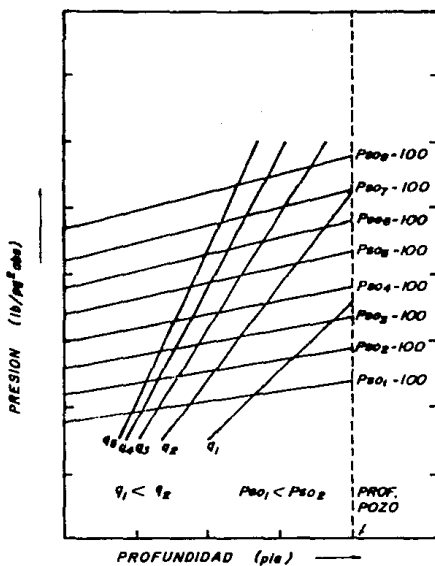


FIG. 3. 7B DETERMINACION DEL PUNTO DE INYECCION



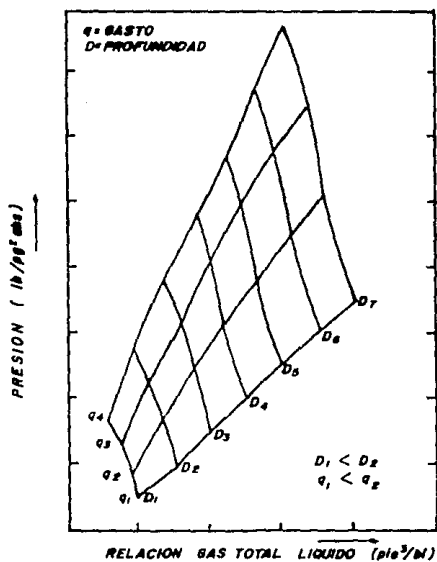


FIG. 3.7C DETERMINACION DE LA RGTL MAS ECONOMICA

La figura 3.7 (B).

- 17.- Calcular la  $P_{wf}$  para los puntos de inyección determinados en el paso 15 (figura 3.7 (B)), utilizando la RGL de formación. Las  $P_{wf}$  determinadas, serán las presiones de fondo que se requieren para que el pozo fluye con los gastos supuestos.
- 18.- Con la presión en la ordenada y el gasto en la abscisa, graficar la curva de comportamiento de afluencia (IPR) del pozo como se muestra en la figura 3.7 (D).
- 19.- En la figura 3.7 (D), graficar los valores de  $P_{wf}$  obtenidos en el paso 17 para un sólo valor de  $P_{so}$  contra gasto. La intersección de la curva de comportamiento de afluencia con la curva de  $P_{so}$  representa el gasto más económico para esta  $P_{so}$ . Repetir el procedimiento para todas las  $P_{so}$ .
- 20.- Graficar el gasto más económico contra la presión de operación del paso 19 como se muestra en la figura 3.7 (D). Esta curva da la relación entre la  $P_{so}$  y el gasto para el sistema de bombeo neumático correspondiente a la RGL más económica.

#### METODO DE LA UTILIDAD SOBRE EL ACEITE CONTRA COSTO DE GAS INYECTADO

Para determinar la  $P_{th}$  se utiliza la correlación de Bertuzzi, Tek y Poettman para flujo horizontal; para determinar la  $P_{wf}$  se utiliza la correlación de Poettman y Carpenter de flujo vertical, basándose en la  $P_{th}$  obtenida de la correlación para flujo horizontal.

Con la presión de separación, se determina la  $P_{th}$  para las RGL's supuestas y para los diferentes gastos utilizando correlaciones de flujo multifásico horizontal. Con la  $P_{th}$  determinada para cada gasto y diferentes RGL's, las  $P_{wf}$ 's se determinan del diagrama presión-profundidad. Con estos valores y tomando en consideración el com-

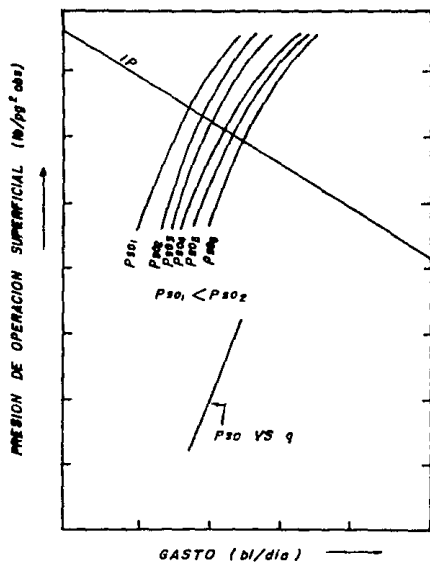


FIG. 3.7D DETERMINACION DEL GASTO MAS ECONOMICO

portamiento de afluencia del pozo, en un diagrama de presión-gasto, el gasto máximo se determina para la RGTL máxima.

Utilizando el método de utilidad sobre el aceite contra el costo de gas inyectado, el gasto se determina para cada incremento de RGTL's, hasta alcanzar el gasto máximo. Como se muestra en la figura 3.8 (A) la producción aumenta a medida que aumenta el volumen de gas inyectado hasta un valor máximo a partir del cual disminuye. Es de esperarse que exista un volumen determinado de gas al cual le corresponde la producción máxima de aceite, ya que para mayores volúmenes de inyección las pérdidas por fricción aumentan considerablemente, provocándose mayores caídas de presión en la tubería de producción.

También puede observarse que los incrementos en la producción disminuyen a medida que aumente el volumen de gas inyectado. Por lo que es evidente que exista un gasto óptimo arriba del cual no se justifican, desde el punto de vista económico incrementos en la producción.

Procedimiento de diseño más económico para diferentes valores de  $P_{so}$  utilizando el método de utilidad sobre el aceite contra el gasto de gas inyectado.

- 1.- Determinar si el pozo podrá fluir naturalmente, si es así, con que gasto.
  - a) Suponer un gasto.
  - b) Calcular la  $P_{wf}$  para el gasto supuesto, dados la  $P_{ws}$  y  $J$ .
  - c) Calcular la  $P_{th}$  para el gasto supuesto utilizando una correlación de flujo multifásico.
  - d) Calcular la  $P_{wf}$  para la  $P_{th}$  calculada utilizando una correlación

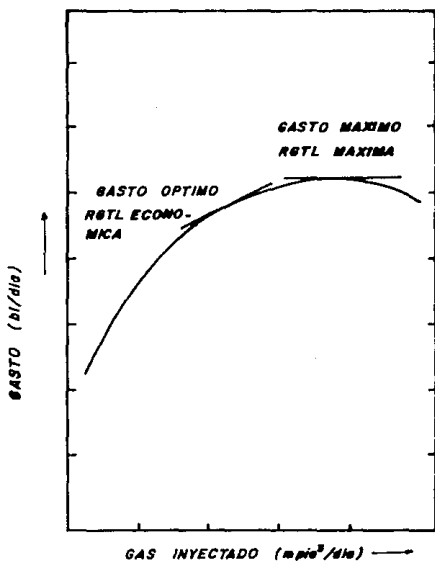


FIG. 3.8A CURVA DE COMPORTAMIENTO DE BOMBEO  
NEUMATICO CONTINUO

ción de flujo multifásico vertical (o curvas de gradiente de presión para flujo vertical).

- e) Comparar la  $P_{wf}$  calculada en b) y d). Si la diferencia entre estas es menor a  $1 \text{ lb/pg}^2$ , el gasto supuesto es el gasto natural del pozo. Si la diferencia es mayor que  $1 \text{ lb/pg}^2$ , calcular otro gasto para la  $P_{wf}$  calculada en d) y para la  $P_{ws}$  y  $J$  dados. Este procedimiento se repite hasta obtener una convergencia.
- 2.- Determinar las condiciones de flujo inyectando gas al pozo para determinar el gasto máximo para la RGTL y  $P_{so}$  dados.

El procedimiento es el siguiente:

- a) Suponer un gasto mayor que el gasto natural.
- b) Calcular la RGTL incluyendo la RGL de la formación para un incremento de RGL. El incremento en la RGL fue seleccionado como  $50 \text{ pie}^3/\text{bl}$  para este estudio.
- c) Calcular la  $P_{th}$  para el gasto y RGTL supuestos utilizando la correlación de flujo multifásico horizontal.
- d) Calcular la  $P_{wf}$  para el gasto y RGTL supuestos dada la  $P_{ws}$  y  $J$ .
- e) Calcular la presión que ejerce el gas a la profundidad del pozo, considerando el peso de la columna de gas.
- f) Comparar la  $P_{wf}$  calculada en d) y la presión del gas en la T.R. más  $100 \text{ lb/pg}^2$  a la profundidad del pozo. Si ésta es mayor o igual a la  $P_{wf}$ , el punto de inyección se localiza en el fondo del pozo.
- g) Si la presión del gas en el fondo del pozo es menor que la  $P_{wf}$ , el punto de inyección se calcula como se indica en h) e i).

- h) Dividir la profundidad del pozo en incrementos aproximadamente de 200 pie.
- i) Calcular la presión del gas y la  $P_{wf}$  para la RGL a la misma -- profundidad, hasta que la presión del gas en la T.R. sea mayor o igual a la  $P_{wf}$ . Una interpolación lineal determina la profundidad y presión de inyección, donde la curva del gradiente fluvente intersecte el gradiente de la columna del gas. Utilizar una correlación de flujo multifásico vertical para calcular la  $P_{wf}$  como se muestra en la figura 3.8 (B).
- j) Utilizar la RGL de la formación para calcular el gradiente abajo del punto de inyección y determinar la  $P_{wf}$  utilizando la correlación de flujo multifásico vertical.
- k) Comparar la  $P_{wf}$  calculada para el gasto supuesto,  $P_{ws}$  y  $J$  dados con la  $P_{wf}$  calculada en j). Si la diferencia de estas es mayor a  $1 \text{ lb/pg}^2$ , calcular otro gasto usando la  $P_{wf}$  de j) dadas la --  $P_{wf}$  y  $J$ , repetir el procedimiento desde el paso c) hasta obtener la convergencia. Si la diferencia es menor o igual a  $1 \text{ lb/pg}^2$ , el gasto supuesto es correcto para la RGL supuesta.
- l) Repetir el procedimiento desde el paso a) para nuevos incrementos de RGL hasta que el gasto no se incremente con incrementos adicionales de RGL.
- 3.- Suponer diferentes valores de utilidad sobre el aceite ( $\$/\text{bl}$ ).
- 4.- Suponer valores de costo de gas ( $\$/\text{Mpie}^3$ ).
- 5.- Para un sólo valor de utilidad sobre el aceite ( $\$/\text{bl}$ ) y todos los valores de costo de gas ( $\$/\text{Mpie}^3$ ), determinar el gasto y la RGL, donde la utilidad sobre el aceite ( $\$$ ) obtenida para un --

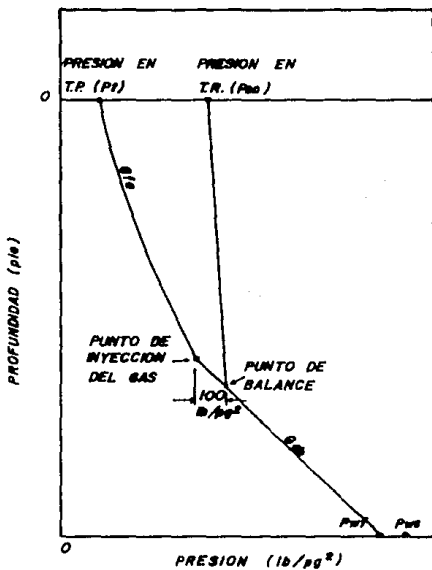


FIG. 3.88 ILUSTRACION DE UN POZO CON FLUJO CONTINUO



incremento de gas inyectado sea igual al costo de gas (\$) requerido para obtener la recuperación adicional de aceite. Hacer la comparación de los valores de utilidad sobre el aceite (\$) y los valores de costo de gas (\$) para todos los incrementos de RGL. Los gastos y RGTL's determinados de esta manera, son más económicos.

- 6.- Repetir el paso 5 para todos los valores de utilidad sobre el aceite supuestos en el paso 3.
- 7.- Con el gasto en la ordenada y la utilidad sobre el aceite (\$) o costo de gas (\$) sobre la abscisa, graficar los valores de utilidad sobre el aceite (\$) y costo de gas (\$) contra los gastos determinados en el paso 5. La intersección de las diferentes combinaciones de costo de gas ( $\$/Mpie^3$ ) y la utilidad sobre el aceite ( $\$/b\ell$ ), son los gastos más económicos con sus correspondientes RGTL's más económicas como se muestra en la figura 3.8 (C).
- 8.- Suponer otros valores de Pso y repetir el procedimiento desde el paso 2.
- 9.- Con los gastos en la ordenada y RGTL en la abscisa, graficar -- los valores de RGTL contra gastos determinados en i) para cada valor de Pso, figura 3.8 (D). Con el gasto más económico determinado en la figura 3.8 (C), la RGTL más económica puede determinarse de la figura 3.8 (D).
- 10.- Con los gastos en la ordenada y la profundidad de inyección en la abscisa, graficar los valores de profundidad de inyección --

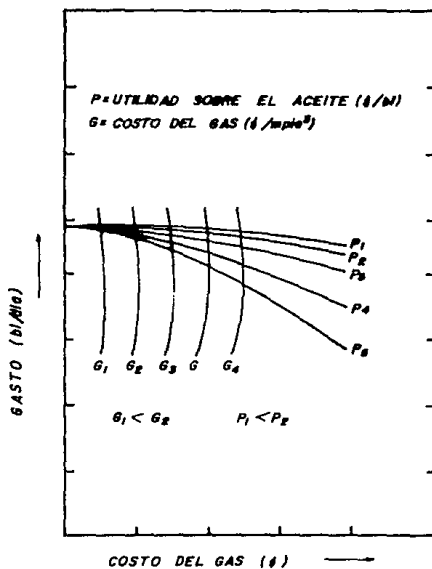


FIG. 3.8C DETERMINACION DEL GASTO MAS ECONOMICO

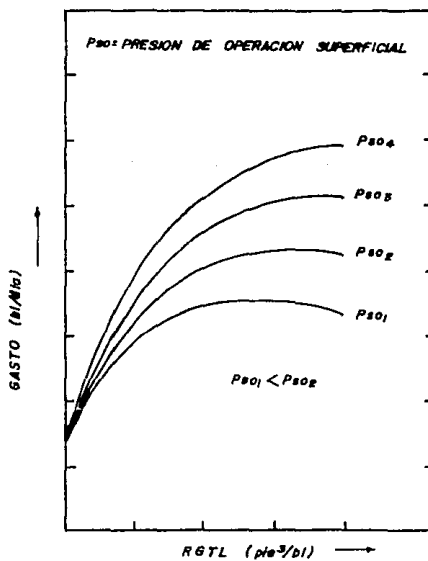


FIG. 3-8D DETERMINACION DE LA RGTL MAS ECONOMICA

determinadas en i) para cada valor de  $P_{so}$  y diferentes RGL's, correspondiendo a cada incremento de RGL. Unir los puntos correspondientes a la misma RGL con una curva, figura 3.8 (E). Con la RGL más económica determinada en la figura 3.8 (D) y la  $P_{so}$  correspondiente, la profundidad de inyección puede determinarse en la figura 3.8 (E).

- 11.- Con el gasto en la ordenada y la presión de inyección en la abscisa graficar los valores de presión de inyección determinados en i) para cada valor de  $P_{so}$  y diferentes RGL's correspondientes a cada incremento de RGL. Unir los puntos correspondientes a la misma RGL con una curva, figura 3.8 (F). Con la RGL más económica determinada en la figura 3.8 (D) y la  $P_{so}$  apropiada la presión en el punto de inyección puede determinarse en la figura 3.8 (F).

#### EJEMPLO DE DISEÑO DE BOMBEO NEUMÁTICO MAS ECONOMICO PARA $P_{th}$ VARIABLE.

Este problema ilustra la aplicación de ambos procedimientos de diseño de bombeo neumático para flujo continuo.

Dada la siguiente información del pozo:

Profundidad del pozo	=	8,000 pie
Diámetro de la T.P.	=	2.441 pg (D.I.)
Longitud de la L.D.	=	4,000 pie.
Diámetro de la L.D.	=	2.5 pg.
$P_{ws}$	=	2,400 lb/pg <sup>2</sup>
$P_{so}$	=	800, 1000, 1,200 lb/pg <sup>2</sup>
$P_{sep}$	=	80 lb/pg <sup>2</sup>

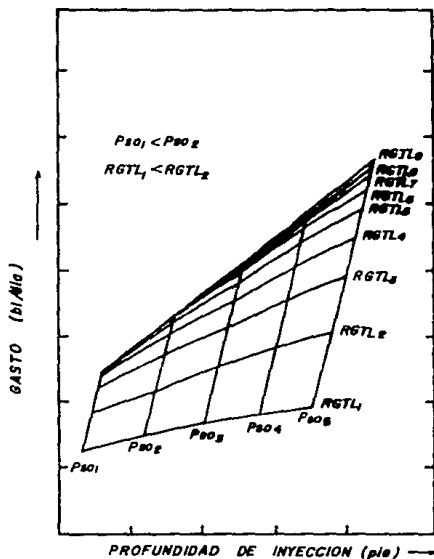


FIG. 3-8E DETERMINACION DE LA PROFUNDIDAD DE INYECCION

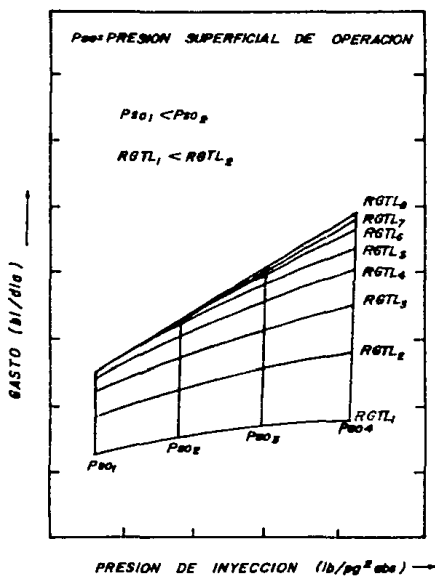


FIG. 3. 8F DETERMINACION DE LA PRESION DE INYECCION

$T_{sep}$	=	100°F
J	=	3 bl/dla/lb/pg <sup>2</sup> (constante)
RGL de formación	=	200 pie <sup>3</sup> /bl
Agua	=	0 %
$\gamma_g$	=	0.65 (aire = 1)
°API	=	35
$\gamma_w$	=	1.07
$T_{sup}$	=	120°F
$T_{fondo}$	=	180°F
Costo de gas	=	1.0 \$/Mpie <sup>3</sup>
Utilidad en el aceite	=	4.0 \$/bl

Determinar los gastos posibles de este pozo para la RGTL más económica.

#### SOLUCION

a) UTILIZANDO EL METODO DE PENDIENTE ECONOMICA.

- 1.- Suponer gastos de 500, 1,000, 1,500 y 2,000 bl/dla.
- 2.- Suponer RGTL's de 100 a 1,300 pie<sup>3</sup>/bl con incrementos de 100 -- pie<sup>3</sup>/bl.
- 3.- Suponer incrementos de profundidad de 1,000 pie hasta la profundidad del pozo.
- 4.- Para un gasto de 500 bl/dla y una RGTL de 100 pie<sup>3</sup>/bl, calcular la Pth para una presión de separación constante de 80 lb/pg<sup>2</sup> y longitud de línea de descarga de 4,000 pie utilizando una corrección de flujo multifásico horizontal o curvas de gradiente de presión para flujo horizontal.

- 5.- Calcular la  $P_{wf}$  correspondiente al valor de  $P_{th}$  del paso 4 para incrementos de profundidad de 1,000 pie, hasta la profundidad total del pozo utilizando correlaciones de flujo multifásico o bien curvas de gradiente de presión para flujo vertical.
- 6.- Repetir los pasos 4 y 5 para valores de RGTL de 200 a 1,300  $\text{pie}^3/\text{bl}$  con incrementos de 100  $\text{pie}^3/\text{bl}$ .
- 7.- Calcular la pendiente económica para un gasto de 500  $\text{bl}/\text{día}$ ,  $J = 3 \text{ bl}/\text{día}/\text{lb}/\text{pg}^2$  utilidad sobre el aceite de 4  $\$/\text{bl}$  y costo de gas de 1  $\$/\text{Mpie}^3$  utilizando la ecuación 3.4 como sigue:
- $$X = q \times G / P \times J$$
- $$X = \frac{500}{4} \times \frac{1/1,000}{x \times 3} \quad (\text{lg}/\text{pg}^2/\text{pie}^3/\text{bl})$$
- 8.- Graficar los valores de  $P_{wf}$  del paso 5 contra la RGTL para incrementos de profundidad de 1,000 pie hasta la profundidad total del pozo, figura 3.9 (A).
- 9.- Estimar valores de RGTL más económicos y su correspondiente  $P_{wf}$  de la figura 3.9 (A). Trazar una tangente a la curva para cada incremento de profundidad de igual pendiente al valor de pendiente económica determinada en el paso 7. Estimar la RGTL y su correspondiente  $P_{wf}$  para un valor de pendiente cero en la misma dirección.
- 10.- Dibujar una curva de RGTL económica como se muestra en la figura 3.9 (A), uniendo los puntos de RGTL más económicos del paso 9 para cada profundidad. Dibujar la curva de RGTL máxima mediante la unión de puntos de pendiente cero.
- 11.- Repetir el procedimiento del paso 4 a 10 para gastos de 1,000,



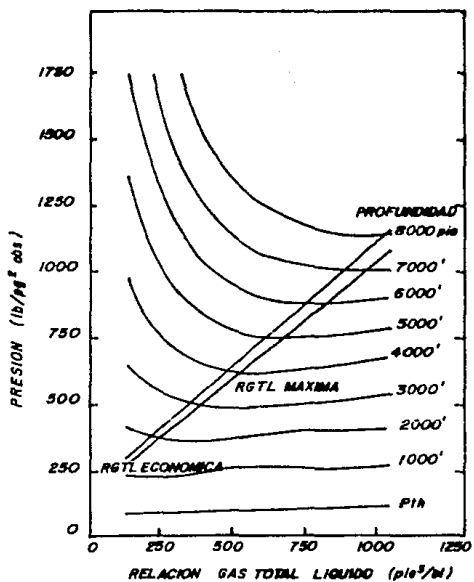


FIG. 3.9A CURVAS DE PRESION CONTRA RGTL PARA UN GASTO DE 500 bi/dia

1,500 y 2,000 bl/día.

- 12.- Suponer valores de Pso de 800, 1,000 y 1,200 lb/pg<sup>2</sup>.
- 13.- Calcular la presión del gas a la profundidad del pozo incluyen do los efectos de la columna del gas para cada Pso supuesta en el paso 12.  
Las Pso de 800, 1,000 y 1,200 lb/pg<sup>2</sup> dan 849.5, 1,090.2 y - - 1,331.7 lb/pg<sup>2</sup> a 8,000 pie.
- 14.- Graficar los valores de presión de gas desde la profundidad ce ro hasta la profundidad total del pozo. La unión de dos pun- tos para la misma Pso, definen la línea de operación del gas, - figura 3.9 (B).
- 15.- Graficar los valores de Pwf del paso 9 correspondientes a la - RGTL económica en la figura 3.9 (B) para cada gasto. Unir los puntos correspondientes al mismo gasto. La intersección de es tas líneas con las líneas de presión de operación del gas, co- rresponden a la presión y profundidad del punto de inyección - para un gasto y Pso dados.
- 16.- Graficar los valores de RGTL económica, calculada en el paso 9 contra presión como se muestra en la figura 3.9 (C) para cada- profundidad y gasto. Unir los puntos correspondientes al mis- mo gasto con una línea. Trazar una línea, uniendo los puntos- de la misma profundidad. Calcular la RGTL más económica de la figura 3.9 (C), utilizando los resultados de la figura 3.9 (B).
- 17.- Calcular la Pwf para los puntos de inyección determinados en - el paso 15, utilizando la correlación de flujo multifásico ver

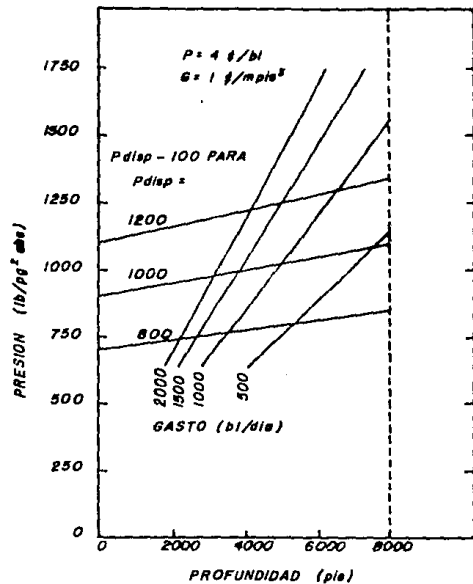


FIG. 3.9B DETERMINACION DEL PUNTO DE INYECCION

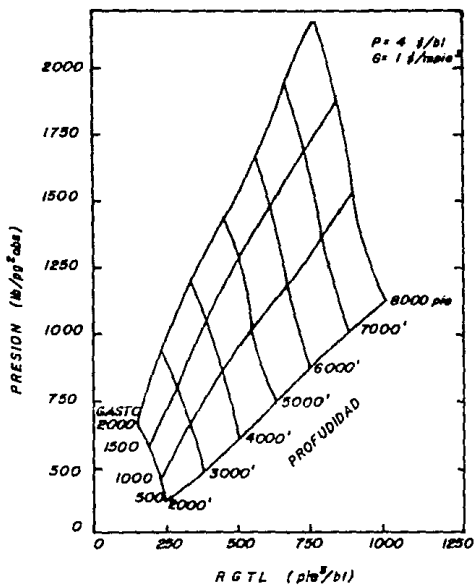


FIG. 3.9C DETERMINACION DE LA RGTL MAS ECONOMICA

tical y la RGL de formación.

- 18.- La curva de comportamiento de afluencia del pozo se grafica en la figura 3.9 (D).
- 19.- Graficar los valores de  $Pwf$  determinados en el paso 17 contra el gasto en la figura 3.9 (D) para cada valor de  $Psc$ . Unir -- los puntos correspondientes a la misma  $Psc$ . La intersección a la curva de comportamiento de afluencia con la curva de operación superficial, representa el gasto más económico para la --  $Psc$  dada. Los resultados de estos cálculos dan gastos de 885, 1,025 y 1,180 bl/día para  $Psc$  de 800, 1,000 y 1,200 lb/pg<sup>2</sup>.
- 20.- Los gastos más económicos del paso 19 se grafican contra la --  $Psc$  en la figura 3.9 (D). Esta gráfica da la relación entre -- la  $Psc$  y el gasto a la RGL más económica.
- Un resumen de los resultados obtenidos para los parámetros más importantes de bombeo neumático se presentan en la tabla 3.4.

b) METODO DE UTILIDAD SOBRE EL ACEITE CONTRA EL COSTO DE GAS INYECTADO.

- 1.- Suponer un gasto de 700 bl/día y efectuar el proceso iterativo presentado anteriormente para determinar las condiciones de flujo natural del pozo. Estos resultados muestran un gasto de 632 bl/día para una  $Pwf$  de 2,189.7 lb/pg<sup>2</sup> y  $Pth$  de 91.1 lb/pg<sup>2</sup>.
- 2.- Suponer una  $Psc$  de 800 lb/pg<sup>2</sup> y realizar el proceso iterativo para determinar los gastos para incrementos de RGL's hasta el gasto máximo. Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 3.5

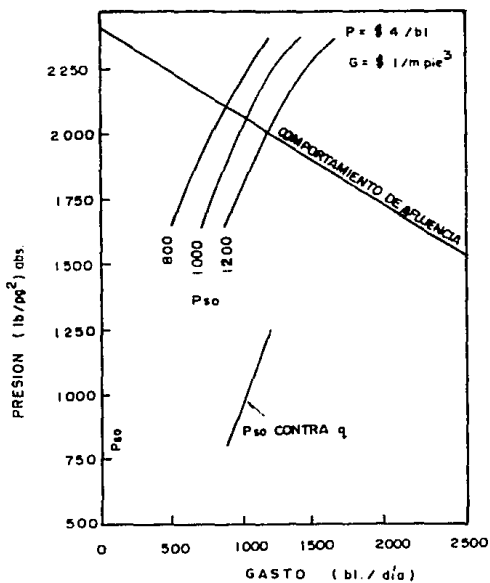


FIG. 3.9 - D DETERMINACION DEL GASTO DE FLUJO MAS ECONOMICO.

- 3.- Suponer valores de utilidad sobre el aceite de 3, 4, 6, 8 y 10 \$/bl.
- 4.- Suponer valores de costo de gas de 0.5, 1, 1.5, 2.0 y 2.5 - - \$/Mpie<sup>3</sup>.
- 5.- Los gastos y las RGTL's determinadas para un sólo valor de utilidad sobre el aceite y todos los costos de gas supuestos en el paso 4 hasta que la utilidad sobre el aceite (\$) obtenida - para un incremento de gas inyectado sea igual al costo de gas (\$) requerido para obtener la recuperación adicional de aceite.
- 6.- Repetir el paso 5 para todos los valores de utilidad sobre el aceite. Los resultados de los pasos 5 y 6 se muestran en la - tabla 3.6.
- 7.- Los gastos determinados en el paso 5 se grafican contra el cos to de gas (\$) o la utilidad sobre el aceite (\$) como se mues- tra en la figura 3.9 (E). La intersección de las diferentes - combinaciones de utilidad sobre el aceite (\$/bl) y costo de - gas (\$/Mpie<sup>3</sup>) son los gastos más económicos que corresponden a la RGTL más económica.
- 8.- Repetir el procedimiento desde el paso 2 hasta el 7 para valo- res de Pso de 1,000 y 1,200 lb/pg<sup>2</sup>. Referir a la figura 3.9 - (E), para Pso de 800 lb/pg<sup>2</sup>.
- 9.- Los gastos y RGTL determinados en el paso 2 se grafican para - cada valor de Pso como se muestra en la figura 3.9 (F). Del - gasto más económico determinado en las figuras tales como la - figura 3.9 (E), calcular la RGTL más económica de la figura 3.9 (F).

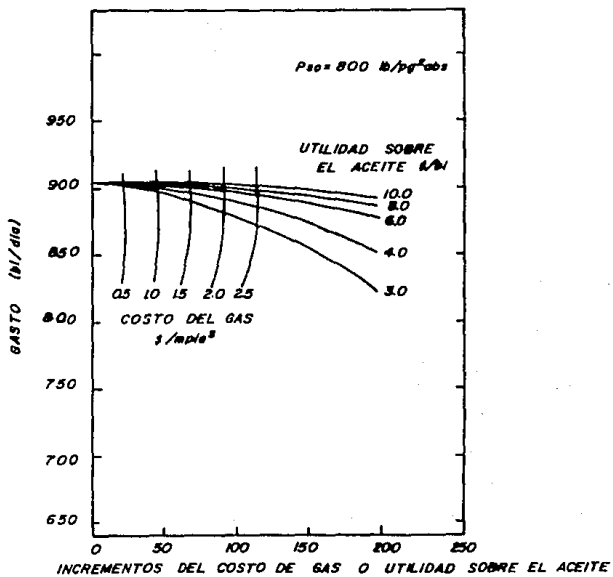


FIG 3.9E DETERMINACION DEL GASTO MAS ECONOMICO



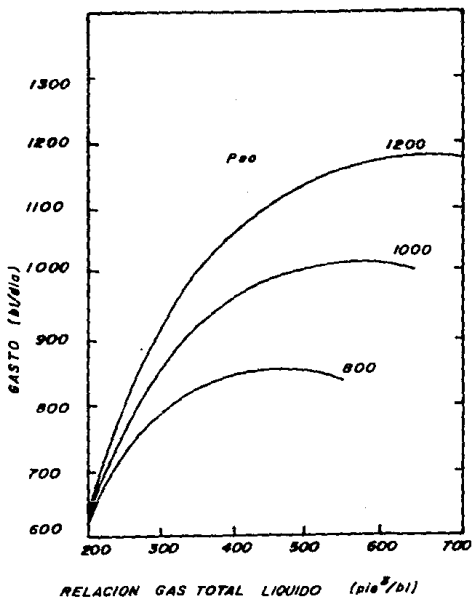


FIG. 3.9F DETERMINACION DE LA RGTL MAS ECONOMICA

TABLA 3.4  
 RESULTADOS PARA EL DISEÑO DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO  
 UTILIZANDO EL MÉTODO DE PENDIENTE ECONOMICA

$P_{so}$ $lb/pg^2$ abs.	Prof. iny. pie	Presión de inyección $lb/pg^2$ abs.	RGTL económica $pie^3/bl$	Gasto económico $bl/dla$
800	3,950	770	450	885
1,000	4,900	1,015	525	1,025
1,200	5,800	1,265	625	1,180

TABLA 3.5  
 CONDICIONES DE BOMBEO NEUMÁTICO  
 PARA UNA P<sub>so</sub> DE 800 lb/pg<sup>2</sup> abs.

Gasto bl/día	RGL de iny. pie <sup>3</sup> /bl	RGTL pie <sup>3</sup> /bl	Presión de iny. lb/pg <sup>2</sup> abs.	Prof. de iny. pie	Pth lb/pg <sup>2</sup> abs.	Pwf lb/pg <sup>2</sup> abs.
728.3	50	250	758.7	3676.8	98.1	2157.2
788.8	100	300	759.7	3743.8	104.6	2136.9
826.4	150	350	760.4	3782.5	110.6	2125.3
845.7	200	400	760.7	3805.2	115.8	2118.3
853.7	250	450	760.0	3815.2	120.2	2115.3
853.7	300	500	761.0	3816.0	123.8	2115.1

TABLA 3.6  
 RESULTADOS DE RGTL ECONOMICA  
 PARA UNA P&o DE 800 lb/pg<sup>2</sup> abs.

Utilidad sobre el aceite \$/bl	Costo de gas \$/Mpie <sup>3</sup>	Gasto económico bl/dla	RGTL económica pie <sup>3</sup> /bl
3	0.5	835.7	450.0
3	1.0	848.8	417.1
3	1.5	842.2	389.7
3	2.0	834.4	368.5
4	0.5	853.7	450.0
4	1.0	851.5	434.4
4	1.5	847.4	409.2
4	2.0	842.2	389.7
4	2.5	836.3	373.6
5	0.5	853.7	450.0
6	1.0	853.0	450.0
6	1.5	851.5	434.0
6	2.0	848.8	417.1
6	2.5	846.0	401.6
8	0.5	853.7	450.0
8	1.0	853.7	450.0
8	1.5	855.5	448.5
8	2.0	851.5	434.4
8	2.5	849.5	421.3
10	0.5	853.7	450.0
10	1.0	853.7	450.0
10	1.5	853.7	450.0
10	2.0	853.1	445.6
10	2.5	851.5	434.4

- 10.- Graficar los valores de profundidad de inyección determinados en el procedimiento iterativo del paso 2, contra gasto para cada valor de P<sub>so</sub> y diferentes RGTL's correspondientes para cada incremento de RGTL como se muestra en la figura 3.9 (G). - Unir los puntos correspondientes a la misma RGTL. De la RGTL más económica determinada en la figura 3.9 (F) la profundidad de inyección puede determinarse de la figura 3.9 (G).
- 11.- Graficar los valores de presión de inyección determinados en el procedimiento iterativo del paso 2 contra el gasto para cada valor de P<sub>so</sub> y diferentes RGTL correspondientes a cada incremento de RGL, figura 3.9 (H). Unir los puntos correspondientes a la misma RGTL. De la RGTL más económica determinada en la figura 3.9 (F) y la P<sub>so</sub> apropiada, la presión en el punto de inyección puede determinarse de la figura 3.9 (H).

Un resumen de los resultados obtenidos, utilizando el método de utilidad sobre el aceite contra costo de gas inyectado para diseño de bombeo neumático muestra los gastos de 852, 1,008 y 1,164 bl/día para las RGTL de 434, 515 y 584 pie<sup>3</sup>/bl para P<sub>so</sub> de 800, 1,000 y 1,200 lb/pg<sup>2</sup>.

Para mostrar como cambia la longitud y el diámetro de la línea de descarga afectando las características de flujo en un sistema de bombeo neumático continuo, el ejemplo ilustra la aplicación de los métodos para el diseño económico resuelto para diferentes valores de longitud y diámetro de línea de descarga. Las tablas 3.7 y 3.8 muestran un resumen de los resultados obtenidos en estos cálculos para los parámetros más importantes de bombeo neumático.

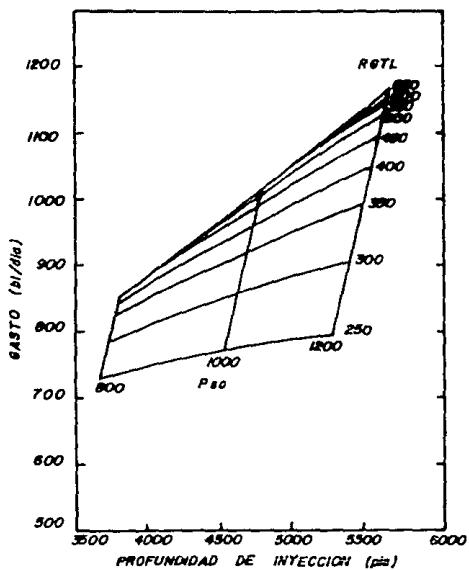


FIG.3.9G DETERMINACION DE LA PROFUNDIDAD DE INYECCION

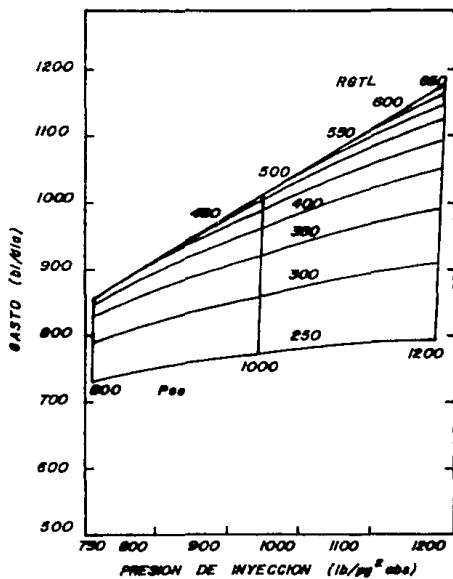


FIG.3.9H DETERMINACION DE LA PRESION DE INYECCION

La figura 3.10 (A) muestra los efectos de la longitud de la línea de descarga sobre el gasto y la RGTL para un diámetro de tubería de descarga de 2.441 pg. (DI), el diámetro de la línea de descarga de 2.5 pg. y una Pso de 1,000 lb/pg<sup>2</sup> y un incremento en la longitud de la línea de descarga origina un decremento en el gasto. Por ejemplo, una RGTL de 600 pie<sup>3</sup>/bl para una longitud de línea de descarga de 1,000 pie da un gasto de 1,109 bl/dla, mientras una longitud de línea de descarga de 5,000 pie da un gasto de 995 bl/dla.

La figura 3.10 (B) muestra los efectos de la longitud de la línea de descarga sobre la Pth y la RGTL para las mismas condiciones dadas anteriormente. Para estas condiciones un incremento en la longitud de la línea de descarga origina un incremento en la Pth. Por ejemplo, si la RGTL es de 600 pie<sup>3</sup>/bl para una línea de descarga de - - 1,000 pie corresponde una Pth de 104 lb/pg<sup>2</sup>, mientras que una longitud de línea de descarga de 5,000 pie da una Pth de 157 lb/pg<sup>2</sup>.

La figura 3.10 (C) muestra los efectos del diámetro de la línea de descarga en el gasto y RGTL. Para un diámetro de tubería de 2.441-pg., longitud de línea de descarga de 4,000 pie y Pso de 1,000 lb/pg<sup>2</sup>, un incremento en el diámetro de la línea de descarga incrementará el gasto. Por ejemplo, si la RGTL es de 600 pie<sup>3</sup>/bl y el diámetro de la línea de descarga es de 2.5 pg, da un gasto de 1,076 bl/dla, mientras que un diámetro de 4 pg da un gasto de 1,141 bl/dla. La figura 3.10 (D) muestra los efectos del diámetro de la línea de descarga en la Pth y RGTL para las condiciones dadas anteriormente. Un incremento en el diámetro de la línea de descarga origina un decremento en la Pth. Por ejemplo, una RGTL de 600 pie<sup>3</sup>/bl y un diámetro de línea de descarga de 2.5 pg. requiere una Pth de 147 lb/pg<sup>2</sup>,



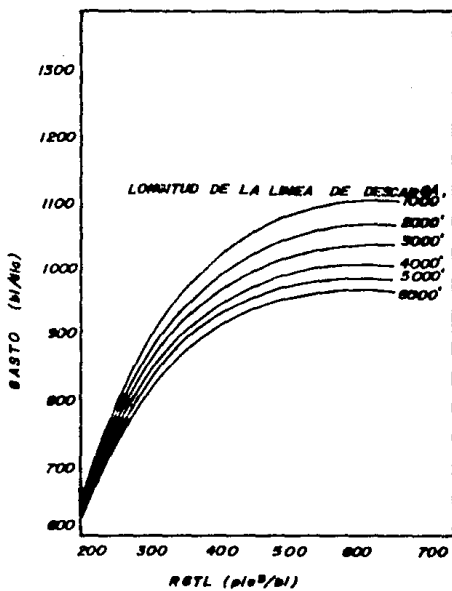


FIG. 3.10A EFECTO DE LA LINEA DE DESCARGA SOBRE EL GASTO

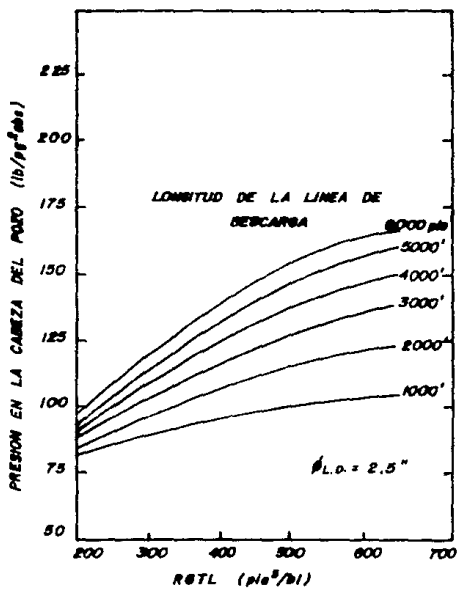


FIG. 3.10B EFECTO DE LA LINEA DE DESCARGA SOBRE LA PRESION EN LA CABEZA DEL POZO

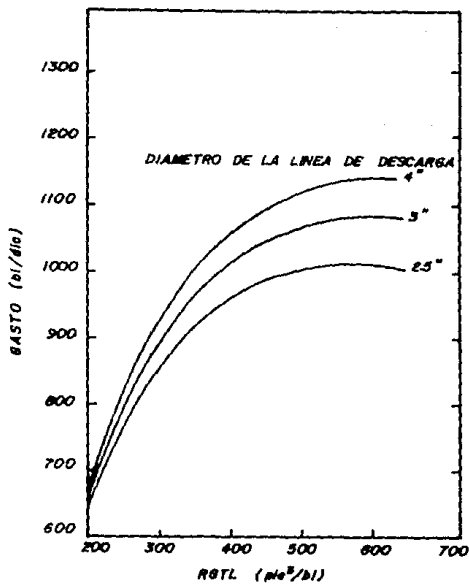


FIG.3.10C EFECTO DEL DIAMETRO DE LA LINEA DE DESCARGA

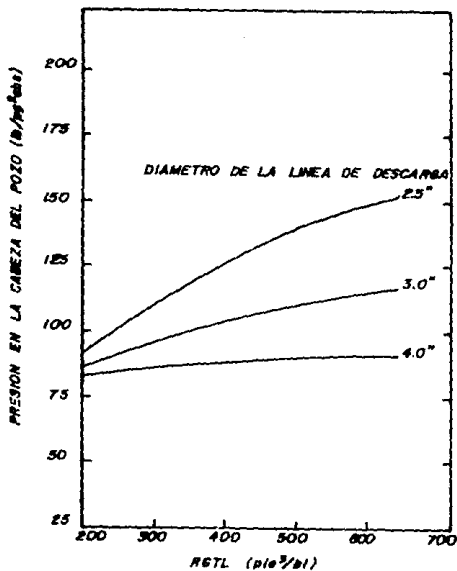


FIG.3.10D EFECTO DEL DIAMETRO DE LA LINEA DE DESCARGA SOBRE LA PRESION EN LA CABEZA DEL POZO

mientras que una línea de descarga de 4 pg. de diámetro requiere --  
una Pth de 89 lb/pg<sup>2</sup>.

TABLA 3.7

RESULTADOS PARA EL DISEÑO DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO  
UTILIZANDO DIFERENTES LONGITUDES DE LINEA DE DESCARGA [L.D.]

L.D. pie	P <sub>so</sub> lb/pg <sup>2</sup> abs.	Prog. de inyección pie	Presión de iny. lb/pg <sup>2</sup> abs.	RGTL económica pie <sup>3</sup> /bl	Gasto económico bl/día
1,000	800	3,886	762	452	917
1,000	1,000	4,896	1,003	537	1,101
1,000	1,200	5,845	1,253	603	1,281
2,000	800	3,857	762	446	891
2,000	1,000	4,654	1,002	528	1,063
2,000	1,200	5,789	1,251	594	1,232
3,000	800	3,834	761	441	870
3,000	1,000	4,820	1,001	520	1,033
3,000	1,200	5,747	1,250	590	1,195
4,000	800	3,814	761	434	852
4,000	1,000	4,791	1,001	515	1,008
4,000	1,200	5,712	1,249	584	1,164
5,000	800	3,797	761	430	856
5,000	1,000	4,768	1,000	512	988
5,000	1,200	5,683	1,249	580	1,139
6,000	800	3,781	760	427	822
6,000	1,000	4,748	1,000	512	970
6,000	1,200	5,658	1,248	575	1,117

TABLA 3.8  
 RESULTADOS PARA EL DISEÑO DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO  
 UTILIZANDO DIFERENTES DIÁMETROS DE LÍNEA DE DESCARGA

Diámetro de L.D. pg.	$p_{80}$ $\text{lb/pg}^2$ abs.	Prof. de inyección pie	Presión de iny. $\text{lb/pg}^2$ abs.	RGTL económica $\text{pie}^3/\text{bl}$	Gasto económico $\text{bl}/\text{día}$
2.5	800	3,813	761	434	851
2.5	1,000	4,792	1,001	515	1,006
2.5	1,200	5,712	1,249	498	1,132
3.0	800	3,868	762	445	901
3.0	1,000	4,871	1,002	533	1,079
3.0	1,200	5,814	1,252	601	1,254
4.0	800	3,909	762	459	938
4.0	1,000	4,932	1,003	545	1,133
4.0	1,200	5,895	1,254	615	1,326

CAPITULO IV  
ANALISIS ECONOMICO

Frecuentemente se han hecho estudios donde se muestran las consideraciones económicas en diseño de instalaciones de bombeo neumático. Este estudio fue tomado de un pozo fluyente, y determina la factibilidad económica del bombeo neumático.

Muchos pozos caen en esta categoría, estos son capaces de producir por flujo natural, pero los gastos pueden incrementarse con la instalación del bombeo neumático

Esto es cierto para pozos con alta productividad. Para una mejor ilustración de este estudio se realiza un ejemplo.

EJEMPLO

Dada la siguiente información.

Datos del pozo

Presión de fondo estática (Pws)	= 2400 lb/pg <sup>2</sup> (todo aceite)
J	= 4 bl/dla/lb/pg <sup>2</sup>
Relación gas aceite	= 400 pie <sup>3</sup> /bl
Pth	= 120 lb/pg <sup>2</sup> cte.
Pso	= 900 lb/pg <sup>2</sup>
γ <sub>g</sub>	= 0.65 (aire=1)
Profundidad (D)	= 8000 pie

La Pws disminuye 100 lb/pg<sup>2</sup> por cada 200 000 bl recuperados.

Presión de saturación = 2300 lb/pg<sup>2</sup>

La ecuación de Vogel se utiliza para flujo en dos fases en el yacimiento.

Los diámetros de la T.P. y T.R. disponibles son los siguientes: T.P. 2, 2.5, 3, y 4 pg. (diámetro nominal).

En flujo por espacio anular es posible para 2 x 5 1/2 pg., y 2 1/2 x 7 pg. de diámetro.

Precio del aceite (U.S)	= 11.00 \$/bl
Costo de inyección	= 0.05 \$/Mpie <sup>3</sup>



Costo de producción	= 0.20 \$/bl
Costos de mantenimiento	= 0.15 \$/bl utilizando una compresora
Arranque del pozo	= \$ 150 000.00
Equipo nueva (válvulas)	= \$ 18 000.00
Otros equipos	= \$ 5 000.00
Tasa de interés	= 10%
Derechos	= 15 %
Impuesto por producción limitada	= 5 %
Costos de capacidad utilizando - un compresor de gas	= 73 000.00 \$/MMpie <sup>3</sup>

#### SUPERVISIÓN ADICIONAL

Costo utilizando gas inicialmente	= \$ 1 000.00
Compresor	= \$ 500.00 por mes

Dos diferentes diámetros de tubería pueden ser utilizados, siendo estos, 2 1/2 y 4 pg.. Suponiendo que el gas disponible es suficiente para obtener máximos gastos de producción, y que el gas no se optimiza para una utilidad máxima en este caso.

#### REQUERIMIENTOS:

##### PROYECTO A (utilizando T.P. de 2 1/2 pg.)

- 1.- Determinar la producción máxima por flujo natural para este pozo.
- 2.- Determinar la producción máxima posible por bombeo neumático.
- 3.- Realizar un análisis económico de un pozo con bombeo neumático utilizando gas desde un sistema central y un compresor.

##### PROYECTO B (utilizando T.P. de 4 pg.)

- 1.- Determinar la producción máxima por flujo natural para este pozo.
- 2.- Determinar la producción máxima posible por bombeo neumático.
- 3.- Realizar un análisis económico de un pozo con bombeo neumático utilizando gas desde un sistema central y un compresor.

## PROCEDIMIENTO DE SOLUCION

## PROYECTO A

- 1.- Los diagramas presión contra gasto se construyen como se muestra en las figuras 4.1 y 4.2, para condiciones fluyentes y bombeo neumático.
- 2.- Las tablas 4.1 y 4.2 muestran el gasto posible para flujo natural y por bombeo neumático para una T.P. de 2 1/2 pg.. Tablas similares son mostradas para T.P. de 4 pg.  
  
Esta información se obtiene de la figura 4.1 de datos de fws con decrementos de 100 lb/pg<sup>2</sup> para cada 200 000 barriles recuperados.
- 3.- La figura 4.3 muestra la producción acumulativa contra el tiempo para flujo natural y bombeo neumático.
- 4.- La tabla 4.3 muestra la producción por flujo natural.
- 5.- La tabla 4.4 muestra la producción por bombeo neumático para una T.P de 2 1/2 pg.
- 6.- La tabla 4.5 muestra el incremento de producción de flujo natural a bombeo neumático.
- 7.- Se construye una curva de ingreso neto acumulativo contra tiempo como se muestra en la figura 4.4, para un interés del 10 % a un tiempo relativamente corto de 4.8 meses para pagar, como base. Ver tabla 4.6
- 8.- Observando otras medidas económicas como utilidad y valor presente neto, la tabla 4.7 muestra el descuento en efectivo. Las estimaciones del valor presente neto se muestran en la tabla 4.7
- 9.- Los datos de la tabla 4.7 se grafican en la figura 4.5 donde la utilidad se extrapola a 368 % y el proyecto es sumamente favorable

El procedimiento de solución es el mismo para un compresor, y un tiempo de pago de 9 meses como base, con una utilidad de 330 % para una inversión inicial de \$ 306 200.00

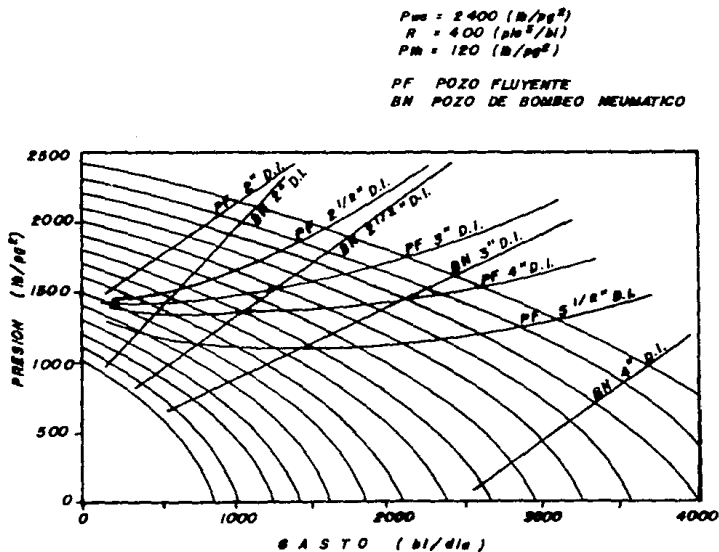


FIG. 4.1 COMPARACION DE GASTOS CON DIFERENTES DIAMETROS DE T.P. PARA POZO FLUYENTE Y BOMBEO NEUMATICO

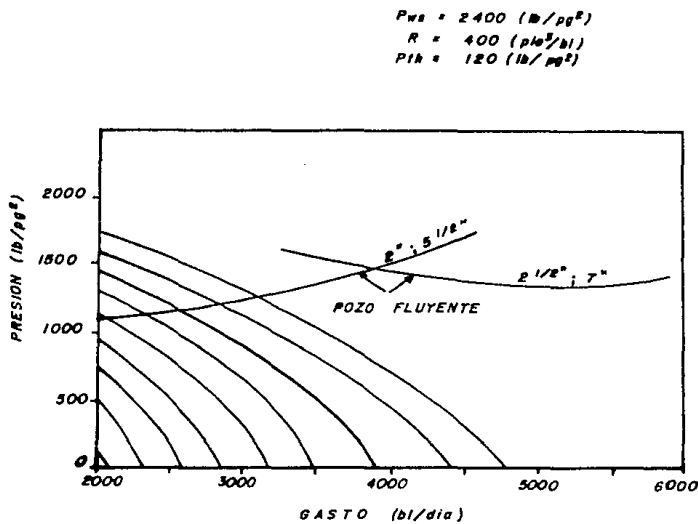


FIG. 4.2 COMPARACION DE GASTOS CON DIFERENTES DIAMETROS DE T.P. PARA POZO FLUYENTE

TABLA 4.1

## PRODUCCION DEL POZO FLUYENTE

PROYECTO A (T.P. 2 1/2 pg.)

TIEMPO (meses)	PRODUCCION DE ACEITE ( $q_0$ ) (bbl/dca)	PRODUCCION ACUMULATIVA ( $N_p$ ) (bbl)
4.46	1 475	200 000
9.43	1 325	400 000
15.03	1 175	600 000
21.30	1 050	800 000
28.61	900	1 000 000
37.28	750	1 200 000
48.34	600	1 400 000
62.96	450	1 600 000
84.89	300	1 800 000

TABLA 4.2

## PRODUCCION POR BOMBEO NEUMATICO

PROYECTO A (T.P. 2 1/2 pg.)

TIEMPO (meses)	PRODUCCION DE ACEITE ( $q_0$ ) (bbl/dla)	PRODUCCION ACUMULATIVA ( $N_p$ ) (bbl)
3.96	1 660	200 000
8.20	1 550	400 000
12.77	1 440	600 000
17.68	1 340	800 000
23.07	1 220	1 000 000
28.95	1 120	1 200 000
35.53	1 000	1 400 000
42.84	900	1 600 000
52.23	700	1 800 000
63.02	610	2 000 000
75.92	510	2 200 000

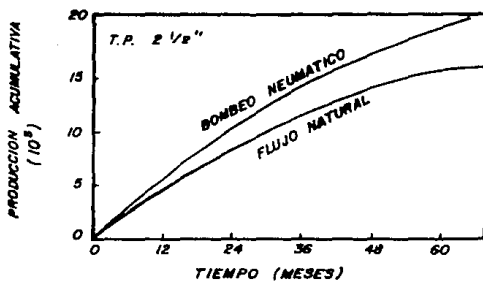


FIG. 4.3 PRODUCCION ACUMULATIVA CONTRA TIEMPO  
PROYECTO A

TABLA 4.3

## POZO FLUYENTE - PROYECTO A

ARO	PRODUCCION PROMEDIO (bℓ/dℓa)
0-1	1 450
1-2	1 100
2-3	850
3-4	675
4-5	540

TABLA 4.4

## BOMBEO NEUMATICO DE UN POZO - PROYECTO A

GAS DE INYECCION (MM pie <sup>3</sup> /año)	PRODUCCION DE ACEITE (q <sub>o</sub> ) (bℓ/dℓa)
666	1 600
622	1 320
578	1 080
538	880
490	700



TABLA 4.5

## INCREMENTO DE PRODUCCIÓN - PROYECTO A

PRODUCCION DE ACEITE (q <sub>0</sub> )	INCREMENTO ANUAL
(bℓ/día)	(bℓ)
150	54 750
220	80 300
230	83 950
205	74 825
160	58 400

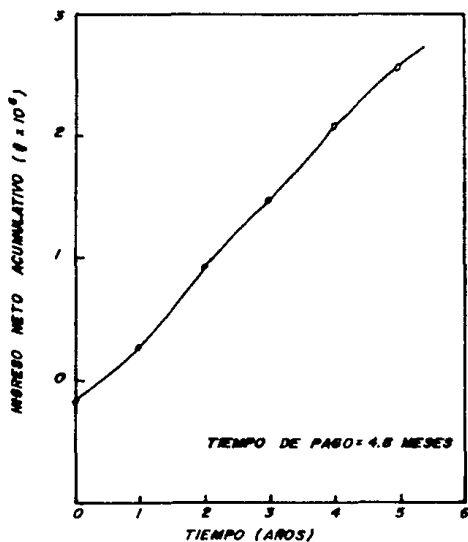


FIG. 4.4 INGRESO NETO ACUMULATIVO CONTRA TIEMPO  
PROYECTO A

TABLA 4.6

PRODUCCION Y PRECIO NETO PARA EL PROYECTO A (T.P. 2 1/2 pg.)

ANO	GAS DE INV. Mmpie <sup>3</sup> /año	INCREMENTO ANUAL DE PRODUCCION (bL)	RENTA ANUAL BRUTA (11 \$/bL)	COSTO DE GAS DE INYECCION (0.05 \$/Mpie <sup>3</sup> )	COSTO DE PRODUCCION (.20 \$/bL)
0	-----	-----	-----	-----	-----
1	666	54 750	602 250	33 300	10 950
2	622	80 300	883 300	31 100	16 060
3	578	83 950	923 450	28 900	16 790
4	538	74 825	823 075	26 900	14 965
5	490	58 400	642 400	24 500	11 680

ANO	COSTO DE MAN TENIMIENTO (0.10 \$/bL)	INGRESO NETO ANUAL * (\$)	GASTO FUTURO (\$)	INGRESO NETO EN EFECTIVO (\$)	INGRESO NETO ACUMULATIVO (\$)
0	-----	-----	-----	- 173 000	- 173 000
1	5 475	436 592	-----	436 592	263 592
2	8 030	658 075	-----	658 075	921 667
3	8 395	691 600	150 000	541 600	1 463 267
4	7 482	615 286	-----	615 286	2 078 553
5	5 840	476 718	-----	476 718	2 555 271

\* Ingreso neto anual = renta anual bruta (1 - 0.15)(1 - 0.05) - costo de gas de inyección - costo de producción - costo de mantenimiento

Derechos = 15 %

Impuesto por producción limitada = 5 %

Ejemplo:  $642\ 400 (1-0.15)(1-0.05) - 24\ 500 - 11\ 680 - 5\ 840 = 476\ 718$

TABLA 4.7

## VALOR PRESENTE NETO PARA EL PROYECTO A

AÑO	INGRESO NETO	FACTOR DE DESCUENTO ( MEDIO AÑO)				
		10%	20%	50%	100%	200%
0	-173000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
1	436592	0.95346	0.91287	0.81650	0.70711	0.57735
2	658075	0.86678	0.76073	0.54433	0.35355	0.19245
3	541600	0.78799	0.63394	0.36289	0.17673	0.06415
4	615286	0.71635	0.52828	0.24192	0.08839	0.02138
5	476718	0.65123	0.44023	0.16128	0.04419	0.00713

AÑO	DESCUENTO EN EFECTIVO				
	10%	20%	50%	100%	200%
0	-173000	-173000	-173000	-173000	-173000
1	416273	398552	356477	308718	252066
2	570406	500617	358210	232662	126646
3	426775	343342	193541	95717	34744
4	440760	325043	148850	54385	13155
5	310453	209866	76885	21066	3399
	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	* 1'991667	1'604420	963963	539548	257010

\* valor presente neto.

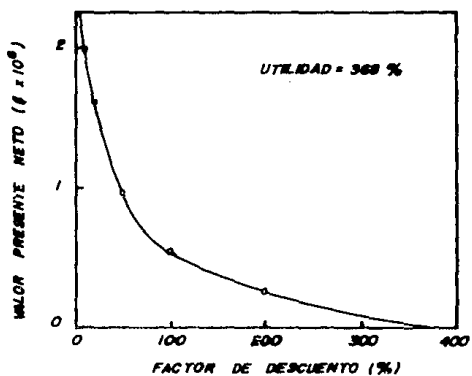


FIG. 4.5 VALOR PRESENTE NETO CONTRA FACTOR DE DESCUENTO. PROYECTO A

## PROYECTO B

Debido a que el procedimiento de solución es el mismo, únicamente se mostrarán algunas figuras y tablas.

Las tablas 4.8 y 4.9 muestran la comparación de gastos y producción acumulativa para flujo natural y bombeo neumático para una T.P. de 4 pg.

La figura 4.6 muestra la producción acumulativa contra el tiempo para el proyecto B, para flujo natural y bombeo neumático.

Prescindiendo un compresor, el tiempo de pago es de un mes con una utilidad mayor de 400 %

Si el compresor es utilizado, el tiempo de pago es de dos meses y la utilidad es mayor que 400%

La tabla 4.10 resume el estudio económico de este pozo, para T.P. de 2 1/2 y 4 pg de diámetro.

En el estudio de estos proyectos, la instalación del bombeo neumático continuo es recomendable.

En este capítulo no se trató la optimización del volumen de gas para una máxima utilidad. El objetivo fue encontrar el gasto máximo y mostrar la ganancia económica de la instalación de bombeo neumático de este pozo. Los procedimientos de optimización se discutieron en el capítulo III.

TABLA 4.8  
 PRODUCCION DEL POZO FLUYENTE - PROYECTO B

TIEMPO (mes)	PRODUCCION DE ACEITE ( $q_0$ ) (bbl/dca)	PRODUCCION ACUMULATIVA ( $N_p$ ) (bbl)
2.70	2 450	200 000
6.00	2 200	400 000
10.30	1 925	600 000
15.82	1 663	800 000
23.08	1 425	1 000 000
33.60	1 175	1 200 000
51.20	900	1 400 000
77.97	675	1 600 000
118.42	500	1 800 000

TABLA 4.9  
 PRODUCCION POR BOMBEO NEUMATICO-PROYECTO B

TIEMPO (mes)	PRODUCCION DE ACEITE ( $q_0$ ) (bbl/dca)	PRODUCCION ACUMULATIVA ( $N_p$ ) (bbl)
1.81	3 625	200 000
3.80	3 462	400 000
6.00	3 300	600 000
8.50	3 100	800 000
11.54	2 900	1 000 000
15.80	2 500	1 200 000

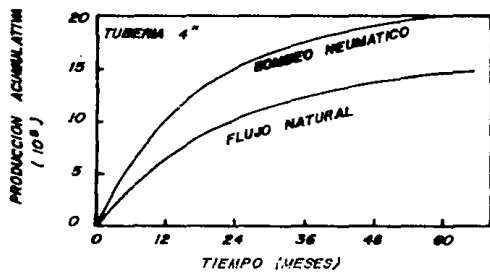


FIG. 4.6 PRODUCCION ACUMULATIVA ( $N_p$ ) CONTRA TIEMPO  
PROYECTO B



TABLA 4.10

ANALISIS DE PRODUCCION	PROYECTO A	PROYECTO B
	T.P. 2 1/2 pg. (bē/día)	T.P 4 pg. (bē/día)
Gasto máximo de producción por flujo natural	1 550	2 575
Gasto máximo de producción posible por B.N.	1 725	3 700
ANALISIS ECONOMICO		
a) Utilizando un sistema - central @10 % de descuento de gasto para pagar.	0.40 (año)	0.08 (año)
- Valor presente neto	\$ 1 991 667	
- Utilidad	368 %	>400 %
b) Utilizando un compresor - @10 % de descuento de gasto para pagar.	0.75 (año)	0.17 año
- Utilidad	330 %	>400 %

CAPITULO V  
PROGRAMA DE COMPUTO

En los capítulos III y IV se han descrito de manera detallada los métodos y procedimientos de optimización de la RGTI en instalaciones de bombeo neumático continuo.

Se desarrolló un programa de cómputo que permite diseñar y analizar instalaciones de bombeo neumático. Este se realizó en lenguaje Fortran, es de fácil manejo y los resultados son confiables, previo ajuste de las correlaciones empleadas con da-tos medidos de campo.

Con la finalidad de facilitar el análisis, únicamente se consideró el comportamiento de afluencia al pozo con la ecuación de Índice de productividad constante, pero el programa está elaborado, de tal manera que pueden acoplarse subrutinas que consideren los modelos de Vogel, Standing, Weller, Fetkevitch, etc., dependiendo de las presiones del yacimiento con respecto a la presión de saturación.

La determinación del gasto de aceite que puede obtenerse del pozo de bombeo neumático continuo está fundamentado en los métodos descritos en el capítulo III.

El gasto de aceite se obtiene en función de variables tales como: presión de operación superficial del gas de inyección, volumen de gas de inyección, etc., la producción del pozo aumen-

ta a medida que se incrementa el volumen de gas inyectado, hasta un valor máximo a partir del cual el gasto de aceite disminuye, por el incremento de las caídas de presión por fricción.

La correlación de flujo multifásico vertical que se utiliza para determinar los gradientes de presión fluyendo a través de la tubería de producción es, la de Poettmann y Carpenter. Y la de Bertuzzi, Tek y Poettmann para determinar las caídas de presión a través de la tubería de descarga. Ambas correlaciones se utilizan como subrutina en el programa de cómputo.

#### ENFOQUE EN EL DESARROLLO DE LAS CORRELACIONES

Las correlaciones existentes para el cálculo de distribuciones de presión con flujo multifásico, pueden clasificarse en tres tipos bien definidos:

Tipo I.- No se considera resbalamiento entre fases. La densidad de la mezcla se obtiene en función de las propiedades de los fluidos, corregidas por presión y temperatura. Las pérdidas por fricción y los efectos del colgamiento se expresan por medio de un factor de fricción correlacionado empíricamente. No se distinguen patrones de flujo. Dentro de este tipo están incluidos los métodos de Poettmann y Carpenter, Fancher y Brown y Baxendell y Thomas.

Tipo II.- Se toma en cuenta el resbalamiento entre las fases. La densidad de la mezcla se calcula utilizando el concepto de

colgamiento. El factor de fricción se correlaciona con las propiedades combinadas del gas y líquido. No se distinguen regímenes de flujo. El método de Hagedorn y Brown cae dentro de este tipo de correlaciones.

Tipo III.- Se considera resbalamiento entre las fases. La densidad de la mezcla se determina mediante el colgamiento. El factor de fricción se correlaciona con las propiedades del fluido en fase continua. Se distinguen diferentes patrones de flujo. Las principales correlaciones que caen dentro de esta clasificación son: Duns y Ros, Orhiszewski, Aziz, Beggs y Brill, Chierici, Gould y Tek, etc.

La determinación de las distribuciones de presión en las tuberías de producción permite

- a) Diseñar las tuberías de producción y de descarga.
- b) Obtener el punto de inyección de gas en el bombeo neumático.
- c) Diseñar aparejos de producción artificial (neumático, mecánico, eléctrico).
- d) Obtener  $P_{wf}$  sin necesidad de intervenciones en los pozos.

## POETTMANN Y CARPENTER

Publicaron en 1952 un procedimiento analítico para determinar las caídas de presión en tuberías verticales con flujo multifásico. Su ecuación principal la desarrollaron a partir de un balance de energía entre dos puntos dentro de la tubería de producción. Esta ecuación es:

$$\frac{\Delta P}{\Delta h} = \frac{1}{144} \left( \rho_{ns} + \frac{f_{tp} (q_o M)^2}{2.979 \times 10^3 \rho_{ns} d^5} \right)$$

El factor de fricción  $f_{tp}$  se obtiene con la siguiente ecuación:

$$f_{tp} = 5.415 \times 10^{-3} - 5.723 \times 10^{-4} a + 1.848 \times 10^{-4} a^2 + 3.5843 \times 10^{-6} a^3$$

Donde:

$$a = \frac{d \times 10^6}{q_o M}$$

Donde:

$\frac{\Delta P}{\Delta h}$  = Caída de presión, lb/pg<sup>2</sup>/pie

$q_o$  = Gasto de aceite, bl/día

$M$  = Masa de la mezcla a condiciones esc., lbm/bl @ c.S.

$d$  = Diámetro interior de la tubería de producción, pg.

$f_{tp}$  = Factor de fricción, adim.

$\rho_{ns}$  = Densidad de la mezcla sin resbalamiento, lbm/pie<sup>3</sup>

## CORRELACION DE BERTUZZI, TEK Y POETTMANN

Publicaron en 1956 un procedimiento para determinar las caídas de presión en tuberías horizontales.

Las características principales de esta correlación son:

- Simplicidad de su aplicación.
- Es independiente del patrón de flujo.
- No se consideran pérdidas de presión por aceleración.
- La densidad y el gasto másico de la mezcla están definidos por las ecuaciones:

$$\rho_{ms} = \rho_L \lambda + \rho_g (1-\lambda)$$

$$W_m = W_L + W_g$$

Donde:

$$W_L = W_o + W_w$$

$$W_o = \rho_o q_o \beta_o / 15391$$

$$W_w = \rho_w q_w \beta_w / 15391$$

$$W_g = \rho_g q_o (R-R_s) \beta_g / 66400$$

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{q_o (R-R_s) \beta_g}{5.615 (q_o \beta_o + q_w \beta_w)}}$$

La ecuación del gradiente de presión por fricción es:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{174.158 f_{tp} W_m^2}{\rho_{ns} d^5}$$

Donde:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \text{Caída de presión, lb/pg}^2/\text{pie}$$

$\rho_{ns}$  = Densidad de la mezcla sin resbalamiento, lbm/pie<sup>3</sup>

$W_m$  = Gasto de masa, lbm/seg.

$f_{tp}$  = Factor de fricción, adim.

El programa de cómputo permite elegir el método mediante el cual se desee determinar la relación gas total líquido más económica, los métodos que presenta el programa de cómputo son: el de pendiente económica y utilidad sobre el aceite.

Utilizando el método de pendiente económica con el programa de cómputo se determina la presión y profundidad del punto de inyección, relación gas total líquido más económica y gasto de aceite óptimo, dada una presión de operación superficial del gas de inyección.

Con el método de utilidad sobre el aceite el programa determina los parámetros anteriormente mencionados, en función de la presión de operación superficial del gas de inyección, costo de gas de inyección y utilidad sobre el aceite.

El diagrama de flujo del programa de cómputo se muestra en la figura 5.1 y el listado con los resultados obtenidos se encuentran al final de este capítulo.

El programa de cómputo que se elaboró fue alimentado con datos - del ejemplo de diseño de bombeo neumático más económico con  $P_{th}$  variable del capítulo III.

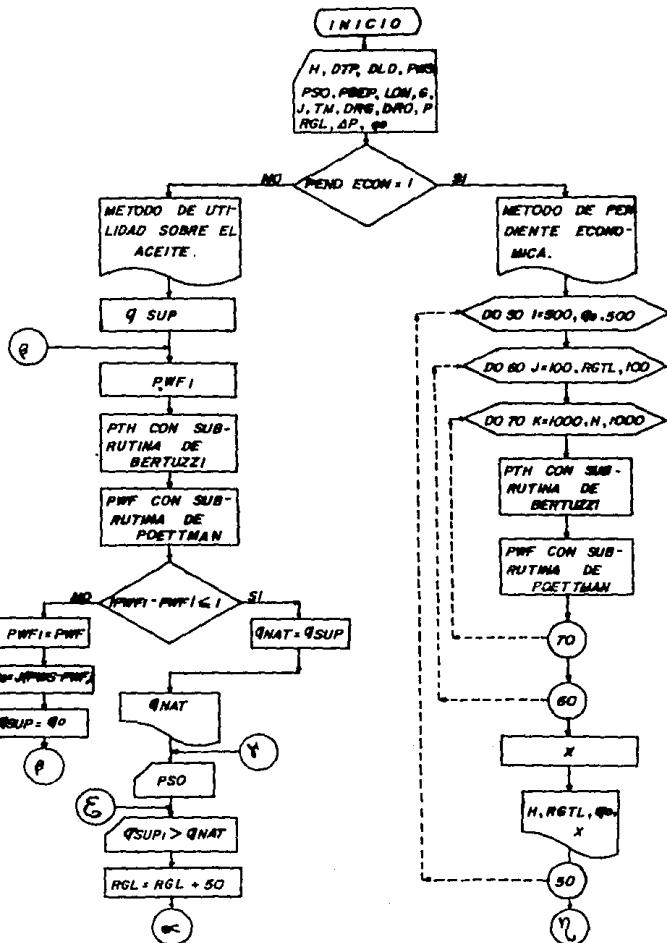
Las correlaciones de flujo multifásico utilizadas no fueron las mismas que la del ejemplo en referencia; además no fueron ajustados con datos medidos.

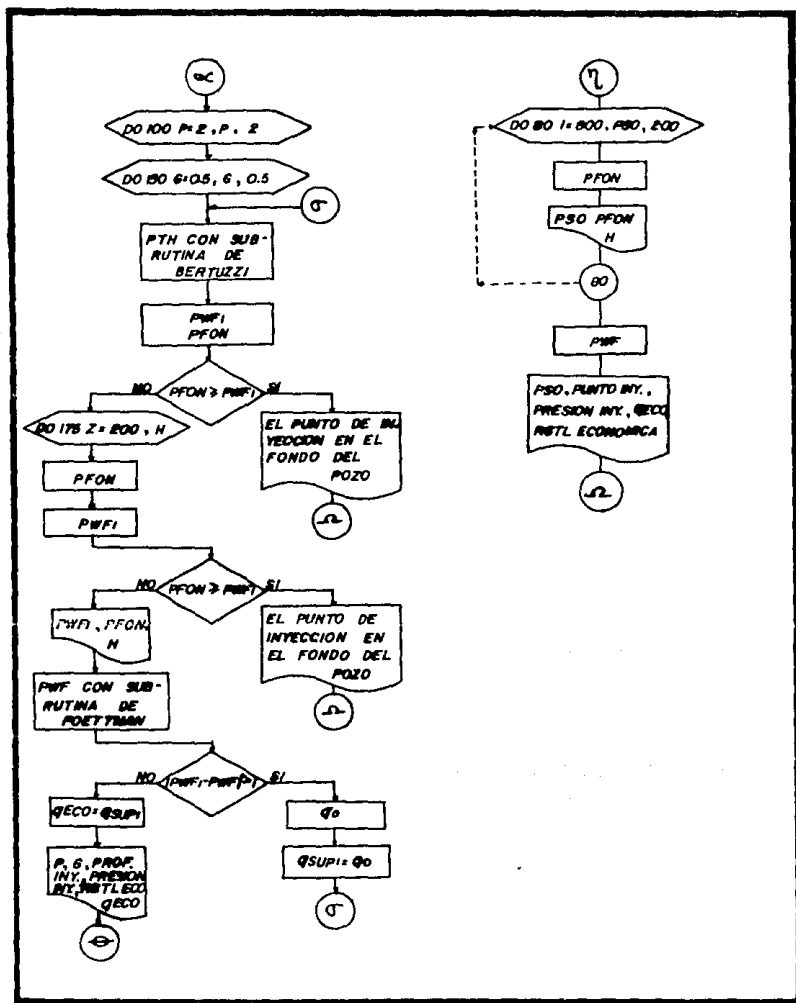
Por lo anterior se puede observar que los resultados del programa, tanto para los métodos de pendiente económica como el de utilidad sobre el aceite difieren a los anotados en las tablas 3.4 y 3.6.

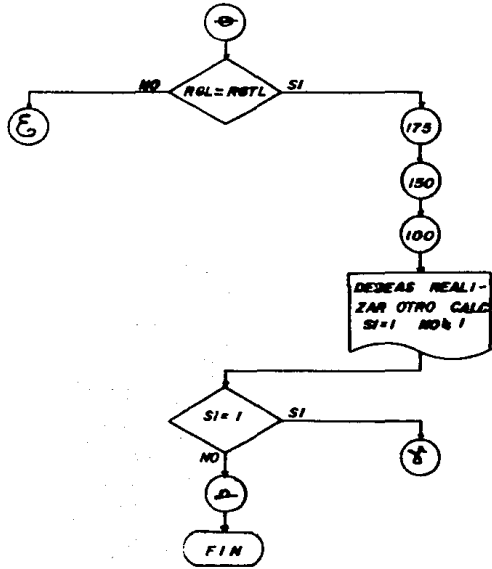
Se recomienda un ajuste adecuado en función de los datos medidos del o de los pozos en estudio de un determinado campo.



FIG. 5.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE COMPUTO











```

1  A1=0.3150h
2  A2=-1.0467
3  A3=-0.5793
4  A4=0.5353
5  A5=-0.6173
6  A6=0.1044g
7  A7=0.6R(5)
8  AR=0.4P446
9  ZC1=(A1+A2/TR+A3/TR**3)*DNH+(A4+A5/TM)*DR**2+(A5*A6*DR**5)/TR
10 ZC2=ZC1+(A7*ID**2/TR**3)*(1+AR*DR**2)*(FXP(-AR*DR**2))+1
11 ZI=AR*ZC2-ZC1
12 TFX1,IF,0.01) GOTO 10
13 ER=ZC
14 GOTO 15
15 RC=(0.07R25*7C*(TM+460))/PM
16 GOTO 20
17 5  RS=RR
18 A1=1433
19 A2=5
20 A3=17.2
21 A4=-11.40
22 A5=12.61
23 A6=10884
24 C1=(A1+A2*RS+A3*TM+A4*DRG+A5*DRD)/(A6*PM)
25 DRD=0.472+0.000147*(RS*(DRG/DRD)**0.5+1.25*TM)**1.175
26 DR=350.5e(11+D**DRD)+.0744*DRG
27 DRF=DR/(5.615*(DRD+HW*DRD)+(D-DR)*DRG)
28 DR=(DR*10**6)/(D**W)
29 WNTTF(6.8) 34
30 FT=5.415*10**(-4)*5.723*10**(-4)*AP+.1.84R*10**(-4)*AR**2
31 FTD=FT+.3.5R43*10**(-6)*AR**3
32 AP4=(1.0/144.0)*(DMS+(FTD*(D**W)**2)/(2.479*10**5*(DMS*D**5)))
33 A1=AP/APH
34 I2=1.1+A1.
35 YF(1.2,GF,0) GOTO 30
36 I1=1.2
37 P1=PH2
38 WNTTF(6.8) 11
39 WNTTF(6.8) P1
40 C(17) 40
41 10  PWF=P1+(APH*(D-1.1))
42 WNTTF(6.8) 0.044
43 WNTTF(6.8)
44 CALL EXIT
45 PND
46 SUBROUTINE WFTUZZT(H,D,DRD,DRG,DRF,PM,AP,LON,PTH)
47 DIMENSION
48 I1=0
49 D2=P1+AP
50 PM=P1+AP/2.0
51 AS=141.5/DRD-131.5
52 DS1=(P1/18)*(10**(-0.6175*AS))/(10**(-0.0004*(TM)))**1/0.83)
53 DS=DRG*DS1
54 DRD=0.472+0.000147*(DS*(DRG/DRD)**0.5+1.25*TM)**1.175
55 DRF=DR/(5.430*DRD+.01362*DS*DRG)/PH
56 W1=(0.4+0.5794*DRG)*(TM+460)**1.53
57 K=K1/200+50.4*DRG*(TM+460)
58 Y=3.5*(400.0/(TM+460))+0.2947*DRG
59 Y=2.4-0.2*Y
60 VG=(F*(Y)*(Y)*(DRG/62.42h)**Y))/1000
61 Y1=10**((3.0324-0.07023*AS)
62 Y1=1+TM**(-1.163)
63 VM=(10**Y1)-1.0

```

```

1  A=10.715*(WS+100.0)**(-0.515)
2  B=5.44*(PN+150.0)**(-0.138)
3  V0=A*B*V0**4
4  TR=(T**460)/(238+210*DRG)
5  DR=DR/(740-100*DR(1))
6  ZS=0.4
7  NR=0.27*PW/(ZS*TR)
8  A1=0.31506
9  A2=-1.0467
10 A3=-0.5783
11 A4=0.533
12 A5=-0.6123
13 A6=-0.10489
14 A7=0.08157
15 A8=0.08446
16 ZC1=(A1+A2/TP+A3/TP**3)*DR+(A4+A5/TP)*DR**2+(A6+A6*DR**5)/TR
17 ZC2C1*(A7*DR**2/TP**3)+(A8*DR**2)*(1+AR*DR**2)**XP(-AR*DR**2)+1
18 TF=ABS(ZS-ZC1)*F.0.001) GOTD 1
19 ZS=ZC
20 GOTD 2
21 RC=(0.02275*ZC*(TM+460))/PW
22 DFC=0.0744*DRG/RC
23 W=(DFNC+D000)/5301.0
24 W=(DFNC+D0*(R-PS1)*HC/R6400.0
25 W=W+J+WC
26 CCE1.0/1+(0*(P-PS)*RC)/(5.015*(D*PI+LW1))
27 WRITE(6,*) 'CALCULATED PFI FACTOR BY PROCEDURE'
28 PFI=27737.0*W/(D*DFNC)
29 RC=27737.0*W/(D*DFNC)
30 FT=W/C/WI.
31 AA=FT/(1.0+FT)
32 RH=1.0/FT*PFI.0*FT)
33 WA=(RC**0.83)*(PI.0*RR)
34 FT*(TA*F.400) GOTD 3
35 FT*(TA*F.10000) GOTD 4
36 YY=ALOG10(TA)-2.690
37 XY=10**((1.225*FT-0.06561*ALOG10(TA)-0.37)
38 XZ=10**((0.40*FT-0.12616*ALOG10(TA)-1.702)
39 AF=YZ-XY
40 FT=XY-0.6561*YY+(1.1056+1.7773*AF)*YY**2
41 FT=FT-(0.4621+0.90817*AF)*YY**3
42 FTD=1.0*FT
43 GOTD 1)
44 FTD=10**((1.225*FT-0.06561*ALOG10(TA)-0.37)
45 GOTD 1)
46 FTD=10**((0.40*FT-0.12616*ALOG10(TA)-1.702)
47 DMS=DEGREE(CG+DFNC*(1.0-CG)
48 APH=(174.15*FT*PH**2)/DMS*DI.0**5
49 BI=AP/APH
50 IZ=1.1+BI
51 F(I.2-CT.LON) GOTD A
52 I.1=I.2
53 P1=PP
54 WRITE(6,*) I.1,DI
55 GOTD 7
56 DTH=DI*AP*(I.1+L.1)
57 WRITE(6,*) DTH,LON
58 CALL EXIT
59 FND
60 STOP
61 FND

```

1000

## MAYORD DE PERMITEE ECONOMICA

PSD	PROP. INV.	PREBION INV.	RECTI. FCO.	GASTO FCO.
800	3513	-766	385	794
1800	4960	1030	584	948
1200	6000	1280	-650	1105

DESEAS HACER OTRO CALCULO SI=1



METODO DE UTILIDAD SOBRE EL ACEITE  
 RGTI. ECONOMICA PARA UNA PSD DE 800 LB/PG2

UTILIDAD DEL ACEITE	COSTO GAS	PROF. INY.	PRESION INY.	RGTI. ECON.	GASTO ECON.
2.0	0.5	3820.0	765.0	848.0	452.0
2.0	1.0	3820.0	765.0	848.0	412.0
2.0	1.5	3818.0	764.0	846.0	382.0
2.0	2.0	3817.0	764.0	840.0	364.0
2.0	2.5	3812.0	761.0	832.0	351.0
4.0	0.5	3819.0	764.0	853.0	452.0
4.0	1.0	3818.0	764.0	852.0	436.0
4.0	1.5	3818.0	764.0	849.0	411.0
4.0	2.0	3816.0	761.0	845.0	392.0
4.0	2.5	3816.0	761.0	836.0	375.0
6.0	0.5	3820.0	765.0	853.0	452.0
6.0	1.0	3819.0	764.0	853.0	452.0
6.0	1.5	3818.0	764.0	852.0	438.0
6.0	2.0	3818.0	764.0	849.0	421.0
6.0	2.5	3817.0	761.0	846.0	409.0
8.0	0.5	3820.0	765.0	853.0	452.0
8.0	1.0	3820.0	765.0	853.0	452.0
8.0	1.5	3820.0	765.0	852.0	449.0
8.0	2.0	3819.0	764.0	851.0	437.0
8.0	2.5	3819.0	764.0	849.0	428.0
10.0	0.5	3820.0	765.0	853.0	452.0
10.0	1.0	3820.0	765.0	853.0	452.0
10.0	1.5	3820.0	765.0	852.0	452.0
10.0	2.0	3820.0	765.0	852.0	447.0
10.0	2.5	3819.0	764.0	850.0	436.0

DESEAS HACER OTRO CALCULO SIMI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para lograr un buen entendimiento del bombeo neumático continuo es necesario reafirmar las bases teóricas en que se fundamenta, para ello se definen algunos de los principales conceptos manejados, tales como: gradiente geotérmico, propiedades y leyes de los gases, así como las ecuaciones que las rigen, etc.

En este trabajo se analiza el bombeo neumático continuo como uno de los sistemas artificiales de producción más eficientes, para ello se hace mención de las características y mecanismos de operación de este sistema.

Para implantar este sistema artificial es necesario realizar un estudio de la capacidad de aportación del pozo, así como determinar cuáles son las condiciones más favorables para la instalación del bombeo neumático continuo, con la finalidad de optimizar los diseños y con ello la obtención de mejores resultados.

Antes de realizar el diseño de bombeo neumático continuo deben determinarse los parámetros de diseño por medio de los métodos de pendiente económica o utilidad sobre el aceite, tales como: relación gas total líquido más económico, y el punto óptimo de inyección conociendo previamente el índice de productividad, la relación gas de formación líquido, el diámetro de la tubería de producción, etc.

Es necesario realizar un análisis económico para determinar si es recomendable la instalación del bombeo neumático continuo, - considerando los costos de gas, de compresión, de operación, - etc.

El programa de cómputo presentado en este trabajo, permite al - Ingeniero Petrolero analizar y diseñar las instalaciones de bombeo neumático continuo en forma más eficiente, es de fácil manejo, a través de él se puede determinar la RCTL con los métodos mencionados anteriormente. Mediante este programa se pueden optimizar variables tan importantes como son: presión de operación superficial, gasto de aceite, relación gas total líquido más - económico, además de obtener el punto de inyección óptimo.

Es recomendable utilizar el procedimiento descrito en este trabajo para optimizar las instalaciones de bombeo neumático continuo.

Se recomienda que al utilizar el programa de cómputo se realice un ajuste de las correlaciones de flujo multifásico en función de los datos medidos del c de los pozos en estudio de un determinado campo.

Ab	=	Area del fuelle de la válvula, $\text{pg}^2$
Ap	=	Area del asiento de la válvula, $\text{pg}^2$
C <sub>t</sub>	=	Factor de corrección por temperatura, adimensional
D	=	Profundidad, pie
G	=	Costo de gas de inyección, $\$/\text{Mpie}^3$
G1	=	Gradiente geotérmico, $^{\circ}\text{F}/100\text{pie}$
Gfa	=	Gradiente fluyente arriba del punto de inyección, $\text{lb}/\text{pg}^2/\text{pie}$
Gfb	=	Gradiente fluyente abajo del punto de inyección, $\text{lb}/\text{pg}^2/\text{pie}$
J	=	Indice de productividad, $\text{bl}/\text{día}/\text{lb}/\text{pg}^2$
m	=	Peso total, lb
M	=	Peso molecular, $\text{lb}/\text{mol}-\text{lb}$
n	=	Número de moles, $\text{mol}-\text{lb}$
Np	=	Producción acumulativa, bl
P	=	Presión, $\text{lb}/\text{pg}^2$ man.
P	=	Utilidad sobre el aceite, $\$/\text{bl}$
Ppc	=	Presión pseudocrítica, $\text{lb}/\text{pg}^2$ abs.
Ppr	=	Presión pseudoreducida, adimensional
P1	=	Presión de superficie, $\text{lb}/\text{pg}^2$ man.
P2	=	Presión de fondo, $\text{lb}/\text{pg}^2$ man.
Pc	=	Presión del gas en el espacio anular, $\text{lb}/\text{pg}^2$
Pth	=	Presión en la cabeza del pozo, $\text{lb}/\text{pg}^2$
Pd	=	Presión en el domo, $\text{lb}/\text{pg}^2$
Pdis	=	Presión disponible, $\text{lb}/\text{pg}^2$
(P <sub>t</sub> )iny	=	Profundidad del punto de inyección, pie
Pvc	=	Presión de cierre a la profundidad de la válvula, $\text{lb}/\text{pg}^2$
Pvo	=	Presión de apertura a la profundidad de la válvula, $\text{lb}/\text{pg}^2$
Psept	=	Presión de separación, $\text{lb}/\text{pg}^2$
Pso	=	Presión de operación superficial, $\text{lb}/\text{pg}^2$
Pt	=	Presión en la tubería de producción, $\text{lb}/\text{pg}^2$
P <sub>trc</sub>	=	Presión de calibración de la válvula a condiciones de superficie, $\text{lb}/\text{pg}^2$
Pwf	=	Presión de fondo fluyendo, $\text{lb}/\text{pg}^2$
Pws	=	Presión de fondo estática, $\text{lb}/\text{pg}^2$
q	=	Gasto, $\text{bl}/\text{día}$
R	=	Constante universal de los gases, $\text{lb}/\text{pg}^2-\text{pie}^3/\text{mole}-\text{lb } ^{\circ}\text{R}$
RGL	=	Relación gas de formación líquido, $\text{pie}^3/\text{bl}$
RGL <sub>iny</sub>	=	Relación gas inyectado líquido $\text{pie}^3/\text{bl}$
RGLT	=	Relación gas total líquido, $\text{pie}^3/\text{bl}$

$R_s$	=	Relación de solubilidad, $\text{pie}^3/\text{bl}$
$S_t$	=	Presión ejercida por el resorte, $\text{lb}/\text{pg}^2$
$T_{\text{fon}}$	=	Temperatura de fondo, $^{\circ}\text{F}$
$T$	=	Temperatura, $^{\circ}\text{F}$
$T_{\text{pc}}$	=	Temperatura pseudocrítica, $^{\circ}\text{R}$
$T_{\text{pr}}$	=	Temperatura pseudoreducida, adimensional
$T_{\text{sep}}$	=	Temperatura de separación, $^{\circ}\text{F}$
$T_{\text{sup}}$	=	Temperatura de superficie, $^{\circ}\text{F}$
$V$	=	Volumen, $\text{pie}^3$
$X$	=	Pendiente económica, $\text{lb}/\text{pg}^2/\text{pie}^3/\text{bl}$
$Z$	=	Factor de compresibilidad, adimensional
$\Delta P$	=	Amplitud de la válvula, adimensional
$\rho_{\text{aire}}$	=	Densidad del aire, $\text{lb}/\text{pie}^3$
$\rho_{\text{g}}$	=	Densidad del gas, $\text{lb}/\text{pie}^3$
$\rho_{\text{r}}$	=	Densidad relativa, adimensional
$\gamma_{\text{g}}$	=	Densidad relativa del gas, adimensional
$\gamma_{\text{w}}$	=	Densidad relativa del agua, adimensional
$\$$	=	Dólares

## B I B L I O G R A F I A

- Vogel J.V.: "Inflow Performance Relationship for Solution Gas Drive Well"., J.P.T. January 1968. pp. 83-93.
- González Hernández Servando y De La Garza Carrasco Nahum.: "Apuntes de Físico-Química y Termodinámica de Los Hidrocarburos", Fac. de Ingeniería, UNAM, 1988.
- Gómez Cabrera José Angel.: "Apuntes de Producción de Pozos 1", Fac. de Ingeniería, UNAM, 1988.
- Brown K.E.: "The Technology of Artificial Lift Methods". Petroleum Publishing Co. 1980, Vol. 2a pp. 95-224
- Nind, T.E.W.: "Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros". Editorial Limusa, 1987.
- Garaicochea Petrirena Francisco.: "Apuntes de Transporte de Hidrocarburos". Fac. de Ingeniería, UNAM, 1983.
- Bertuzzi A.F., Tek M.R. y Poettman F.H.: "Simultaneous flow of Liquid and Gas Through Horizontal Pipe". Trans. AIME, 1956.
- Poettman F.H. y Carpenter P.G.: "The Multiphase Flow of Gas, Oil and Water Through Vertical Flow Strings With Application to the Design of Gas Lift Installations". Drill, and Prod. Prac., API 1952.
- Loyo Fernández José A.: "Programa de Cómputo para instalaciones de bombeo neumático continuo". Tesis de maestría en Ing. Petrolera, DEPEFI, UNAM, 1987.
- Friedman L. Frank.: "FORTRAN" Fondo Educativo Interamericano, S.A., 1984.