

2ej  
4

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**



**APLICACION DE ANALISIS NODAL A SISTEMAS  
ARTIFICIALES DE PRODUCCION**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A N :  
MIGUEL SIMILIANO ARELLANO REYES  
GABRIELA VERONICA GRANADOS ALVIS  
OSCAR MORAN OCHOA

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

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

	Pagina
INTRODUCCION .....	1
BOMBEO NEUMATICO .....	34
BOMBEO ELECTRICO .....	111
BOMBEO HIDRAULICO .....	132
BOMBEO MECANICO .....	182

## I. INTRODUCCION

### I.1 ANALISIS NODAL

El objetivo del Análisis Nodal es combinar adecuadamente los componentes de un sistema de producción (pozo productor de gas o aceite) para predecir los gastos de flujo y optimizar los componentes en el sistema.

El Análisis Nodal se puede aplicar a todo el sistema que conforma el pozo, desde el límite exterior del yacimiento y a través de la formación productora, a través de los disparos incluyendo la sección de flujo en tubería de revestimiento entre zona disparada y empacador (colocación de bomba), sarta de tubería de producción, incluyendo cualquier restricción y válvulas de seguridad subsuperficiales, estrangulador superficial, línea de descarga y separador.

Un sistema de producción simple consiste de tres secciones o módulos:

- (1) Flujo a través del medio poroso.
- (2) Flujo a través de tubería vertical o direccional.
- (3) Flujo a través de línea de descarga horizontal o inclinada.

En un sistema complejo desde el yacimiento hasta el separador ocurren varias caídas de presión (ver figs. (1.5a), (1.5b) y (1.5c)). Comenzando desde el yacimiento las caídas de presión son:

$\Delta P_1 = P_{ws} - P_{wi}$  = caída de presión en el medio poroso.

$\Delta P_2 = P_{wi} - P_w$  = caída de presión entre zona de disparos y colocación de bomba o empacador.

$\Delta P_3 = P_w - P_r$  = caída de presión a través de un regulador, estrangulador o niple.

$\Delta P_4 = P_{ws} - P_{sv}$  = caída de presión a través de la válvula de seguridad.

$\Delta P_5 = P_{ws} - P_{su}$  = caída de presión a través de estrangulador superficial.

$\Delta P_6 = P_{su} - P_{sd}$  = caída de presión en línea de descarga.

$\Delta P_7 = P_{wt} - P_{wd}$  = caída de presión total en tubería de producción, la cual incluye  $\Delta P_1$  y  $\Delta P_2$ .

$\Delta P_8 = P_{wt} - P_{sd}$  = caída de presión total en línea de descarga, incluyendo estrangulador superficial.

La aplicación del Análisis Nodal permite diseñar, optimizar y analizar los sistemas de bombeo artificial (ver figs. 1.6 a 1.11).

El primer objetivo es determinar el gasto de flujo para cada método de bombeo. Sin embargo, el gasto no representa el único criterio en la elaboración final de una selección de bombeo.

En el diseño de sistemas de bombeo artificial para un pozo, se recomienda que inicialmente se realice el análisis considerando el pozo como fluyente; esto es, se prepara una gráfica gasto vs. presión de los sistemas de producción para ver si el pozo es

capaz de fluir y si es así, a qué gasto. El análisis del bombeo artificial puede realizarse sobre la misma gráfica. Numerosos pozos fluyentes muestran incremento en sus gastos al implementar bombeo artificial (ver fig. 1.2).

El propósito de cualquier sistema de bombeo artificial es proporcionar la energía adicional requerida para continuar la explotación racional del yacimiento. El proceso de generación y transmisión de energía varía según el sistema que se utilice.

En el caso de Bombeo Neumático Continuo, por medio de la inyección de gas a una presión relativamente alta (250 lb/pg<sup>2</sup> mínimo), se reduce la presión que ejerce la carga de fluido sobre la formación (por disminución de la densidad del fluido) creando la presión de fondo fluyendo necesaria para que el pozo responda y produzca al gasto deseado.

En el caso de Bombeo Hidráulico tipo pistón, mediante un fluido mótriz inyectado a presión al pozo, se accionan los pistones tanto del motor como de la bomba (instalada abajo del nivel de trabajo del fluido producido por el pozo) impulsando el fluido producido por el yacimiento hacia la superficie.

En el caso de Bombeo Mecánico, por medio de la unidad superficial, se cambia el movimiento giratorio de la flecha del motor a un movimiento oscilatorio en la varilla pulida, la cual, acciona la bomba permitiendo la entrada de fluido (que aporta la formación al pozo) en el interior del barril para después elevarlos a la superficie.

En el caso de Bombeo Eléctrico, se utiliza un sistema bomba motor, donde el motor proporciona la energía necesaria para impulsar a la bomba centrífuga de etapas múltiples. El tipo de etapa que se utilice, determina el volumen de fluido que se va a bom-

bear, el número de etapas determina la carga generada por la bomba y la potencia generada en el motor.

El diseño y análisis de cualquier sistema de bombeo puede dividirse en dos componentes principales; El primer componente es el yacimiento (relación de comportamiento de afluencia) el cual representa la habilidad de los pozos para producir fluidos, (ver fig. 1.1). El segundo componente nos representa la tubería total y el sistema de bombeo artificial. Este incluye al separador, línea de descarga, restricciones en la línea de descarga tales como estranguladores, sarta de tubería, restricciones en la sarta de tubería tales como válvulas de seguridad, y los propios mecanismos del sistema de bombeo artificial.

El comportamiento  $P_w$  puede determinarse variando los gastos y cuando este comportamiento es llevado sobre la misma gráfica -- con la curva IPR, se podrá determinar el gasto para un método particular de bombeo.

La fig. 1.2 muestra un conjunto de curvas que indican los gastos posibles para diferentes métodos de bombeo artificial. A manera de repaso la fig. 1.2 muestra un pozo fluyendo en forma natural bajo condiciones de flujo estable, notese que cada curva de comportamiento  $P_w$  corresponde a un método diferente de bombeo artificial y cruza a la curva IPR en un punto, además muestra una pendiente positiva (arriba, a la derecha) en el punto de intersección.

La fig. 1.3 muestra un pozo muerto; es decir, la curva de comportamiento no interseca la curva IPR. Este pozo necesita de algún tipo de bombeo artificial para trasladar la curva de comportamiento hacia abajo, haciendo intersecar a la curva IPR. Esto puede lograrse utilizando un método apropiado de bombeo artificial.

Que un pozo pueda ser capaz de fluir naturalmente no implica que no pueda ser instalado un sistema de bombeo artificial. Muchos pozos son capaces de producir mayores gastos cuando se coloca un sistema de bombeo artificial; esto es bastante frecuente en los proyectos de aceleración de gastos de producción o bien donde existe una situación de competencia.

Existen numerosos sistemas de bombeo artificial que utilizan bombas mecánicas sumergibles para desplazar el líquido hacia la superficie. Los tres principales son, bombeo mecánico, bombeo hidráulico y bombeo electrocentrífugo.

La bomba puede o no estar localizada en el fondo del pozo (a nivel del intervalo disparado). En algunas instalaciones la bomba se coloca en el fondo del pozo, teniendo como objetivo --- crear un decremento de presión como sea posible a fin de obtener los gastos máximos de producción.

La preparación de curvas de comportamiento se facilita cuando la bomba se coloca en el fondo (a nivel de los disparos). La razón principal es que la presión de succión de la bomba y la  $P_w$  resultan idénticas. Cuando la bomba está arriba del intervalo disparado, la presión de succión de la bomba y la  $P_w$  son diferentes.

La presión de fondo fluyendo se define como aquella que existe en el centro del intervalo disparado, necesaria para llevar -- los fluidos hasta el tanque de almacenamiento.

La presión de succión de la bomba es aquella que existe a la entrada de la bomba y puede diferir considerablemente de la  $P_w$ , dependiendo de la localización de la bomba.

Las figs. (1.4a, 1.4b, 1.4c, 1.4d y 1.4e) muestran que la curva  $P_w$  se prepara independientemente de la curva IPR, con esto



se puede ver que las condiciones del medio poroso se conservan es táticas mientras, mediante algún tipo de bombeo artificial se modifican las condiciones de flujo en tubería.

La fig. (1.11a) muestra una instalación donde la bomba se co loca arriba de la zona de disparos. Notese la localización de la presión de succión de la bomba (sumergencia) y la presión a nivel de los disparos (Nodo  $P_u$ ). La fig. (1.11b) ilustra este concepto a detalle. Notese que el flujo en tubería de revesti- miento se presenta desde el intervalo disparado hasta la succión de la bomba. Sabiendo la presión de succión de la bomba, se podrá extender ésta hacia el fondo y determinar la  $P_u$  (Nodo  $P_u$ ).

La fig. (1.13) muestra una instalación de bombeo artificial donde la bomba se encuentra colocada a nivel de los disparos.

Un término que con frecuencia no es comprendido es el de "le vantamiento efectivo". Por ejemplo una bomba debe colocarse a 10,000 pie, pero si ésta solo puede levantar la columna de fluido a 7,000 pie, la unidad deberá diseñarse para mayores requerimien- tos de potencia (H.P.) que la preestablecida (ver fig. 1.13b).

La extensión del gradiente fluyente abajo del punto de inyección hasta intersectar la línea de profundidad (gráfica profundi- dad Vs. presión), determina la posición del nivel dinámico.

El Nivel Dinámico es la profundidad que hay entre la superfi cie y la cara de la columna de fluido que se encuentra dentro del pozo bajo condiciones fluyentes, es decir, a una  $P_u$  y una  $\gamma$ . - Otra forma de visualizar el concepto es que el Nivel Dinámico es la profundidad a la cual la colocación de la bomba será tal que - manejando el mismo gasto, la presión de succión será cero.

Esto podrá ilustrarse con un ejemplo sencillo:

Suponiendo que se produce agua salada para un proyecto de 10

yeción de agua. Asumiendo que el gradiente de esta agua es de 0.5 PSI/pie, incluyendo el gradiente de fricción, y además que:

$$P_w = 2,400 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{profundidad} = 8,000 \text{ pie}$$

$$IP = 4 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

$$\text{gasto de diseño} = 3,200 \text{ bl/día}$$

La presión de fondo fluyendo requerida es:

$$P_w = P_w - (q \text{ a c.s./J}) = 2,400 - 3,200/4 = 1,600 \text{ lb/pg}^2$$

La  $P_w$  es capaz de soportar el flujo de agua salada a una altura de  $1,600/0.5 = 3,200$  pie. La profundidad hasta este punto es  $8,000 - 3,200 = 4,800$  pie. Así el Nivel Dinámico es de --- 4,800 pie. Sin embargo, si el pozo tuviese solamente 4,800 pie de profundidad y cero de presión en la cabeza ( $P_w$ ), fluiría naturalmente a un gasto de 3,200 bl/día. O bien, si se coloca la -- bomba a 4,800 pie y se crea una presión de succión cero en esta posición, el pozo proporcionaría 3,200 bl/día. Si la presión en la cabeza del pozo fluyendo es de 100 PSI, la bomba deberá descargar a una presión de:

$$100 + 4800(0.5) = 100 + 2400 = 2500 \text{ lb/pg}^2$$

Esto también es la  $\Delta P$  que la bomba debe crear para obtener - ese gasto y es:

$$\Delta P = (P_{\text{desc.}} - 0) = 2500 \text{ lb/pg}^2$$

Ahora, si colocamos la bomba en el fondo a 8,000 pie, la  $P_w$  y la presión de succión de la bomba son idénticas y son igual a - 1,600 lb/pg<sup>2</sup>. Sin embargo la bomba descarga a:

$$100 + 8000(0.5) = 4100 \text{ lb/pg}^2$$

La  $\Delta P$  que la bomba podrá crear es, sin embargo, la misma y -- es:

$$4100 - 1600 = 2500 \text{ PSI}$$

La misma bomba producirá los mismos 3,200 bl/día prescindiendo de que si está colocada a 4,800 pie o 8,000 pie. En la práctica la bomba se colocará a una profundidad mayor a los 4,800 pie para mantener alguna sumergencia sobre la bomba. Prescindiendo de la posición a la cual la bomba se coloca, se creará la misma  $\Delta P$  y de aquí que se requerirá la misma potencia.

El flujo multifásico del pozo es ligeramente diferente, como se apreciará en el ejemplo siguiente:

Si el pozo tiene 10,000 pie de profundidad, a una  $P_w$  de --- 2,000 lb/pg<sup>2</sup>, IP = 2 (supuesto constante), RGL = 300 pie a c.s./bl  $P_{wh} = 120 \text{ lb/pg}^2$ , se tiene una tubería de producción de 2 3/8" diam ext. ¿Cuál es la profundidad del nivel dinámico para un gasto - de 1,000 bl/día (todo aceite)?

La  $P_{wi}$  requerida por el pozo para proporcionar este gasto es:

$$2000 - 1000/2 = 1500 \text{ lb/pg}^2$$

La correlación de flujo multifásico apropiada nos determinará que una columna de fluido equivalente a 1,500 lb/pg<sup>2</sup> se encuentra a 5,000 pie desde el fondo o a una profundidad de 5,000 pie. Teóricamente un sistema de bombeo podrá colocarse a 5,000 pie, y se creará una presión de succión igual con cero en ese punto, obteniendo el gasto preestablecido. Entonces, la presión de descarga de la bomba será igual a todas las caídas de presión que ocurran arriba de los 5,000 pie, tales como caídas de presión en tubería de producción, línea de descarga, y presión en el separador; siendo aproximadamente 950 lb/pg<sup>2</sup>. Si éste pozo tuviese solamente 5,000 pie de profundidad, fluirían 1000 bl/día de aceite

con presión cero en la cabeza del pozo. Sin embargo con 10,000 pie de profundidad, la bomba solo tiene para trabajar desde 5,000 pie.

Otra forma de visualizar éste concepto es notando que la bomba debe crear una cierta presión de descarga para contrarrestar -- todas las caídas de presión arriba del nivel dinámico, conocida -- también como la  $\Delta P$  que la bomba puede crear si se coloca en el nivel dinámico. Si se supone para éste ejemplo que todo el gas -- (300 pie/bl) está siendo bombeado, la presión de descarga es aproximadamente 950 lb/pg<sup>2</sup> para una presión en cabeza de 120 lb/pg<sup>2</sup>, como se determinó con una correlación de flujo multifásico apropiada. Esta presión de descarga se incrementa cuando más gas es venteado porque disminuye el aligeramiento de la columna de fluido arriba de la bomba.

Existen numerosas razones para colocar una bomba abajo o cerca del nivel dinámico. Obviamente la bomba será sumergida lo suficiente de modo que permita una presión de succión lo suficientemente alta para prevenir cavitación y vencer cualquier caída de presión por alguna restricción, tal como aquellas que pueden existir a través de un separador de gas. La sumergencia en pie se define como el nivel de fluido en el espacio anular arriba de la bomba bajo condiciones de operación. La conveniencia de crear bajas presiones de succión de la bomba restringe a algunos sistemas de bombeo. Una regla general de 150 a 300 pie de sumergencia para pozos de aceite bombeando gas, restringe a algunas bombas. El manejo de volúmenes bajos de gas libre a través de la bomba permite tener profundidades de colocación más atractivas -- (menores).

El Bombeo Eléctrico requiere más sumergencia en pozos con al

tos volúmenes de aceite. Donde se tiene pozos con muy bajo volumen de aceite empleando bombeo mecánico se requiere muy poca sumergencia y en algunos casos se opera bajo condiciones de no sumergencia ( $P_s = 0$ ). Una sumergencia de 150 a 300 pie se considera un buen valor para eliminar problemas en el bombeo y prevenir excesivos trabajos de reparación. Esto puede ser imposible en algunos casos donde la  $P_m$  es extremadamente baja.

A mayor profundidad de colocación de bomba se incrementa la temperatura y el manejo adicional de gas libre puede abatirse. - El costo puede ser mayor colocando la misma unidad a una profundidad mayor. Esto requiere más cable para Bombeo Eléctrico, más varillas de succión para Bombeo Mecánico, y más tubería paralela para algún sistema de Bombeo Hidráulico. La principal ventaja para profundidades menores de colocación es que el gasto volumétrico total que succiona la bomba es menor debido a que se reduce el volumen de gas libre; es decir, se tiene una menor presión de succión lo que hace que se libere gas en el espacio anular.

Para determinar el gasto de succión que será manejado por la bomba, es necesario preparar curvas IPR que incluyan el gasto volumétrico total.

La curva IPR estándar se muestra en una gráfica de barriles de líquido a c. TQ./día Vs.  $P_m$ . Esto no incluye el incremento de volumen de aceite causado por gas en solución ni tampoco incluye el volumen de gas libre que la bomba tiene que manejar.

La fig. 1.12 muestra un diagrama típico de presión Vs. gasto, incluyendo curvas IPR para gastos en barriles a c. TQ, a c. yac. - y gasto volumétrico total del yacimiento incluyendo gas libre. - En algunas instalaciones de plataforma marina donde el venteo de gas puede no ser favorable se necesita de la bomba para manejar -

el gasto volumétrico total de aceite, agua y gas.

La bomba debe tener la capacidad suficiente para manejar el volumen total de fluidos, incluyendo gas libre.

El diseñar una bomba que tenga la capacidad para manejar el volumen extra de gas no quiere decir que la bomba se comportará como si ésta manejara un volumen equivalente de líquido. Pueden ocurrir otros problemas tales como cavitación de gas y golpeteo de líquido para Bombeo Mecánico, decremento en la eficiencia de la bomba para Bombeo Eléctrico, aumento de fugas en el pistoneo para Bombeo Hidráulico y Mecánico, y decremento en la eficiencia para bombas Jet. El único beneficio en llevar gas libre a través de una bomba es una disminución de la presión de descarga.

La manera de preparar curvas de comportamiento y, de aquí, determinar los gastos de flujo se presentara a continuación. -- Se emplea el mismo procedimiento general que para pozos fluyentes. El Bombeo Neumático es el más fácil de los métodos artificiales para preparar curvas de comportamiento por la similitud a un pozo fluyente. La única diferencia es que la relación gas de formación-aceite es suplementada con el gas de inyección ( $R_i = R_{in} + R_e$ ). Para el caso cuando el gas es inyectado en el fondo de la tubería (a nivel de los disparos), el procedimiento es idéntico que para un pozo fluyente excepto por el cambio en la relación gas-liquido total.

Para cada sistema de bombeo se deben considerar dos casos:

- 1) Se bombea solamente liquido.
- 2) Se bombea gas con el liquido.

Para ambos casos, se supone que el sistema de bombeo está colocado a nivel del intervalo disparado y que la presión en la cabeza y el tamaño de los conductos de flujo permanecen fijos. Para el caso 2, se supone que todo el gas asociado es bombeado con

el líquido. Las siguientes variables afectan el gasto:

(1) Factor de Volumen. Cuando se bombea gas por medio de un sistema de bombeo artificial, el factor de volumen es importante para predecir el gasto total de fluido producido a cualquier condición de presión y temperatura. Este volumen total, no exactamente el gasto de líquido, determina el número de etapas para una bomba eléctrica sumergible, el gasto de fluido motriz (Q.) para bomba hidráulica o jet, la velocidad de bombeo y la longitud de carrera para bombeo mecánico. El porcentaje de gas libre que manejará el mecanismo de bombeo también será considerado. Sin embargo, el problema de separación de gas en el fondo no se aborda en este estudio.

El volumen de l bl a c. esc. de líquido (+) gas asociado a presión y temperatura específica está dado por:

$$VF = (Wc)Bw + (1 - Wc)Bo + (RGL - (1 - Wc)Rs - (Wc)Rsw)Bg \dots (1.1)$$

Como es una práctica común ignorar Rsw y considerar Bw = 1, la ecuación anterior se reduce a:

$$VF = Wc + (1 - Wc)Bo + (RGL - (1 - Wc)Rs)Bg \dots (1.2)$$

Si un cierto porcentaje de gas es venteado antes de entrar al sistema de bombeo, la ecuación anterior quedará modificada:

$$VF = Wc + (1 - Wc)Bo + GIP(RGL - (1 - Wc)Rs)Bg \dots (1.3)$$

Donde GIP es el porcentaje de gas que pasa a través de el sistema de bombeo.

En algunos textos se menciona al recíproco de VF como "eficiencia volumétrica". En realidad, VF no tiene nada que ver con la eficiencia volumétrica a estimar para los mecanismos del sistema.

El volumen total de gasto de fluido producido (líquido + gas) a cualquier condición de presión y temperatura es entonces:

$$V = Q_{cs} VF \dots (1.4)$$

Para  $P_w$ , arriba del punto de burbuja, el IPR está representado por la siguiente relación lineal:

$$q_{c.s.} = IP(P_w - P_{wb}) \quad \dots (1.5)$$

Cuando  $P_w$ , declina abajo del punto de burbuja, el IPR ya no tendrá un comportamiento lineal. Para este caso, el IPR está dado por la ecuación de Vogel:

$$\frac{q_{c.s.}}{q_{max}} = 1 - 0.2 \left[ \frac{P_w}{P_{wb}} \right] - 0.8 \left[ \frac{P_w}{P_{wb}} \right]^2 \quad \dots (1.6)$$

Algunas veces, es común preparar curvas IPR tomando en cuenta el total de barriles de fluido producido, incluyendo gas.

Esto podrá establecerse multiplicando  $q_{c.s.}$  en la ecuación 1.5 o 1.6 por el factor de volumen  $V_F$  evaluado a la  $P_w$  y temperatura de la ecuación 1.2.

## I.2 SISTEMAS DE BOMBEO ARTIFICIAL

La posición relativa de los sistemas de bombeo está basada en el número de instalaciones existentes en todo el mundo, difiere de campo a campo, de estado a estado y de país a país, relativamente en el siguiente orden:

1. Bombeo Mecánico.
2. Bombeo Neumático.
3. Bombeo Electrocentrifugo.
4. Bombeo Hidráulico tipo pistón.
5. Bombeo Hidráulico tipo Jet.
6. Bombeo por Embolo (pistón libre).
7. Otros métodos.



Nuevos sistemas de bombeo se están probando y desarrollando continuamente. El bombeo de crudos viscosos pesados, requiere una atención especial por lo que se están probando métodos de diseño específicamente para éste propósito. Pozos localizados cogta afuera y en aguas profundas, presentan problemas específicos y las limitaciones de espacio superficial llegan a ser importantes.

El método de bombeo artificial se puede considerar antes de que el pozo es perforado. Obviamente en pozos exploratorios no podrá realizarse, pero se puede determinar en todos los pozos de desarrollo subsecuentes. El programa de perforación debe comenzar asegurando el diámetro del agujero que permitirá el diámetro adecuado de sarta de T.P. y T.R. Una de las mayores limitaciones para instalaciones de bombeo artificial es la instalación de pequeños diámetros de T.R., ya que de este modo se restringe el diámetro de T.P. para obtener el gusto de flujo fijado y, en particular, limita el tamaño de equipo recuperable de bombeo.

Las limitaciones de espacio superficial es un factor importante. Por ejemplo, si se provee compresores grandes para Bombeo Neumático o grandes generadores para Bombeo Eléctrico en plataformas marinas, en el diseño original se les proveerá de peso y espacio en la plataforma.

Para seleccionar un equipo de bombeo artificial se consideraran las características de producción, propiedades de los fluidos características del agujero, un plan de largo margen de recuperación, instalaciones superficiales, localización, fuente de poder disponible, problemas de operación, tipo de terminación, automatización, personal de operación, servicio disponible, y económicos.

### I.3 FACTORES DE DISEÑO

Los factores a considerar en el diseño de instalaciones de bombeo artificial son los siguientes:

1.- La capacidad productiva del pozo, es el factor más importante en la selección de un método de bombeo.

Para hacer una apropiada comparación de gastos para diferentes métodos de bombeo, es necesario establecer curvas de  $R_p$  para cada sistema de bombeo, tal como se muestra en la fig. (1.2).

El nodo solución para la determinación del gasto en esta fig se toma en el fondo del pozo frente al intervalo disparado. La intersección de cada curva con la curva IPR del pozo muestra el gasto para un método de bombeo particular. El gasto posible para cada método cambia dependiendo de las condiciones de cada pozo. Cada pozo será evaluado separadamente y muchos factores controlan el gasto de flujo. Por ejemplo, el gasto para Bombeo Neumático puede exceder a todos los otros métodos, si son manejados grandes volúmenes de gas libre por el mecanismo de bombeo, mientras que el Bombeo Eléctrico, puede mostrar altos gastos por alta productividad de agua en los pozos y baja relación gas-aceite en pozos de aceite.

2.- La cantidad de gas producido y, en consecuencia, la relación gas-líquido es un factor muy significativo en la selección del método de bombeo artificial. Si altos volúmenes de gas pasan a través del mecanismo de bombeo, puede esperarse una reducción en la capacidad de líquido para todos los sistemas de bombeo, y dejar al Bombeo Neumático como una de las alternativas más lógicas.

La habilidad de algunos sistemas de bombeo para manejar gas es dudosa. El Bombeo Electrico comienza perdiendo eficiencia -- cuando el volumen de gas in-situ a ser manejado excede 1% del -- fluido total bombeado. Las bombas de Bombeo Mecánico presentan candado de gas cuando se tiene alta producción de gas. Las bombas hidraulicas de pistón no presentan candado de gas, pero tienen que desplazar al gas, por lo que la capacidad de líquido es -- reducida. El gas libre también reduce la habilidad de las bombas Jet para manejar líquidos. Bombeo Neumático y bombeo con Embolo son convenientes para pozos de alta RGA.

Pocos de los sistemas de bombeo artificial son idealmente -- convenientes para manejar gas tal como el B.N.C., B.N.I. y Bombeo con Embolo. El B.N.C. es benefico si el gas de formación producido no es excesivo, esto es, si la inyección de gas adicional --- tiende a aligerar el gradiente fluyente. El B.N.I. puede bom--- bear pozos productores de gas, pero no utiliza el gas de forma--- ción. Un émbolo puede ser idealmente conveniente para pozos pro--- ductores de gas, pero el abastecimiento se hará por la comunica--- ción entre la tubería y el espacio anular en la mayor parte de -- los casos. El volumen y presión generados sobre la T.R. proporcionan la energía necesaria para empujar el embolo hacia la superficie en intervalos periódicos.

### 3.- Limitaciones por profundidad:

(a) La principal limitación por profundidad para bombas electricas ha sido la temperatura excesiva. Esta limitación se ha -- mejorado con algunas unidades que operan actualmente a 450 °F en pozos geotermicos. Sin embargo, se tendrá un acortamiento de la vida esperada del motor y el cable, conforme se incrementa la temperatura. Son convenientes grandes profundidades de colocación

para eliminar el bombeo de gas libre.

(b) El Bombeo Neumático está limitado principalmente por la disponibilidad de presión de gas de inyección, con pozos que operan con presiones superficiales de inyección que van de, 300 a -- 3,000 lb/og'. Sin embargo muchas válvulas de B.N. comienzan a mostrar un acortamiento de la vida esperada a presiones arriba de 1,500 lb/og', y las características operacionales de la válvula -- pueden ser menores que las optimas, debido a altas cargas de domo o muy fuertes o pesados resortes. Algunas válvulas de B.N. son operadas con buen éxito; sin embargo a presiones superficiales - de 2,500 lb/og' o mayores. Para B.N.C. se han realizado inyecciones a profundidades mayores de 12,000 pie. Sin embargo muchas - de las operaciones de alta presión utilizan orificios en el punto operante. El flujo intermitente ha sido utilizado a 12,000 pie, pero el retroceso de líquidos puede consumir más del bache original. Cuando se emplea en conjunción con un émbolo, una gran porción del resbalamiento puede eliminarse. La cámara de bombeo intermitente resulta más efectiva para grandes profundidades.

(c) La bomba Jet no es muy eficiente cuando se tiene que bombear a grandes profundidades. Requiere un mayor porcentaje de - sumergencia que otros sistemas de bombeo. Un mínimo de 20 % de sumergencia es necesario normalmente, y se incrementará el porcentaje si se desea una mejor eficiencia. Sin embargo algunas bombas Jet son colocadas a 11,000 pie y producen de 200 a 300 bl/día.

(d) El Bombeo Hidráulico con pistón, es el método artificial de bombeo más apropiado para pozos con profundidades mayores a -- los 12,000 pie. La facilidad para reemplazar la bomba (bomba - libre) en cortos tiempos, lo hace un método atractivo para grandes profundidades. Por ejemplo, suponiendo que se tenga una pro

ducción anormal de arena, la bomba libre podrá ser reemplazada periódicamente sin necesidad de extraer el aparejo.

(e) Algunos sistemas de Bombeo Mecánico operan a 12,000 pie; sin embargo, la potencia adicional para levantar la sarta de varillas puede resultar excesiva. El trabajo para levantar las varillas se realiza desde la profundidad de la bomba y no desde la -- profundidad efectiva de bombeo.

El Bombeo Mecánico es el sistema más ampliamente usado para pozos de profundidad media y baja. El gran número de pozos con Bombeo Mecánico nos indica que es un sistema atractivo. Muchos operadores trabajan a gusto con estas unidades de bombeo lo cual indica un factor importante en la selección de equipo de bombeo.

Las unidades especiales tales como la Lufkin, Mark II, Bethlehem, Alpha I y otros equipos, pueden bombear a profundidades mayores a los 10,000 pie.

4.- La flexibilidad de los métodos de bombeo, para cambiar de gasto cuando las características de producción del pozo cambian, es un factor importante. El gasto original fijado, para el cual el sistema de bombeo artificial fué diseñado, puede cambiar por las razones siguientes:

- (1) Decremento de la productividad del pozo, debido a una -- disminución de la  $P_m$  y/o habilidad de afluencia.
- (2) Incremento de la productividad del pozo, debido a un método de recueneración secundaria o terciaria, causando -- incremento en la  $P_m$  y/o habilidad de afluencia al pozo.
- (3) Errores que existen en los datos originales del pozo o -- correlaciones de flujo multifásico.
- (4) Un cambio en el gasto fijado, debido a factores tales como producción de arena, conificación, pozo competitivo, etc.

(a) El B.N. ofrece un amplio rango de flexibilidad, dentro de los rangos de gasto que éste es capaz de producir. Puede manejar desde miles hasta pocos barriles por día. El diseño original, puede requerir la instalación de más válvulas de B.N. que las necesarias para producir el gasto original fijado. Además una sustitución de válvulas de B.N. es necesaria si se cambia de flujo continuo a intermitente.

(b) Para los sistemas de Bombeo Mecánico e Hidráulico, se puede realizar fácilmente un cambio en las emboladas por minuto o longitud de carrera, entonces la flexibilidad en gasto es bastante fácil obtenerla, dentro de las limitaciones especificadas de gasto.

(c) Bombeo Eléctrico. Hasta el reciente desarrollo del controlador de frecuencia variable, el Bombeo Eléctrico era el menos flexible, para operar dentro de una velocidad y frecuencia especificadas, tal como 3,500 RPM a 60 ciclos de potencia y 2,915 RPM a 50 ciclos de potencia. La unidad de frecuencia variable de potencia, ha incrementado la flexibilidad de esta bomba sobre un amplio rango, y se considera ahora bastante flexible, para manejar un amplio rango de gastos.

(d) La bomba Jet es bastante sensible a cambios de gasto, y se tendrá cuidado para diámetros razonablemente cerca al de diseño. También es muy sensitivo a la presión de succión.

5.- La localización superficial resulta bastante crítica con algunos sistemas. El Bombeo Mecánico normalmente no es considerado para plataformas marinas, aunque numerosas unidades pueden establecerse en lagunas o lagos, como el lago Maracaibo de Venezuela.

Una nueva innovación de Bombeo Mecánico, se ha considerado en unas cuantas áreas marinas de Africa. Este sistema utiliza un malacate principal, como medio de levantamiento de la sarta de varillas de succión, y ocupa muy poco espacio.

Bombeo Neumático, Bombeo Eléctrico y Bombeo Hidráulico con pistón, son los sistemas generalmente considerados para operaciones marinas. El uso de agua como fluido motriz elimina el peligro de fuego de los sistemas hidráulicos. La bomba eléctrica, actualmente, no se considera suficientemente desarrollada para operaciones de recuperación de equipo. Las válvulas recuperables de B.N. y las unidades de Bombeo Hidráulico recuperables, ofrecen una apreciable ventaja cuando se tiene limitación de volumen. Si no se toman en cuenta los problemas de equipo recuperable, la bomba eléctrica será uno de los métodos más atractivos de bombeo para plataformas marinas.

La localización del sistema en áreas urbanas, requiere consideraciones ambientales apropiadas, y algunas veces la localización del sistema de potencia, tal como un compresor para Bombeo Neumático, o facilidades superficiales para bombeo Hidráulico resulta cómodo.

Los problemas ambientales, llegan a tener importancia en condiciones climáticas extremas (calor y frío excesivos).

5.- El bombeo de más y más aceites crudos pesados resulta no cerario. La mayor parte de éste aceite pesado es manejado con Bombeo Mecánico. El Bombeo Hidráulico ofrece una forma rápida de mezclar un aceite ligero motriz, con un crudo pesado de producción para reducir la viscosidad.

Se han ideado tipos especiales de bombeo para crudos pesados tal como la unidad Efflar. La eficiencia de la bomba eléctrica se reduce considerablemente, y el B.N. no parece muy atractivo. - El Bombeo Mecánico sin embargo, se emplea más extensivamente que otros métodos.

El bombear crudos pesados en campos que utilizan torrentes de vapor, requiere atención especial para fluidos muy calientes.

7.- Los problemas de operación, ofrecen dificultad para algunos métodos de bombeo, e incluyen arena, parafina, incrustaciones corrosión, emulsiones, temperatura de fondo, y clima superficial.

(a) La producción de arena causa problemas de erosión, para todo tipo de bombeo artificial. El Bombeo Neumático, es el único método que no requiere que el fluido cargado de arena, pase a través del mecanismo de bombeo. La invasión de arena arriba del nivel de colocación de la bomba, puede causar problemas de recuperación de equipo (pescado).

(b) La acumulación de parafina en la parte superior de la sarta de la tubería de producción, cabeza del pozo, o línea de descarga, causará caídas de presión que reducirán la eficiencia. Se requiere una remoción o prevención.

El Bombeo Mecánico, tiene ventaja sobre otros métodos de bombeo, puesto que las varillas proporcionan una acción de raspado continuo. Las raspaduras o surcos, pueden ayudar a remover la parafina. Fluidos a altas temperaturas e inhibidores pueden circularse inmediatamente en un sistema hidráulico. Los embolos sirven como raspadores automáticos de parafina.



(c) La depositación de incrustaciones, reducirá el diámetro interior de la tubería, por tanto decrece la eficiencia. El B.-N. puede agravar la depositación de incrustaciones. La prevención por aditivos químicos, puede alargar la vida de la bomba, y mantiene el diámetro interior de la tubería. Los embolos mantienen la tubería limpia.

(d) La corrosión puede originarse por electrólisis, entre diferentes tipos de metal, H<sub>2</sub>S o CO<sub>2</sub>, contenidos en el fluido producido, alta salinidad, u oxigenación de metales. La fragilidad originada por el H<sub>2</sub>S es el mayor problema y acelera el debilitamiento de la sarta de varillas, si las varillas están excesivamente cargadas. Bombear gas con gas corrosivo no resultará económico.

(e) Anticipar los problemas de emulsión, cuando se planea y selecciona el método artificial de bombeo, es dificultoso. Las emulsiones causan altas caídas de presión anormales en la tubería.

(f) Altas temperaturas de fondo, reducen la vida aparente de algunos tipos de equipo de bombeo. La bomba-motor y cable de bombeo Eléctrico son afectados. Se deberán tomar precauciones cuando la temperatura exceda los 300 °F. Se requerirán altos costos en metalurgia, y sellos en todo el equipo, incluyendo empacadores, tubería, equipo en la cabeza del pozo, y equipo de bombeo de fondo.

(g) condiciones climáticas extremas en la superficie, pueden influir en la selección del equipo de bombeo. Climas muy calientes, originan problemas de recalentamiento en el equipo y se requerirá de un sistema especial de enfriamiento. Clima muy frío causa problemas de congelamiento en combustibles, y fragilidad de las conexiones eléctricas. También, muchas áreas, experimentan altos vientos que causan daño superficial, y polvo o nieve pueden causar problemas operacionales.

(h) La habilidad técnica del personal operativo de campo, -- puede influenciar la selección del bombeo artificial. El bombeo Mecánico, ofrece condiciones de operación menos molestas para el personal de campo, que los otros tipos de bombeo. La supervisión ingenieril, será requerida para bombeo Neumático, con instrucciones operativas especiales para bombeo Hidráulico, Eléctrico y Jet.

(i) Uno de los factores más importantes en la selección de un método de bombeo artificial, es la disponibilidad de personal de servicio competente, partes de reemplazamiento, y equipo. En algunas áreas, el cambio de un tipo de bombeo menos deseable, se ha hecho solamente sobre la disponibilidad de personal de servicio. La disponibilidad de partes de reemplazamiento, es igualmente tan importante como el personal de servicio. Si un equipo de bombeo no puede ser atendido y reparado rápidamente, un método de bombeo alternativo podrá elegirse.

8.- Seis factores económicos representan los parámetros más importantes en la selección del equipo de bombeo artificial:

- (1) Capital de inversión inicial.
- (2) Costo mensual de operación.
- (3) Vida del equipo.
- (4) Número de pozos a bombearse.
- (5) Excedente de equipo disponible.
- (6) Vida del pozo.

Cada sistema de bombeo artificial, tiene limitaciones económicas y operativas, que lo pueden eliminar considerando ciertas condiciones de operación.

Las normas económicas y operativas, están perfectamente bien definidas por la experiencia, especialmente si se está dentro de condiciones de operación bien establecidas.

#### I.4 SELECCION DEL SISTEMA ARTIFICIAL ADECUADO

La selección de un método de bombeo artificial se hará con mucho cuidado.

El criterio principal de selección es el *gasto*. Otros factores, tales como manejo de gas, localización y economía, son muy importantes.

1. El Bombeo Mecánico es el tipo de sistema de bombeo más ampliamente usado. Historicamente, la principal ventaja ha sido la familiaridad de este tipo de bombeo para el personal operativo. Una de las principales desventajas ha sido la limitación en profundidad. Sin embargo, unidades con grandes capacidades de carga y alta resistencia de las varillas al esfuerzo, permiten operar a grandes profundidades (12,000 pie).
2. El Bombeo Neumático e Hidráulico proporcionan el rango más flexible en profundidad y *gasto*, de todos los tipos de bombeo. El Bombeo Neumático también puede usarse para "arrancar" pozos que fluyen naturalmente, para el empuje (respresionamiento) del flujo de agua en pozos de inyección, para la descarga de líquidos en pozos de gas. La recuperación de válvulas, por medio de línea de acero lo hace un sistema muy atractivo.
3. El Bombeo Hidráulico, puede operar hasta profundidades de 18,000 pie. Las bombas Hidráulicas pueden funcionar con sartas de venteo, y anclas de gas, para manejar RGA's corranas a los 4,000 pie<sup>3</sup> a c.s./bl o., dependiendo de la productividad. La gran profundidad en los pozos, nos lleva

a requerir alta  $P_o$  la cual, en un momento dado, puede limitar la producción para pozos con alta  $P_{ul}$ .

4. La bomba eléctrica sumergible ha sido asociada con la producción de altos volúmenes de fluido. Se emplea para incrementar la descarga de agua producida por formaciones superiores, que invaden formaciones productoras de aceite. La bomba será operada por cable, y colocada en un nivel de asiento, para inducir el flujo y posteriormente, remover el aparejo cuando el pozo fluya naturalmente. La potencia límite depende del tamaño de la flecha que pueda instalarse. Una bomba sumergible nunca se colocará abajo del intervalo disparado, a menos que se utilice una chaqueta, para que el fluido pase por el motor y lo enfríe.
5. El bombeo Jet ofrece un equipo de fondo, sin partes de operación. Aún no se conoce una limitación completa, pero se han instalado bombas abajo de los 11,000 pie, dando 200 bl/día y otras produciendo 25,000 bl/día a poca profundidad de instalación. Se requiere alta presión del equipo, tuberías para el fluido motriz, y cabezales. Se proveerá de facilidades para filtrar, limpiar, y tratar el fluido.
6. Se tiene disponible otros sistemas de bombeo, que pueden cumplir las necesidades de un pozo en particular, y serán considerados donde sean aplicables.
7. Se tendrá en cuenta los costos por servicio, reparación, disponibilidad de partes y equipo de cambio. Un buen método de bombeo artificial, se seleccionará considerando cuidadosamente todos los aspectos de instalación, diseño, disponibilidad y servicio.

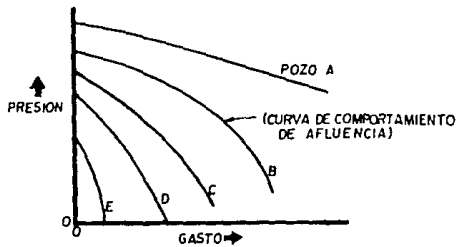


FIGURA 1.1  
CURVAS TÍPICAS DE COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA

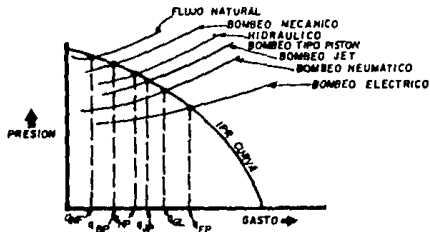


FIGURA 1.2  
CURVAS  $P_{wf}$  PARA SISTEMAS DE BOMBEO ARTIFICIAL

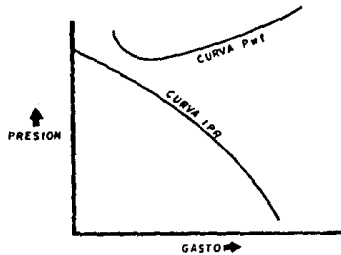


FIGURA 1.3  
POZO MUERTO

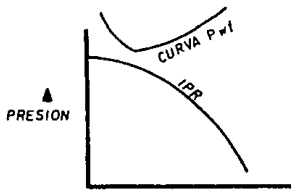


FIGURA 1.4A  
POZO MUERTO

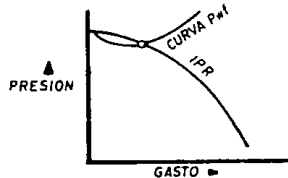


FIGURA 1.4C  
POZO MUERTO ó SEVERO CABECEO

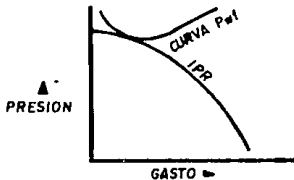


FIGURA 1.4B  
POZO MUERTO

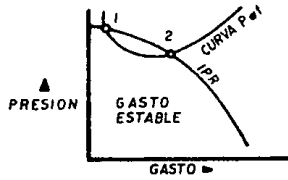


FIGURA 1.4D  
POZO FLUYENDO EN POSICION 2

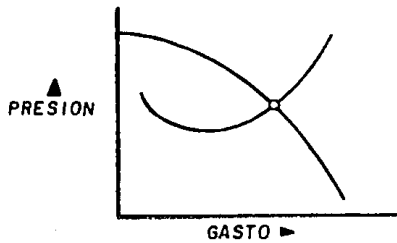


FIGURA 1.4E  
FLUJO ESTABLE

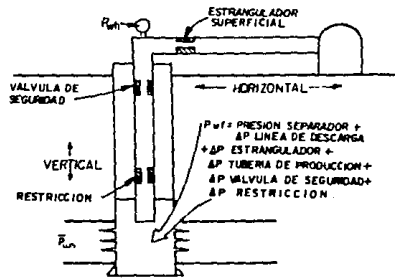


FIGURA 1.5A SISTEMA TOTAL DE FLUJO

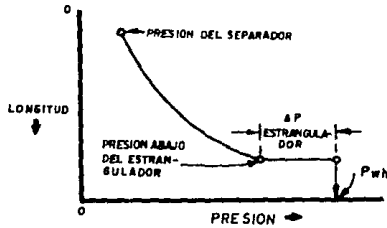


FIGURA 1.5B

PRESION A TRAVES DE LA LINEA DE DESCARGA

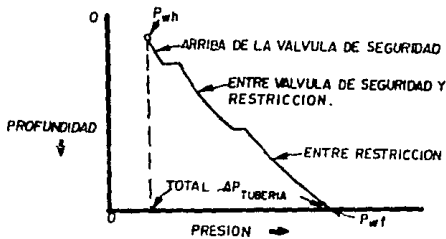


FIGURA 1.5C

PRESION A TRAVES DE LA TUBERIA DE PRODUCCION

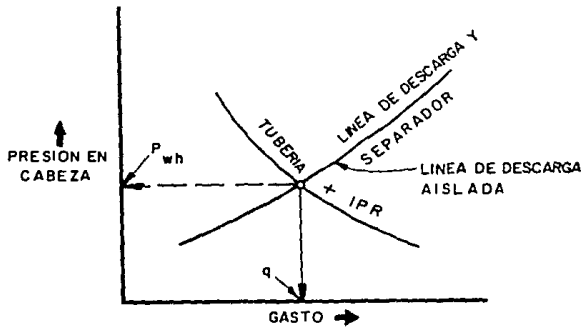


FIGURA 1.6  
SOLUCION EN CABEZA DE POZO

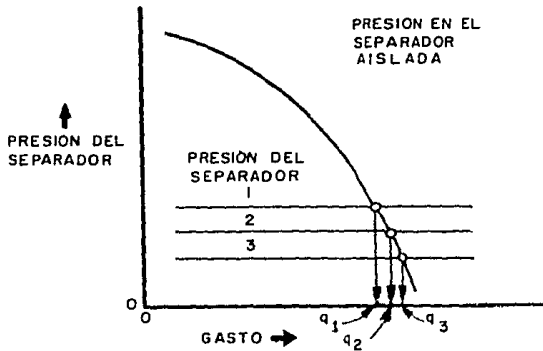


FIGURA 1.7  
EFECTO DE PRESION EN EL SEPARADOR



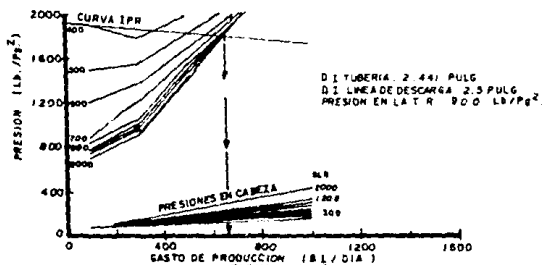


FIGURA 1.8  
NODO SOLUCION BOMBEO NEUMATICO EN EL FONDO DEL POZO

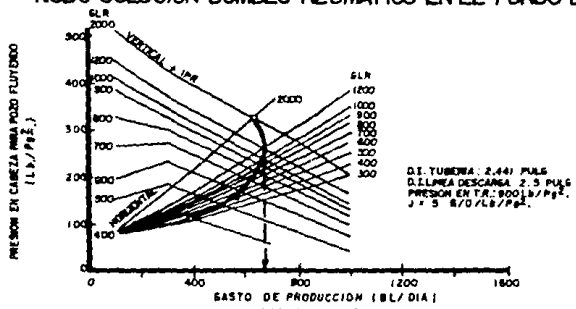


FIGURA 1.9  
NODO SOLUCION EN CABEZA PARA BOMBEO NEUMATICO

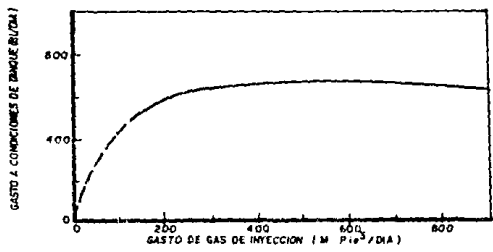


FIGURA 1.10  
CURVA DE COMPORTAMIENTO B.N. PARA LAS FIGURAS  
1.8 Y 1.9

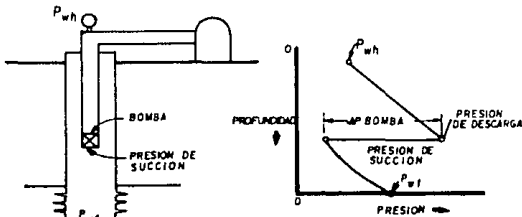


FIGURA 1.11A  
TIPICA INSTALACION DE BOMBA

FIGURA 1.11B  
PRESIONES A TRAVES DE UN SISTEMA DE BOMBEO

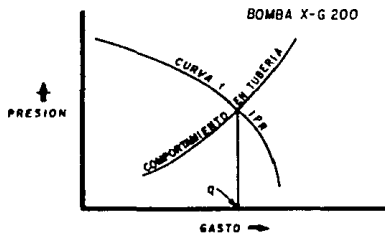


FIGURA 1.11C  
NODO SOLUCION  $P_{wf}$

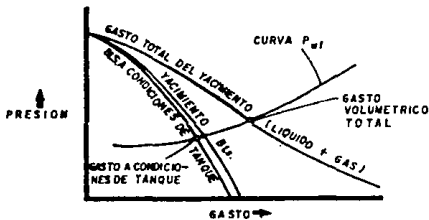


FIGURA 1.12  
CURVAS IPR PARA PRODUCCION TOTAL DE FLUIDO INCLUYENDO GAS.

Fig 113a Colocacion de la bomba a nivel de la zona de disporos

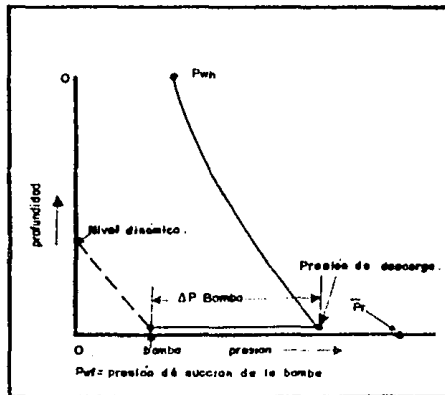
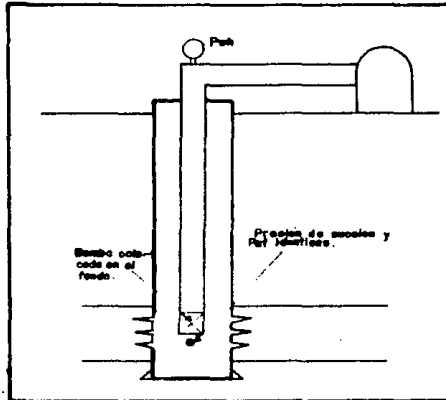


Fig 113a Bomba colocada en el fondo

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

1. Kermit E. Brown.  
Technology of Artificial Lift Methods. Vol. 4  
Capítulo 5: Artificial Lift (por Bashir A. y  
Kermit E. Brown).
2. Kermit E. Brown.  
Overview of Artificial Lift Systems.  
SPE. 9979.  
- Miembro SPE-AIME, University of Tulsa.

## C A P I T U L O   I I

### Aplicación de Análisis Nodal al Bombeo Neumático Continuo.

#### E S T U D I O   P R E L I M I N A R

El B.N. es un método artificial de producción de pozos verticales o desviados, que tiene el propósito de crear la  $P_w$  necesaria para permitir producir el pozo al gasto deseado, por medio de la inyección de gas en un punto deseado de la T.P.

El gas inyectado levanta los fluidos hasta la superficie, debido a que disminuye la presión que ejerce la columna de fluido sobre la formación, pues el fluido reduce su densidad, a la vez que es empujado hacia arriba por la expansión del gas.

En éste trabajo escrito se analizará el caso de B.N. continuo, éste método se utiliza en pozos con alto índice de productividad ( $> 0.5$  bl/día/lb/pg<sup>2</sup>) y una presión de fondo relativamente alta, (columna hidrostática del orden de 50 % o más en relación a la profundidad del pozo).

En éste tipo de pozos la producción de fluidos puede caer en el rango de 200 - 20,000 bl/día a través de sartas de T.P. de diámetro normal. En flujos a través de T.R. es posible obtener gastos del orden de 80,000 bl/día.

El B.N.C. consiste en inyectar un volumen continuo de gas, - proveniente de alguna fuente de suministro, como sería, un pozo - productor de gas, una estación de compresión o bien un gasoducto, éste gas pasa posteriormente a una tubería de inyección de gas, u na válvula de compuerta, una válvula de aguja, un medidor de gas y un registrador de flujo, una vez en el pozo, entra por el e.a. donde se encuentra un punto de inyección (válvula operante), en - correspondencia con la T.P., donde aligera la columna de fluidos del pozo, hasta reducir la presión en el fondo, permitiendo una - diferencial suficiente a través de la cara de la formación, que cau se que el pozo produzca al gasto deseado, como se muestra en la - fig. II. . .

Las válvulas arriba de la válvula operante (válvulas de flu- jo de descarga de gas), facilitan la descarga de los fluidos del pozo, con un suministro de presión del gas existente, y las válvu las abajo de ésta, están disponibles, para cuando la presión de - fondo disminuya, y el punto de inyección deba ser removido más a- bajo.

El principal medio para diseñar y evaluar este tipo de pozos al igual que los fluyentes, es el Análisis Nodal. El Análisis - Nodal es precisamente, la evaluación de un sistema de producción dividiendolo en componentes básicos. Para predecir el comporta- miento del sistema, se obtiene la  $\Delta P$  en cada componente; y el -- procedimiento para obtener ésta, involucra asignar nodos a va-- rios puntos del sistema utilizando diferentes gastos de flujo, en modelo físico apropiado, o bien un modelo matemático.

Una vez que el nodo solución es seleccionado, se suman o se

restan las  $\Delta P$ , desde el punto de partida hasta que se alcanza el nodo solución.

Para usar este concepto de nodo, debe conocerse al menos la presión del punto de partida, en un sistema de producción la  $P$ , de separación y la  $P_w$  son conocidas.

## Aplicación del Análisis Nodal a Sistemas de Bombeo Neumático Continuo

### Determinación del gasto por Pedro Regnault

Así como en un pozo fluyente, las variables que afectan el -  
gasto de producción en B.N.C. se dividen en dos grupos:

- 1.- Las que pueden ser controladas;
  - diámetro y longitud de la línea de flujo.
  - diámetro y longitud de la T.P.
  - restricciones superficiales.
  - presión de separación.
- 2.- Las que se pueden controlar un poco o bien no se pueden controlar;
  - propiedades de los fluidos
  - $P_w$
  - I.P.

El máximo gasto posible para un pozo con B.N.C., se puede de-  
terminar utilizando el mismo procedimiento requerido para pozos -  
fluyentes. Excepto, que debido a que el gas es inyectado en el  
algún punto más alto que el total de la profundidad del pozo, se en-  
cuentran dos curvas de gradiente fluyente, una abajo del punto de  
inyección con RGLF, y otra arriba del punto de inyección con una  
RGLT, donde  $RGLT = RGLF + RGLI$ . Para un gasto constante, la --  
RGL permanecerá constante arriba y abajo del punto de inyección -  
del gas.

Para determinar el gasto en un pozo con B.N.C. se deben con-  
struir dos diagramas:

- 1) diagrama Presión - Profundidad, para determinar variables  
como el punto de inyección del gas,  $P_w$  y  $P_w$ .



2) Diagrama Presion - gasto de flujo, el cual incluye la curva de comportamiento de afluencia, y la curva de comportamiento - de flujo multifásico.

Las correlaciones para flujo vertical determinan el gasto de flujo posible para  $P_{wn} = \text{cte.}$  Una combinación de las correlaciones para flujo horizontal y vertical se utiliza cuando la  $P_{wn}$  es variable.

Soluciones propuestas:

- a) para  $P_{wn} = \text{cte.}$
- b) para  $P_{wn}$  variable.

a) Solución para una  $P_{wn} = \text{cte.}$ ; Se puede asumir una  $P_{wn} = \text{cte.}$  cuando no se tienen restricciones en la cabeza, y además la línea de flujo es corta, lo que sucede en plataformas cercanas a la costa.

Se utilizan dos métodos para predecir el máximo gasto posible en pozos con E.N.C. y  $P_{wn} = \text{cte.}$ :

- a.1) Procedimiento diagrama Presión-gasto de flujo.
- a.2) Procedimiento de Curva de Equilibrio.

En ambos métodos la  $P_{wn}$  es un parámetro controlado determinado el gasto de producción.

Existen dos posibilidades para ambos procedimientos:

- i) gas ilimitado disponible.
- ii) gas limitado disponible.

La ventaja de contar con gas ilimitado, es que permite obtener el mínimo gradiente fluyendo en la sarta de la T.P.

El abastecimiento limitado de gas, significa menor cantidad de gas disponible de inyección, aunque en ocasiones, una cantidad limitada de gas, puede ser suficiente para obtener el máximo gasto posible .

Para predecir el gasto de flujo posible para pozos con B.N.C. con  $P_{wh} = cte.$ , es necesario el uso de parámetros como correlaciones de flujo multifásico vertical, propiedades de los fluidos,  $P_{wh}$ , diámetro de T.P., presión disponible del gas de inyección, e I.P., los cuales son conocidos, con esta información y asumiendo que no hay restricciones en el pozo, el gasto se puede determinar con los siguientes procedimientos:

a.1.1) PROCEDIMIENTO DIAGRAMA PRESION-GASTO DE FLUJO  
(PARA VOL. DE GAS ILIMITADO DISPONIBLE)

1.- Preparar una gráfica que tenga la profundidad en el eje de las ordenadas, y la presión sobre el eje de las abscisas. La gráfica deberá tener la misma escala que las curvas de gradiente ha ser utilizadas. (ver fig. II.1.1).

2.- Localizar la  $P_{wh}$  en la superficie (prof. cero)

3.- Extender la  $P_{wh}$  hasta el fondo, tomando en cuenta el incremento en la presión de la columna de gas de inyección, con la densidad específica del gas y la correlación adecuada.

Para un gasto bajo de inyección considerar la columna estática. Para altos gastos de gas de inyección y flujo anular, considerar la fricción del gas.

4.- A 100 PSI menos de  $P_{wh}$ , trazar una paralela a la línea anterior.

5.- Esta última línea representa la posición de los puntos de inyección, dependiendo de los gastos de producción.

6.- Localizar la  $P_{wh}$  en la superficie (prof. cero)

7.- Suponer varios gastos de flujo.

8.- Los siguientes pasos se pueden llevar a cabo mediante computadoras. En el caso de utilizar curvas de gradiente, seleccionar las adecuadas para cada gasto de flujo supuesto.

9.- Superponiendo y alineando la gráfica de presión-profundi

dad, sobre la curva de gradiente fluyente elegida, y deslizando - hasta que la  $P_{w}$  intersecte la RGL más alta (mínimo gradiente fluyente), para gas ilimitado disponible. Trace el gradiente fluyente arriba del punto de inyección, hasta intersectar la línea - de gradiente del gas de inyección. Este representa el punto de inyección del gas.

10.- Del punto de inyección del gas obtenido en el paso 9, - deslizar la gráfica presión-profundidad hacia arriba y hacia abajo (sobre las curvas de gradiente fluyente adecuadas), hasta encontrar la RGLF, y trace la curva de gradiente fluyente abajo del punto de inyección.

11.- repita el procedimiento para cada gasto de flujo supuesto. Los pasos del 1-11 se pueden observar en la fig. II.1.1.

12.- Se prepara un diagrama presión-gasto de flujo, el cual incluye la curva de comportamiento de afluencia, y la curva formada por los gastos supuestos anteriormente Vs. sus correspondientes  $P_{w}$  obtenidos, como se ve en la fig. II.2.

13.- El máximo gasto de flujo posible, y la correspondiente  $P_{w}$  se lee en la intersección de las dos curvas, obtenidas en el - paso 12. Vea la fig. II.2.

#### a.1.i.1) PROCEDIMIENTO DIAGRAMA PRESION-GASTO DE FLUJO (PARA VOL. DE GAS LIMITADO DISPONIBLE)

El procedimiento es el mismo que para vol. de gas ilimitado disponible, Excepto que la RGLT (arriba del punto de inyección), se determina para cada gasto de flujo dependiendo del volumen total del gas de inyección disponible. La RGLT se obtendrá como - sigue:

$$RGLT = \frac{q_g}{q_l}$$

donde: RGLT = relación gas líquido inyectado en (pie<sup>3</sup>/bl)  
 $q_g$  = vol. de gas disponible en (pie<sup>3</sup>/día)

$q_l^0$  = gasto de flujo supuesto en (bl/día)

$$RGLT = RGLI + RGLF$$

donde:

RGLT = relación gas líquido total en (pie/bl)

RGLF = relación gas líquido de la formación en (pie/bl)

La fig. II.3 muestra el diagrama presión-profundidad para - vol. de gas limitado.

La fig. II.4 muestra el diagrama presión-gasto de flujo para vol. de gas limitado.

#### a.II.i) PROCEDIMIENTO POR CURVA DE EQUILIBRIO

(PARA VOL. ILLIMITADO DE GAS DISPONIBLE)

En éste procedimiento, se predice el máximo gasto posible para un pozo con B.N.C. por interpolación, utilizando el diagrama presión profundidad, donde la interrelación de las cuatro variables ( $q_{l,0}$ , RGLT, prof. de inyección, y presión en la T.P. a la profundidad de inyección), son representados por una curva de equilibrio.

La curva de equilibrio se define, como el lugar de los puntos de intersección entre curvas de gradiente, que van de  $P_e$  hacia abajo con RGLT, y curvas de gradiente fluyente que van desde  $P_e$  hacia arriba con RGLF. Intersectando las curvas de igual gasto - obtenemos puntos de equilibrio, y la curva que pasa a través de estos puntos se llama curva de equilibrio.

El posible punto de inyección más profundo, es la intersección de la curva de equilibrio con la curva de gradiente de gas de inyección, su correspondiente  $P_e$ , se puede encontrar por interpolación y con esta calcular el máximo gasto de flujo posible.

La importancia de la curva de equilibrio, es que da las condiciones de equilibrio a alguna profundidad, después de que el pozo ha comenzado a producir.

### Procedimiento:

En éste procedimiento se usan curvas de gradiente, pero también se pueden realizar los cálculos por computadora.

1.- Prepare una gráfica presión-profundidad (profundidad en las ordenadas y presión en las abscisas), con la misma escala de las curvas de gradiente ha ser utilizadas. (ver fig. II.5)

2.- Suponga varios gastos de producción.

3.- para cada gasto de flujo, determine la  $P_w$ , de la siguiente ecuación:

$$P_w = P_{wi} - \frac{q_i}{J} \quad J = \text{cte.}$$

Para pozos productores de altas RGA, será necesario calcular por Vogel o Standing.

4.- Independientemente de la presión del gas de inyección -- disponible ( $P_w$ ), determinar el punto de inyección de gas para cada gasto de flujo como sigue: (ver fig. II.5).

- a) marque la  $P_w$  obtenida en el paso 3 sobre el diagrama -- presión-profundidad, a la profundidad total, y marque -- la  $P_w$  en la superficie.
- b) sobreponiendo y alineando la grafica presión-profundi-- dad sobre la curva de gradiente fluyente elegida (gasto de flujo), deslícela hacia arriba o hacia abajo hasta -- encontrar la RGLP, de éste punto, trace el gradiente -- fluyente abajo del punto de inyección.
- c) sobreponiendo y alineando la gráfica presión-profundi-- dad sobre la curva de gradiente elegida (gasto de flu-- jo), deslícela hasta que la  $P_w$  intersekte la RGL que -- proporciona el gradiente fluyente mínimo (volumen ilimi-- tado de gas disponible), trace la curva, hasta intersec-- tar la curva de gradiente fluyente obtenida en el paso 4-b. La intersección de las curvas de igual gasto de-

producción da un punto de equilibrio. Repetir para cada gasto supuesto.

5.- La curva dibujada a través de estos puntos es conocida como Curva de Equilibrio.

6.- Marque la  $P_o$  en la superficie, y extienda hacia abajo la curva de gradiente, tomando en cuenta la columna de gas ( $J_g$ ) con la correlación adecuada.

7.- reste 100 PSI a la  $P_o$ , y trace en este punto una línea paralela a la misma. Esta es la línea de puntos de inyección de gas.

8.- Determine el punto de inyección actual, en la intersección con la curva de equilibrio.

9.- Determine la  $P_w$  correspondiente al punto de inyección anterior por interpolación, extendiendo una línea del punto de inyección del gas al fondo del pozo.

10.- Determine el gasto de flujo posible con la sig. fórmula:

$$q_f = (P_w - P_{wi}) J \quad J = \text{cte}$$

donde la  $P_{wi}$  se determinó en el paso 9.

a.II.i.i) PROCEDIMIENTO POR CURVA DE EQUILIBRIO  
(PARA VOL. LIMITADO DE GAS DISPONIBLE)

Este procedimiento es el mismo que para vol. ilimitado de gas disponible, sólo que la curva de gradiente arriba del punto de inyección, no será la que proporcione el gradiente mínimo, sino la que cumpla con la RGLT correspondiente al vol. de gas disponible, y se calcula como anteriormente se dijo. (ver fig. II.6).

b) SOLUCION PARA UNA  $P_{L_0}$  VARIABLE:

Esta solución requiere utilizar las correlaciones de flujo - multifásico horizontal y vertical. Se consideran las mismas variables que afectan al pozo con  $P_{L_0}$  cte., y algunas más como  $P_{sep.}$ , longitud y diametro de la línea de flujo.

En la predicción del máximo gasto de flujo posible para -- B.N.C. con  $P_{L_0}$  variable, se ofrecen dos procedimientos de solución:

b.1) PROCEDIMIENTO MEDIANTE EL DIAGRAMA  $P_{L_0} - Q$  flujo

b.2) PROCEDIMIENTO MEDIANTE EL DIAGRAMA  $P_{L_0} - Q$  flujo

En ambos procedimientos existe una RGL óptima con la cual se obtiene el máximo gasto, y será probablemente menor que la relación requerida para crear el mínimo gradiente fluyendo en la sarta de T.P.

La inyección de más, o menos gas del requerido para dar este valor óptimo, da como resultado un decremento en el gasto de producción. Esto es porque para mover el gas y el líquido a través de la línea de flujo al separador,  $P_{L_0}$  se incrementa como el volumen de gas se incrementa, debido a que gas extra en la línea de - descarga causa una fracción adicional de  $\Delta P$ , sin conocer la densidad de la mezcla, porque los fluidos no son levantados verticalmente. En la T.P., también la adición de gas causa  $\Delta P$ . Sin embargo, si se conoce la densidad de la mezcla.

b.1) PROCEDIMIENTO MEDIANTE EL DIAGRAMA  $P_{L_0} - Q$  flujo:

Para determinar el máximo gasto de flujo posible para un pozo con B.N.C., se requiere suponer varios gastos de flujo, para - cada uno de ellos se determinará la correspondiente  $P_{L_0}$ , mediante la ecuación de índice de productividad, y además para cada uno se

elaborará un diagrama presión-profundidad (que consta de una curva de gradiente del gas de inyección, gradiente fluyente abajo -- del punto de inyección con la RGLF), y también para cada uno se -- deberá considerar varias RGL para trazar las curvas de gradiente arriba del punto de inyección con la RGLT (de éste diagrama podremos determinar las  $P_{un}$ 's correspondientes a las curvas de gradiente arriba del punto de inyección, como se muestra en la fig. II.7). Así mismo se elaborará un diagrama presión-longitud, considerando las mismas RGL del diagrama anterior, a fin de determinar las  $P'_s$  del separador a la cabeza del pozo como se ve en la fig. II.8 .

Con los datos obtenidos en las dos graficas anteriores, se -- puede elaborar un diagrama presión-gasto de flujo, en el cual se considerará la RGL etc. La intersección de las curvas de igual RGL nos dara puntos, sobre los cuales dibujaremos una curva, en -- el punto más a la derecha de la curva encontraremos la  $P_{un}$  óptima, y el gasto máximo con su correspondiente RGL óptima. (fig. II.9)

A continuación desglosaremos detalladamente éste procedimiento:

- 1.- Prepare una gráfica presión-profundidad.
- 2.- Con la profundidad en las ordenadas (empezando con cero en la máxima profundidad del pozo), la presión en las abscisas, -- (con el cero en el origen hasta la  $P$  máxima). La gráfica deberá tener la misma escala que las curvas de gradiente a ser utilizadas. (ver fig. II.7).
- 3.- Localice la  $P_s$  en la superficie.
- 4.- Trace la curva de gradiente partiendo de  $P_s$  , tomando en cuenta el peso de la columna de gas con la  $\gamma_g$  y la correlación apropiada
- 5.- Recte 100 PSI a la  $P_s$  y trace a partir de éste punto una paralela a la línea obtenida en el paso 4 (Obteniendo la línea de



inyección de gas).

6.- suponga varios gastos de flujo.

7.- seleccione las curvas de gradiente horizontales y verticales apropiadas para cada gasto de flujo supuesto, o prepare los cálculos por computadora.

8.- Para cada gasto de flujo, suponga varias RGLT. Use un valor de RGL cercano al gradiente mínimo para cada gasto de flujo.

9.- Para cada gasto de flujo determinar la  $P_w$  requerida como sigue:

$$P_w = P_w - \frac{q_{Ti}}{J} \quad J = \text{cte.}$$

10.- Determine la  $P_w$  permisible para cada gasto de flujo y para la RGL seleccionada, usando curvas de gradiente fluyente vertical o bien calcularlas por computadora:

- (a) Para un gasto de flujo supuesto, grafique la  $P_w$  obtenida en el paso 9 a la profundidad total sobre el diagrama presión-profundidad.
- (b) Sobreponiendo y alineando la grafica presión-profundidad sobre la curva de gradiente elegida, deslice la gráfica a lo largo de la línea base (prof. en pie) — hasta que la  $P_w$  intersecte la RGLF, desde este punto trace el gradiente fluyente abajo del punto de inyección del gas.
- (c) De este punto de inyección obtenido en el paso anterior, deslice la gráfica hacia arriba o hacia abajo — hasta intersectar con la RGL seleccionada. De este punto trace la curva de gradiente fluyente arriba del punto de inyección, hasta intersectar la profundidad cero. Este punto da la  $P_w$  permisible.

Repita el procedimiento para el mismo gasto de flujo pero con otra RGL supuesta.

11.- Repita todo el procedimiento para los otros gastos supuestos en el paso 9 y para las mismas RGL supuestas.

12.- Determine la  $P_{ms}$  necesaria para mover el mismo gasto de flujo supuesto desde el separador a la caveza a través de la línea de descarga, para las mismas RGL supuestas, utilizando curvas de gradiente fluyente horizontal, o bien cálculos por computadora, de la siguiente forma: (ver fig. II.8).

- (a) Prepare un diagrama presión-longitud, siguiendo los pasos 1 y 2. Marque la presión de separación en la superficie.
- (b) sobreponiendo y alineando la grafica presión-longitud sobre la curva de gradiente fluyente elegida; deslice hacia abajo a lo largo de la línea base (prof. en pie) hasta intersectar la presión de separación con la RGL seleccionada. De éste punto trace la curva de gradiente fluyente horizontal, hasta intersectar la longitud total de la línea de descarga, este punto da la  $P_{ms}$  necesaria.
- (c) Repita éste procedimiento para el mismo gasto de flujo, para las otras RGL supuestas y para los otros gastos de flujo y para las respectivas RGL supuestas.

13.- Tabule los resultados de las  $P_{ms}$ 's obtenidas de las correlaciones de flujo multifásico horizontal y vertical.

14.- Prepare un diagrama  $P_{ms}$ - $Q$  flujo y grafique los resultados tabulados en el paso 13. La intersección de curvas horizontales con curvas verticales de misma RGL, representan el gasto posible para esta RGL.

15.- Dibuje una curva a través de estos puntos, obteniendo el máximo gasto de flujo posible en la intersección más alejada hacia la derecha sobre la escala de gasto, determinando la  $P_{ms}$  y la RGL correspondiente. (ver fig. II.9).

## b.2) PROCEDIMIENTO MEDIANTE EL DIAGRAMA $P_w$ - $q$ flujo:

La etapa inicial del procedimiento, es considerar solamente flujo por tubería de descarga. Entonces, para las condiciones de diseño dadas; a partir de la  $P_{sep}$  se traza la curva de gradientes horizontales y se determina la  $P_w$ , para las diferentes RGL con sus correspondientes gastos.

Se traza el gradiente de presión del gas de inyección desde la superficie hasta el fondo del pozo. Para determinar el punto de inyección se utiliza el método antes descrito.

Ya una vez definido, se toma el primer valor de  $P_w$  y se trazan los diferentes perfiles de presión descendente, cada uno con un incremento igual en la RGL hasta intersectar la línea de gradiente del gas de inyección.

Cada punto de intersección será el posible punto de inyección de gas para la  $P_w$  correspondiente.

Desde cada punto de intersección y con la RGLP, se traza el perfil de presiones descendente hasta alcanzar la profundidad total del pozo. ver fig. II.11

Esta misma gráfica se construye tantas veces como presiones en la cabeza del pozo y gastos correspondientes se tengan, obteniendo así las  $P_w$ 's requeridas. Ver fig. II.12, en esta figura se obtienen curvas de gasto Vs  $P_w$ , con RGL cte. en T.D. como en T.P.

La intersección entre las curvas del componente de tuberías con la línea de comportamiento de afluencia con posibles soluciones al problema, pero sólo la curva más a la derecha corresponde al máximo gasto.

A continuación se desglosa detalladamente éste procedimiento:

1.- Suponga varios gastos de flujo.

2.- Suponga varias RGLT para cada gasto de flujo.

3.- Seleccione las curvas de gradiente horizontal y vertical apropiadas para cada gasto de flujo supuesto o prepare los cálculos por computadora.

4.- Determine la  $P_{nc}$  necesaria para manejar el gasto de flujo supuesto a través de la línea de descarga al separador, utilizando las correlaciones de flujo horizontal.

5.- De la  $P_{nc}$  del paso 4 determine la  $P_{nc}$  para cada gasto de flujo y para cada RGL. Tabule los resultados.

6.- Prepare el diagrama  $P_{nc} - Q$  flujo el cual incluye la curva I.P. ( $J = cte.$ ). Suponga dos gastos y determine la  $P_{nc}$  correspondiente por la sig. ecuación:

$$P_{nc} = P_{nc} - \frac{q_1}{J} \quad J = cte$$

7.- Grafique los resultados tabulados en el paso 5, sobre el diagrama del paso 6. La intersección de las curvas de flujo multifásico (RGL etc.) con la curva de comportamiento de afluencia da el posible gasto de flujo para cada RGL.

8.- El gasto de flujo máximo se obtiene en la intersección más lejana hacia la derecha sobre la escala de gasto de producción, obteniendo así la correspondiente RGLT y  $P_{nc}$  requerida.

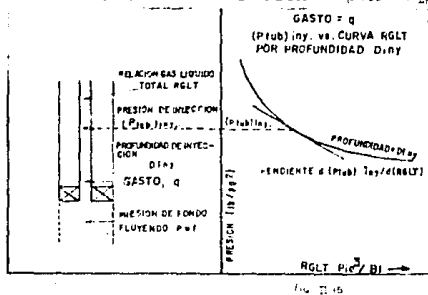
9.- Prepare una gráfica  $Q$  flujo Vs. RGL para seleccionar el  $Q$  max. con la RGL correspondiente.

**DISEÑO DE INSTALACIONES DE B.N.C.**  
**BASEADO EN EL VOL. DE GAS INYECTADO MAS ECONOMICO**  
 por VICTOR MITCHELL Y JESUS PACHECO

La RGLT más económica existe cuando la cantidad de aceite levantado por unidad de incremento de gas, es igual al costo de esa unidad de gas.

El precio por bl de aceite varía de lugar a lugar y de instalación a instalación, porque está determinado por los costos de operación como, costo de composición del gas inyectado, costos de combustible para compresoras, diámetro y eficiencia de compresoras, diferencia de presión a través del compresor etc. y deberán determinarse por el operador.

Mitchell hizo el siguiente estudio, para mostrar como se obtiene la RGL más económica en pozos con B.N.C. bajo ciertas condiciones. Su solución supone  $P_{in} = cte.$



La fig. II.15 considera el pozo y la presión asociada al pozo  $V_c$  RGLT. La curva  $P$  vs. RGLT para la profundidad de inyección, se considera como la curva de  $P$  en T.P. en el punto de inyección  $V_c$  RGLT.

Suponiendo que la RGLT más económica ocurre en el punto sobre la curva ( $P_{in}$ ),  $V_c$  RGLT, donde la pendiente es  $X$  PSI/RGLT ( $\frac{dP_{in}}{dRGLT}$ ).

Por tanto:

$$X = \frac{d(P_{in})}{d RGLT}$$

(P<sub>o</sub>)<sub>o</sub> Vs. RGLT, el punto de tangencia define la RGLT más económica, la tangente de inclinación cero que intersecciona a ésta curva define la RGLT máxima y corresponde con el gradiente mínimo.

Dibujando curvas del pozo P Vs. RGLT para diferentes valores de profundidad, y determinando la RGLT más económica a cada profundidad por medio de un punto en cada curva, la curva de RGLT -- más económica es la unión de éstos puntos como se muestra en las figs. II.16, II.17, y II.18 para diferentes gastos.

#### PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO MAS ECONOMICO DE E.N.

El diagrama principal usado en este diseño es el de flujo -- multifasico vertical de P Vs. RGLT para diferentes profundidades. Este puede ser una transferencia de las curvas de gradiente existentes o bien, calculadas de una correlación de flujo multifasico apropiada. Es necesario una fig. para cada gasto como se nota -- en las figs. II.16, II.17, II.18 para los gastos de 1500, 2000 y 2500 bl/día respectivamente.

La fig. II.19 se usará para preparar el diseño más económico de E.N. Esta comprende 4 escalas lado por lado. Estas escalas están hechas sobre gráficas de panel transparente para facilitar el trazo de la curva de gradiente fluente deseada.

Estas escalas son:

Fig. II.19A Gráfica P Vs. profundidad, la cual muestra -- efectos del peso de la columna de gas, y determina -- la P<sub>o</sub> por medio de la extensión de la curva de gra-- diente fluente a la profundidad del pozo.

Fig. II.19B Gráfica P Vs. RGLT, la cual muestra la inter-- relación flujo, profundidad y la RGLT más económica.

Fig. II.19C Gráfica P Vs. gasto de flujo, donde la pre--

sión de fondo del pozo determinada en las figs. II. 19A y II.19B, con lo que podemos pasar a trazar la curva de comportamiento de afluencia siguiente.

Fig. II.19D Gráfica P Vs. gasto de flujo, donde se grafica la  $P_w$  Vs.  $q$  flujo. Estos valores se obtienen determinando primero la  $P_{wh}$  de la fig. II.19C y determinando sus correspondientes valores de  $P_{wh}$ .

El siguiente procedimiento aplicado al método de diseño más económico para diferentes valores de  $P_w$ , permite la selección del volumen de gas más económico.

1.- Prepare una gráfica de flujo multifasico de P Vs. RGLT para diferentes profundidades, y determine la RGLT máxima y más económica como sigue:

- a) Suponga varios gastos de flujo
  - b) Grafique datos de flujo multifasico vertical con la P sobre las ordenadas y la RGLT sobre las abscisas, para varias profundidades, y diferentes gastos supuestos. - figs. II.19A, B y C.
  - c) Determine el gradiente mínimo donde las pendientes de las curvas de la gráfica son cero (P Vs. RGLT). Estos puntos se unen, formando la curva de RGLT máxima. Esta línea puede construirse por observación.
  - d) Calcule la pendiente ( $qG/IP/P$ ) más económica, y determine la curva de RGLT más económica sobre la gráfica P Vs. RGLT. Esta gráfica se obtiene uniendo los puntos de RGLT más económica de cada curva. La RGLT más económica se calcula como se describió previamente.
2. a) Con la presión sobre las ordenadas y la profundidad sobre las abscisas, grafique la  $P_w$  a la profundidad cero

y extienda hasta la totalidad del pozo tomando en cuenta el peso de la columna de gas, ver fig. II.19A . -  
Se traza una línea paralela a la anterior comenzando con 100 PSI menos que la  $P_0$  a la profundidad cero. -  
Esta es la línea de operación del gas. Esta diferencia de 100 PSI ocurre por la  $\Delta P$  durante el flujo a través de la válvula de B.N. y representa la  $P$  en T.P. disponible en algún punto de inyección del pozo.

- b) Con la  $P$  sobre las ordenadas y la RGLT sobre las abscisas, trace sobre la fig. II.19B la curva de RGLT más económica para diferentes gastos obtenidos en el paso 1 y grafíquelos en las figs. II.19A, B y C. Marque la profundidad total del pozo para cada gasto supuesto. Dibuje una pequeña curva entre los puntos de igual profundidad. Una vez que la escala de las curvas es la misma ( $P$  Vs. profundidad y  $P$  Vs. RGLT figs. II.19A,B), los cruces de ambas curvas da la profundidad de los puntos de inyección y  $P$  de inyección respectivamente.

Con la localización de los puntos de inyección sobre la línea de operación del gas fig. II.19A, los gradientes de presión abajo de los puntos de inyección, se determinan por medio de curvas de flujo multifásico vertical, con la RGLP y gastos de flujo supuestos. -  
La  $P_w$  puede determinarse al gasto de flujo deseado, por medio de la extensión de la curva del punto de inyección a la profundidad del pozo. La  $P_w$  determinada será la  $P$  de fondo requerida para el gasto supuesto.

Tabule los resultados de  $R_w$ ,  $q$  flujo,  $P_{inj}$ , RGLT e inyección de gas.

3. a) Prepare la gráfica de  $P$  Vs.  $q$  flujo fig. II.19C. Dibuje la curva de IPR, ( $P_w$  Vs.  $q$  flujo). Una de las -



- muchas formas de construcción del IPR incluye Vogel, Standing, Weller y Petkovitch, o bien I.P. etc.
- b) los datos de  $P_w$  y  $Q$  flujo obtenidos en el paso 2. b) en la fig. II-19C para una  $P_w$  se grafican. La intersección de las curvas del paso 3. a) y b), representan el gasto de aceite más económico para la  $P_w$  dada.
  - c) Pueden suponerse otros valores de  $P_w$  y repetir los pasos del 2. a) a 3. b), obteniendo los gastos más económicos para cada  $P_w$  supuesta. Después se dibuja la gráfica flujo Vs.  $P_w$ , dando la relación entre  $P_w$  y  $Q$  flujo para el sistema de B.N. que mantenga la RGLT - más económica, ver fig. II.19D.

## DETERMINACION DE LA RGLT MAS ECONOMICA PARA $P_w$ VARIABLE

Pacheco propuso dos procedimientos para determinar la RGLT más económica en un diseño de B.N. Además extendió el trabajo de Mitchell para incluir los efectos de la línea de descarga. Este primer método utiliza curvas de flujo multifásico vertical de  $P$  Vs. RGLT para diferentes profundidades, para determinar la RGLT más económica, basandose en el concepto de la pendiente económica.

El segundo método utiliza un programa de B.N.C. para determinar la máxima producción de fluido, donde la pendiente de la curva de B.N. es igual a cero, procediendo de igual forma hasta el punto donde el costo de inyección de un incremento en cantidad de gas es igual al precio obtenido por la recuperación adicional de aceite. Este punto corresponde a la más económica RGLT.

La correlación modificada de Hugerhorn y Brown para flujo multifásico vertical, y el factor de fricción de Dukler en combinación con las correlaciones de Eaton para flujo multifásico horizontal se utilizan en este procedimiento.

En el diseño de instalaciones de B.N.C. con  $P_w$  variable, donde existe una RGLT optima ocurre la máxima producción; Probablemente esta RGLT será menor que la necesaria para crear un gradiente fluyente mínimo en T.P. Sin embargo el más económico sucede cuando el beneficio obtenido por un incremento adicional en la recuperación de aceite es igual al costo de inyección de la cantidad de gas incrementada.

## DESCRIPCION DEL METODO DE LA PENDIENTE MAS ECONOMICA

El método de la pendiente económica de Mitchell fue modificado para aplicarse a condiciones de  $P_{10}$  variable.

La fig. II.20 es una grafica de la curva P Vs. RGLT. La curva P Vs. RGLT a la profundidad de inyección, coincide con la curva P en T.P. a la profundidad de inyección  $(P_{10})_{in}$  Vs. RGLT.

Suponiendo que la RGLT más económica ocurre en el punto sobre la curva  $(P_{10})_{in}$  Vs. RGLT donde la pendiente es  $X \text{ PSI/RGLT} = (P_{5I}/\text{pie}^3/\text{bl})$ , entonces:

$$X = \frac{d(P_{10})_{in}}{dRGLT} \quad \dots\dots \text{II.1}$$

Para un  $q$  de flujo de  $q$  (bl/día), el índice de productividad I.P. (bl/día/PSI) puede ser representado como el gasto superficial de producción de líquidos desde el vacimiento y dentro de T.P. por (PSI) de  $\Delta P_w$  en la T.P. ( $dq/dP_w$ ).

El decremento de P en T.P. en el punto de inyección, causada por un incremento en RGLT se asocia con un decremento neto de  $P_w$  en la superficie de la arena, lo que resulta en un incremento de afluencia ( $dq$ ) de fluidos dentro del pozo, sin embargo;

$$X \text{ IP} = \frac{d(P_{10})_{in}}{dRGLT} \cdot \frac{dq}{dP_w} \quad \dots\dots \text{II.2}$$

A el más económico gasto de inyección, el costo del incremento de una unidad de RGLT ( $dRGLT = \text{unidad}$ ) es igual al beneficio obtenido de la producción resultante de aceite ( $dq$ ).

El gas inyectado por unidad incrementada de RGLT es  $q$  ----- ( $q \text{ bl/día} \times 1 \text{ pie}^3/\text{bl} = q$ ). Si el costo del gas es  $G$  \$/pie<sup>3</sup> y -

el beneficio sobre el aceite es  $PO \text{ \$/bl}$ , en el punto económico.

$$dQ \times PO = Q \times G$$

o'

$$dQ = \frac{Q \times G}{PO}$$

Sustituyendo por;  $dRGLT = \text{unidad}$ :

$$X \text{ IP} = \frac{Q \times G}{PO} \times \frac{d(P_{TUB})_{NY}}{dP_{WJ}} \quad \dots\dots\dots \text{II.3}$$

Asumiendo el decremento de P en T.P. en el punto de inyección igual al decremento neto de  $P_{WJ}$  en la superficie de la arena, la pendiente más económica se expresa como sigue:

$$X = \frac{Q \times G}{IP \times PO} \quad \dots\dots\dots \text{II.4}$$

Entonces, si la tangente de pendiente X se ajustó a la curva  $(P_{TUB})_{NY}$  vs. RGLT, el punto de tangencia define la pendiente más económica. La tangente de pendiente cero se ajusta a esta curva y define la RGLT a la que se establece la máxima producción.

La fig. II.21A es una gráfica de flujo multifásico vertical de P vs. RGLT para diferentes profundidades. Usando el valor de pendiente económica dado por la ecuación II.4, la RGLT económica puede determinarse a cada profundidad. Una curva trazada a través de estos puntos define la curva de RGLT más económica. Una curva que una los puntos de pendiente cero define la curva de RGLT máxima.

A continuación se da el procedimiento del método de diseño más económico para varios valores de  $P_{WJ}$ :

- 1) Suponga varios gastos de flujo.
- 2) Suponga varios RGLT's
- 3) Suponga varias profundidades del pozo.

4) Con el valor de gasto de flujo supuesto en el paso 1), determine la  $P_w$  para un valor particular de RGLT supuesto en el - paso 2).

5) Determine la  $P_w$  para los valores de  $P_w$  calculados en - el paso 4) y las profundidades supuestas en el paso 3).

6) Repita los pasos 4) y 5) para todos los valores de -- RGLT.

7) Calcule la pendiente económica con la ecuación II.4.

8) Con la  $P$  sobre las ordenadas y la RGLT sobre las abscisas, grafique los valores de  $P_w$  y RGLT desde el paso 5) para varias profundidades

9) Determine la RGLT más económica y la  $P_w$  correspondiente a la pendiente económica calculada en el paso 7). Identifique los valores que coinciden con la pendiente más económica sobre la curva RGLT Vs.  $P_w$  dibujadas en el paso 8) (a cada profundidad). Calcule la RGLT máxima correspondiente al valor de pendiente cero. Use el trabajo de interpolación por SPLINE CURVICO. en combinación con la fórmula de Lagrange para estos cálculos.

10) En la fig. II.21A , dibuje la curva RGLT económica, uniendo los puntos de RGLT económica determinados en el paso 9) a cada profundidad. Determine la curva de RGLT máxima uniendo los puntos de RGLT máxima.

11) Repita los pasos 4) a 10) para los diferentes valores de flujo.

12) Suponga varias presiones de operación superficiales.

13) Calcule la presión del gas en el fondo del pozo, considerando el efecto del peso de la columna de gas para todas las  $P_w$  supuestas menos 100 PSI.

14) Con la  $P$  sobre las ordenadas y la profundidad sobre -- las abscisas, grafique los valores de  $P_w - 100$  PSI a la profundi--

dad cero, y extiéndalos gradientes a la profundidad total del pozo. (líneas de operación del gas). fig. II.21B.

15) En la fig. II.21B, grafique los valores de  $P_{wf}$  correspondientes a la RGLT económica calculados en el paso 9) para un sólo gasto de flujo, repita para todos los gastos. Una los puntos correspondientes al mismo gasto de flujo con una línea. La intersección de estas líneas con las curvas de operación de gas - definen la profundidad de inyección, la P de inyección para el -- gasto de flujo dado y la  $P_{fo}$ .

16) Con la P sobre las ordenadas y la RGLT sobre las abscisas, grafique los valores de RGLT económica del paso 9) para cada profundidad y  $Q$  flujo fig. II.21C. Dibuje una curva que una -- los puntos de misma profundidad. Esta gráfica puede usarse para calcular la RGLT económica dado el  $Q$  flujo, profundidad de inyección y presión de inyección de la fig. II.21B.

17) Cálculo de  $P_{wf}$  para los puntos de inyección determinados en el paso 15) (fig. II.21B), usando la RGLF. Las  $P_{wf}$ 's de terminadas en este paso, son las presiones de fondo del pozo requeridas para que el pozo fluya a los gastos supuestos.

18) Con la P sobre las ordenadas y el gasto sobre las abscisas, dibuje la curva de IPR del pozo fig. II.21D.

19) en la fig. II.21D, grafique los valores de  $P_{wf}$  obtenidos en el paso 17) para un valor particular de  $P_{fo}$  Vs.  $Q$  flujo, la intersección de la curva IPR con la curva  $P_{fo}$  representa el gasto de flujo más económico para esa  $P_{fo}$ . Repita para todas las presiones de operación.

20) Grafique el gasto de flujo más económico del paso 19) Vs.  $P_{fo}$  en la fig. II.21D Esta curva es la relación entre  $P_{fo}$  y el  $Q$  flujo para el sistema de B.N. y corresponde a la más económica RGLT.

## METODO DE VENEFICIO SOBRE EL ACEITE Vs. COSTO DE GAS INYECTADO

En este método de combinación de correlación de factor de -- fricción de Dukler con la correlación de flujo horizontal de Eason, se utiliza para determinar la  $P_{ws}$  y la correlación de flujo vertical de Hagedorn y Brown, para determinar la  $P_{wf}$  basada sobre la  $P_{ws}$  obtenida de la correlación horizontal.

El máximo gasto de flujo se predice mediante el uso del diagrama presión-profundidad y el diagrama presión-longitud.

De la presión de separación a la profundidad cero, se calcula el perfil fluente horizontal y se determina la  $P_{ws}$  para las diferentes RGLT's supuestas y para los diferentes gastos de flujo.

Con la  $P_{ws}$  determinada para cada gasto de flujo y diferente - RGLT, las  $P_{wf}$ 's son determinadas en un diagrama presión-profundidad. Con estos valores y tomando en consideración el I.P. relacionado al pozo, en un diagrama presión-gasto de flujo el flujo máximo - se determina para la máxima RGLT.

Usando el método de beneficio sobre el aceite Vs. costo de - gas inyectado, se determina el gasto de flujo para incrementos de RGLT hasta que se alcanza el máximo gasto de flujo, como se muestra en la fig. II. 22A. Así se obtienen incrementos de gasto de flujo arriba del máximo, según se incremente el volumen de gas, posteriormente decrementos de gasto de flujo se obtienen con un volumen adicional de gas inyectado. Cuando se alcanza el  $Q_{fluj}$  máximo, se hace una comparación entre los beneficios de la obtención de aceite y los diferentes incrementos adicionales de gas y sus costos. La RGLT a la cual el costo de inyección de un incremento en la cantidad de gas es igual al beneficio obtenido por la recuperación adicional de aceite, se toma como la RGLT más económica.

El siguiente procedimiento se aplica al diseño más económico para diferentes valores de  $P_w$ , utilizando el método de beneficio sobre el aceite Vs. costos de gas inyectado:

1) Determine si el pozo fluye o no de manera natural, y a que gasto. Utilice el siguiente procedimiento;

- a) Suponga un gasto de flujo
- b) Calcule la  $P_w$  para el gasto de flujo supuesto y el I.R
- c) Calcule la  $P_w$  para el gasto de flujo supuesto usando la correlación de flujo multifásico horizontal.
- d) Calcule la  $P_w$  para la  $P_w$  calculada, usando la correlación de flujo multifásico vertical.
- e) Compare la  $P_w$  calculada en b) y d). Si la diferencia entre ellas es menor a 1 PSI, entonces el pozo tiene un gasto de flujo natural.

Si la diferencia es mayor de 1 PSI, se calcula otro gasto de flujo para la  $P_w$  en d), para la  $P_w$  dada e I.P. Este procedimiento se repite hasta que converge.

2) Después de determinar las condiciones de flujo natural se inyecta gas en el pozo, para determinar el máximo gasto de flujo para una RGLT y una  $P_w$  dadas. El procedimiento es como sigue:

- a) Suponga gastos de flujo superiores al gasto de flujo natural.
- b) Calcule la RGLT adicionando a la RGLF un incremento en RGL. El incremento de RGL fue seleccionada de 50 -- pie<sup>3</sup>/bl para este caso.
- c) Calcule la  $P_w$  para el  $Q$  flujo y RGLT supuesto, utilizando la correlación de flujo multifásico horizontal.
- d) Calcule la  $P_w$  para el  $Q$  flujo y RGLT supuestos, dados  $P_w$  e I.P.



- e) Calcule la P en T.R. en el fondo partiendo de una  $P_o$  conocida menos 100 PSI, considerando el peso de la columna de gas.
- f) Compare la  $P_{wf}$  calculada en d) y la presión del gas calculada en el fondo de la T.R. más 100 PSI. Si la presión del gas en el fondo de la T.R. es mayor o igual a la  $P_m$ , el punto de inyección se coloca en el fondo.
- g) Si la P del gas en el fondo de la T.R. es menor que  $P_m$ , el punto de inyección se localizará como se indica en h) e i).
- h) Divida la profundidad del pozo en incrementos de aproximadamente 200 pies.
- i) Calcule la P del gas en T.R. (para altos gastos de gas) y la  $P_{wf}$  para la RGLT a la misma profundidad, repitiendo esto desde el fondo para cada incremento vertical, hasta que la P en T.R. sea mayor o igual a la  $P_m$ . Interpolando con una línea determine la profundidad de inyección del gas, y la P de inyección donde la curva de gradiente fluyente intersecta el gradiente de la columna de gas. Utilice la correlación de flujo multifásico vertical para calcular la  $P_m$ . ver fig. II.22B.
- j) Use la RGLF para calcular la línea de gradiente abajo del punto de inyección, y determine la  $P_m$  utilizando la correlación de flujo multifásico vertical.
- k) Compare la  $P_{wf}$  calculada para el gasto supuesto antes -  $P_{ws}$  e I.P. con la  $P_{wf}$  calculada en j). Si la diferencia entre estas es mayor a 1 PSI, calcule otro gasto de flujo utilizando la  $P_{wf}$  de j), y la  $P_m$  e I.P.. Repita el procedimiento desde el paso e) hasta que se obtenga la convergencia. Si la diferencia es menor o igual a 1 PSI, el gasto de flujo es correcto para la --

de flujo más económico determinado en la fig. II.22C, la RGLT más económica puede determinarse de la fig. II.22D.

10) Con el gasto de flujo sobre las ordenadas y la profundidad de inyección sobre las abscisas, grafique los valores de profundidad de inyección determinados en i) para cada valor de  $P_{50}$  y diferentes RGLT's correspondientes a cada incremento de RGL. -- Una los puntos correspondientes a la misma RGLT con una curva suave (fig. II.22E). De la RGLT más económica determinada en la fig. II.22D y la correspondiente  $P_{50}$ , la profundidad del punto de inyección puede determinarse con la fig. II.22E.

11) Con el gasto de flujo sobre las ordenadas y la  $P$  de inyección sobre las abscisas, grafique los valores de  $P$  de inyección determinados en i) para cada valor de  $P_{50}$  y diferentes RGLT's correspondientes a cada RGL incrementada. Uniendo los puntos de -- misma RGLT con una curva suave (fig. II.22F), de la más económica RGLT determinada en la fig. II.22D y de la  $P_{50}$  correspondiente, -- puede determinarse la presión en el punto de inyección de la fig. II.22F .

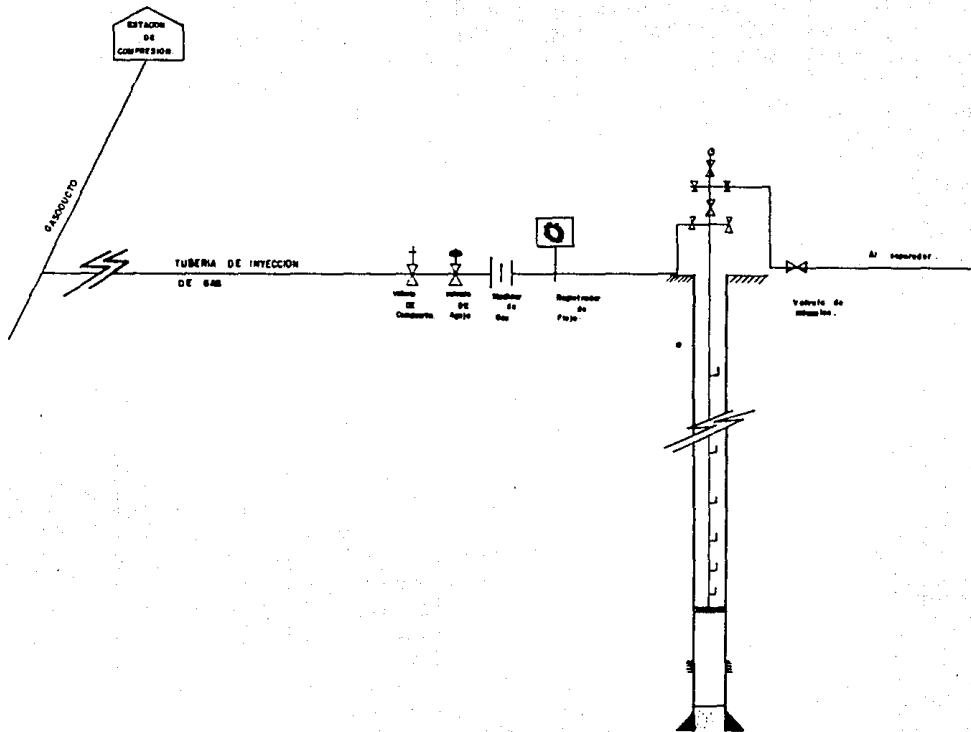


Fig 2.1.1. TRAYECTORIA DEL GAS INYECTADO.

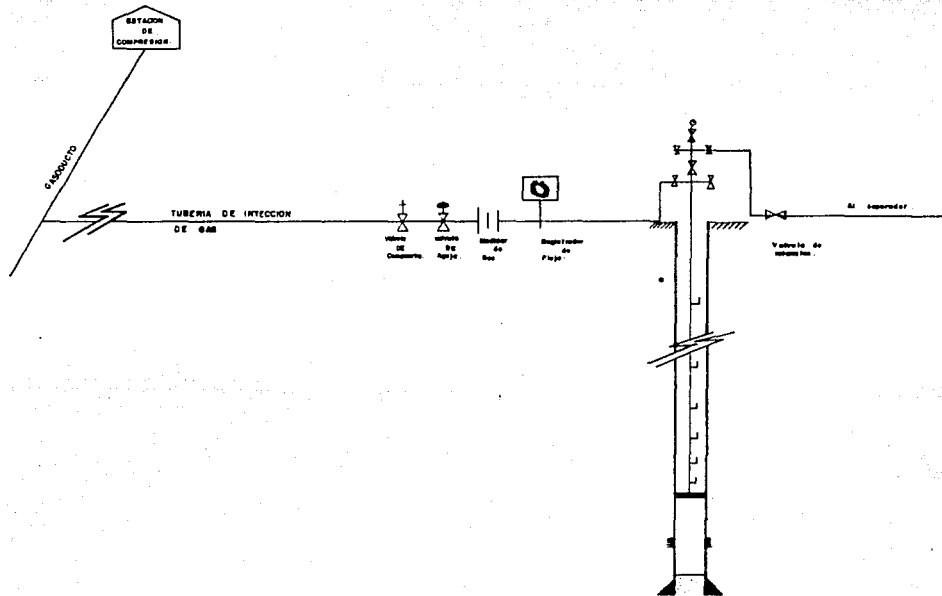


Fig 2.1.- TRAYECTORIA DEL GAS INYECTADO.

## P R O B L E M A S

Para determinar el máximo gasto de producción de un pozo con B.N.C. y  $P_{wh}$  cte., se utilizan correlaciones de flujo multifásico. Con propósitos de comparación se utilizaron tanto correlaciones - de flujo multifásico vertical de Hagedorn y brown como de -- Duns y Ros.

Se supone que las propiedades físicas de los fluidos son las mismas que se manejaron para elaborar las curvas de gradiente.

La siguiente información de un pozo se utilizará para ejem-- plificar los procedimientos de diagrama presión-gasto de flujo, y curva de equilibrio para volumen de gas limitado e ilimitado.

$D = 8,000$  pie  
d.t. = 2.441  $og$  ID ; 2 7/8  $og$  OD  
RGLP = 200  $nie^3/bl$   
I.P. = 3  $bl/114/PSI$  (lineal)  
 $P_o = 900$  PSI  
 $P_{wi} = 2,400$  PSI  
 $P_{wh} = 120$  PSI (cte.)  
 $\gamma_g = 0.65$   
producción = 100 % aceite

calcular el máximo gasto de flujo posible por los méto-- dos antes mencionados:

SOLUCION MEDIANTE EL PROCEDIMIENTO DIAGRAMA PRESTON-GASTO DE FLUJO, ASUMIENDO GAS ILIMITADO DISPONIBLE:

- (1) Elabore una gráfica de coordenadas rectangulares, con la P. en las abscisas y la profundidad en las ordenadas, como se muestra en la fig. II.1.1.
- (2) Localice los siguientes datos en la fig. II.1.1: presión de operación ( $P_{wo} = 900$  PSI) a la profundidad cero, y presión en la cabeza ( $P_{wh} = 120$  PSI) también a la profundidad cero.

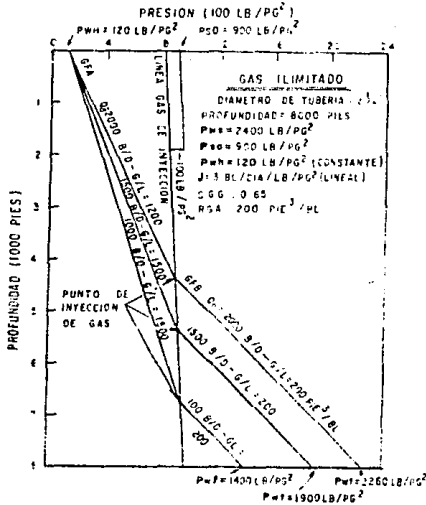


Fig. II.1.1

(Diagrama de coordenadas rectangulares)

- (3) Extienda la presión de operación de 900 PSI, tomando en cuenta el peso de la columna de gas, de la siguiente forma:

De la fig. 2A.1 (apendice 2), para 900 PSI y  $\lambda_g = 0.65$ , - el gradiente del gas es 21.3 PSI/1,000 pie. El peso de la columna a la profundidad total se determina como sigue;

$$\begin{aligned} \text{peso de la columna de gas} &= D \times G_g \\ &= 8,000 \text{ pie} \times \frac{21.3 \text{ PSI}}{1,000 \text{ pie}} \\ &= 170 \text{ PSI} \end{aligned}$$

entonces la presión de operación a 8,000 pie es la presión en la superficie más el peso de la columna de gas, o sea 1,070 PSI.

- (4) Se suponen los siguientes gastos de flujo: 1,000, 1,500 y 2,000 bl/día.
- (5) Se seleccionan las curvas de gradiente a ser utilizadas de acuerdo al gasto y diámetro de T.P.
- (6) Con las curvas de gradiente se obtiene la profundidad - del punto de inyección, y la correspondiente  $P_w$  para cada gasto. Se utiliza la curva de gradiente mínimo para cada gasto como RGIT, (para gas ilimitado).

En la tabla I.1 se tabulan los resultados, utilizando las correlaciones de Hagedorn y las de Ros con pronósticos de comparación.

- (7) Se prepara un diagrama presión-gasto de flujo como se muestra en la fig. II.2.

TABLA II.1

gasto sup.	RGLT	$P_{wt}$ (Hagedorn)	prof.	$P_{wt}$ (Ros)	prof.
1,000	1,500	1,400	6,680	1,005	7,800
1,500	1,500	1,900	5,350	1,600	6,050
2,000	1,200	2,260	4,300	2,100	4,500

(8) Se construye la curva de comportamiento de afluencia su-  
poniendo dos gastos: cero y 3,000 bl/día, con la siguien-  
te ecuación:

$$P_{wt} = P_{wt0} - \frac{q}{J} \quad (J = 1.P. = \text{cte.})$$

Para  $q = 0$  ;  $P_{wt} = P_{wt0}$

$q = 0$  ;  $P_{wt} = 2,400$  PSI

Para  $q = 3,000$  bl/día ;  $P_{wt} = 1,400$  PSI

osea:

$$P_{wt} = 2,400 - \frac{3,000}{3} = 1,400 \text{ PSI}$$

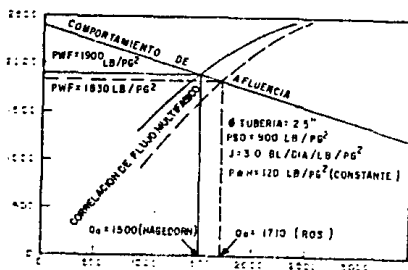


fig. II.1



Con estos puntos se traza la curva de comportamiento de afluencia.

- (9) Los datos obtenidos en la tabla II.1 se localizan sobre la fig. II.2 y se trazan las curvas correspondientes.
- (10) La intersección de las dos curvas con la curva de comportamiento de afluencia, determina el máximo gasto de flujo posible para cada una de las correlaciones (Hagedorn y Ros). La profundidad del punto de inyección se muestra en la fig. II.1.1 (en este caso para Hagedorn).

Los resultados se tabulan en la tabla II.2.

TABLA II.2

CORRELACIONES	Q DE FLUJO POSIBLE	P <sub>m</sub>	PROFUN.
Hagedorn	1,500	1,900	5,350
Ros	1,710	1,830	5,325

SOLUCION MEDIANTE EL PROCEDIMIENTO DIAGRAMA PRESION-GASTO DE FLUJO, ASUMIENDO VOLUMEN DE GAS LIMITADO DISPONIBLE:

Se trabaja el mismo problema excepto, que se considera volumen de gas limitado disponible.

Los volúmenes supuestos de gas limitado disponible serán: 600,000, 400,000, y 200,000 pie<sup>3</sup>/día. El problema se trabajará para 600,000 pie<sup>3</sup>/día disponible.

- (1) Se procede de la misma forma que para volumen de gas ilimitado del paso (1) al paso (3). Ver fig. II.3 para el caso de 600,000 pie<sup>3</sup>/día disponibles.
- (2) Así como en el paso (4) de la solución para gas ilimitado disponible, se suponen gastos, en éste caso, 1,000, 1,500, y 2,000 bl/día.
- (3) Así como en el paso (5) de la solución para gas ilimitado disponible, seleccione las curvas de gradiente para cada gasto de flujo y diámetro de T.P. (2.2, 2.3, 2.4 del apéndice 2)
- (4) Para cada gasto de flujo supuesto, determine la RGLT disponible arriba del punto de inyección. Este incluye -- gas en solución RGLF más RGLI.

Para 1,000 bl/día:

$$RGLI = \frac{600,000 \text{ pie}^3/\text{día}}{1,000 \text{ bl/día}} = 600 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

$$RGLF = 200 \text{ pie}^3/\text{bl} \quad (\text{dato})$$

$$RGLT = 600 \text{ pie}^3/\text{bl} + 200 \text{ pie}^3/\text{bl} = 800 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

Tabule la RGLT correspondiente a cada gasto supuesto en la tabla II.3.

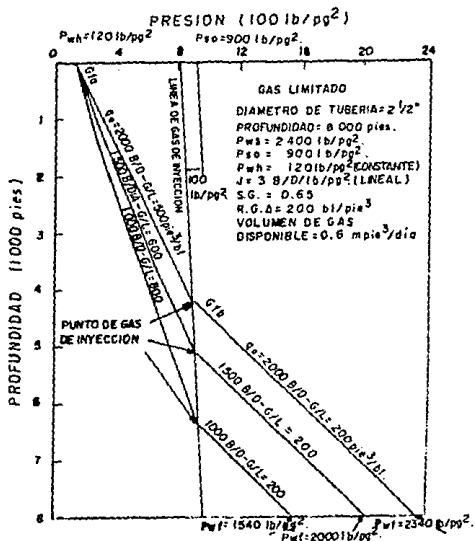


fig. II.3

TABLA II.3

gastos supuestos	RGLI (600000)	RGLT (600000)	RGLT (400000)	RGLT (200000)
1,000	600	800	600	400
1,500	400	600	467	333
2,000	300	500	400	300

- (5) Determine la profundidad del punto de inyección y la  $P_{inj}$  para cada gasto, utilizando la RGLT del caso (4) tabla II.3, y tabule los resultados en la tabla II.4.

TABLA II.4

gasto supuesto	$P_{inj}$ (Hagedorn)	$P_{inj}$ (Ro $\phi$ )	profundidad de inyección (Hagedorn)	profundidad de inyección (Ro $\phi$ )
1,000	1,540	1,220	6,350	7,225
1,500	2,000	1,800	5,050	5,450
2,000	2,340	2,160	4,125	4,350

- (6) Se prepara un diagrama presión Vs. gasto de flujo como el de la fig. II.4.
- (7) La curva de comportamiento de afluencia se construye como se describió previamente. Los resultados se grafican en la fig. II.4 (J=cte)
- (8) Los datos de la tabla II.4 se grafican en la fig. II.4.

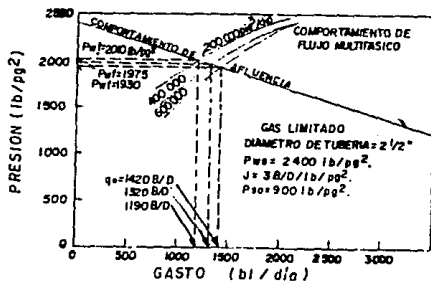


fig. II.4

(9) La intersección de las curvas obtenidas en el caso (8) con la curva de comportamiento de afluencia, es el gasto de flujo máximo en cada caso, y los resultados se tabulan en la tabla II.5.

TABLA II.5

correlaciones	$q_v$	gasto de flujo	$P_{u1}$
Hagedorn y B.	600,000	1,420	1,930
Hagedorn y B.	400,000	1,320	1,975
Hagedorn y B.	200,000	1,190	2,010
Roe	600,000	1,580	1,875
Ros	400,000	1,440	1,920
Ros	200,000	1,260	1,980

SOLUCION MEDIANTE EL PROCEDIMIENTO DE CURVA DE EQUILIBRIO PARA VOLUMEN DE GAS ILIMITADO DISPONIBLE.

- (1) Prepare una gráfica en coordenadas rectangulares de presión Vs. profundidad como se ve en la fig. II.5
- (2) Suponga gastos de producción como: 1000, 1500 y 2000 -- bl/día.
- (3) Seleccione las curvas de gradiente apropiadas para cada gasto de flujo, en este caso se seleccionaron las figs. 2.2, 2.3 y 2.4 (apendice 2).
- (4) para cada gasto, determine la P mediante la sig. ecuación considerando J=cte.

$$P_{wf} = P_{wi} - \frac{q_i}{J}$$

Los resultados se tabulan en la tabla II.6.

TABLA II.6

gasto supuesto	$P_{wf}$
1000	2060
1500	1900
2000	1730

- (5) Los puntos de intersección entre curvas de igual gasto - (gradientes arriba y abajo del punto de inyección) representan los puntos de equilibrio, y estos son los puntos de inyección del gas. Los resultados se tabulan en la tabla II.7

TAFLA II.7

gasto supuesto	punto de inyec. (Hagedorn)	Punto de inyec. (Ros)
1000	3600	2260
1500	5300	4500
2000	7525	6825

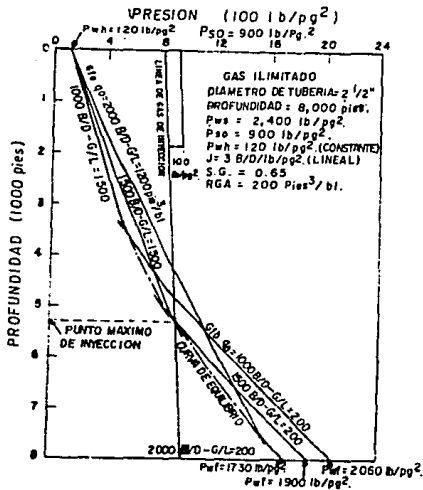


fig. II.5

- (6) La unión de puntos de equilibrio determina la curva de - equilibrio como se muestra en la fig. II.5.
- (7) grafique la  $P_{50}$  en la superficie y determine en gradiente del gas de inyección, reste 100 PSI y dibuje la curva de gas de inyección como se describió anteriormente.

- (8) el punto donde esta línea de inyección de gas intersecta la curva de equilibrio, será el punto de inyección del gas para esa  $P_{so}$ .
- (9) del punto de inyección del gas, extiende la curva hacia el fondo del pozo, y por interpolación, determine la  $P_{wf}$ .
- (10) el gasto de flujo se determinará de acuerdo a la  $P_{wf}$  obtenida en el paso (9), con la sig. ecuación:

$$q_l = (P_{ws} - P_{wf})J \quad \text{para } (J=\text{cte.})$$

los resultados se tabulan en la tabla II.8.

TABLA II.8

correlaciones	gasto de flujo	$P_{wf}$	profundidad
Hagedorn y B.	1500	1900	5300
Ros	1710	1830	5350



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

SOLUCION MEDIANTE EL PROCEDIMIENTO DE CURVA DE EQUILIBRIO PARA VOLUMEN DE GAS LIMITADO DISPONIBLE.

El volumen de gas limitado en este problema se supone de -- 600,000 pie/día.

- (1) Prepare la gráfica presión-profundidad como en los ejemplos anteriores.
- (2) suponga gastos de producción: 1000, y 1500 bl/día.
- (3) seleccione las curvas de gradiente apropiadas para cada gasto, figs. 2.2 y 2.3 (apendice 2).
- (4) para cada gasto determine la  $P_{wf}$  como sigue:

$$P_{wf} = (P_{ws} - \frac{qL}{J}) \quad (J = \text{cte.})$$

- (5) determine la RGLT (arriba del punto de inyección) para cada gasto.
- (6) para cada gasto determine el punto de inyección del gas, como se describió anteriormente. Los resultados se tabulan en la tabla II.9.

TABLA II.9

gasto supuesto	punto de inyec. (Hagedorn)	punto de inyec. (Ros)
1000	3580	2260
1500	5660	4550

- (7) dibuje la curva de equilibrio (vea fig. II.6).

La solución es igual a la descrita previamente, o sea se extiende la curva de gas de inyección, y donde inter--

secta con la curva de equilibrio, es el punto de inyección del gas. De este punto se extiende la curva hacia el fondo del pozo y se determina la  $P_{wf}$  por interpolación.

Con esto se puede determinar el gasto de producción a esa  $P_{wf}$ . Los resultados se tabulan en la tabla II.10.

TABLA II.10

correlaciones	gasto de flujo posible	$P_{wf}$	punto de inyecc.
Hagedorn y B.	1395	1935	5230
Ros	1560	1880	5220

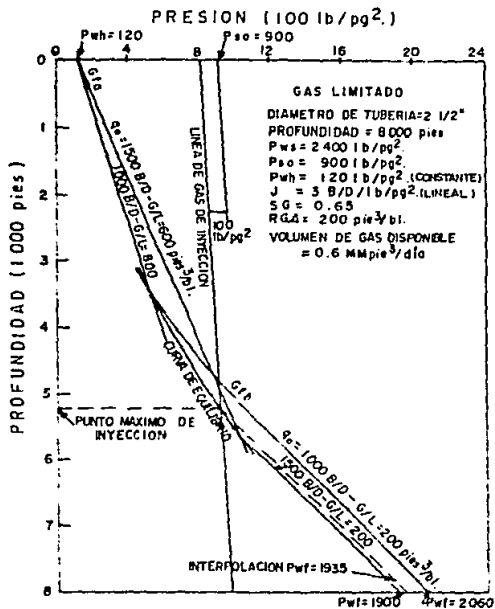


fig. II.6

En los siguientes problemas se utilizarán los siguientes datos del pozo. Se solucionarán mediante las correlaciones de flujo multifásico horizontal de Eaton y las de flujo multifásico vertical de Hagedorn y Brown, y las de Ros.

$D = 7,000$  pie  
long. de L.F. =  $3,000$  pie  
 $\emptyset$  T.P. =  $3$  pulgadas.  
 $\emptyset$  L.F. =  $3$  pulgadas.  
 $P_{ws} = 2,600$  lb/pulg<sup>2</sup>  
 $P_{so} = 900$  lb/pulg<sup>2</sup>  
 $P_{sep} = 80$  lb/pulg<sup>2</sup>  
IP =  $5$  bl/día/lb/pulg<sup>2</sup> (líneal)  
RGA =  $400$  pie<sup>3</sup>/bl  
RGL =  $200$  pie<sup>3</sup>/bl  
producción =  $50$  % aceite y  $50$  % agua  
 $\gamma_g = 0.70$   
RGLT = variable  
 $P_{wh} =$  variable

Determinar: el máximo gasto de flujo posible.

SOLUCION MEDIANTE EL PROCEDIMIENTO DIAGRAMA  $P_{wm} - q$  FLUJO.

(CONSIDERANDO VOL. DE GAS ILIMITADO DISPONIBLE)

- (1) Elabore una gráfica de presión Vs. profundidad. (en la fig. II.7 se utilizaron correlaciones de flujo multifásico de Hagedorn y B.)
- (2) De los datos dados grafique la  $P_o$  en la fig. II.7.
- (3) Trace la línea de gradiente del gas de inyección (como se indicó previamente) como sigue:

De la fig. 3 A.1 (apendice ). El gradiente del gas para  $900 \text{ lb/pg}^2$  y  $\delta_g = 0.7$  es:  $\frac{23.7 \text{ lb/pg}^2}{1000 \text{ pie}}$

$$\text{peso de la columna de gas} = \frac{23.7 \text{ lb/pg}^2}{1000 \text{ pie}} \times 7000 \text{ pie} = 165.2 \text{ lb/pg}^2$$

$$\begin{aligned} \text{la presión de operación} &= 900 \text{ lb/pg}^2 + 165.2 \text{ lb/pg}^2 \\ \text{a la profundidad total} &= 1065.2 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$

- (4) Reste  $100 \text{ lb/pg}^2$  a la  $P_o$ . Trace una paralela a la línea anterior, esta es la línea de puntos de inyección del gas.
- (5) Suponga varios gastos de producción; 1000, 1500, 2000, y 3000 bl/día.
- (6) Seleccione las curvas de gradiente apropiadas para cada gasto de flujo.
- (7) Suponga RGLT para cada gasto de flujo; 400, 600, 800, - 1000 y 1500 pie<sup>3</sup>/bl

- (8) Para cada gasto de flujo determine la  $P_{wf}$  como sigue:

$$P_{wf} = P_{ws} - \frac{qJ}{J} \quad (J = \text{cte.})$$

Sustituyendo:

$$P_{wf} = 2600 - \frac{2000}{5} = 2,200 \text{ lb/pg}^2$$

Calcule de la misma forma los valores de  $P_{wf}$  para cada --  
gasto supuesto y tabulelos como se muestra en la tabla --  
II.11.

- (9) Con las curvas de gradiente vertical seleccionadas, de--  
termine la  $P_{wh}$  permisible utilizando el procedimiento de g  
rito anteriormente. La fig. II.7 muestra el procedi--  
miento para un gasto de 2000 bl/día y RGLTs de 400, 600,  
800, 1000 y 1500 pie/bl. Revita el procedimiento para  
los otros gastos supuestos considerando las mismas RGLTs.

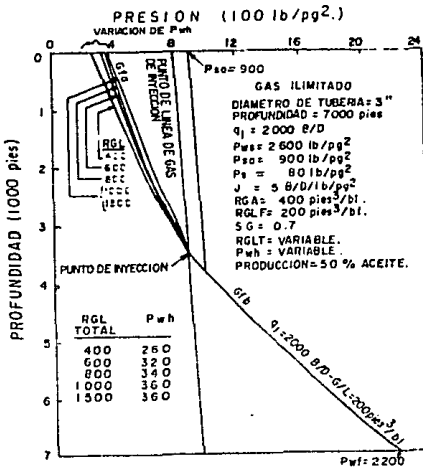


fig. II.7

TABLA II.11

GASTO DE FLUJO SUPUESTO	$P_{wh}$
1000	2400
1500	2300
2000	2200
3000	2000

- (10) De las curvas de gradiente horizontal seleccionadas, determine la  $P_{wh}$  requerida. La fig. II.8 muestra el procedimiento, considerando un gasto de 2000 bl/día,  $P_{so} = 80$  lb/pg<sup>2</sup> y RGLTs de 400, 600, 800, 1000 y 1500 pie<sup>3</sup>/bl. Repita el procedimiento para los otros gastos supuestos y mismas RGLTs.

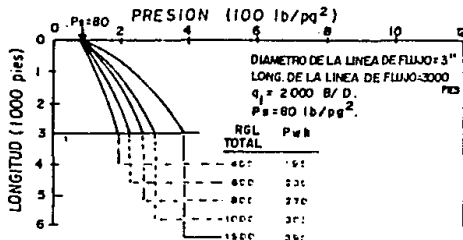


fig. II.8

- (11) Tabule las  $P_{wh}$ 's permisibles encontradas tanto por correcciones de flujo vertical como horizontal, como se muestra en la tabla II.12.

TABLA II.12

gasto supuesto	RGLT	correlaciones verticales		correlaciones
		$P_{wh}$ (Hagedorn)	$P_{wh}$ (Ros)	horizontal $P_{wh}$ (Eaton)
1000	400	370	345	145
	600	440	400	140
	800	480	420	160
	1000	500	460	170
	1500	540	490	195
1500	400	325	280	160
	600	390	360	185
	800	420	380	205
	1000	430	400	225
	1500	450	440	285
2000	400	260	220	195
	600	320	280	230
	800	340	300	270
	1000	360	330	305
	1500	360	350	390
3000	400	110	45	280
	600	140	45	320
	800	160	85	360
	1000	160	90	425
	1500	160	110	535

(12) Con los valores de la tabla II.12, elabore un diagrama  $P_{wh}$  -  $q$  flujo (ver la fig. II.9 para el caso de correlaciones verticales de Brown y correlaciones horizonta-

les de Eaton), (ver la fig. II.10 para el caso de correlaciones verticales de Ros y correlaciones horizontales de Eaton). El máximo gasto de flujo posible se obtiene conectando los puntos de igual RGLT, y trazando a través de estos puntos una curva, en el punto más a la derecha se obtiene  $q_{max}$ , RGLT y  $P_{wh}$  correspondiente. Los resultados se tabulan en la tabla II.13.

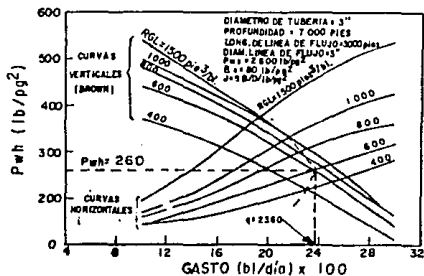


fig. II.9

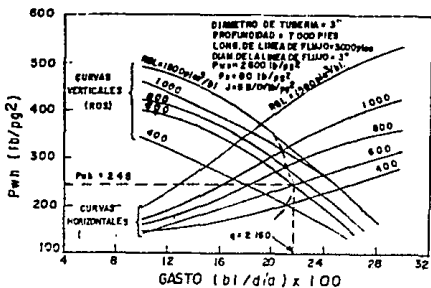


fig. II.10



TABLA II.13

CORRELACIONES	MAXIMO $q$ flujo	$P_{wh}$	RGLT
Hagedorn y Brown	2,360	260	500
Ros	2,160	245	600

SOLUCION MEDIANTE EL PROCEDIMIENTO DIAGRAMA  $P_{wf} - q$  FLUJO.

- (1) Suponga varios gastos de producción; 1000, 1500, 2000 y 4000 bl/día.
- (2) Suponga varias RGLT; 400, 600, 800, 1000, y 1500 pie<sup>3</sup>/bl.
- (3) Seleccione las curvas de gradiente horizontal y vertical apropiadas o bien realice los calculos por computadora.
- (4) Con las curvas de gradiente horizontales determine la  $P_{wf}$  como se describió previamente. La fig. II.8 muestra el procedimiento para un gasto supuesto de 2000 bl/día. Repita el procedimiento para los otros gastos supuestos, utilizando las mismas RGLT seleccionadas.
- (5) De las curvas de gradiente vertical determine la  $P_{wf}$  para un gasto de flujo y RGLTs seleccionadas, repita para los otros gastos de flujo con las mismas RGLTs. (ver fig. II.11). Tabule los resultados como se muestra en la tabla II.14.

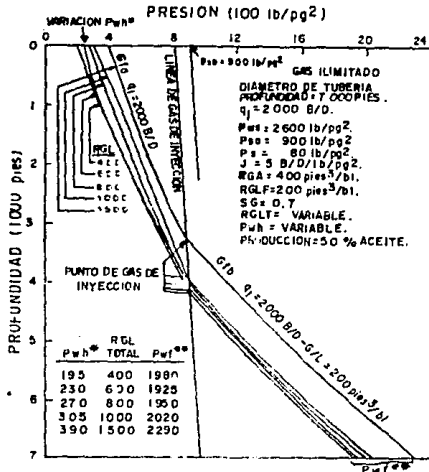


fig. II.11

TABLA II.14

gasto supuesto	RGLT	Horizontal	Vertical	
		$P_{wh}$ (Eaton)	$P_{wf}$ (Hagerdorn)	$P_{wf}$ (Ros)
1000	400	145	1500	1645
	600	140	1160	1400
	800	160	1100	1360
	1000	170	1045	1260
	1500	195	965	1170
1500	400	160	1730	1920
	600	185	1590	1720
	800	205	1535	1710
	1000	225	1550	1700
	1500	285	1690	1630
2000	400	195	1980	2135
	600	230	1925	2080
	800	279	1950	2090
	1000	305	2020	2160
	1500	390	2290	2260
4000	400	300	2860	2840
	600	465	2985	2940
	800	515	3090	3044
	1000	560	3160	3150
	1500	660	3180	3365

- (6) Prepare un diagrama  $P_{wf} - q_f$  flujo como se muestra en la fig. II.12.
- (7) Construya sobre el diagrama del paso (6) la curva de comportamiento de afluencia, considerando dos gastos, 800 y 3000 bl/día, la correspondiente  $P_{wf}$  se encuentra a partir de la ecuación de comportamiento de afluencia al pozo, - como sigue:
- para 800 bl/día;
- $$P_{wf} = 2600 - \frac{800}{5} = 2200 \text{ lb/pg}^2$$
- para 3000 bl/día:
- $$P_{wf} = 2600 - \frac{3000}{5} = 2000 \text{ lb/pg}^2$$
- (8) De la tabla II.14 trace las curvas de  $P_{wf} - q_f$  flujo a - RGLT etc. sobre el diagrama del paso (6). La fig. II.12 muestra los resultados para el caso de la correlación de flujo vertical de Hagerdorn y Brown, y la fig. II.13 para el caso de Ros.

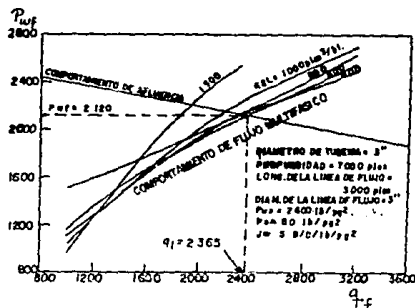


fig. II.12

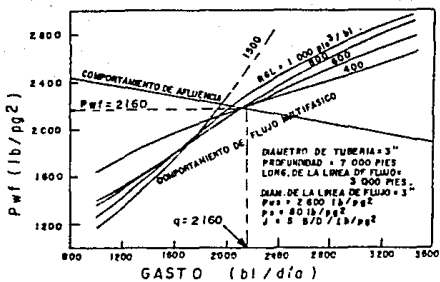


fig. II.13

- (9) Obtenga el gasto de flujo en la intersección de la curva de comportamiento de afluencia y las curvas de flujo multifásico, en el punto más a la derecha sobre la escala de gasto, anote la correspondiente  $P_{wf}$  y RGLT. Tabúle los resultados en la tabla II.15.

TABLA II.15

correlaciones	gasto de flujo	$P_{wf}$	RGLT
Hagedorn y Brown	2365	2120	600
Ros	2160	2160	600

- (10) Una forma de determinar más fácilmente el máximo gasto de flujo con su correspondiente RGLT, es elaborando un diagrama de gasto Vs. RGLT como se muestra en la fig. -- II.14, el cual está realizado en base a los datos de las intersecciones entre curvas de flujo multifásico y la -- curva de comportamiento de afluencia de las figs. II.12 y II.13. Los resultados se tabulan en la tabla II.16.

TABLA II.16

RGLT	q flujo (Hagedorn)	q flujo (Ros)
400	2290	2120
600	2365	2160
800	2280	2140
1000	2180	2040
1500	1930	2000

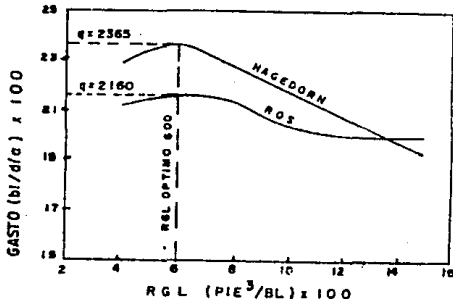


FIG. II.14

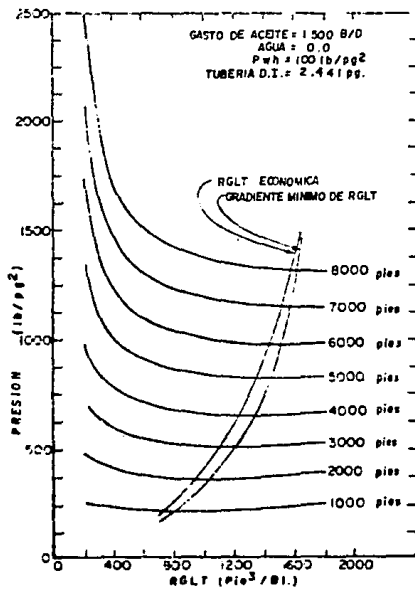


fig. II.16

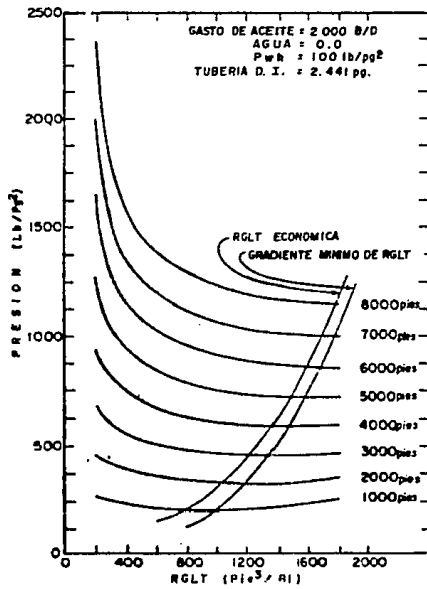


FIG. II.17



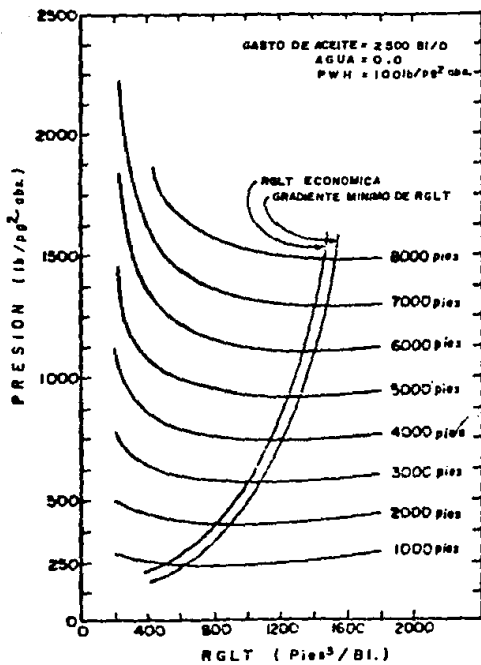
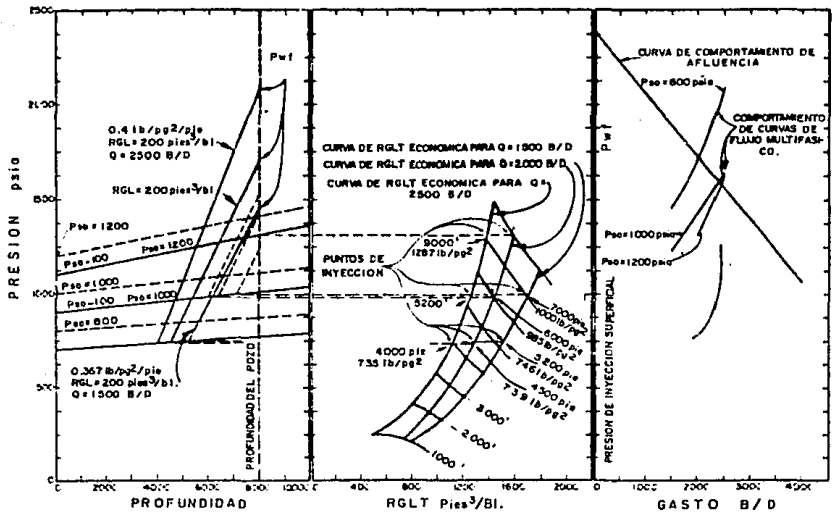


fig. II.18

Fig. II.19



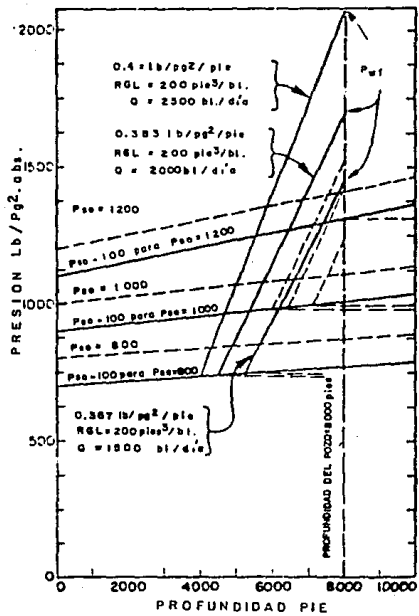


fig. II.19

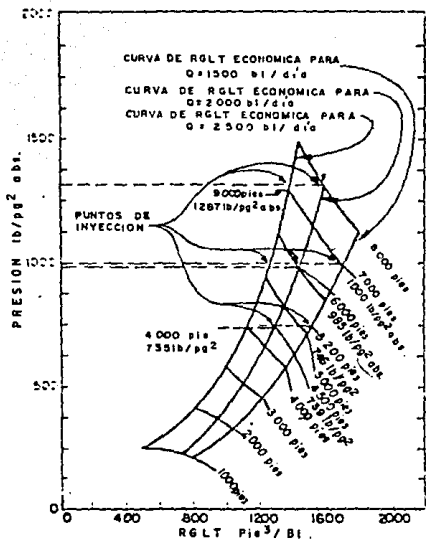


fig. II.14B

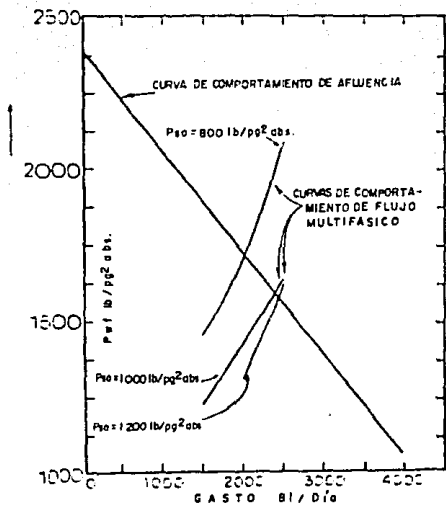


fig. II.19C

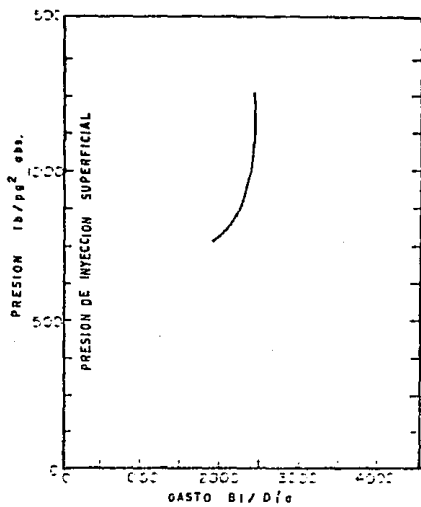


fig. II.19D

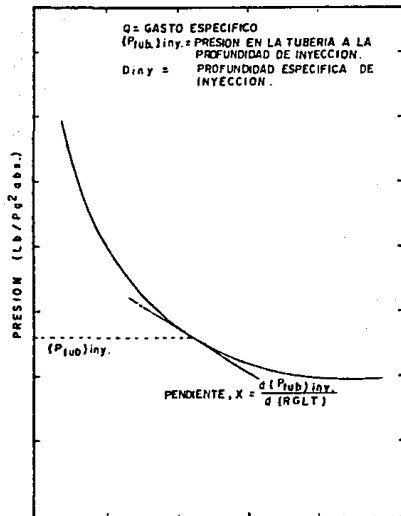


Fig. 11.20

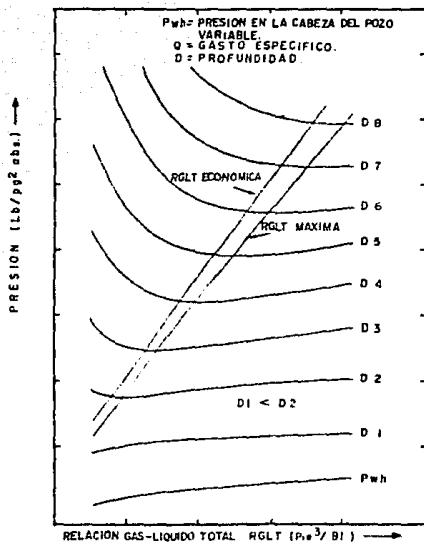


fig. 11.21A

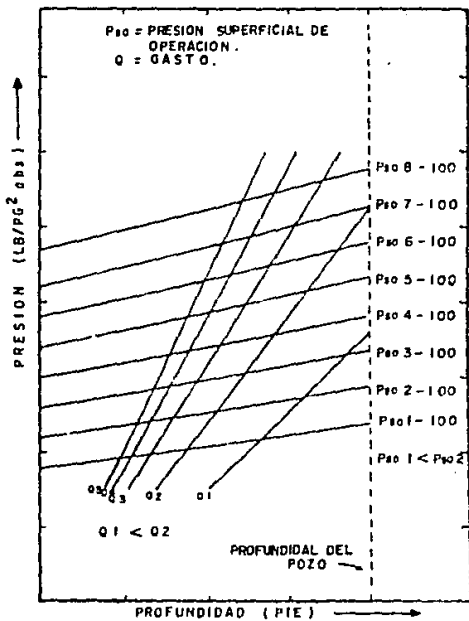


fig. 11.21B



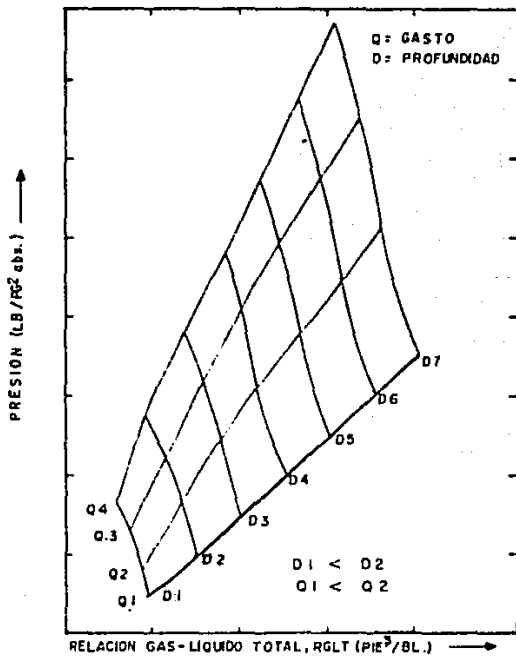


fig. II.21C

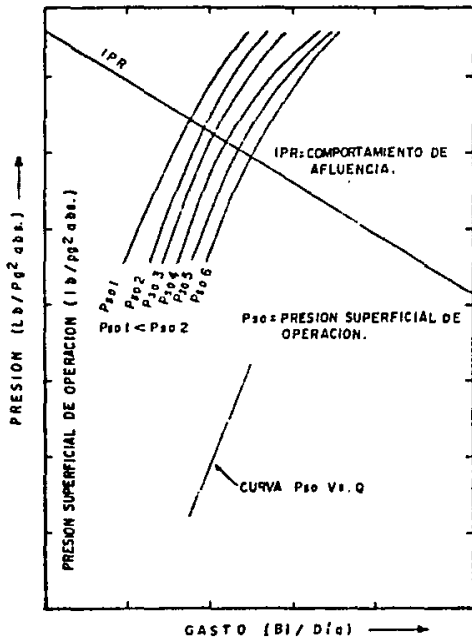


fig. 11.21D

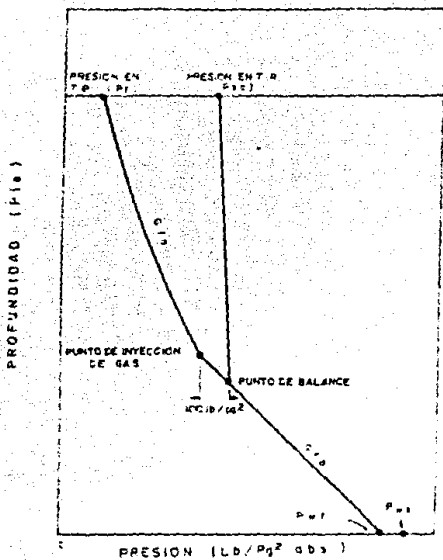


Fig. II. 26

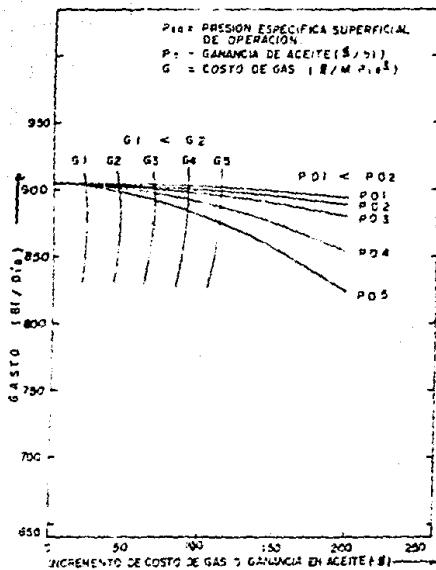


Fig. II. 28

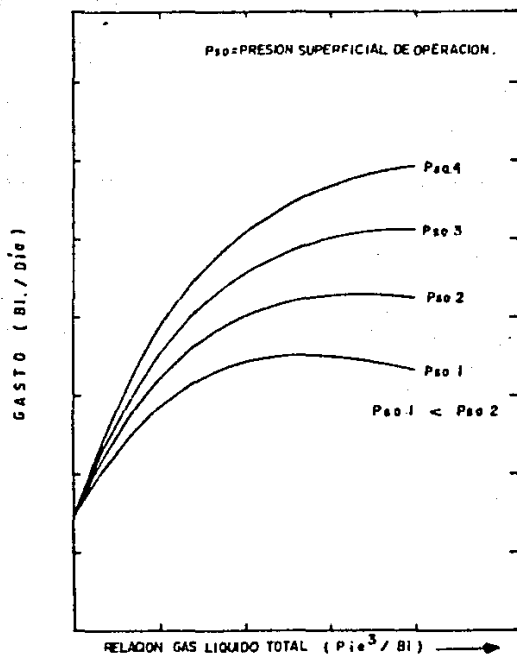


fig. II.22D

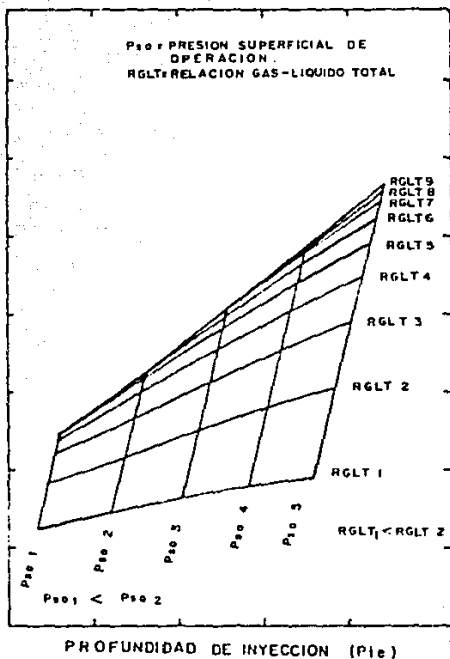


Fig. 11.22B

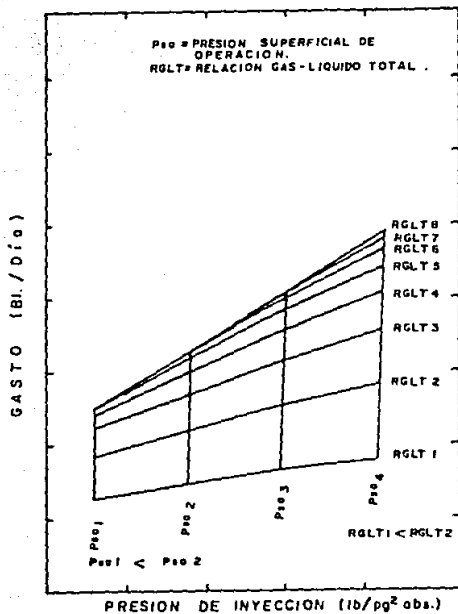


fig. II.22F

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

1. Kermit E. Brown.  
Gas Lift, vol. 2a.  
University of Tulsa, 1980.
2. Gómez Cabrera J.A.  
Apuntes de Producción de Pozos I.  
UNAM (Fac. de Ingeniería). 1988.
3. López Juviera R.  
Aplicación de Análisis Nodal en Instalaciones de B.N.  
Tesis de Ing. Petrolero, 1986.
4. Fuentes Mucamendi F.  
Análisis Nodal Fundamentos y Aplicación.  
Tesis Ing. Petrolero, 1986.

## CAPITULO III

### APLICACION DE ANALISIS NODAL AL BOMBEO ELECTRICO

#### III.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO

El Bombeo Eléctrico se usa generalmente en la industria petrolera para producir fluidos a gastos altos.

La bomba es del tipo centrífuga multietapa que puede ser diseñada con las etapas necesarias para levantar fluidos fácilmente de 12,000 pie de profundidad y con gastos de 250 a 25,000 bl/día, dependiendo del diámetro de la T.R. y la profundidad neta de bombeo.

El equipo subsuperficial de un pozo productor "tipo" consiste de una bomba en la parte superior, la sección del protector, y un motor eléctrico en la parte inferior; todo formando un conjunto y suspendido de la T.P.

La energía es llevada al motor a través de un cable que es fijado al aparejo de la T.P. mediante abrazaderas espaciadas cada 15 pie. El conductor o cable consiste de tres líneas aisladas para resistir las condiciones del pozo. El cable tiene un recubrimiento de metal flexible para proteger al aislamiento cuando se está instalando o reparando el equipo.

La parte del cable que está a la altura de la bomba tiene una forma plana para mantener el espacio entre el equipo y la tube



ría. La parte final del cable viene provista de fábrica con un dispositivo especial para ser conectado al motor. El único equipo que se tiene en la superficie es el tablero de control, un banco de transformadores y la caja de venteo.

La energía eléctrica generalmente es suministrada por alguna compañía de electricidad, pero también se puede suministrar mediante algún generador portátil con motor de combustión interna.

En la fig.(3.1) se muestra una instalación convencional de una bomba electrocentrífuga.

En pozos con alta RGA se puede instalar un separador en la succión de la bomba para separar el gas del fluido producido.

Los fabricantes proporcionan curvas de comportamiento de las bombas y demás información para diseñar este tipo de bombeo artificial.

La selección del tipo y tamaño correcto de la unidad de bombeo para un pozo específico depende de que se tenga la información completa de ese pozo. En estos datos se incluye gasto de producción, presión estática, índice de productividad del pozo, presión en la cabeza del pozo, temperatura de fondo, relación gas-aceite, gravedad específica del fluido producido, presión de burbuja, viscosidad del aceite y otras condiciones especiales de operación tales como arena, corrosión, parafina o problemas de emulsiones.

### III.2 VENTAJAS DEL BOMBEO ELECTRICO

1) La capacidad que tiene este tipo de bombeo para manejar altos volúmenes de producción es el principal atractivo que tiene este sistema para que sea seleccionado. Sin embargo el Bombeo Eléctrico está encontrando mayor aplicación en pozos de

bajo volumen de producción.

ii) No requiere de mucha supervisión por parte del ingeniero de producción.

iii) El Bombeo Eléctrico puede ser empleado para inyectar -- fluidos a la formación.

### III.3 DESVENTAJAS DEL BOMBEO ELECTRICO

i) Debido a la potencia requerida en el motor eléctrico, la profundidad es un factor que limita a este sistema. Al aumentar la profundidad, disminuye el diámetro de la T.R. y aumenta la temperatura de fondo, lo cual también actúa como una limitante.

ii) Los costos iniciales pueden ser altos, ya que las bombas de alta potencia de etapas múltiples y alto volumen son muy caras.

Además se debe tomar en cuenta el costo del cable, que también es muy elevado, especialmente si se solicita con el aislamiento necesario para altas temperaturas y anticorrosivo. Se debe abastecer al sistema con los transformadores adecuados para tener el voltaje óptimo de operación.

iii) Cuando ocurren fallas en el cable, para reparar éste, - se requiere sacar la T.P. La alta temperatura, corrosión, y mala calidad del cable pueden ser las causas de las fallas.

iv) Las fallas en el motor se deben a la alta temperatura, - corrosión y el material abrasivo. La alta RGA puede dar como resultado una eficiencia baja y provocar fallas debido al gas libre el cual puede bloquear o trabar la bomba.

v) Se necesita supervisión del ingeniero de producción en el diseño, instalación, mantenimiento y solución de problemas que se presentan en este tipo de bombeo artificial.

### III.4 CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA

Las curvas de comportamiento para varios modelos de bomba - fueron presentados por Brown. Las bombas se dividen en grupos, - dependiendo del diámetro mínimo de T.R. ya que dentro de este - la bomba se colocará. Cada bomba funciona diferente, independien- temente de que se encuentre en el mismo grupo.

Las curvas de comportamiento de una bomba eléctrica fig. -- (3.2 y 3.3) representan la variación de carga, potencia, eficien- cia y capacidad. La capacidad se refiere al volumen de fluido -- producido, el cual puede incluir gas libre y/o disuelto.

Así las curvas se darán para una frecuencia establecida --- (normalmente de 50 ó 60 ciclos) y pueden ser cambiadas con un -- variador de frecuencia.

La carga (dada en pie por etapa) desarrollada para una bom- ba centrífuga, es la misma sin tomar en cuenta el efecto de la - gravedad específica del tipo de fluido bombeado. Cuando se convi- erte esta carga a presión, está se multiplica por el gradiente - del fluido en cuestión. Por lo tanto, tenemos la siguiente ecua- ción:

P desarrollada  
por la bomba = (carga/etapa)(gradiente del fluido)(No. de etapa)

Cuando se bombea gas con el líquido, la capacidad y, consecue- ntemente la carga por etapa y el gradiente varía cuando la presión del fluido es elevada del valor de presión de succión  $P_3$  al valor de presión de descarga  $P_2$ . Así, la ec. de arriba puede escribirse como sigue:

$$dP = h(v) \times G_p(v) \times d(S_p) \dots\dots\dots(3.1)$$

donde:

$dP$  = presión diferencial desarrollada por la bomba, (lb/peg<sup>2</sup>).

n = carga por etapa, (pie/etapa)

G<sub>1</sub> = gradiente del fluido bombeado, (lb/ft<sup>3</sup>/pie)

d(S,  $\dot{V}$ ) = diferencial del número de etapas

Note que los paréntesis están incluidos para indicar que h y G<sub>1</sub> están en función de la capacidad v, el cual está dado por la ecuación:

$$v = q_{cs} Fv \quad \dots \quad (3.1 a)$$

El gradiente del fluido a cualquier presión y temperatura es ta dado por:

$$G_1(v) = 0.433 \gamma_1(v) \quad \dots \quad (3.2)$$

pero:

$$\gamma_1(v) = \frac{W}{350v}$$

Donde W es el peso de la capacidad V a cualquier presión y temperatura, la cual es igual al peso a condiciones estandar. Por lo tanto;

$$\gamma_1(v) = \frac{q_{cs} P_{cs}}{350v} \quad \dots \quad (3.3)$$

Sustituyendo la ecuación (3.3) en la ecuación (3.2) tenemos:

$$G_1(v) = \left( \frac{0.433}{350} \right) \frac{q_{cs} P_{cs}}{v} \quad \dots \quad (3.4)$$

P<sub>cs</sub> es el peso de 1 bl de líquido más gas bombeado a condiciones estandar o:

$$P_{cs} = 350 w \gamma_{lcs} + 350(1 - w) \gamma_{gcs} + (GIP)(RGL)P_{cs} \quad (3.5)$$

Donde  $\gamma_{gcs}$  es la densidad del gas (lb/ft<sup>3</sup>) a c.s. y GIP es el porcentaje de gas que pasa a través del sistema de bombeo

Sustituyendo la ec. (3.4) en la ec. (3.1) tenemos;

$$d(S_t) = \left( \frac{350}{0.433 q_{cs} \rho_{cs}} \right) \frac{v}{h(v)} dp \dots\dots\dots (3.6)$$

El número total de etapas se obtiene de integrar la ecuación de arriba entre la presión de succión y la presión de descarga.

$$\int_0^{S_t} d(S_t) = \left( \frac{350}{0.433 q_{cs} \rho_{cs}} \right) \int_{P_3}^{P_2} \frac{v}{h(v)} dp \dots\dots\dots (3.7)$$

6

$$S_t = \left( \frac{808.3141}{q_{cs} \rho_{cs}} \right) \int_{P_3}^{P_2} \frac{v}{h(v)} dp \dots\dots\dots (3.7)$$

$$FV = wc + (1-wc)Bo + (RGL - (1-wc)Rs)Bg \dots\dots\dots (3.1b)$$

$$FV = wc + (1-wc)Bo + GIP(RGL - (1-wc)Rs)Bg \dots\dots\dots (3.1c)$$

### III.4 POTENCIA

Las curvas de comportamiento de la bomba (fig.3.2 y 3.3) darán la potencia por etapa, basada en la gravedad específica del fluido igual a 1.0.

Así la potencia se multiplica por la gravedad específica del fluido que este bajo consideración. De esto tenemos la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia} = (\text{Potencia/etapa})(\text{gravedad específica del fluido})$$

( No. de etapas)

Tanto la potencia por etapa, la gravedad específica del fluido y el número de etapas depende de la capacidad  $v$ , la cual varía de la presión de succión a la presión de descarga, la ecuación de arriba queda:

$$d(\text{HP}) = hp(v) \times \gamma_g(v) \times d(S_t) \dots\dots\dots (3.8)$$

Sustituyendo las ecs. (3.3) y (3.6) en la ec. de arriba, tenemos:

$$d(\text{HP}) = \left( \frac{1}{0.433} \right) \frac{hp(v)}{h(v)} dp \dots\dots\dots (3.9)$$

La potencia total requerida se obtiene por integración de ----

la ecuación de arriba entre la presión de succión y la presión de descarga será:

$$\int_0^{HP} d(HP) = \left(\frac{1}{0.433}\right) \int_{P_3}^{P_2} \frac{hp(v)}{h(v)} dp$$

6

$$HP = \left(\frac{1}{0.433}\right) \int_{P_3}^{P_2} \frac{hp(v)}{h(v)} dp \dots\dots\dots(3.10)$$

Para cada bomba, hay un rango de capacidad dentro del cuál la eficiencia de la bomba se acerca a la eficiencia pico (ver figura 3.2 y 3.3). El volumen variará, por lo tanto, si el gasto es seleccionado de la presión de succión a la presión de descarga, pero permanecerá éste dentro de una eficiencia adecuada de bombeo.

### III.5 CURVAS DE PRESION EN LA SUCCION DE LA BOMBA

La predicción de las curvas de presión de succión de la bomba se considera para dos casos:

- (1) Cuando se bombea sólo líquido
- (2) Cuando se bombea líquido y gas

Para ambos casos, se da para la bomba que se coloca en el fondo del pozo y considerando que la presión en la cabeza del pozo - así como el diámetro del agujero se mantienen constantes. Para el caso 2 se toma para toda asociación de gas que se bombea con el líquido. La predicción de las curvas de presión de succión de una bomba eléctrica será directo para el caso 1 e indirecto para el caso 2.

#### III.5.1 BOMBEO SOLO DE LIQUIDO

Para líquidos que son ligeramente compresibles, el volumen del gasto de producción se puede considerar constante e igual al ---

gasto superficial  $q_{cs}$ . También, la carga por etapa puede ser constante, y la ecuación (3.7) se puede integrar quedando:

$$S_t = \left( \frac{808.3141}{\rho_{fcs} h} \right) (P_2 - P_3) \dots\dots\dots(3.11)$$

Resolviendo la ec. (3.11) para  $P_3$ :

$$P_3 = P_2 - S_t \left( \frac{\rho_{fcs} h}{808.3141} \right) \dots\dots\dots(3.12)$$

La ec. (3.10) se puede también integrar quedando:

$$HP = \left( \frac{1}{0.433} \right) \frac{hp}{h} (P_2 - P_3) \dots\dots\dots(3.13)$$

Sustituyendo la ec. (3.11) en la ec. anterior queda:

$$HP = hp \gamma_{fcs} S_t \dots\dots\dots(3.14)$$

### III.5.1.1 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACION DE CURVAS DE PRESION EN LA SUCCION DE LA BOMBA PARA LIQUIDOS.

Un procedimiento sencillo para predecir curvas de presión de succión en la bomba para el caso de cuando sólo se bombea líquido es el siguiente. Este procedimiento se ilustra con figuras, de la (figura 3.4 a 3.7).

1. Seleccione una bomba, adecuada para un diámetro de T.R. \* dado y capacidad de flujo del pozo.
2. Calcule la  $\beta_{cs}$  de la ec. (3.5) ( $RGL=0$ ) y  $\gamma_{cs}$  de la ec. --- (3.3) ( $v=\gamma_{cs}$ ).
3. Tomar varios gastos de producción y, para cada uno de estos gastos realizar lo siguiente:
  - a) Leer la carga por etapa de la curva de comportamiento de la bomba y calcular la cantidad ( $\beta_{cs}h/808.3$ )
  - b) Determinar la presión de descarga requerida de una correlación de gradiente de presión.
  - c) Tomar varios números de etapas y, para cada uno de estos valores, calcular la presión de succión de la ec. (3.12).
4. Graficar la presión de succión  $P_s$  Vs gasto para cada número de etapas tomado, y sobre la misma gráfica, graficar la curva IPR a la misma escala (ver fig. 3.4).
5. Leer los gastos a la intersección de las curvas de presión de succión de la bomba con la curva IPR.
6. Para cada gasto, leer la potencia por etapa de la curva de comportamiento de la bomba; entonces calcular la potencia total requerida de la ec. (3.14).
7. Graficar los gastos Vs. el número de etapas y fuerza requerida. Colocar la variación de la eficiencia de la bomba en la misma gráfica (fig. 3.5).
8. Seleccione el gasto adecuado.

### III.5.2 SELECCION DEL GASTO

Ya sea que se bombeé sólo líquido o líquido con gas, en la selección del gasto se puede dar el siguiente criterio, 1. ---



el volumen variará entre la presión de succión y la presión de -- descarga tal que pueda permanecer en el rango de eficiencia adecuada de la bomba y 2. que resulte económicamente factible.

Para el número de etapas, dado el incremento de gasto de producción, el efecto de fricción llega a ser significativo en la sarta, causando incrementos en la presión de descarga. Como resultado, para una etapa continua el gasto de producción disminuye hasta llegar a ser insignificante.

### III.6 BOMBEO DE LIQUIDO Y GAS

A causa de la alta compresibilidad del gas, el volumen de fluido producido ( $v$ ) sufre una variación significativa con los valores de presión de succión y presión de descarga del fluido. A cualquier punto de presión entre la de succión y la de descarga, el factor de volumen se determina con la ec. (3.1b) considerando que el gas se bombea con el líquido, o la ec. (3.1c) si un porcentaje de gas es venteadado. Para uno u otro caso, el volumen de flujo está dado por la ec. (3.1a).

#### III.6.1 DETERMINACION DEL NUMERO DE ETAPAS

A causa de  $v$ , consecuentemente  $h$  varía con el paso del fluido a través de la bomba, por lo tanto la integración directa de la ec. (3.7) es posible sólo si la integración  $\frac{v}{h(v)}$  se reduce a una simple función de presión.

La existencia de gas en la sección de succión de la bomba, indica que la presión en la succión de la bomba está abajo del punto de burbuja del crudo (crudo saturado).

Si este es el caso y si la presión de descarga requerida es

ta arriba del punto de burbujeo, la ec. (3.7) se puede resolver -  
por dos integrales como sigue:

$$S_1 = \frac{A}{q_{cs}} \int_{P_3}^{P_b} \frac{v}{h(v)} dP + \frac{A}{q_{cs}} \int_{P_b}^{P_2} \frac{v}{h(v)} dP \quad \dots (3.15)$$

donde:  $A = 808.3141/\rho_{cs}$  - constante ..... (3.16)

Para el comportamiento de integración numerico, la ec. (3.15)  
se escribe en una forma más conveniente como;

$$S_1 = \frac{A}{q_{cs}} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{v}_i}{\bar{h}_i} \Delta P_{i,1} + \frac{A}{q_{cs}} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{v}_i}{\bar{h}_i} \Delta P_{i,2} \quad \dots (3.17)$$

donde:

$P_1$  = cualquier presión de succión arriba del punto de burbujeo.

$P_2$  = cualquier presión de succión abajo del punto de burbujeo.

$P_{cs}$  = Presión de descarga ( $P_2$ )

$P_m$  = Presión del punto de burbujeo ( $P_b$ )

$\Delta P_{i,1} = P_{i,1} - P_1$

$\Delta P_{i,2} = P_{i,2} - P_2$

$\bar{v}/\bar{h}$  y  $\bar{v}/\bar{h}$  = Cantidad promedio evaluada a la presión - promedio  $\bar{P}_1$  y  $\bar{P}_2$  respectivamente.

donde:

$$\bar{P}_1 = (P_{i,1} + P_1) / 2 \quad \text{y} \quad \bar{P}_2 = (P_{i,2} + P_2) / 2$$

La razón principal para dividir el número de etapas dentro -  
de dos sumatorias es el factor  $v$  y  $h$  que tienen ligeros cambios a  
riba del punto de burbujeo; también  $\Delta P_{i,1}$  y  $\Delta P_{i,2}$  pueden tomar va  
lores grandes. Res\_ultados satisfactorios se obtienen uniforme-  
mente si  $\Delta P_{i,1}$  se toma como la diferencia entre  $P_b$  y  $P_1$  y la canti-

dad  $v/h$  se evalúa en el punto medio.

Se toman  $\Delta P_3$  constantes. Para este caso la ec. (3.17) puede escribirse como sigue:

$$S_{11} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A \Delta P_3}{q_{cs}} \right) \frac{\bar{v}_i}{\bar{h}_i} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

donde:

$P_{10}$  = Presión de descarga ( $P_1$ )

$P_{1n}$  = Presión de succión ( $P_3$ )

$\eta = (P_2 - P_3) / \Delta P_3$

$P_{3,1} = P_{3,n} - \Delta P_3 \quad \dots\dots\dots (3.18a)$

La cantidad  $v/h$  se evalúa a la presión promedio dada por:

$$\bar{P}_{3,1} = (P_{3,1} + P_{3,n}) / 2 \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

En realidad, cualquier presión  $P_{3,1}$  puede considerarse como presión de succión. Para ilustrar este punto, la ec. (3.18) puede escribirse de la siguiente manera:

$$S_{11} = \sum_{i=1}^n \Delta(S_{1i}) \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

donde:

$$\Delta(S_{1i}) = \frac{A \Delta P_3}{q_{cs}} \frac{\bar{v}_i}{\bar{h}_i} \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

Por lo tanto, el orden para obtener una presión de succión  $P_{3,1}$ , será:

$$S_{11} = \Delta(S_{11}) = \left( \frac{A \Delta P_3}{q_{cs}} \right) \frac{\bar{v}_1}{\bar{h}_1} \quad \dots\dots (3.22)$$

El orden para obtener  $P_{3,2}$  será:

$$S_{12} = \Delta(S_{11}) + \Delta(S_{12}) = \frac{A \Delta P_3}{q_{cs}} \left( \frac{\bar{v}_1}{\bar{h}_1} + \frac{\bar{v}_2}{\bar{h}_2} \right) \quad (3.23)$$

Y el orden para obtener  $P_{3,n}$  será:

$$S_{1n} = \Delta(S_{11}) + \Delta(S_{12}) + \dots + \Delta(S_{1n}) = \frac{A \Delta P_3}{q_{cs}} \left( \frac{\bar{v}_1}{\bar{h}_1} + \frac{\bar{v}_2}{\bar{h}_2} + \dots + \frac{\bar{v}_n}{\bar{h}_n} \right) \quad (3.24)$$

### III.6.2 DETERMINACION DE LA POTENCIA:

La potencia requerida se obtiene mediante la integración de la ecuación (3.10) entre la presión de succión y de descarga.

$$HP. = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta P_i}{0.433} \right) \frac{h_p}{h}. \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

Si  $\Delta(HP)$ , se define como:

$$\Delta(HP). = \left( \frac{\Delta P_i}{0.433} \right) \frac{h_p}{h}. \quad \dots\dots\dots (3.26)$$

La ec. (3.25) será:

$$HP. = \sum_{i=1}^n \Delta(HP). \quad \dots\dots\dots (3.27)$$

### III.6.3 SELECCION DE LA BOMBA

Como se mencionó previamente, la selección de la bomba será de acuerdo al diámetro de la T.R. y a la capacidad de flujo del pozo.

Debido a la alta compresibilidad del gas, la diferencia entre el volumen de succión y el de descarga es grande por lo que debe ser considerada dentro del promedio de eficiencia de una bomba. Por esta razón, el procedimiento siguiente en la selección de la bomba es sugerido:

1. Trazar curvas IPR en (bl./día) y (bl/día) a la misma escala y en la misma gráfica.
2. Entrar a la curva IPR (bl/día) al límite superior de la variación de la eficiencia de varias bombas que sean adecuadas para el diámetro de T.R. dado. Moverse en forma horizontal a la curva IPR (bl./día) y leer el gasto de entrada dado en (bl./día).

3. Para cada gasto de entrada determinado en el paso 2, realizar los siguientes pasos:
  - a) Determine la presión de descarga requerida mediante una correlación de flujo multifásico.
  - b) Calcular PV a la presión de descarga mediante la ec. (3.1b) a ec. (3.1c) y después calcular el volumen de descarga mediante la ec. (3.1a).
4. Seleccione la bomba para el cuál el volumen de descarga se encuentra en el rango de variación de eficiencia.

### III.7 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACION DE CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE PRESION DE SUCCION EN LA BOMBA CUANDO SE MANEJA GAS.

Un procedimiento adecuado para predecir curvas para el caso - de cuando se bombea gas con el líquido es el siguiente:

1. Seleccione una bomba adecuada como previamente se mencionó
2. Calcular  $P_{fcs}$  de la ec. (3.5) y calcular la constante A de la ec. (3.16).
3. Tomar varios gastos de producción en ( $bl_{ct}/dia$ ) y, para cada uno de estos gastos, realizar lo siguiente:
  - a) Determine la presión de descarga requerida ( $P_{3,0}$ ) mediante una correlación de flujo - multifásico.
  - b) variar  $\Delta P_3$  y calcule la cantidad ( $A \Delta P_3 / q_{cf}$ )
  - c) Calcule  $P_{3,1}$  de la ec. (3.18a) y  $P_{3,1}$  de la ec. (3.19).
  - d) Determine PV a  $P_{3,1}$  de la ec. (3.1b); después calcular  $\bar{v}_1$  mediante la ec. (3.1a).
  - e) Leer  $\bar{h}_1$  y  $\bar{v}_1$  de curvas de comportamiento de la bomba.

- f) Calcular el número de etapas requerido para obtener la presión de succión  $P_3$ , mediante la ec. -- (3.18).
- g) Repetir los pasos c-f para  $P_2$ ,  $P_3$ , respectivamente, a través de  $P_3$ . Tabular la presión de succión Vs. número de etapas.
4. Por interpolación o gráfica, obtener la presión de succión para cada uno de los gastos tomados para el mismo número de etapas.
  5. Graficar la presión de succión (obtenida en el paso 4) Vs. gasto de producción para los números de etapa tomados. - Graficar la curva IPR (blc / día) a la misma escala y en la misma gráfica.
  6. Leer los gastos a la intersección de las curvas de presión de succión de la bomba con la curva IPR.
  7. Para cada gasto, calcular la potencia requerida de la ec. (3.25).
  8. Graficar el gasto Vs. número de etapas y potencia requerida. Registrar la variación de eficiencia de la bomba en la misma gráfica.
  9. Seleccione el gasto adecuado.

Distribución de los componentes del aparato de bombeo eléctrico instalado en un pozo

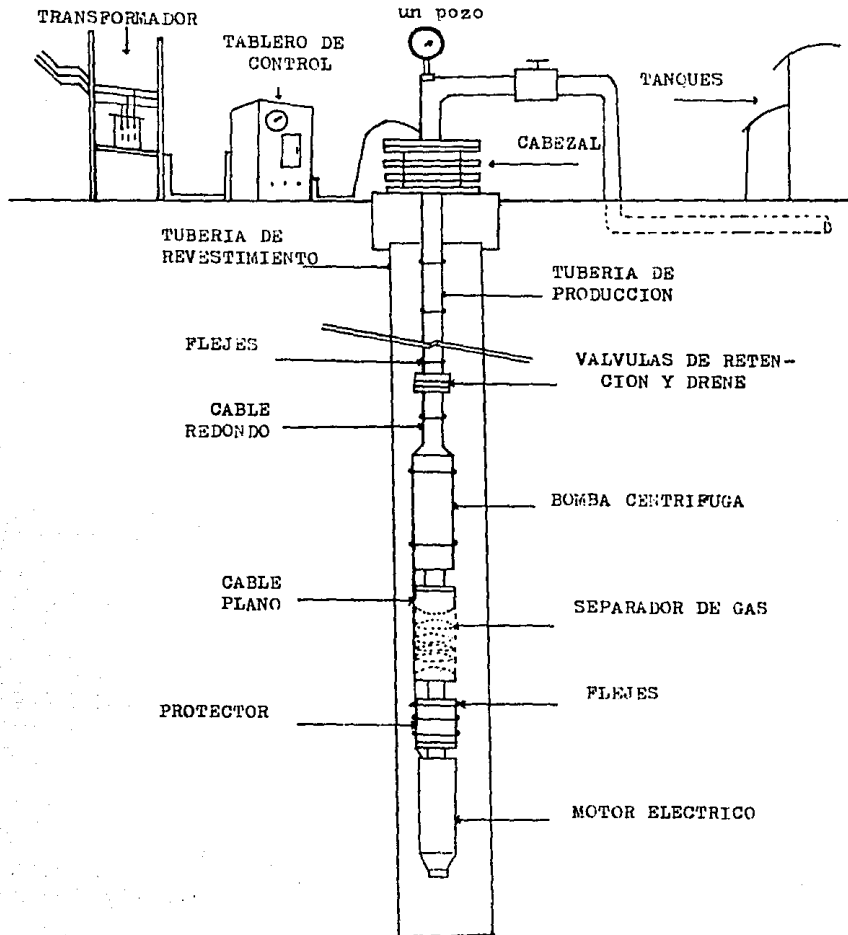


FIGURA 3.1

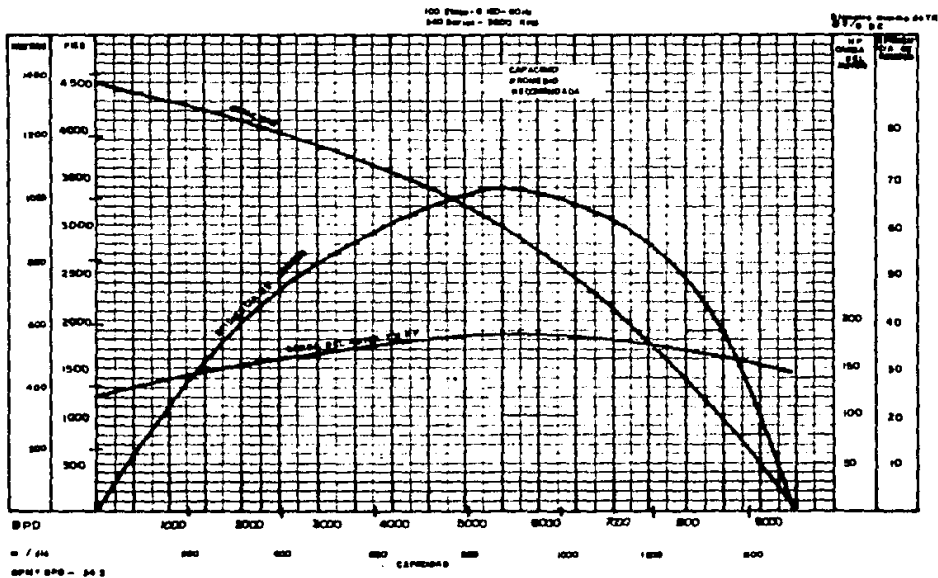


Fig. 3.2. — Curvas de comportamento de uma bomba elétrica



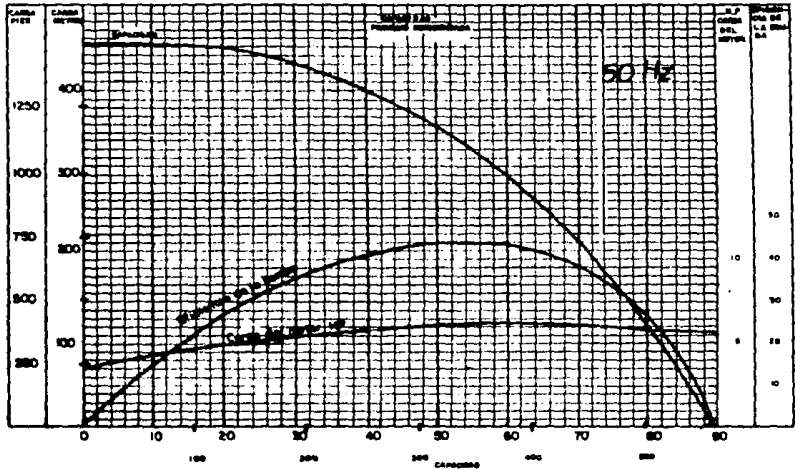


FIG. 3.3 CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UNA BOMBA ELECTRICA.

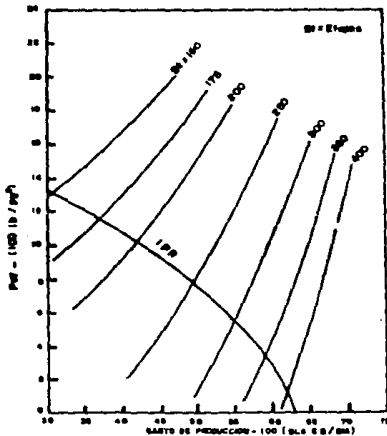


Fig. 3.4 Curvas de comportamiento para una bomba eléctrica (bombando líquido).

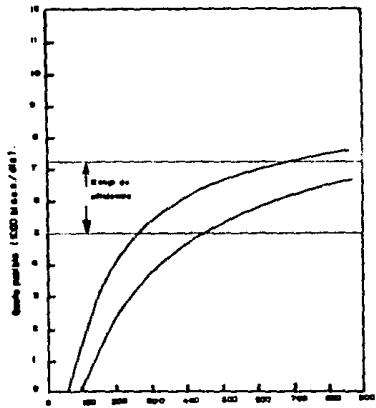


Fig. 3.5 - Caudal de producción posible vs etapas y potencia para una bomba eléctrica bombando líquido.

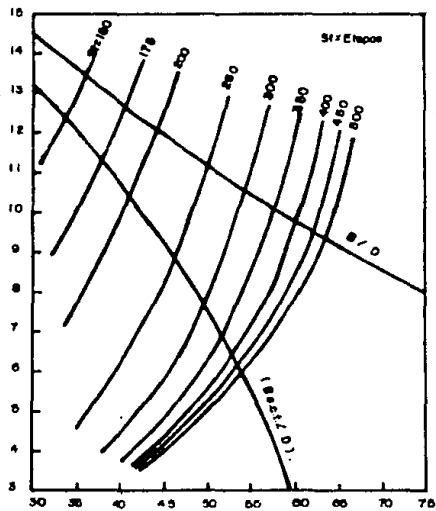


Fig. 3.5 -- Curvas de comportamiento de una bomba eléctrica (bomba) líquida y gas.

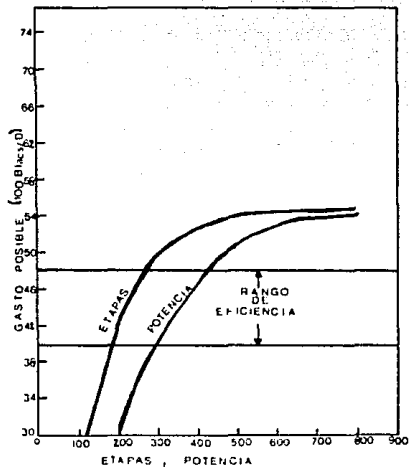


fig. 3.7 Gasto de producción posible Vs.  $S_t$  y HP para una bomba eléctrica (bombeando líquido y gas).

## BIBLIOGRAFIA

- The Technology of artificial lift methods.  
VOLUMEN 4  
Kermit E. Brown  
the university of tulsa
- Apuntes de producción de pozos 1  
José A. Gomez Cabrera  
Facultad de Ingeniería, UNAM.

## CAPITULO IV

### IV APLICACION DE ANALISIS NODAL EN BOMBEO HIDRAULICO

Existen dos tipos de Bombeo Hidráulico disponibles en el mercado; bombeo tipo pistón y tipo jet.

#### IV.1 BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON

##### IV.1.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO

En forma breve, el proceso de generación y transmisión de energía, en el Bombeo Hidráulico Tipo Pistón, se efectúa mediante un fluido conocido como fluido motriz, el cual puede ser agua tratada o aceite libre de impurezas que es inyectado a presión al pozo por una unidad de potencia, a través de una tubería de producción, accionando los pistones, tanto del motor como de la bomba, instalada abajo del nivel de trabajo del fluido producido por el pozo. El pistón del motor acciona mecánicamente el pistón de la bomba la cual succiona los fluidos del yacimiento y los bombea hacia la superficie.

Se tienen unidades disponibles con capacidad de bombeo superior a los 5,000 hl/día y que levantan fluidos desde una profundidad de 15,000 pie

La carrera promedio de bombeo es de 8 a 22 pie con una capa-

cidad de 150 emboladas por minuto. El fluido motriz es almacenado en tanques donde es tratado y limpiado, de estos tanques se envía a la succión de la bomba (s) triplex vertical (s) y cuya característica principal es proporcionar un volumen reducido, pero a una presión considerable. Esta bomba inyecta a presión el fluido motriz hacia el cabezal de distribución, donde se regula en función del volumen o de la presión requerida en cada bozo. Ya en el bozo, el aceite pasa a través de una válvula de 4 vías que permite controlar la dirección del flujo; el aceite circula hacia abajo haciendo operar la unidad de bombeo y retorna a la superficie ya sea mezclado con el aceite producido, si se trata de un circuito abierto, o bien, retorna a través de una tubería adicional en el caso de un circuito cerrado.

El sistema de inyección en circuito abierto fue el primero que se utilizó y su aplicación es la más sencilla y económica. En este sistema, el fluido motriz retorna a la superficie mezclado con el aceite producido ya sea a través de la tubería de descarga o por el espacio anular de las tuberías de revestimiento, producción o inyección, dependiendo del equipo subsuperficial que se tenga.

La aplicación de este sistema presenta varias ventajas como son: la adición de fluido motriz limpio en bozos que contienen alto porcentaje de agua salada, con que se reduce dicho porcentaje y por consiguiente disminuye el efecto de incrustaciones, de la misma manera la adición de aceite ligero puede reducir la viscosidad en bozos productores de aceite pesado.

La principal ventaja de este sistema es el incremento de volumen bruto que debe ser tratado en la superficie para obtener el aceite limpio necesario y continuar la operación. Ver fig. -- (4.1b).

El sistema de inyección en circuito cerrado (ver fig. 4.10) es el método más completo que existe en la actualidad. En este sistema, el fluido motriz retorna a la superficie independientemente del aceite producido, fluyendo nuevamente hasta el tanque almacenador y formando así un circuito cerrado; éste se lleva a cabo por medio de una tubería adicional que va alojada en un dispositivo mecánico llamado "camara de fondo", instalada en el fondo del pozo. Las principales ventajas son; la medición exacta de los fluidos producidos por el pozo y la determinación del desgaste sufrido por la unidad de bombeo al incrementarse el volumen de fluido motriz utilizado en la lubricación de los pistones, todo lo cual facilita la programación del mantenimiento de estas unidades.

#### IV.1.2 VENTAJAS DEL BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON

- i) La profundidad no es un factor limitante. Muchas instalaciones de bombeo hidráulico producen gastos de 150 a -- 300 hl/día, en profundidades de 12,000 pie.
- ii) Se pueden modificar fácilmente la velocidad y tamaño de la bomba para mantenerla en buenas condiciones.
- iii) Los crudos pesados y altamente viscosos se pueden mezclar con un fluido motriz ligero y así poder manejarlo mejor.
- iv) La bomba puede ser circulada a la superficie sin tener -- que sacar la T.P. La inspección, servicio y costos de -- refacciones son generalmente bajos.
- v) Con una estación central en la superficie, se pueden manejar varios pozos.
- vi) En la actualidad existen unidades superficiales compactas para pozos aislados.

#### IV.1.3 DESVENTAJAS DEL SISTEMA HIDRAULICO TIPO PISTON

- i) El costo inicial de capital es alto. Se requieren equipos de alta presión, líneas de fluido motriz y equipo para el cabezal del pozo. Deben tenerse instalaciones para filtrar, limpiar y tratar el fluido motriz.

Las tuberías deben ser de diámetro adecuado y capaces de resistir presiones altas.

- ii) La corrosión y el material abrasivo reduce la vida operativa del sistema, debido a la baja tolerancia del equipo superficial y subsuperficial.
- iii) En la actualidad, los requerimientos de fluido motriz del sistema pueden llegar a ser muy caros, debido a los precios del crudo y especialmente si la pérdida de fluido motriz es alta.
- iv) Ya que las operaciones se realizan generalmente a alta presión, los costos de mantenimiento del equipo superficial pueden llegar a ser muy elevados.
- v) Las altas temperaturas de fondo pueden hacer que se rompan los empaques de la bomba, aunque esto se puede reparar fácilmente, invirtiendo el flujo del fluido motriz, -llevando la bomba a la superficie para su reparación.
- vi) Se necesita personal bien entrenado para su operación eficiente.
- vii) Puede haber peligro de incendio si se tienen motores de gas.

Si se tienen altas presiones en la bomba del fluido motriz el flujo puede acabar con toda la instalación incluyendo tanques de fluido motriz y de almacenamiento.

- viii) El muestreo de pozos en sistemas centrales es un problema si se está produciendo agua.



## IV.2 ARREGLO EN LA TUBERIA

Existen básicamente dos tipos de arreglos de la bomba, uno - llamado arreglo de bomba fija en la tubería y que consiste en sujetar a la bomba en la tubería de fluido motriz y bajarla con la tubería al fondo del pozo, y el segundo arreglo llamado de bomba libre que consiste en una bomba que se elige y que si se requiere introducir junto con la tubería de fluido motriz para circular en el fondo del pozo se sujeta a ella y cuando no se requiere no se coloca. Cualquiera de estos tipos pueden usarse en sistemas cerrados (CPF) o en sistemas abiertos (OPP), la diferencia principal en estos arreglos es que el arreglo de bomba libre se verá limitado por el diámetro de la tubería, y el arreglo de la bomba fija como va adaptada a la tubería no se tendrá el problema de entrar por la T.R. De las tablas que se presentan al final del capítulo (tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4) la primera columna nos lista el tipo de bomba, donde se indica también el diámetro de tubería donde la bomba trabajará adecuadamente.

## IV.4 RELACION P/E

La columna número dos de las tablas ya mencionadas, nos indica la relación (llamada relación P/E) del área del pistón de la bomba con el área neta del pistón del motor, o sea:

$$P/E = \frac{A_p - A_r}{A_e - A_r} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

donde:

$A_p$  = Área del pistón de la bomba,  $pg^2$

$A_e$  = Área del pistón del motor,  $pg^2$

Ar = Area de varillas,  $\text{ng}^2$

La relación P/E esta relacionada con la presión superficial requerida para un nivel dado. Para delimitar la presión superficial a la presión máxima, que en general se aceptan 4,000  $\text{lb}/\text{ng}^2$  se recomienda el siguiente valor como máximo:

$$(P/E)_{\text{max}} = 10,000/\text{NL} \quad \dots\dots\dots (4.1a)$$

donde:

NL = Nivel neto en pie, dado por:

$$\text{NL} = D_0 - \frac{P_b}{G_f} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$D_0$  = Profundidad de colocación de la bomba, pie

$P_b$  = Presión de succión de la bomba,  $\text{lb}/\text{ng}^2$

$G_f$  = Gradiente fluyente del fluido en el conducto de producción,  $\text{lb}/\text{ng}^2/\text{pie}$

Para el caso especial cuando la bomba se coloca a la profundidad del pozo, la ec. (4.2) queda:

$$\text{NL} = D - \frac{P_{bf}}{G_f} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

donde:

D = profundidad del pozo, pie

$P_{bf}$  = presión de fondo fluyendo,  $\text{lb}/\text{pg}^2$

Generalmente hablando y, específicamente para pozos profundos con baja presión de fondo,  $P_{bf}/G_f$  es un valor pequeño comparado con D y por lo tanto  $P_{bf}/G_f$  no se considera.

#### IV.5 DESPLAZAMIENTO DE LA BOMBA

La columna número tres de las tablas, indica el desplazamiento máximo de la bomba basado en la velocidad máxima (columna anterior).

La columna número cuatro indica el desplazamiento de la bomba en (bl/día/emb). El gasto de producción en (bl/día) está dado por:

$$q_3'' = q_3' N \dots\dots\dots (4.4)$$

donde:

$q_3'$  = desplazamiento de la bomba, bl/día/emb

$N$  = velocidad de la bomba, emb

Normalmente,  $q_3''$  está referido al gasto de producción teórico, esto sería igual si la bomba operara al 100 % de eficiencia. En la practica y para un buen diseño se usa una bomba con eficiencia del 85 %, y para seleccionar esta bomba con esta velocidad indicada tenemos:

$$v = q_3'' \eta_p \dots\dots\dots (4.5)$$

Sustituyendo en la ec. (4.4) la ec. anterior queda:

$$v = q_3' N \eta_p \dots\dots\dots (4.6)$$

donde:

$\eta_p$  = eficiencia final de la bomba.

$v$  en la ec. (4.6) es el volumen de gasto de fluido producido (líquido y gas) a la presión de succión, y por lo tanto, será igual al gasto superficial sólo si el fluido se considera incompresible.

Si la bomba maneja gas con líquido, V se puede calcular con la ec. (3.1)

#### IV.6 DESPLAZAMIENTO DEL MOTOR

El motor está acoplado a la bomba, el pistón del motor se -- mueve a la misma velocidad que el pistón de la bomba. El gasto teórico del fluido motriz se calcula con la siguiente ec.:

$$q_1'' = q_1' N \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

donde:

$q_1'$  = desplazamiento del motor en, bl./día/emb, columna número tres de las tablas ya mencionadas.

La eficiencia final del motor es la relación del gasto teórico entre el gasto actual, o sea:

$$\eta_e = \frac{q_1''}{q_1}$$

Sustituyendo la ec. (4.7) en la ec. anterior resulta:

$$q_1 = q_1' N / \eta_e \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

donde:

$q_1$  = gasto actual del fluido motriz requerido para producir un gasto de fluido actual V.

$\eta_e$  = eficiencia final del motor, estimada alrededor del 90 %.

#### IV.6.1 FRICCIÓN DE LA BOMBA

La presión requerida para operar una bomba hidráulica bajo condiciones sin fricción se muestra en la fig. (4.2). La gráfica muestra la fricción mecánica e hidráulica de una bomba. -- Esta fricción se dará de acuerdo al tipo de bomba, variación, velocidad y viscosidad del fluido motriz.

#### IV.7 CALCULOS DE PRESION

Todas las presiones involucradas en un sistema CPF y en un sistema CPF se muestran en la fig. (4.1). La presión disponible para el empuje del motor es  $P_1$ , la descarga del motor será  $P_2$ . La bomba del fondo descarga en el punto  $P_2$  que ocurre con  $P_3$ . Efectuando un balance de fuerzas, resulta:

$$-P_1 A_r - P_2 (A_e - A_r) + P_1 (A_e - A_r) - P_2 (A_p - A_r) + P_3 (A_o - A_r) + P_3 A_r = 0$$

o'

$$(P_1 - P_2)(A_e - A_r) - (P_2 - P_3)(A_p - A_r) = 0$$

$$P_1 - P_2 - (P_2 - P_3) \frac{A_p - A_r}{A_e - A_r} = 0 \quad \dots\dots (4.9)$$

La fricción de la bomba puede ser extraída de la ec. anterior. Tenemos;

$$P_1 - P_2 - (P_2 - P_3) \frac{A_p - A_r}{A_e - A_r} - F_p = 0 \quad \dots\dots (4.10)$$

Sustituyendo la ec. (4.1) en la ec. anterior, tenemos:

$$P_1 - P_2 - (P_1 - P_2)(P/E) - F_n = 0 \quad \dots\dots (4.11)$$

La ec. (4.11) es válida para un sistema OPF y un sistema --- GPF. En un sistema OPF,  $P_1$  es idéntico a  $P_2$ . Así, la ec. --- (4.11) queda como sigue:

$$P_1 - P_2 - (P_1 - P_2)(P/E) - F_n = 0 \quad \dots\dots (4.12)$$

#### IV.7.1 POTENCIA

La potencia requerida se estima mediante la sig. ec:

$$HP = 1.7 \times 10^{-5} \rho_1 P_2 \quad \dots\dots (4.13)$$

### IV.8 CURVAS DE PRESION DE SUCCION DE LA BOMBA

#### INTRODUCCION

La predicción de curvas de presión de succión de una bomba hidráulica se considera para dos casos;

- (1) Cuando se bombea sólo líquido
- (2) Cuando se bombea gas y líquido

Para ambos casos, considerando que la bomba se encuentra en el fondo del pozo con la presión en la cabeza del pozo y la cantidad de flujo dirigida etc. Para el caso 2, es tomado en cuenta que todo el gas asociado es bombeado con el líquido. La variable más común para este sistema de bombas, es la presión del - fluido motriz.

Como se mencionó anteriormente, la predicción de curvas de -

presión de succión de la bomba hidráulica es directo para el caso 1 e indirecto para el caso 2.

#### IV.3.1 BOMBEO DE LIQUIDO

Puesto que los líquidos son ligeramente compresibles,  $v$  en la ec.(4.6) puede considerarse constante e igual al gasto superficial  $q_{cs}$ , o sea:

$$q_{cs} = q_s N \eta_p$$

o'

$$N = \frac{q_{cs}}{q_s \eta_p} \dots\dots\dots (4.14)$$

Para este caso, la presión en la cabeza del pozo, la presión superficial retornable, la cantidad de flujo dirigido y la presión de descarga se mantienen ctes. en cada gasto. Así dejamos sólo a  $P_1$  como variable. Resolviendo las ecs. (4.11) y (4.12) - para  $P_3$  tenemos:

Para un sistema GPP

$$P_3 = \left[ P_1 + \left( \frac{P_1 + P_0}{(P/E)} \right) \right] - \frac{P_1}{(P/E)} \dots\dots (4.15)$$

Para un sistema OPF

$$P_3 = \left[ P_1 + \left( \frac{P_1 + P_0}{(P/E)} \right) \right] - \frac{P_1}{(P/E)} \dots\dots (4.16)$$

NOTA: Si la bomba se coloca en el fondo del pozo, como para este caso,  $P_3$  será igual a  $P_{ad}$ .

#### IV.C SELECCION DE LA BOMBA

Como se mencionó previamente, el tamaño de la bomba está en función del diámetro de la tubería (tipo libre) o por el diámetro de la T.R. (tipo fijo). Otra restricción es la relación  $(P/E)$  - de la bomba que no puede ser más grande que la relación  $(P/E)_{\max}$  - dado por la ec.(4.1a). Para el caso de que se encuentre más de una bomba, manteniendo la presión superficial de operación, se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Para cada bomba, tomar un punto de producción y realizar lo siguiente:
  - a) Calcular  $N$  de la ec.(4.1a). Después, calcular  $q_1$  de la ec.(4.8). Determinar el porcentaje de la velocidad nominal.
  - b) Determinar la presión del fluido motriz y la presión de descarga mediante una correlación de gradiente de presión.
  - c) Determine  $F_p$  de la fig.(4.2)
  - d) Calcular  $P_s$  de la ec.(4.15) o ec.(4.16)
  - e) Repetir los pasos a)-d) para otros gastos.
2. Graficar  $P_s$  Vs. gasto para cada bomba. Graficar la curva IPR (bl. / día) a la misma escala y en la misma gráfica (ver fig. 4.3)
3. Leer el gasto para cada bomba en la intersección de la curva de presión de succión con la de IPR.
4. Para cada gasto, calcular  $N$  de la ec. (4.14),  $q_1$  de la ec. (4.8) y  $HP$  de la ec. (4.13).
5. Seleccionar una bomba en base al análisis económico.



IV. 10 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACION DE CURVAS DE PRESION  
DE SUCCION DE LA BOMBA PARA LIQUIDOS

1. Elegir el tipo de fluido motriz (agua o aceite) y el tipo de sistema (CPF o' OPF).
2. Seleccionar la bomba adecuada
3. Tomar un gasto de producción y realizar lo siguiente:
  - a) Calcular  $N$  de la ec. (4.14). Después calcular  $C_1$  mediante la ec. (4.8). Determinar el porcentaje de la velocidad nominal.
  - b) Determinar la presión de descarga requerida mediante una correlación de gradiente de presión.
  - c) Determinar  $F_p$  de la fig. (4.2)
  - d) Tomar varias presiones de fluido motriz y calcular  $P_3$  de la ec. (4.15) o (4.16).
  - e) Repetir los pasos a)-d) para otros gastos.
4. Graficar  $P$  Vs. gasto, para cada presión de fluido motriz tomado. Graficar la curva IPR (bl.<sup>3</sup> / día) a la misma escala de la gráfica.
5. Leer el gasto disponible de la intersección de la curva de presión de succión de la bomba con la curva IPR.
6. Para cada gasto posible, calcular  $q_1$ . Después, determinar la presión superficial de operación y calcular HP de la ec. (4.13).
7. Graficar el gasto Vs.  $q_1$ ,  $P_3$  y HP. Tomar un 85 % de desplazamiento de la bomba a velocidades indicadas de la misma gráfica.
8. Seleccionar el gasto óptimo.

#### IV.10.1 BOMBEO DE LIQUIDO Y GAS

Debido a la alta compresibilidad del gas,  $v$  no puede ser considerado constante pero si puede determinarse a la presión de succión mediante la ec. (3.1a). Por lo tanto, la ec. (4.6) queda:

$$q_{cs} \times FV = q_3' N \prod_P$$

o'

$$N = \frac{q_{cs} FV}{q_3' \prod_P} \dots\dots\dots (4.17)$$

Donde  $FV$  se determina a la presión de succión mediante la ec (3.1c).

Para un sistema OPP usando aceite como fluido motriz, el gasto total de líquido, la RGA y el agua en la columna de producción se dará como:

$$q_2 = q_1 + q_{cs} \dots\dots\dots (4.18)$$

$$RGA_2 = \frac{q_{cs} RGL}{q_1 + q_{cs} (1-wc)} \dots\dots\dots (4.19)$$

y:

$$wc_2 = \frac{q_{cs} wc}{q_2}$$

La RGA y el agua de la columna de producción se mantendrán - constantes. Resolviendo las ecs. (4.11) y (4.12) para  $P_1$  tenemos:

Para sistemas CPP  $P_1 = P_2 + (P_2 - P_3)(P/E) + F_0 \dots\dots\dots (4.20)$

Para sistemas OPP  $P_1 = P_2 + (P_2 - P_3)(P/E) + F_0 \dots\dots\dots (4.21)$

#### IV. 11 SELECCION DE LA BOMBA

A causa de la existencia de gas para este caso, el fluido motriz requerido es grande comparado con el caso del bombeo de líquido. Por lo tanto, la bomba que se usa para el caso del líquido no puede ser usada para el caso del bombeo líquido-gas.

#### IV.12 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACION DE CURVAS DE PRESTION DE SUCCION PARA BOMBEO DE LIQUIDO Y GAS.

1. Elegir el tipo de fluido motriz (aceite o agua) y el tipo de sistema (CPF o' OPF).
2. Seleccionar la bomba adecuada.
3. Tomar varios gastos de producción (bl.<sup>ac.</sup> /día) y, para cada uno realizar lo siguiente:
  - a) Tomar una presión de succión.
  - b) Determinar FV a la presión de succión mediante la ec. (3.1c).
  - c) Calcular N mediante la ec. (4.17). Después, calcular  $q_1$  de la ec. (4.8).
  - d) Determinar el porcentaje de velocidad nominal. - Después, calcular  $F_p$  mediante la fig.(4.2).
  - e) Determinar la presión de descarga requerida me--- diante una correlación de flujo bifásico.
  - f) Cálcular la presión del fluido motriz de la ec. - (4.20) o ec. (4.21).
  - g) Repetir los pasos b)-f) para otras presiones de - succión.
4. Por interpolación o gráfica, obtener la presión de suc--- ción para los gastos de producción tomados, para idénticas -

presiones de fluido motriz.

5. Graficar la presión de succión (obtenida en el caso 4) vs. gasto, para varias presiones de fluido motriz. Graficar la curva IPR (bls día) a la misma escala y en la misma gráfica.
6. Leer los gastos posibles a la intersección de las curvas de la presión de succión de la bomba con la curva IPR.
7. Para cada gasto posible, calcular  $q_p$ , después, determine la presión superficial de operación. Calcule HP de la ec. (4.13).
8. Graficar el gasto posible vs.  $P_s$ ,  $P_r$  y HP. Tomar un 25% del desplazamiento de la bomba a la velocidad nominal, en la misma gráfica.
  - a) Seleccionar el gasto óptimo.

#### IV. 12.1 SELECCION DEL GASTO

Para ambos casos, que se bombee líquido o se bombee gas con el líquido, la selección del gasto deberá de ser:

- 1.- Con un 55% de desplazamiento de la bomba a la velocidad nominal.
- 2.- Sea factible el analisis económico.

#### IV.14 BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET.

El bombeo subsuperficial tipo jet (a chorro) es un sistema - especial de bombeo hidráulico, a diferencia del tipo pistón, no o - cupa partes móviles, y su acción de bombeo se realiza por medio - de transferencia de energía entre el fluido motriz y los fluidos - producidos.

El fluido motriz entra por la parte superior de la bomba y - a través de la tobera, donde su presión se convierte en una velo - cidad. La tobera descarga un chorro dentro de la cámara de en - trada a los fluidos del pozo, la cual tiene comunicación con la - formación. En la cámara de mezclado, que es de diámetro más -- grande que el de la tobera, se mezclan los fluidos producidos y el fluido motriz.

Al mismo tiempo que se efectúa la mezcla, el fluido motriz - pierde energía que es ganada por los fluidos del pozo.

Después, la mezcla pasa al difusor, que es la última sección de trabajo, en donde la energía que en su mayor parte se conserva da en forma de velocidad se convierte en presión estática; cuando esta presión es mayor que la ejercida por la columna de fluidos - en el espacio anular, se establece el flujo hacia la superficie.

##### IV.14.1 VENTAJAS DEL BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET

- i) Ya que el bombeo tipo jet trabaja basado en una caída de presión y un cambio de velocidad a través de una tubería, no hay partes móviles subsuperficiales.
- ii) La bomba es corrida dentro del pozo igual que una bomba -

de tipo pistón, cuando decrece la  $P_w$ , puede instalarse -  
facilmente una bomba tipo pistón.

- iii) La profundidad de levantamiento no es una limitante para este tipo de sistema de producción artificial, ya que se ha aplicado en algunas áreas o profundidades de hasta --- 11,500 pie.
- iv) Las instalaciones de bombeo tipo jet están asociadas con altos volúmenes de producción.
- v) La sección de trabajo de la bomba es compacta lo que permite su instalación a cualquier profundidad.

#### IV.14.2 DESVENTAJAS DEL BOLBEO HIDRAULICO TIPO JET

- i) La inversión inicial de capital es alta. Se necesita equipo de alta presión, líneas de fluido motriz y equipo para el cabezal del pozo.

Se deben tener las instalaciones necesarias para filtrar, limpiar y tratar el fluido. Las tuberías deben -- ser de diámetro adecuado y deben resistir las altas presiones que se manejan.

- ii) Se necesita una presión de succión realmente alta para - evitar la cavitación.
- iii) La eficiencia mecánica es baja, normalmente requiere de - una potencia de entrada mayor que la de una bomba hidraulica convencional.
- iv) La corrosión y el material abrasivo dañan a la tobera (de be tomarse en cuenta que a menos que la bomba llegue a pegarse en el agujero debido a incrustaciones u obstrucciones por sal, esto puede ser bombeada a la superficie para su inspección). La cavidad de sello de la bomba puede - necesitar remplazo bajo severa corrosión y alta temperatura

ra de operación.

- v) Ya que se están manejando altas presiones, los costos de mantenimiento para el equipo subsuperficial pueden ser - muy altos.

#### IV. 15 AREA DIMENSIONAL

La relación del área de la tobera con el área total de la cámara de mezclado fig. (4.9) se representa como:

$$R = \frac{A_i}{A_t} \dots\dots\dots(4.22)$$

##### IV.15.1 GASTO DE FLUJO DIMENSIONAL

Se define como:

$$M = \frac{v}{q_1} \dots\dots\dots(4.23)$$

donde:

$v$  = volumen de gasto de flujo producido (líquido mas -  
gas)

$q_1$  = Gasto de fluido motriz.

$v$  se determina en la succión de la bomba, con ec.(4.9), donde se bombean fluidos ligeramente compresibles como son los líquidos, esto puede considerarse constante e igual al gasto superficial.

#### IV.15.2 CARGAS DIMENSIONALES

Las cargas dimensionales estan definidas como la relación - del incremento de presión dado por el fluido de producción al decremento de presión sufrido por el fluido motriz ver fig. (4.9) y (4.10).

$$H = (P_1 - P_3)/(P_1 - P_2) \quad \dots\dots\dots (4.24)$$

donde:

$P_1$  = Presión del fluido motriz

$P_2$  = Presión de descarga

$P_3$  = Presión de succión

#### IV.15.3 EFICIENCIA

La eficiencia de una bomba jet está definida como la relación del incremento de presión del fluido producido y el decremento de presión del fluido motriz. El incremento de presión del fluido producido está dado por:

$$(HP)_3 \propto v(P_1 - P_3) \quad \dots\dots\dots (4.25)$$



El decremento del fluido motriz está dado por:

$$(HP)_1 \propto q_1 (P_1 - P_2) \dots\dots\dots(4.26)$$

La eficiencia está dada por:

$$\eta_p = \frac{(HP)}{(HP)} = \left( \frac{v}{q_1} \right) \left( \frac{P_2 - P_3}{P_1 - P_2} \right) \dots\dots\dots(4.27)$$

Sustituyendo las ecs. (4.23) y (4.24) en la ec. de arriba tenemos:

$$\eta_p = MH \dots\dots\dots(4.28)$$

#### IV.15.4 CURVAS DE COMPORTAMIENTO DIMENSIONALES

El comportamiento de bombas jet geoméricamente similares operando al mismo número de Reynolds, se describen en las ecs (4.22) (4.23), (4.24) y (4.26). Una gráfica de estas ecuaciones muestra  $H$  y  $(\rho Vs M$  para varios valores de  $R$  en la fig. (4.11)

Las relaciones de  $M$  y  $H$  son ctes., por lo tanto, las ecs. -- (4.23) y (4.24) quedan:

$$Q_1 = \frac{v}{M_D} \dots\dots\dots (4.29)$$

y:

$$P_3 = (1 + H_D) P_2 - H_D P_1 \dots\dots (4.30)$$

donde:

$M_D$  y  $H_D$  es la relación de flujo de eficiencia pico y la relación de carga de eficiencia pico, respectivamente.

#### IV.16 CAVITACION

De la fig. (4.9) se observa que la presión  $P_3$  a la entrada de la cámara de mezclado (garganta) es siempre menor que la carga de succión  $H$  para un gasto mayor que cero. De esta manera, si  $P_3$  es reducido abajo de la  $P_V$  (presión de vapor del fluido al iniciar el bombeo) se presenta el fenómeno de cavitación. Debido a que  $P_V$ , es la presión mínima que puede ser obtenida a la entrada de la cámara de mezclado, el gasto de succión en este punto es el máximo que puede considerarse un valor particular de la carga de succión  $H_3$ .

Cuando se experimenta un valor de  $P_3$  menor que  $P_V$  por un incremento en el flujo de la tobera, puede ser que se tenga mayor vol. de vapor a la  $P_V$  en el fluido de succión. Además, el colapso de las burbujas de la cavitación en la cámara de mezclado de la bomba causa daños severos debido al golpe de las ondas y por la velocidad de los fluidos.

Si la  $P_V = 0$

$$M_c = \frac{1-R}{R} \left[ 1 + K_j \sqrt{\frac{P_3}{I_c(P_1 - P_3) + P_3}} \right] \quad \dots (4.31)$$

donde:

$K_j$  = coeficiente de pérdida en la tobera

$I_c$  = Índice de cavitación.

Diferentes investigadores determinaron empíricamente el valor de  $I_c$  y que está comprendido entre 0.8 y 1.67, considerando 1.35 como un valor de diseño. Para valores de operación de  $M$  menores que  $M_c$  no habrá cavitación. Con estos valores de  $I_c$  y  $K_j$ , la ec. (4.31) queda:

$$M_c = (1.0724) \left( \frac{1-R}{R} \right) \sqrt{\frac{P_3}{1.35(P_1 - P_3) + P_3}} \quad (4.32)$$

Cuando se experimenta un incremento en el valor de  $M$  hasta alcanzar  $M_c$  se tendrá cavitación en la entrada de la cámara de mezclado y el comportamiento de la bomba puede desviarse del esperado referente a las curvas  $H - N$ . La ec. (4.32) puede resolverse para el mínimo valor de  $P_3$  bajo el cual toma lugar la cavitación. En base a esto la ec. (4.32) puede escribirse de la siguiente forma.

$$\frac{P_3}{1.35(P_1 - P_3) + P_3} = \left( \frac{RMp}{1.0724(1-R)} \right)^2 \quad \dots (4.33)$$

donde  $Mp$  es el decremento de  $M_c$  con respecto a la capacidad de operación de  $M$ . Para la misma bomba, la parte derecha de la ec. de arriba es constante y puede denotarse como  $B$ :

$$B = \left( \frac{RMp}{1.0724(1-R)} \right)^2 \quad \dots (4.34)$$

Entonces:

$$P_c = \left( \frac{1.35B}{1 + 1.35B - B} \right) P_1 \quad \dots (4.35)$$

donde;  $P_c$  es la cavitación a la presión de succión.

El coeficiente  $P_1$  en la ec. de arriba es constante y puede denotarse como  $C$ :

$$C = \frac{1.35B}{1 + 1.35B - B} \quad \dots (4.36)$$

entonces:

$$P_c = CP_1 \quad \dots (4.37)$$

#### IV.16.1 GASTO Y PRESION DE FLUIDO MOTRIZ

Similar a las bombas hidráulicas, las bombas jet utilizan como fluido motriz agua o aceite. El gasto actual del fluido motriz estará en función de la presión  $P_1$  y  $P_2$ , el área de flujo de la tobera  $A_j$ , y la gravedad específica del fluido motriz  $\delta_1$ . El gasto de fluido motriz puede calcularse de la siguiente ec:

$$Q_1 = 1214.5 A_j \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\delta_1}} \quad \dots (4.38)$$

donde:

$q_1$  = gasto dado en (bl/día)

$P_1$  y  $P_3$  = presiones de entrada y salida en (lb/psq)

$A_j$  = Area de flujo de la tobera en (psq)

donde  $q_1$  normalmente se conoce de la relación M ec. (4.23)  
la ec. (4.36) puede resolverse por  $A_j$ :

$$A_j = \frac{q_1}{1214.5} \sqrt{\frac{\gamma_1}{P_1 - P_3}} \quad \dots\dots\dots (4.39)$$

Así  $A_j$  se determina de la ec. (4.39), esto puede aplicarse para diferentes toberas.

#### IV.17 POTENCIA

La potencia requerida se estima de la siguiente ecuación:

$$HP = 1.7 \times 10^{-5} q_1 P_3 \quad \dots\dots\dots (4.40)$$

donde la  $P_3$  es la presión superficial de operación en (lb/psq)

##### IV.17.1 CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA

El procedimiento para predecir curvas de comportamiento --- se considera para dos casos: (1) Bombeando sólo líquido y (2) -- Bombeando gas con líquido. Para ambos casos, considerando que la bomba se encuentra en el fondo del pozo, la presión en la cabeza y la cantidad de flujo retornable se mantienen constantes, y operan de la bomba a la eficiencia pico. Para el caso 2, considerando que todo el gas asociado se bombea con el líquido.

#### IV.18 BOMBEO DE LIQUIDO

Como los líquidos son ligeramente compresibles,  $v$  en la ec. (4.29) se puede considerar constante e igual al gasto superficial

$$q_1 = \frac{q_{cs}}{M_p} \dots\dots\dots (4.41)$$

##### IV.18.1 SELECCION DE LA BOMBA

Un procedimiento apropiado para la selección de la bomba es el siguiente:

1. Establecer una presión superficial de operación
2. Leer  $R$ ,  $M_p$  y  $H_p$  para varias relaciones de bomba tomadas de la fig. (4.11). Para cada relación de bomba realizar lo siguiente.
  - a) Tomar un gasto de producción
  - b) Calcular  $q_1$  de la ec. (4.41)
  - c) Determinar la presión del fluido motriz y la presión de descarga mediante una correlación coronada, de gradiente de presión.
  - d) Calcular la presión de succión de la ec. (4.30)
  - e) Repetir los pasos b) - d) para otros gastos de producción tomados.
3. Graficar la presión de succión vs. gasto para cada relación de bomba. Trazar la curva IPR (bl./día) a la misma escala y en la misma gráfica.
4. Leer los gastos posibles de cada bomba a la intersección de las curvas de presión de succión con la curva IPR.
5. Para cada gasto posible, calcular  $q_1$  de la ec. (4.41); después calcular la potencia requerida de la ec. (4.40).

6. Seleccionar la bomba adecuada bajo las bases de un análisis económico.

#### IV.19 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE CURVAS DE COMPORTAMIENTO PARA UNA BOMBA JET

Para apreciar el efecto de fricción, es necesario variar el límite en la presión superficial de operación.

1. Seleccionar una relación de bomba adecuada
2. Leer  $P_0$  y HP de la fig. (4.11) para la bomba elegida.
3. Tomar un gasto de producción y realizar lo siguiente:
  - a) Calcular  $Q_1$  de la ec. (4.41)
  - b) Determinar  $P_2$  de una correlación de gradiente de presión.
  - c) Tomar varias presiones de fluido motriz y, para cada una de estas presiones, calcular  $P_3$  de la ec. (4.30).
  - d) Repetir los pasos a) - c) para otros gastos de producción tomados.
4. Graficar  $P_3$  Vs. gasto para varias presiones de fluido motriz. Trazar la curva IPR (blsc./día) a la misma escala en la misma gráfica.
5. Calcular  $R$  de la ec. (4.34); después, calcular  $C$  de la ec. (4.36). Determinar la cavitación a la presión de succión mediante la ec. (4.37). Marcar los puntos de cavitación a la intersección de la cavitación de la presión de succión (línea horizontal) con la respectiva curva. Trazar una curva suave a través de los puntos de cavitación.
6. Leer los gastos posibles a la intersección de la curva -

de presión de succión de la bomba con la curva IPR. --  
 Leer el gasto del límite de cavitación y la intersección  
 de la curva de cavitación con la curva IPR.

7. Para cada gasto posible, calcular el gasto de fluido motriz, después, determinar  $P_s$  y calcular HP de la ec. --- (4.40).
8. Gráficar el gasto posible Vs.  $P_s$ , HP y  $q_1$ . Trazar el -  
 gasto del límite de cavitación en la misma gráfica.
9. Seleccionar el gasto adecuado.

#### IV.20 BOMBEO DE LIQUIDO Y GAS

Dada la alta compresibilidad del gas,  $v$  en la ec. (4.29) puede considerarse constante como se hizo para el caso del líquido y puede ser determinada a la presión de succión de la ec. (3.1a). -  
 Por lo tanto la ec. (4.29) queda:

$$q_1 = q_{cs} \frac{FV}{M \rho} \dots\dots\dots (4.42)$$

Donde  $FV$ , es el factor de volumen calculado a la presión de succión de la ec. (3.1b)

Para una bomba jet usando aceite como fluido motriz, el gasto de líquido total, la relación gas-aceite y la cantidad de agua en la columna hidrostática, son como sigue:

$$q_2 = q_1 + q_{cs} \dots\dots\dots (4.43)$$

$$RGA_2 = \frac{q_{cs} RGL}{q_1 + q_{cs} (1 - wc)} \dots\dots\dots (4.44)$$

$$wc_2 = \frac{q_{cs} wc}{q_2} \dots\dots\dots (4.45)$$



Un orden para facilitar gráficamente el comportamiento de curvas es necesario para obtener presiones de succión -- para los diferentes gastos de producción tomados e idénticas presiones de fluido motriz. Esto se puede completar realizando una gráfica de  $P_3$  vs.  $P_1$  para cada gasto ó mediante -- una interpolación.

Resolviendo la ec. (4.30) para  $P_1$  tenemos:

$$P_1 = \frac{(1 + H_0) P_2 - P_3}{H_p} \dots\dots\dots(4.46)$$

#### IV.20.1 SELECCION DE LA BOMBA

Como se mencionó previamente, los dos factores que influyen en la selección de una bomba son la relación de flujo y carga. La diferencia de la relación de flujo es una -- cantidad dada de la diferencia del gasto de fluido motriz. Por lo tanto, dado la existencia de gas para este caso, la diferencia del gasto de fluido motriz es alta, comparado -- con el caso de cuando se bombea sólo líquido.

#### IV.21 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACION DE CURVAS DE COMPORTAMIENTO PARA UNA BOMBA JET (BOMBEO DE GAS)

El procedimiento de pasos es el siguiente:

1. Seleccionar la bomba adecuada
2. Tomar varios gastos, y para cada uno de estos, realizar lo siguiente:
  - a) Tomar una presión de succión
  - b) Determinar FV a la presión de succión -- mediante la ec. (3.1b).

- c) Calcular  $q_1$  de la ec. (4.42)
  - d) Calcular  $q_2$ ,  $RGA_2$ , y  $wc_2$  de las ecs. (4.43), -- (4.44) y (4.45).
  - e) Determinar  $P_2$  de una correlación de flujo bifásico.
  - f) Calcular  $P_1$  de la ec. (4.46)
  - g) Repetir los pasos b) - f) para otras presiones de succión.
3. Por interpolación o gráfica, obtener la presión de succión para los gastos de producción tomados por presiones de fluido motriz idénticas.
  4. Graficar la presión de succión (obtenida en el paso 3) Vs gasto para varias presiones de fluido motriz. Graficar la curva IPR ( $bl_{cr}/día$ ) a la misma escala y en la misma gráfica.
  5. Calcular B de la ec. (4.34); Después, calcular C mediante la ec. (4.36). Determinar la cavitación a la presión de succión para cada presión de fluido motriz mediante -- las ec. (4.37). Marcar los puntos de cavitación a la intersección de la cavitación de la presión de succión. -- (línea horizontal) con la respectiva curva. Trazar una curva suave a través de los puntos de cavitación.
  6. Leer los gastos posibles en la intersección de las curvas de comportamiento de la bomba con la curva IPR. Leer -- el gasto del límite de cavitación en la intersección de -- la curva de cavitación con la curva IPR.
  7. Para cada gasto posible, calcular el gasto de fluido mo-- triz; después, determinar  $P_s$  y calcular HP de la ec. ---- (4.41)

8. Graficar el gasto posible Vs.  $q_1$ ,  $P_s$  y HP. Trazar el -  
gasto del límite de cavitación en la misma gráfica.
9. Seleccionar el gasto adecuado.

#### IV.21.1 SELECCION DEL GASTO

Si se bombea sólo líquido o gas con el líquido, la selección del gasto será:

- a) Sin cavitación
- b) sea económicamente factible

Como resultado del efecto de fricción, la ganancia en el gasto de producción para 1 HP disminuirá hasta ser insignificante.

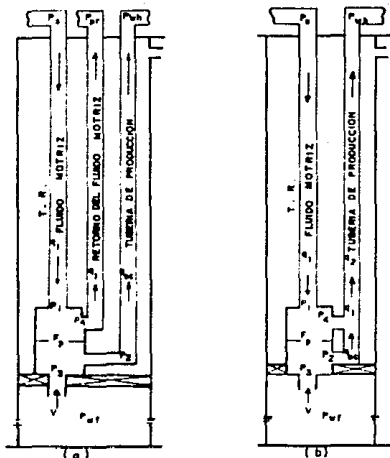


Figura 4.1.-Presiones que influyen en una bomba hidraulica (a) CPF, (b) OPF

INCREMENTO DE PRESION DEMADO A FRICCION MECANICA E HIDRAULICA vs. EFICIENCIA VOLUMETRICA

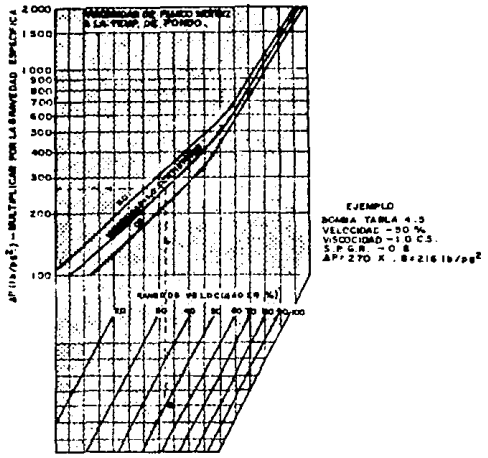


Figura 4.2 - Presion requerida para operar una bomba hidraulica sin carga

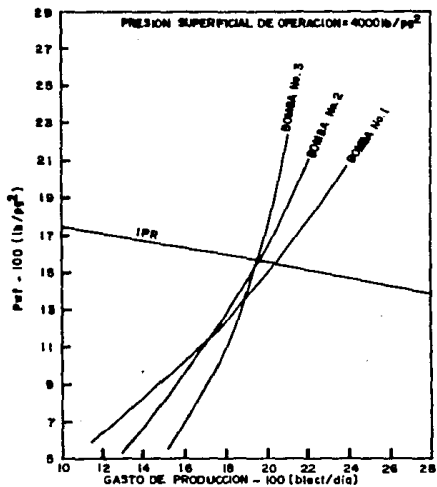


Fig. 4.3 -Comportamiento de curvas para varias bombas hidráulicas (bombeando liquido)

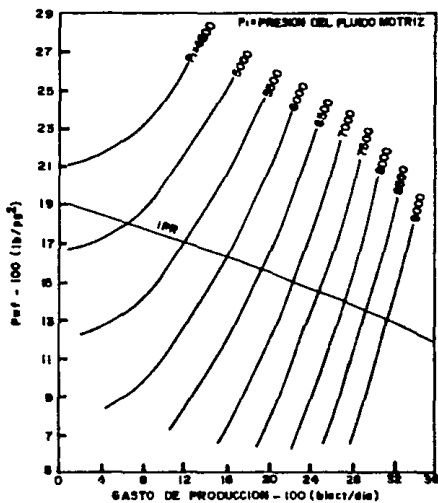


Fig. 4.4 - Comportamiento de curvas para una bomba hidráulica (bombeando líquido)

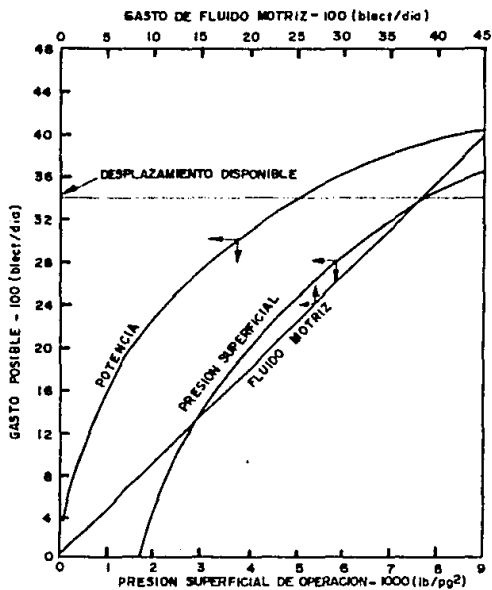


Fig. 4.5.- Gasto de producción posible vs HP, Ps y q, para una bomba hidráulica (bombeando líquido)

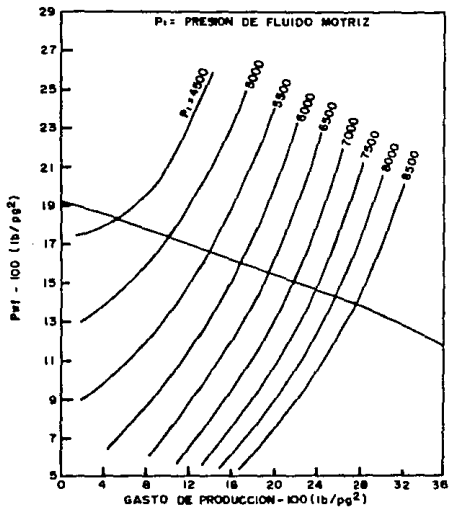


Fig. 4.6 - Comportamiento de curvas en una bomba hidráulica (bombeando líquido y gas)



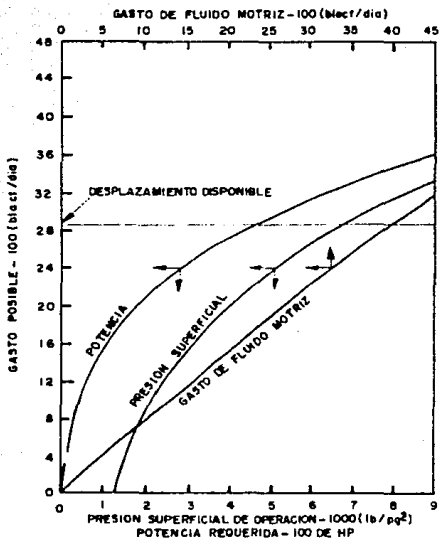


Fig. 4.7 - Gasto de producción posible vs. HP, Ps y q, para una bomba hidráulica (bombeando líquido y gas)

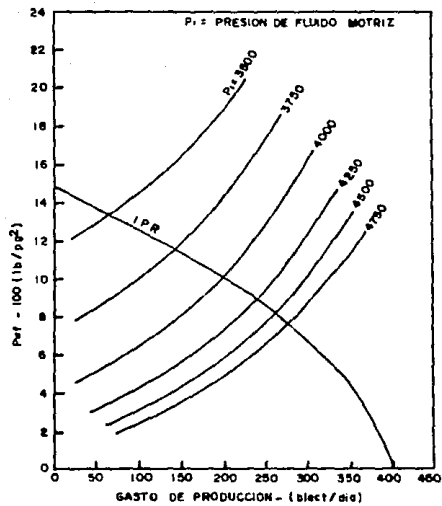
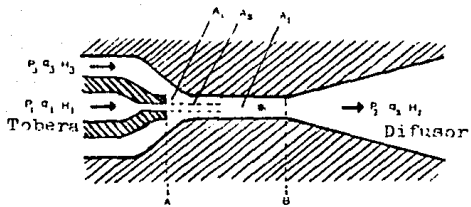


Fig. 4 B.-Comportamiento de curvas para una bomba hidráulica (bombeando líquido y gas)



♦ Cámara de mezclado

figura 4.ª Bomba Jet Libre

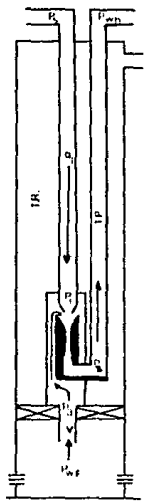


fig. 4.1J Esquema de una Bomba Jet

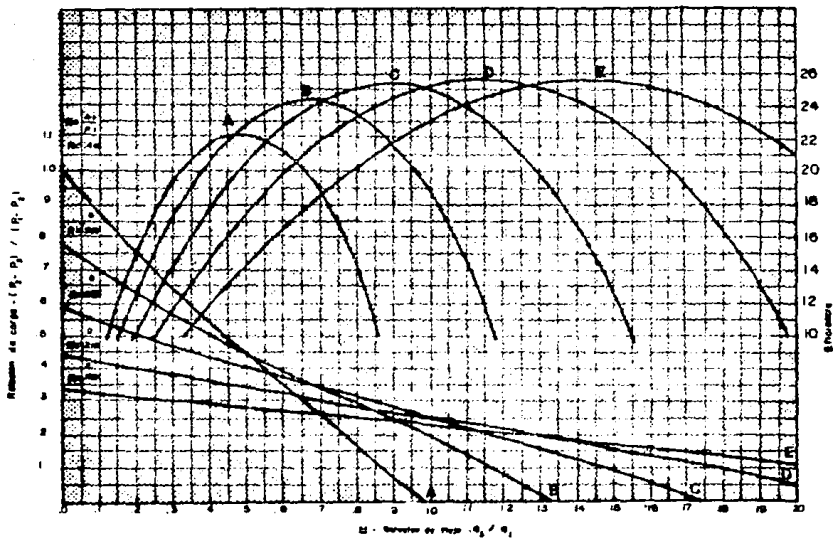


FIG. 4.11 Gráfico de  $M$  contra  $M$  para diferentes valores de  $R$ .

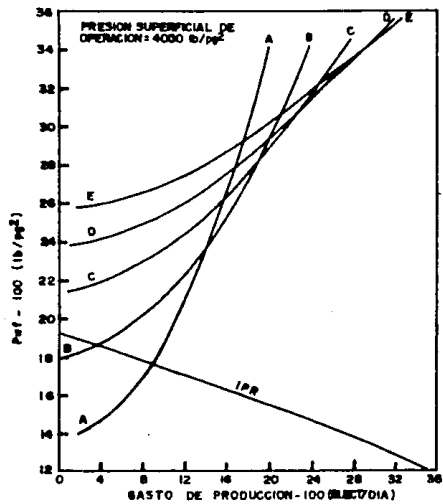


Fig. 4.12.-Comportamiento de curvas para varias bombas jet (bombeando líquido)

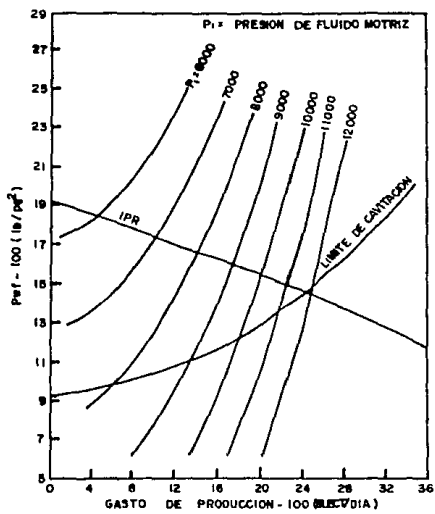


Fig. 4.13.- Comportamiento de curvas para una bomba jet (bombeando líquida)

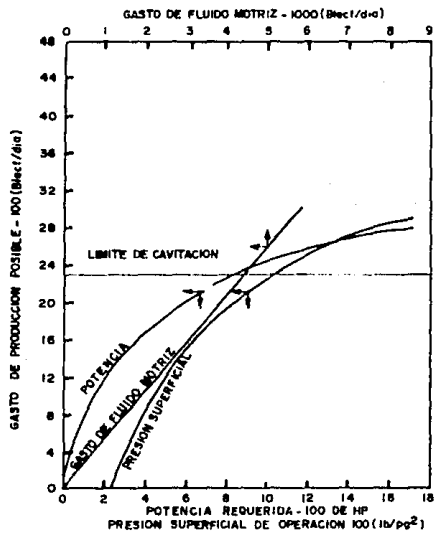


Fig. 4.14 - Gasto de producción VS HP, Pa y q, para una bomba jet (bombeando líquido)

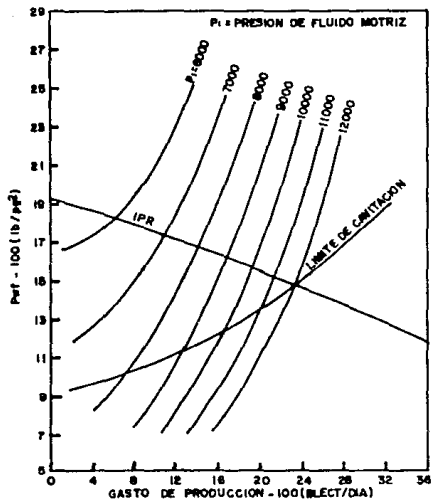


Fig. 4.15.- Comportamiento de curvas para una bomba jet (bombeando líquido y gas.



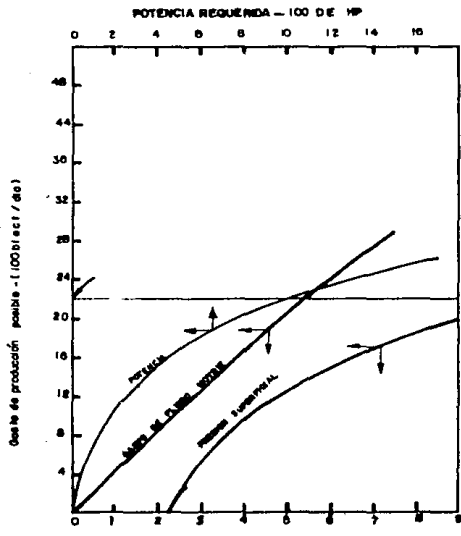


Fig. 4.15 Costos de producción en HP, Ps y \$, de una bomba jet (bombeando líquido y gas)

$$P_z = \frac{1.475 P_s - P_3}{0.475}$$

TABLA 4.1  
 ESPECIFICACIONES PARA BOMBAS KOBE E

DIAMETRO DE BOMBA Y DESCRIPCION	RELACION P/E	DESPLAZAMIENTO			VELOCIDAD MAXIMA EPM
		GASTO B/D	B/D X EPM		
			MOTOR	BOMBA	
2X1 3/8	1.152	1,311	18.35	21.15	62
2 1/2X1 3/4	1.146	2,397	37.35	42.81	56
3X2 1/8	1.142	4,015	66.32	75.76	53

TABLA 4.2

ESPECIFICACIONES PARA BOMBAS KOBE A

DIAMETRO DE BOMBA Y DESCRIPCION	RELACION P/E	DESPLAZAMIENTO			VELOCIDAD	
		GASTO		B/D x EPM		MAXIMA
		B/D	MOTOR	BOMBA	EPM	
2X1-13/18	0.545	139	2.15	1.15	121	
2X1-1	1.000	254	2.15	2.10	121	
2Y1-1 3/16	1.546	393	2.15	3.25	121	
2X1 3/16-1	0.647	254	3.30	2.10	121	
2X1 3/16-1 3/16	1.000	393	3.30	3.25	121	
2 1/2X1 1/4-1	0.520	256	5.02	2.56	100	
2 1/2X1 1/4-1 1/8	0.746	367	5.02	3.67	100	
2 1/2X1 1/4-1 1/4	1.000	492	5.02	4.92	100	
2 1/2X1 1/4-1 7/16	1.431	703	5.02	7.03	100	
2 1/2X1 7/16-1 1/4	0.700	492	7.13	4.92	100	
2 1/2X1 7/16-1 7/16	1.000	703	7.13	7.03	100	
3X1 1/2-1 1/4	0.592	486	9.61	5.59	87	
3X1 1/2-1 3/8	0.787	646	9.61	7.43	87	
3X1 1/2-1 1/2	1.000	821	9.61	9.44	87	
3X1 1/2-1 3/4	1.480	1,218	9.61	14.00	87	
3X1 3/4-1 1/2	0.676	821	14.17	9.44	87	
3X1 3/4-1 3/4	1.000	1,218	14.17	14.00	87	
4X2-1 3/4	0.687	1,108	21.44	14.40	77	
4X2-2	1.000	1,617	21.44	21.00	77	
4X2-2 3/8	1.541	2,502	21.44	32.50	77	
4X2 3/8-2	0.649	1,617	32.94	21.00	77	
4X2 3/8-2 3/8	1.000	2,502	32.94	32.50	77	

TABLA 4.3

ESPECIFICACIONES PARA BOMBAS KOBE D

DIAMETRO DE BOMBA Y DESCRIPCION	RELACION P/E	DESPLAZAMIENTO			VELOCIDAD
		GASTO B/D	B/D X EPM		MAXIMA
			MOTOR	BOMBA	EPM
2X1 3/16X1 3/8- 1 3/16X1 3/16	0.802	751	7.79	6.21	121
2X1 3/16X1 3/8- 1 3/8X1 3/16	0.976	913	7.79	7.55	121
2X1 3/16X1 3/8- 1 3/8X1 3/8	1.150	1,076	7.79	8.90	121
2 1/2X1 7/16X 1 3/4-1 1/2X1 1/2	0.813	1,452	17.99	14.52	100
2 1/2X1 7/16X 1 3/4-1 3/4X1 1/2	0.976	1,794	17.99	17.94	100
2 1/2X1 7/16X 1 3/4-1 3/4X1 3/4	1.196	2,136	17.99	21.36	100
3X1 3/4X2 1/8- 1 7/8X1 7/8	0.882	2,726	35.74	31.34	87
3X1 3/4X2 1/8- 2 1/8X1 7/8	1.039	3,213	35.74	36.94	87
3X1 3/4X2 1/8- 2 1/8X2 1/8	1.197	3,700	35.74	42.53	87

TABLA 4.4

ESPECIFICACION PARA BOMBAS FLUID-PACKED VFR

DIAMETRO DE BOMBA Y DESCRIPCION	RELACION P/E	GASTO B/D	DESPLAZAMIENTO		VELOCIDAD
			B/D X EPM		MAXIMA
			MOTOR	BOMBA	EPM
VFR 20161613	0.54	444	6.86	2.96	150
VFR 20161616	0.81	673	6.86	4.49	150
VFR 25202015	0.41	630	15.16	5.25	120
VFR 25202017	0.56	858	15.16	7.15	120
VFR 25202020	0.73	1,119	15.16	9.33	120

## BIBLIOGRAFIA

- The Technology of artificial lift methods  
VOLUMEN 4  
Hermit E. Brown  
the university of tulsa
- Apuntes de producción de pozos 1  
José A. Gomez Cabrera  
Facultad de Ingenieria, U.A.M.

## V APLICACION DEL ANALISIS MODAL A BOMBEO MECANICO

### V.1 INTRODUCCION

Históricamente, los sistemas de Bombeo Mecánico han sido los más populares; con un costo rentable, es un método adecuado de -- bombeo artificial para yacimientos de aceite en los EE.UU. y o---tros países. Cerca del 85 % de los pozos productores trabajan -- con Bombeo Mecánico. En México su uso no ha sido tan grande como en otros países, debido principalmente a la disponibilidad de gas natural en muchos de los campos, lo que ha conducido al uso -- del Bombeo Neumático. No obstante, en la actualidad existe una gran cantidad de pozos que operan por Bombeo Mecánico y es obvio que un mejoramiento en la eficiencia de operación de estas unida--des representaría un incremento notable en la producción de acei--te, así como una disminución en los costos de operación. Este -- mejoramiento puede lograrse aplicando métodos más apropiados al -- proyectar las instalaciones, o bien efectuando modificaciones ade--cuadas a las instalaciones existentes.

El estudio y diseño de estos sistemas mecánicos complejos se inició por el año 1930. Se realizaron investigaciones tempranas de los problemas asociados con sistemas de bombeo mecánico: Gil--bert investigó dinágrafos de bomba en 1936, Rienietz investigó so--bre émbolo viajero en 1937, y Slonneger introdujo técnicas para e

valuar cargas por vibración en sistemas de bombeo en 1937. Uno de los primeros trabajos serios considerados como técnicas modernas de bombeo mecánico fueron presentados por Coberly en 1938. - El trabajo de éste y muchos otros investigadores llevó a la obtención de el método clásico de diseño de un sistema de Bombeo Mecánico presentado por Craft, Holden, y Graves, y Nind.

A mediados de los 60's la API realizó una investigación que dió como resultado la recomendación práctica API para el diseño - de sistemas de bombeo mecánico, la API RPIIL. Este trabajo, que es una extensión del trabajo de Gibbs, está basado en soluciones por computadora de la ecuación de onda en una dimensión, sujeta a ciertas condiciones de frontera. Se presentaron una colección - de datos para esta simulación en terminos de cartas dinamométricas de varilla pulida y de aquí, correlacionaron en cartas de diseño para uso práctico.

La aproximación API y los métodos clásicos de diseño para unidades de bombeo convencional consideran todos los efectos de -- las variables de operación sobre el sistema de bombeo. Las más importantes de estas variables son la velocidad de bombeo, la longitud de carrera, carga de fluido, tipo de varilla, carga neta, y elongación de la tubería. Ambos métodos asumen también entre otras cosas que:

1. El movimiento de la varilla pulida puede describirse en - terminos de movimiento armónico simple.
2. La unidad tiene 100 % de eficiencia mecánica y contrabalanceo perfecto.
3. No hay interferencia de gas ni anomalías en la bomba.

Sin embargo, el método API incluye los efectos de cargas por vibración en la carta de varillas durante el ciclo de bombeo



y los efectos de mojado (damping). Estas dos importantes consideraciones se desprecian en los métodos clásicos.

El diseño del sistema de bombeo mecánico incluye un número de condiciones que comprende la elección y operación de equipo -- tanto del pozo como para el gasto de producción proporcionado por el yacimiento. Las decisiones referentes al equipo podrán hacerse después de haber sido estimada la producción de el yacimiento. Muchos operadores, cuando desean la producción máxima del pozo, colocan la bomba cerca de los disparos y producen con un nivel de líquido en el espacio anular tan bajo como sea posible. Sin embargo, en muchos casos no es recomendable producir altos gastos a baja  $P_{wf}$ . Por ejemplo, un análisis completo de campo indicará que para la producción óptima, requiere que el pozo produzca a un gasto menor al de su máxima capacidad. En muchos casos, la  $P_{wf}$  puede ser incrementada paulatinamente para disminuir la producción de los pozos hasta el gasto deseado. Sin embargo, cuando se trata de altas  $P_{wf}$  es común colocar la bomba a nivel de los disparos. Esta práctica sin embargo, usualmente no hace producir al pozo de la manera más económica.

## 5.2 DESCRIPCION GENERAL DEL EQUIPO DE BOMBEO MECANICO

### 5.21 INTRODUCCION

Una unidad de bombeo consiste de cinco partes:

- (1) El motor principal, el cual suministra la potencia necesaria al sistema.
- (2) El reductor de velocidad.
- (3) El equipo de bombeo superficial, el cual cambia el movimiento rotatorio del motor principal en un movimiento lineal oscilatorio.

- (4) La sarta de varillas de succión, los cuales transmiten - la potencia y movimiento de bombeo superficial hacia la bomba subsuperficial; incluyendo además la sarta necesaria de tubería de producción y/o tubería de revestimiento dentro de la cual operan las varillas de succión y la cual conduce el fluido bombeado hacia la superficie
- (5) La bomba subsuperficial, cuya función es admitir los --- fluidos del yacimiento y desplazarlos desde el fondo del pozo hasta la superficie por el interior de la tubería - de producción mediante un movimiento vertical ascendente y descendente hasta llegar a la cabeza del pozo.

#### 5.22 UNIDAD SUPERFICIAL DE BOMBEO

Esta incluye las partes 1, 2 y 3 mencionadas en la sección - anterior. Brown, Day, y Byrd presentaron una discusión detallada de estos componentes (referencia 3).

Se tiene esencialmente dos tipos comunes de unidades de bombeo. Estos tipos se muestran en la fig. 5.1. El tipo I es una unidad convencional con el poste de Sanson en la parte media del balancín (lo que no implica que se encuentre en su centro de masa), y el brazo compensador en la parte posterior de la vigueta, centrado arriba del eje-manivela de la caja de engranes. El tipo II es una unidad aerobalanceada con el brazo compensador colocado arriba del eje-manivela y localizado sobre la parte frontal de la vigueta, y con el poste de sanson localizado en la parte -- posterior de la vigueta.

La unidad tipo II tiene cierta ventaja de bombeo sobre la unidad tipo I (convencional) causa que la carga máxima por acelera

ción ocurra al final de la carrera descendente, o al mismo tiempo que la carga de fluido es transmitida a la sarta de varillas. La geometría de la unidad tipo II evita esta combinación de cargas pico por generar la aceleración máxima por carga en la parte superior de la carrera ascendente. La unidad tipo I en muchos casos es más durable que la tipo II por la tendencia de el cilindro de aire a requerir mantenimiento frecuente.

La unidad tipo III (fig. 5.1) tiene una geometría similar a una unidad tipo II. Consecuentemente goza de las mismas cargas de aceleración que una unidad tipo I. Sin embargo, la unidad tipo III tiene el brazo compensador desplazado hacia adelante y ya no se encuentra centrado arriba del eje-manivela de la caja de engranes. Esta unidad tiene la ventaja adicional de reducir más las cargas por aceleración sobre la carrera ascendente e incrementarlas sobre la carrera descendente. Así, la carga mínima y máxima sobre la viga finalizan a la vez. Este tipo permite un contrabalanceo más eficiente y consecuentemente reduce el torque por cargas en la caja de engranes comparado con una unidad tipo I (convencional) o tipo II (aerobalanceada) para cargas iguales.

La unidad tipo IV (fig. 5.1) tiene una geometría similar a la unidad tipo I excepto que esta tiene el poste de sanson en el centro de la viga y el brazo compensador, en la parte posterior de la viga; éste ya no se encuentra centrado arriba del eje de la manivela. Los contrapesos están defasados con la manivela. Estos cambios, dan a esta unidad cargas por aceleración similares a una unidad tipo III excepto que la máxima carga por aceleración ocurre al final de la carrera descendente cuando la carga de fluido es transmitida a la sarta de varillas, idéntico a una unidad tipo I. Por lo tanto, la unidad tipo IV experimenta cargas y --

torques que son menores a una unidad tipo I, pero no tan bajos como las cargas y torques soportadas por la unidad tipo III. Las cargas y torques soportadas por instalaciones tipo IV serán aproximadamente las mismas que para una unidad tipo II (aerobalanceada).

La aproximación de diseño API generalmente ha sido reconocida como un método superior de diseño para unidades de bombeo tipo I (convencional). Métodos de diseño para el tipo II y tipo III han sido presentados por los manufactureros de estas unidades, y son generalmente variaciones y combinaciones empíricas de la API y la aproximación de diseño clásico. No se ha presentado una aproximación de diseño que satisfaga la geometría de la unidad tipo IV. Se tiene un juego de ecuaciones de diseño (ver referencia 2) que genera resultados apropiados a la geometría de esta unidad. Las ecuaciones ilustran la predicción de resultados para el análisis de la geometría de la unidad tipo IV. Las ecuaciones no han sido probadas para dimensiones de campo.

Recientemente se presentó un trabajo referente a un nuevo enfoque para el diseño de unidades de Bombeo Mecánico (referencia 2) Presenta una superficie tridimensional de torque en la caja de engranes, carga en viga (balancín), y esfuerzo en varilla en función de la profundidad y velocidad de bombeo para los cuatro tipos de unidades de bombeo. La superficie puede ser generada para cualquier tamaño de bomba, combinación de varillas de succión, tipo y tamaño de unidad de bombeo, y sobre cualquier rango de profundidad y velocidad de bombeo.

La superficie puede usarse para definir rápidamente los límites de operación de un sistema de bombeo. Se emplea también para comparar la importancia de las variables que componen un sistema de bombeo. Adicionalmente, la superficie nos sirve para exami

nar los efectos de condiciones de operación tal como sumergencia de la bomba y tubería desanclada.

Se examinan y comparan los métodos de diseño de sistemas de bombeo usando la superficie. La superficie compuesta se construye empleando los métodos de diseño conocidos. La superficie compuesta representa las cargas máximas esperadas para cada método. Puede emplearse en el diseño de unidades de bombeo que tengan pequeños factores de seguridad de fabricante.

Las superficies tridimensionales, del mismo modo que las cartas dinamométricas, pueden ser coleccionadas para cada combinación de sistemas de bombeo y rangos de operación. Una vez compiladas las superficies podrán ser empleadas como guía para diseño de unidades de bombeo (referencia 2).

El movimiento rotatorio de la manivela es convertido a movimiento oscilatorio por medio de el balancín. La manivela está conectada a el balancín por medio de la biela Pitman, y el balancín está soportado por el poste Sancon y el cojinete central.

La cabeza de caballo y la brida (sujetador del cable) se emplean para asegurar que el jalón sobre la sarta de varillas sea vertical todo el tiempo, de tal manera que no se aplique un movimiento de torsión en alguna parte de la sarta de varillas de succión arriba del estopero. La combinación de varilla pulida y estopero se emplea para mantener un buen sello en la superficie y evitar fuga de fluido de producción.

Las unidades de bombeo mecánico están disponibles en un amplio rango de tamaños. Las longitudes de carrera varían desde 12 pg. hasta 240 pg. La longitud de carrera para cualquier unidad en particular podrá variarse, con tres o más longitudes posibles. Esta variación en la longitud de carrera puede lograrse variando la posición de la conexión de la biela pitman a la manij

vela. Varilla y rangos estructurales se expresan en terminos de las cargas máximas sobre varilla pulida, las cuales varían desde 3,000 a más de 42,000 lb.

### 5.23 SARTA DE VARILLAS

La sarta de varillas es un sistema vibratorio complejo que transmite energía desde el equipo superficial hacia la bomba sub-superficial. La selección adecuada de una sarta de varillas depende de la profundidad del pozo y condiciones de operación. Para profundidades mayores de 3,500 pie, es una práctica común usar sarta de varillas telescopiadas, que consiste de diferentes longitudes de diferentes tamaños de varilla. El porcentaje de cada tamaño de varilla podrá determinarse de la tabla 5.1.

Las varillas más delgadas se colocan en el fondo de la sarta donde la carga sobre la sarta es mínima, y las de mayor grosor se colocan en la parte superior de la sarta, donde la carga sobre la sarta es máxima. Las cargas máxima y mínima desarrolladas durante el ciclo de bombeo deben determinarse lo más exacto posible para diseñar o seleccionar el equipo superficial adecuado para manejar estas cargas, (ver referencia 3).

El esfuerzo máximo en la parte superior de toda la sarta de varillas es la carga pico en la varilla pulida (denotada como ---PPRL y discutida en una sección siguiente) dividida por el área transversal de la sección de varilla superior (ver referencia 3):

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{PPRL}{A_v} \dots\dots\dots (5.1)$$

El mínimo esfuerzo en la parte superior de la sarta de vari-

llas es la carga mínima de la varilla pulida (denotado MPRL y también discutida en una sección siguiente) dividida por el área transversal de la sección superior de varilla (ver referencia 3):

$$\sigma_{min} = \frac{MPRL}{A_n} \dots\dots\dots (5.2)$$

El esfuerzo máximo está relacionado a el esfuerzo mínimo por la ecuación siguiente:

$$\sigma_{max} = (T/4 + 0.5625 \sigma_{min}) SF \dots\dots\dots (5.3)$$

Donde:

T = mínima fuerza tensil para las varillas (90,000 lb/pg<sup>2</sup> para varillas API grado C y 115,000 lb/pg<sup>2</sup> para varillas API grado D).

SF = factor de servicio que depende de el tipo de varillas y las condiciones de operación.

La tabla 5.2 lista los valores aproximados de SF.

La ecuación 5.3 proporciona el rango máximo permisible de esfuerzo entre  $\sigma_{min}$  y  $\sigma_{max}$ . En esta ecuación el  $\sigma_{max}$  no debe exceder el esfuerzo máximo permisible para el acero (30,000 a 40,000 lb/pg<sup>2</sup>).

$$\sigma_{max} \leq \sigma_s$$

$$30,000 \leq \sigma_s \leq 40,000 \dots\dots (5.4)$$

## 5.24 BOMBA SUBSUPERFICIAL

La bomba subsuperficial (fig. 5.2) consiste de cuatro elementos esenciales:

- (a) barril
- (b) émbolo
- (c) válvula de pie
- (d) válvula viajera

La bomba es operada por la sarta de varillas y la unidad superficial de bombeo.

Las bombas pueden dividirse en tres tipos básicos:

- (a) bombas de tubería
- (b) bombas insertadas
- (c) bombas de T.R. (una versión grande de bombas insertadas).

La diferencia básica entre una bomba de tubería y una bomba insertada es la forma como se instala el barril. Con bombas de tubería, el barril se conecta en el extremo inferior de la tubería de producción y funciona dentro del nozo como una parte integral de la sarta de tubería. Con las bombas insertadas, el barril es una parte integral del montaje de la bomba, y funciona como una unidad fija dentro de la sarta de tubería (o T.R.). La tabla (5.3) ilustra el tamaño máximo de la bomba (émbolo) que puede operar dentro de la sarta de tubería.



## 5.25 DESPLAZAMIENTO DE LA BOMBA

El desplazamiento teórico de la bomba está dado por:

$$V = 0.1484 A_p S_p N \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

Donde:

- V = desplazamiento teórico de la bomba, bl a c.y./día
- A<sub>p</sub> = Area del émbolo de la bomba, in<sup>2</sup>.
- S<sub>p</sub> = Carrera efectiva del émbolo, in.
- N = Velocidad de bombeo, cpm

Si se define una constante como:

$$K = 0.1484 A_p \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

Entonces, el desplazamiento teórico para un diámetro de émbolo dado y para una combinación de velocidad de bombeo y longitud de carrera, podrá determinarse de la ecuación:

$$V = K S_p N \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

La carrera efectiva del émbolo es aproximadamente un 80 % de la carrera superficial. Así, la ecuación (5.7) puede escribirse como:

$$V = 0.8 K S N \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

Donde S es la carrera superficial en in.

El desplazamiento teórico de bombeo V se refiere al volumen total de fluido producido (líquido + gas). Para el caso cuando se bombea fluidos ligeramente compresibles (líquidos), podrá considerarse constante e igual al garto a c.s.

## 5.26 CICLO DE BOMBEO

La fig. 5.2 muestra un esquema de las etapas en un ciclo de bombeo. El ciclo es aplicable a bombas de tubería, insertadas o de T.R.

## 5.27 ÉMBOLO EN MOVIMIENTO DESCENDENTE

En la fig. 5.2a, el émbolo desciende hacia el fondo. El fluido asciende a través de la válvula viajera abierta mientras el peso de la columna de fluido es soportado por la válvula de pie, la cual se encuentra cerrada.

Kind establece que el valor máximo de la aceleración en la carrera descendente, el cual incrementa la carga sobre la sarta de varillas, ocurre cerca del fondo del barril. (ver referencia 4). Este valor máximo está dado por:

$$a_1 = \frac{SN^2}{70,500} (1 \pm c/p) \dots\dots\dots (5.9)$$

Donde el signo positivo es para unidades convencionales (tipo I) y el signo negativo es para unidades de aire o Mark II (tipo II y III); c/p es la relación manivela/biela.

Si se supone que la válvula viajera cierra y la de pie abre al instante, la aceleración descendente es máxima; haciendo un balance de fuerzas en el mismo instante que se produce la carga pico en la varilla buida:

$$PFRL = (\text{peso de la columna de fluido}) + (\text{peso del émbolo}) + (\text{peso de varillas}) + (\text{termino de aceleración}) + (\text{termino de fricción}) - (\text{empuje ascendente sobre el émbolo}).$$

El término de fricción y el peso del émbolo son pequeños comparado con los otros términos y, de esta manera, pueden despreciarse. El empuje ascendente sobre el émbolo es la presión del fluido producido sobre el área del émbolo. Por tanto:

$$PPRL = \frac{62.4 \gamma_f D_p D_o (A_o - A_i)}{144} + W_r + \alpha W_r - P_3 A_p \dots (5.10)$$

ó:

$$PPRL = \frac{62.4 \gamma_f D_p D_o A_o}{144} - \frac{62.4 \gamma_f D_p D_o A_i}{144} + W_r + \alpha W_r - P_3 A_p \dots (5.11)$$

Donde  $P_3$  es la presión de entrada a la bomba (ver fig. 5.2).

El primer término de la ecuación (5.11) es la carga de fluido sobre el área total del émbolo y será denotado  $W_r$  :

$$W_r = \frac{62.4}{144} \gamma_f D_p A_p = 0.433 \gamma_f D_p A_p \dots (5.12)$$

El segundo término es la fuerza de flotación sobre las varillas. Este término puede escribirse como:

$$F_b = \left( \frac{62.4 \gamma_f}{C_s} \right) \left( \frac{D_p A_i C_s}{144} \right) = \frac{62.4}{490} \gamma_f W_r = 0.1273 \gamma_f W_r \quad (5.13)$$

Donde  $C_s$  es la densidad del acero (490 lb/pie<sup>3</sup>).

La fuerza de flotación aparece como un término de sustracción en la expresión para la carga pico en varilla pulida (ver ecuación 5.11). Un crudo con 50° API tiene una gravedad específica de 0.78, y en este caso, 0.1273  $\gamma_f$  es igual a 0.1. Por lo tanto:

$$F_b = 0.1 W_r \dots (5.14)$$

Sustituyendo ecuaciones 5.12 y 5.14 en la ecuación 5.11 :

$$PPRL = W_2 + 0.9 W_1 + \alpha W_1 - P_3 A_3 \dots\dots\dots (5.15)$$

### 5.28 ÉMBOLO EN MOVIMIENTO ASCENDENTE

En la fig. 5.2b, el émbolo se mueve hacia arriba. La válvula viajera está cerrada ahora, y la válvula de pie abierta. La carga causada por la columna de fluido es soportada por la sarta de varillas.

Nind también estableció que el valor máximo de la aceleración ascendente, la cual opera para reducir la carga sobre la sarta de varillas, ocurre cercana al final de la carrera (ver referencia 4). Este valor máximo está dado por:

$$\alpha_1 = \frac{SN^2}{70,500} (1 \pm c/v) \dots\dots\dots (5.16)$$

Donde, en éste caso, el signo (-) es para unidades convencionales Y el signo (+) es para unidades aerobalanceadas o Mark II.

Si se supone que la válvula viajera abre y la válvula de pie cierra al instante, la aceleración ascendente es máxima; haciendo un balance de fuerzas en el mismo instante en que se produce la carga mínima sobre la varilla pulida (referencia 4):

$$MPRL = (\text{peso de varillas}) + (\text{peso de émbolo}) - (\text{termino de fricción}) - (\text{termino de aceleración}) - (\text{termino de flotación}).$$

De la misma manera, el peso de émbolo y el termino de fricción será despreciada. La fuerza de flotación esta dada por la ecuación (5.14). Por lo tanto:

$$MPRL = W - 0.1 W - \alpha_1 W = 0.9 W - \alpha_1 W \quad \dots (5.17)$$

### 5.29 TAMAÑO DE BOMBA

El tamaño de bomba (émbolo) está limitado por el tamaño de - T.P. o T.R. y el gasto de producción deseado. Si el objetivo es maximizar el gasto de producción desde el pozo, se usará el émbolo más grande posible (ver tabla 5.3). Sin embargo, si el émbolo es demasiado grande, altas cargas innecesarias se impondrán sobre el equipo, y el desdoblamiento del émbolo resultará en una operación ineficiente. Si el émbolo es demasiado pequeño, la velocidad de bombeo será demasiado alta, y los efectos de incremento de aceleración podrán resultar en incrementos de cargas pico - sobre el equipo.

## 5.3 CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA

### 5.31 INTRODUCCION

La predicción de curvas de comportamiento para la bomba toma en cuenta dos casos:

- (1) se bombea líquido solamente
- (2) se bombea gas junto con el líquido.

Para ambos casos, se supone que la bomba está colocada a nivel de los disparos y que el tamaño de tubería de producción, bomba, sarta de varillas de succión, y la relación manivela/biela se mantienen constantes. Para el caso (2), se supone que todo el gas asociado es bombeado con el líquido.

El parámetro seleccionado para el sistema de bombeo mecánico es una combinación de la velocidad de bombeo y la longitud de carrera.

Resolviendo la ecuación 5.15 para  $P_3$  tenemos:

$$P_3 = \frac{1}{A_p} \left[ W_c + 0.9 W_v + \alpha_1 W_v - PPRL \right] \quad \dots (5.18)$$

La relación entre  $P_3$  y  $V$  está implícita. Una relación explícita puede obtenerse por sustitución de los valores de PPRL y  $\alpha_1$  en la ecuación anterior como sigue:

Sustituyendo ecuación 5.3 en la ecuación 5.1 :

$$PPRL = \frac{T}{4} SF A + 0.5625 SF A_v \sigma_{min} \quad \dots (5.19)$$

Sustituyendo ecuación 5.17 en la ecuación 5.2 tenemos:

$$\sigma_{min} = \frac{0.9 W_v}{A_v} - \frac{W_v}{A_v} \alpha_1 \quad \dots (5.20)$$

Sustituyendo ecuación 5.16 en la ecuación anterior:

$$\sigma_{min} = \frac{0.9 W_v}{A_v} - \frac{W_v}{A_v} \frac{SN^2}{70,500} (1 \pm c/n) \quad \dots (5.21)$$

Sustituyendo ecuación 5.21 en la ecuación 5.19:

$$PPRL = \frac{T}{4} SF A_v + 0.5063 SF W_v - 0.5625 SF W_v \frac{SN^2}{70,500} (1 \pm c/n) \quad \dots (5.22)$$

Ahora, sustituyendo el valor de PPRL proporcionado por la --

ecuación 5.22 y el valor de  $\alpha$ , dado por la ecuación 5.9 en la ecuación 5.18, y haciendo algunos artificios algebraicos:

$$P_3 = \frac{1}{A_p} (W_f + (0.9 - 0.5063 \text{ SP}) W_f - \frac{T}{4} \text{ SP } A_{11}) + \frac{W_f \text{ SN}^2}{70,500 A_p} (1 + 0.5625 \text{ SP} \pm (1 - 0.5625 \text{ SP}) c/p) \dots (5.23)$$

Donde el signo (+) es para unidades convencionales y el signo (-) es para unidades aerobalanceadas o Mark II.

$\text{SN}^2$  en la ecuación 5.23 puede escribirse como :

$$\text{SN}^2 = \frac{(0.8 \text{ K SN}) N}{0.8 \text{ K}} \dots (5.24)$$

Pero  $(0.8 \text{ K SN})$  es igual a el volumen de gasto de fluido producido  $V$  (ver ecuación 5.8); por lo tanto:

$$\text{SN}^2 = \frac{N}{0.8 \text{ K}} V \dots (5.25)$$

Sustituyendo la ecuación 5.25 en la ecuación 5.23:

$$P_3 = \frac{1}{A_p} (W_f + (0.9 - 0.5063 \text{ SP}) W_f - \frac{T}{4} \text{ SP } A_{11}) + \frac{W_f N}{56,400 \text{ K } A_p} (1 + 0.5625 \text{ SP} \pm (1 - 0.5625 \text{ SP}) c/p) V \dots (5.26)$$

La ecuación (5.26) puede escribirse como:

$$P_3 = a + bV \dots (5.27)$$

donde:

$$a = \frac{1}{A_0} (W_c + (0.9 - 0.5063 SF) W, - \frac{\pi}{4} SF A_c) \quad \dots (5.28)$$

$$b = \frac{W_c N}{56,400 K A_0} (1 + 0.5625 SF \pm (1 - 0.5625 SF) c/p) \quad \dots (5.29)$$

$SN^2$  también podrá escribirse como:

$$SN^2 = \frac{(0.8 K SN)^2}{(0.8 K)^2 S} = \frac{V^2}{(0.8 K)^2 S} \quad \dots (5.30)$$

Sustituyendo el valor de  $SN^2$  en la ecuación 5.23 la ecuación resulta en la forma de la ecuación 5.27:

$$P_3 = a + cv^2 \quad \dots (5.31)$$

Donde "a" está dada por la ecuación 5.28 y "c" esta dada por:

$$c = \frac{W_c}{45,120 K^2 A_0 S} (1 + 0.5625 SF \pm (1 - 0.5625 SF) c/p) \quad \dots (5.32)$$

Con las suposiciones anteriormente mencionadas, la cantidad "a" será constante. La cantidad b será constante para cada valor fijo de N y, en este caso, la ecuación 5.27 es lineal; considerando que la cantidad c será constante para cada valor fijo de S, la ecuación 5.31 resulta cuadrática. Se podrá apreciar que, con N fija, la variación de V en la ecuación 5.27 implica solamente la variación de S; sin embargo, puede decirse que  $P_3$  es una función lineal de S con una pendiente igual a  $(0.8 K N b)$  y una ordenada al origen igual a "a". Por otra parte, con S fija, la variación de V en la ecuación 5.31 implica la variación de N solamente; por tanto, puede expresarse que  $P_3$  es una función cuadra-



tica de N.

De aquí, una relación lineal entre  $P_3$  y V podrá obtenerse para cada valor supuesto de N. Similarmente, se tendrá una relación cuadrática para cada valor supuesto de S. Si las rectas o curvas cuadráticas son trazadas a la misma escala sobre la misma gráfica, sus intersecciones con la curva IPR, representa los gastos posibles de producción.

La P mínima permisible de succión (o el máximo gasto de producción permisible) podrá ser determinado tomando en cuenta la condición de que el esfuerzo máximo en la parte superior de la varilla no deberá exceder el esfuerzo permisible para el grado de varillas usado. Sustituyendo la ecuación 5.7 en la ecuación 5.6 tenemos:

$$\bar{V}_{max} = \frac{PPRL}{A_{11}} \leq \bar{V}_s \quad \dots\dots (5.33)$$

ó:

$$PPRL \leq \bar{V}_s A_{11} \quad \dots\dots (5.34)$$

Sustituyendo la ecuación 5.22 en la desigualdad de arriba:

$$\frac{T}{4} SF A_{11} + 0.5063 SF W - 0.5625 SF W \frac{SN^2}{70,500} (1 \pm c/p) \leq \bar{V}_s A_{11} \quad \dots\dots (5.35)$$

ó:

$$SN^2 \geq \frac{70,500}{0.5625 SF W (1 \pm c/p)} \left( \left( \frac{T}{4} SF - \bar{V}_s \right) A_{11} + 0.5063 SF W \right) \quad \dots\dots (5.35)$$

Donde el signo (-) es para unidad convencional y el signo -- (+) es para unidad aerobalanceada o Mark II.

La desigualdad 5.35 nos da el valor mínimo permisible de  $SN^2$  el cual, si se sustituye en la ecuación 5.23, nos da la presión - mínima de succión de la bomba (la  $P_w$ , mínima permisible).

### 5.32 PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACION DE CURVAS DE COMPORTAMIENTO PARA BOMBEO MECANICO (LIQUIDO SOLAMENTE)

El procedimiento para preparar curvas de presión de fondo -- fluyendo para bombeo mecánico es complejo, y las soluciones que se muestran en este trabajo pueden no ser exactas. Previa advertencia, este trabajo se presenta para fomentar nuevas investigaciones para tener calculos en API, etc.

Los líquidos son ligeramente compresibles, por lo tanto,  $V$  en las ecuaciones 5.27 y 5.31 podrán ser reemplazadas con  $\rho$  a c.s., o:

$$P_3 = a + b \rho_{c.s.} \quad \dots \dots (5.36)$$

$$P_3 = a + c \rho_{c.s.} \quad \dots \dots (5.37)$$

Además,  $\gamma$ , puede considerarse igual al valor a condiciones - de superficie:

$$\gamma_{c.s.} = WC \gamma_{ws} + (1 - WC) \gamma_{osc} \quad \dots \dots (5.38)$$

El procedimiento para construir las curvas de comportamiento presión de fondo fluyendo es como sigue:

- (1) Decidir sobre el tipo de unidad de bombeo superficial -- (convencional, aerobalanceada, Mark II, etc.)
- (2) Seleccionar tamaño de bomba, sarta de varillas de succión, y relación manivela/biela (c/p).
- (3) Calcular  $A_p$ ,  $K$  y  $W$ . Determinar  $\delta$ , de la ecuación 5.38; después, calcular  $W_f$  de la ecuación 5.12.
- (4) Calcular "a" de la ecuación 5.28. Calcular b como una función de N de la ecuación 5.29 y c como una función de S de la ecuación 5.32.
- (5) Suponer varias velocidades de bombeo y, para cada una de estas velocidades, calcular b; después, graficar  $P_3$  contra  $\omega_{cr}$  de la ecuación 5.36.
- (6) Suponer longitudes de carrera y, para cada una de estas longitudes, calcular c; después graficar  $P_3$  contra  $\omega_{cr}$  de la ecuación 5.37.
- (7) Trazar la curva IPR.

Los diagramas de los pasos 5, 6 y 7 se harán a la misma escala sobre la misma gráfica.

- (8) Determinar el esfuerzo máximo permisible para el grado de varillas usado; después, calcular el valor mínimo permisible de  $SN^2$  de la ecuación 5.35. Usar este valor de  $SN^2$  para calcular la presión mínima permisible de succión de la ecuación 5.23. Colocar este valor de  $P_3$  (línea horizontal) sobre la gráfica preparada en los pasos 5, 6 y 7.
- (9) Leer los gastos en la intersección de las curvas de comportamiento de bomba (las líneas rectas del paso 5 o las curvas cuadráticas del paso 6) con la curva IPR. Leer

el gasto máximo admisible en la intersección de la presión de succión mínima permisible con la curva IPR.

- (10) Graficar gasto contra S y N. Colocar el gasto máximo - admisible sobre la misma gráfica.
- (11) Seleccionar un gasto adecuado.

### 5.33 PREPARACION DE CURVAS DE COMPORTAMIENTO PARA BOMBEO DE POZOS CON GAS Y CON LIQUIDO.

Los métodos clásicos de diseño consideran que no hay interferencia de gas ni anomalías en la bomba. En realidad, el bombeo de gas libre en un pozo de aceite puede reducir significativamente la eficiencia de una instalación de bombeo mecánico. La profundidad de colocación de bomba y el uso de un separador de fondo son variables que permiten disponer de una eficiencia total. Se tiene que a presión de succión baja se debe disponer de un separador de gas, sin embargo, a una presión de succión alta no tiene efectos benéficos un separador de gas. Así, se encontró que colocando la bomba a la altura máxima permitida para una carga de succión apropiada, puede reducir significativamente los costos de operación de la instalación de bombeo mecánico.

Muchos operadores tienen reglas estándar para saber si es necesario instalar o no un separador de fondo (ancla de gas) en los pozos; estas decisiones pueden estar basadas en experiencias de operaciones pasadas y puede no aplicarse para las cda. actuales; - lo que no conduce a una producción más económica del pozo.

Considerar la profundidad de colocación de la bomba y el uso

de ancla de gas resulta de importancia tanto en la eficiencia como en los costos de operación de la instalación de bombeo mecánico.

La mezcla de gas con aceite resulta contraproducente para la eficiencia volumétrica de la bomba durante la producción. Esto contribuye a elevar los costos de producción por la baja eficiencia, además de acelerar el deterioro del equipo. Una baja eficiencia volumétrica puede tener muchas causas como:

1. fugas en válvulas
2. émbolo pegado
3. etc.

Sin embargo la presencia de gas en el fluido bombeado tiene una mayor influencia en el decremento de la eficiencia volumétrica. Gas en grandes cantidades disminuye la capacidad de la bomba para la producción de líquidos.

La presión de succión de la bomba es un parámetro importante de diseño. A una baja presión de succión pequeñas cantidades de gas pueden expandirse significativamente resultando una reducción de la eficiencia volumétrica de la bomba. Altas presiones de succión producirán altas eficiencias volumétricas porque el gas está en solución y solo una pequeña cantidad está libre. Para presiones arriba del punto de burbujeo todo el gas está en solución, resultando una eficiencia volumétrica total. La presión de succión de la bomba puede tener influencia directa de la profundidad de colocación de la bomba y/o del nivel de líquido en la T.R.

Como se mencionó brevemente,  $V$  en la ecuación 5.27 y 5.31 se refiere a el volumen de fluido producido (líquido (+) gas). Por lo tanto, cuando se bombea gas con el líquido, no puede ser considerado constante como se hizo para el caso cuando se bombea

solamente líquido. El volumen total de fluido producido (líquido (+) gas) puede calcularse de:

$$V = \alpha_{ca} VP \dots\dots\dots (5.39)$$

Donde:

$$VP = WC + (1 - WC)B_o + (RGL - (1 - WC) Rs) B_o \dots (5.40)$$

VP = volumen de 1 bl a c. s. de líquido (+) gas asociado a cualquier presión y temperatura.

La determinación de  $W_r$  de la ecuación 5.12 se dificulta en este caso porque la  $\delta_f$  varía entre la profundidad de colocación de bomba y la cabeza del pozo. Sin embargo  $W_r$  aparece como un término adicional en la expresión para la carga ríco (máxima) en la varilla fluida (ver ecuación 5.11). Por lo tanto, siendo con servativos,  $\delta_f^*$  puede considerarse con un valor más alto. Una buena aproximación para  $\delta_f^*$  es tomando el valor en el punto de burbujeo del crudo:

$$\delta_{fb}^* = \frac{350 WC \delta_{vnc}^* + 350(1 - WC) \delta_{onc}^* + (RGL)(GIP) \alpha_{ca}}{350(WC + (1 - WC) B_{ob})} \dots\dots (5.41)$$

donde:

GIP = porcentaje de la RGL bombeada con el líquido.

$B_{ob}$  = factor de volumen del aceite de formación en el punto de burbuja.

Con esta aproximación a  $\delta_f^*$ , la relación entre  $P_3$  y V será lineal para cada valor fijo de N (ec. 5.27) y cuadrático para cada valor de S (ec. 5.31).

El procedimiento para construir curvas de comportamiento  $P_{wf}$  es el mismo que el esbozado previamente para el caso de líquido - excepto que  $P_3$  en este caso es graficado contra V en lugar de  $\alpha_{ca}$ .

así los posibles gastos son la intersección de las curvas de comportamiento de la bomba con la curva IPR (bl/día) en lugar de la curva IPR (bl/día a c.s.). Sin embargo, es conveniente incluir la curva IPR (bl/día a c.s.) sobre la misma gráfica, ya que los gastos pueden ser fácilmente convertidos a bl/día a c.s.

## 5.4 PROBLEMAS DE ILUSTRACION

### 5.41 PROBLEMA CONSIDERANDO QUE SE BOMBEA LIQUIDO

Los datos del pozo, fluido y yacimiento se muestran en la tabla 5.1 (ver referencia 1).

Una bomba insertada se coloca en el fondo del pozo con una - unidad convencional de bombeo superficial. Una sarta de varillas API grado D es empleada (varilla número 86 en tabla 5.1). - El cálculo de VF con 100 % de GIP se hace en el apéndice 5 (referencia 1, tabla 5A.1). Los IPR's en bbl a c.c./día y en bl/día a c.y. se muestran en la fig. 5.3. Los resultados se muestran - en la fig. 5.4 y 5.5

Se supone que la bomba se coloca en el fondo del pozo y que el tamaño de tubería, tamaño de bomba, sarta de varillas de succión, y la relación manivela/biela se mantienen fijas.

Como el objetivo es maximizar el gasto de producción desde - el pozo, se usará el mayor tamaño posible de émbolo. Para un tipo de bomba insertada con un barril de pared delgada y tubería de 2 7/8 ", la tabla 5.3 muestra un émbolo de 2 ". Entonces:

$$A = \frac{\pi}{4} (2)^2 = 3.1416 \text{ pg}^2$$

Aplicando la ecuación 5.6:

$$K = (0.1484)(3.1416) = 0.4662$$

Para varilla número 86 y émbolo de 2 pg., la tabla 5.1 nos -



indica emplear varillas con las siguientes características:

32.8 % de 1 pg.

33.2 % de 7/8 pg.

34.0 % de 3/4 pg.

Estas varillas pesan 2.9, 2.22 y 1.63 lb/pie respectivamente (ver tabla 5.4), entonces:

$$W_r = 8000 (0.328 \times 2.9 + 0.332 \times 2.22 + 0.34 \times 1.63) = 17940 \text{ lb}$$

Como el agua se produce con aceite, se empleará un factor de servicio de 0.9 (ver tabla 5.2). Aplicando la ecuación 5.29:

$$b = \frac{17940 \text{ N}}{(56400)(0.4662)(3.1416)} (1 + (0.5625)(0.9) + (1 - 0.5625 \times 0.9)(.33))$$

$$= 0.3625 \text{ N} \quad \dots (5.42)$$

y con la ecuación 5.32:

$$c = \frac{17940}{(45120)(.4662)^2 (3.1416)S} (1 + (.5625)(0.9) + (1 - .5625 \times .9)(.33))$$

$$= 0.972/S \quad \dots (5.43)$$

Como la varilla de 1 pg. es colocada en la parte superior:

$$A_{11} = \frac{\pi r^2}{4} (1)^2 = 0.7854 \text{ pg}^2$$

Entonces, aplicando la ecuación 5.28:

$$a = \frac{1}{3.1416} (W_r + (.9 - .5063 \times .9)(17940) - \frac{(11.5 \times 10^4)}{4} (.9)(.7854))$$

$$= \frac{1}{3.1416} (W_r - 12351) \quad \dots (5.44)$$

Como la bomba está colocada en el fondo del pozo, la presión de succión de la bomba es igual a la  $P_{wf}$ ; de aquí, el IPR en bl a c.s./día que se muestra en la figura 5.3 es aplicable:

$$\gamma_{osc} = \frac{141.5}{131.5 + 35} = 0.8498$$

Entonces, con la ecuación 5.38 y tabla 5.1 (referencia 1):

$$\gamma_{fsc} = (0.5)(1.074) + (0.5)(0.8498) = 0.9619$$

y con la ecuación 5.12:

$$W_f = (0.433)(0.9619)(8000)(3.1416) = 10,468 \text{ lbs.}$$

Entonces, con la ecuación 5.41:

$$a = \frac{1}{3.1416} (10,468 - 12,351) = -600 \text{ PSI}$$

Con b dado por la ecuación 5.39, la ecuación 5.36 queda finalmente:

$$P_3 = -600 + (0.3625 N) o_{cs} \quad \dots\dots (5.45)$$

y con c dado por la ecuación 5.40, la ecuación 5.37 resulta en:

$$P_3 = -600 + \left(\frac{0.972}{S}\right) o_{cs} \quad \dots\dots (5.46)$$

Suponiendo  $o_{cs}$ , la  $P_{wf}$  podrá determinarse de la ecuación 5.42 para cualquier valor supuesto de N o de la ecuación 5.43 pa-

ra cualquier valor supuesto de S. Estas ecuaciones serán graficadas a la misma escala en la figura 5.4. La curva IPR para gas en bl a c.s./día también será graficada a la misma escala en la misma figura. Las líneas rectas representan la ecuación 5.42 y las curvas cuadráticas representan la ecuación 5.43. Nótese que las líneas rectas y las curvas cuadráticas parten del mismo punto de intersección de -600 PSI (ordenada al origen).

Si el esfuerzo máximo permisible para las varillas se toma como 35,000 lb/pg (ver ecuación 5.4), la desigualdad 5.35 queda:

$$SN^2 \geq \frac{70,500}{.5625(.9)(17940)(1+.33)} \left( \left( \frac{11.5 \times 10^4}{4} (.9) - 35000 \right) \times .7854 + .5063(0.9)(17,940) \right) \geq 11,678$$

Usando este valor de  $SN^2$  en la ecuación 5.23:

$$P_3 \geq 980 \text{ lb/pg}^2$$

Esto limita el valor de  $P_3$  (ver fig. 5.4, línea horizontal). para una  $P_{wf}$  de 980 lb/pg<sup>2</sup>, la curva IPR muestra 4,350 bl a c.s./día (ver fig. 5.3). De aquí, la bomba operará en cualquier lugar de la región limitada por una  $P_{wf}$  mínima de 980 lb/pg<sup>2</sup> y un gasto de producción máximo de 4,350 bl a c.s./día.

Los gastos están representados por la intersección de las curvas de comportamiento de la bomba (las líneas rectas o las líneas curvas cuadráticas) con la curva IPR. Por ejemplo, el pozo puede producir 228 bl a c.s./día con una velocidad de bombeo de 30 EPM (fig. 5.4). La longitud de carrera requerida para este gasto puede ser leído directamente de la fig. 5.5 o calculada de

la ecuación 5.8 o 5.43.

Empleando la ecuación 5.8 (con  $V = \alpha_1$ ) tenemos:

$$S = \frac{228}{(0.8)(0.4662)(30)} = 20.38 \text{ pg.}$$

El gasto posible ( $\alpha_1$ ) se graficará contra  $N$  y  $S$  en la fig. 5.5. Es evidente que la longitud de carrera así como la velocidad de bombeo resultan imprácticos a altos gastos de producción. Si la longitud de carrera está limitada para un valor práctico de digamos, 180 pg., un gasto de producción de 668 bl a c.s./día se obtendrá la (fig. 5.5). Para este gasto:

$$N = \frac{668}{(0.8)(0.4662)(180)} = 10 \text{ gpm}$$

$$\alpha_1 = \frac{(180)(10)^2}{70,500} (1 + .33) = 0.3396 \text{ pie/s}^2$$

$$\alpha_2 = \frac{(180)(10)^2}{70,500} (1 - .33) = 0.1711 \text{ pie/s}^2$$

$$P_3 = 1,800 \text{ lb/pg}^2 \text{ (curva IPR)}$$

$$PPRL = 10468 + (.9 + .3396)(17940) - (1800)(3.1416) = 27,052 \text{ lb}$$

Entonces:

$$\bar{\sigma}_{max} = \frac{27,052}{0.7854} = 34,443 \text{ lb/pg}^2$$

De la ecuación 5.17:

$$MPRL = (.9 - .1711)(17,940) = 13,076 \text{ lb}$$

Entonces:

$$\bar{V}_{m_0} = \frac{13,076}{0.7954} = 16,649 \text{ lb/pg}^3$$

#### 5.42 PROBLEMA CONSIDERANDO QUE SE BOMBEA LIQUIDO CON GAS.

Puesto que la bomba está colocada en el fondo del pozo y todo el gas es bombeado con el líquido, las curvas IPR mostradas en la fig. 5.3 y los datos del factor de volumen de la tabla 5A.1 (apéndice referencia 1) se emplearán en éste ejemplo de ilustración (ver también figs. 5.6 y 5.7).

Para este caso se empleará la misma bomba y sarta de varillas de succión que cuando se hizo el estudio para el caso de bombeo de líquido.

$$e_{gsc} = e_a (\gamma_{gsc}^*) = (.0763)(0.7) = 0.0534 \text{ lb/pie}$$

donde:

$e_a$  = densidad del aire

$\gamma_{gsc}^*$  = gravedad específica del gas (aire = 1)

El factor de volumen del aceite de formación a la presión de burbujeo es cerca de 1.266 bbl/Stbo (ver tabla 5A.1 en apéndice 5 referencia 1). De aquí la ecuación 5.41 queda:

$$\gamma_{rb}^* = \frac{(350)(.5)(1.074) + (350)(.5)(.8438) + (200)(.0534)}{350(0.5 + (0.5)(1.266))} = 0.8917$$

Entonces, la ecuación 5.12 nos da como resultado:

$$W_f = (0.433)(0.8917)(8,000)(3.1416) = 9,704 \text{ lb}$$

Con este valor de  $W_f$ , la ecuación 5.44 queda:

$$a = \frac{1}{3.1416} (9,704 - 12,351) = - 843 \text{ PSI}$$

Entonces, con b dada por la ecuación 5.42, la ecuación 5.27 nos lleva:

$$P_3 = - 843 + (0.3625 N) V \quad \dots\dots\dots (5.47)$$

y con C dada por la ecuación 5.43, la ecuación 5.31 nos lleva a:

$$P_3 = - 843 + \left(\frac{0.972}{S}\right) V^2 \quad \dots\dots\dots (5.48)$$

Suponiendo valores de  $V$ , la presión de succión ( $P_{wf}$ ) podrá determinarse de la ecuación 5.47 para cualquier valor supuesto de  $N$ , de la ecuación 5.48, para cualquier valor supuesto de  $S$ . Estas ecuaciones se graficarán a la misma escala en la figura 5.8. -- Las curvas IPR en stbl/día y bl/día también se graficarán a la misma escala en la figura. Las líneas rectas representan la ecuación 5.48. Notese que las líneas rectas y las curvas cuadráticas se originan desde un mismo punto de intersección que es -- - 843 lb/pg.<sup>2</sup>

Para un esfuerzo máximo permisible en varilla de 35,000 lb/pg.<sup>2</sup>, el valor mínimo permisible de  $SN^2$  es el mismo al calculado previamente para el caso de líquido (11,678). Usando este valor de  $SN^2$  en la ecuación 5.23 tenemos:

$$P_3 \geq 736 \text{ lb/pg}^2$$

Para una presión de fondo fluyendo de  $736 \text{ lb/pg}^2$ , la curva - IPR bl/día muestra  $8,100 \text{ bl/día}$  (fig. 5.5). De aquí, la bomba operará en cualquier lugar de la región limitada por una presión - mínima de succión ( $P_{wf}$ ) de  $736 \text{ lb/pg}^2$  y un gasto máximo de producción de  $8,100 \text{ bl/día}$  ( $5,050 \text{ stbl/d}$ ).

Los gastos posibles en este caso serán las intersecciones de las curvas de comportamiento de la bomba con la curva IPR bl/día. Por ejemplo, el pozo puede producir  $250 \text{ bl/día}$  con una velocidad de bombeo de  $30 \text{ epm}$ . Este gasto podrá convertirse a  $\text{stbl/d}$  moviéndose horizontalmente hacia la curva IPR en  $\text{stbl/d}$ , obteniéndose  $225 \text{ stbl/d}$ . La longitud de carrera requerida para  $250 \text{ -- bl/día}$  es:

$$S = \frac{250}{(0.8)(0.4662)(30)} = 22.34 \text{ pg}$$

Los gastos posibles se grafican contra N y S en la fig. 5.7. Es evidente que la longitud de carrera así como la velocidad de bombeo resultan impracticables a altos gastos de producción. Si la longitud de carrera se limita a un valor práctico de, digamos,  $180 \text{ pg}$ , un gasto de producción de  $700 \text{ bl/día}$  ( $625 \text{ stbl/d}$ ) podrá obtenerse (ver fig. 5.7).

Para este gasto:

$$N = \frac{700}{(0.8)(0.4662)(180)} = 10.43 \text{ epm}$$

$$\alpha_1 = \frac{(180)(10.43)^2}{70,500} (1 + 0.33) = 0.3692 \text{ pie/s}^2$$

$$\alpha_1 = \frac{(180)(10.43)^2}{70,500} (1 - 0.33) = 0.1861 \text{ pie/s}^2$$

$$P_3 = 1,810 \text{ lb/pg}^2 \\ (\text{curva IPR})$$

de la ecuación 5.15:

$$\text{PPRL} = 9,704 + (0.9 + 0.3692)(17,940) - (1610)(3.1416) \\ = 26,787 \text{ lb}$$

Entonces:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{26,787}{0.7854} = 34,106 \text{ lb/pg}^2$$

De la ecuación 5.17:

$$\text{MPRL} = (0.9 - 0.1861)(17,940) = 12,807 \text{ lb}$$

Entonces:

$$\sigma_{\text{mín}} = \frac{12,807}{0.7854} = 16,307 \text{ lb/pg}^2$$



## 5.5 DISCUSION DE RESULTADOS

El gasto de producción se muestra a decrecer con el incremento de velocidad de bombeo y esto, por supuesto, no ocurre dado -- que  $V$  es proporcional a  $N$  (ecuación 5.8). En las figs. 5.4 y -- 5.6, el comportamiento de presión muestra un decremento con el incremento de longitud de carrera, y esto también no puede ocurrir puesto que  $P_3$  es proporcional a  $S$  (ec. 5.23). Sin embargo, las gráficas parecen lógicas si son vistas simultáneamente. Porque el comportamiento de presión es proporcional a  $SN^2$ , la variación con  $N$  es mucho más grande que la variación con  $S$ . Esta es la razón del por qué mas altos gastos de producción (o menores presiones de succión) podrán obtenerse por la reducción simultánea de la velocidad de bombeo e incremento de la longitud de carrera.

Bombeando gas con el líquido reduce el valor de "a", por reducir la carga de fluido sobre el émbolo (ver ecuación 5.28). -- Esto origina el comportamiento de curvas para el caso cuando se -- bombea solamente líquido para disminuir por una cantidad igual a el cambio en "a". Como resultado, volúmenes mayores de fluido -- podrán obtenerse bombeando gas con el líquido; sin embargo, para presiones de succión abajo del punto de burbuja de el crudo, el -- gasto de líquido neto puede ser reducido porque el gas libre en--tra al barril.

TABLA 5.1  
DATOS DE BOMBA Y VARILLA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
VARILLA no.	DIAMETRO DE EMBOLO, PULGADAS	PESO DE VARILLA lb / pie	CONSTANTE ELÁSTICA Pu/g / lb-pie $E_c$	FACTOR DE FRECUENCIA $F_c$	SARTA DE VARILLAS, % DE CADA DIAMETRO					
					1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	1/4
44		0.726	$1.990 \times 10^{-4}$	1.000	—	—	—	—	—	100.0
54	1.06	0.908	$1.668 \times 10^{-4}$	1.138	—	—	—	—	44.8	55.4
54	1.25	0.929	$1.633 \times 10^{-4}$	1.140	—	—	—	—	49.5	50.6
54	1.50	0.957	$1.584 \times 10^{-4}$	1.137	—	—	—	—	55.4	43.6
54	1.75	0.990	$1.525 \times 10^{-4}$	1.132	—	—	—	—	64.6	35.4
54	2.00	1.027	$1.450 \times 10^{-4}$	1.095	—	—	—	—	73.7	26.3
54	2.25	1.067	$1.391 \times 10^{-4}$	1.061	—	—	—	—	83.4	16.6
54	2.50	1.106	$1.318 \times 10^{-4}$	1.023	—	—	—	—	93.5	6.5
55	General	1.135	$1.270 \times 10^{-4}$	1.000	—	—	—	—	100.0	—
64	1.06	1.164	$1.382 \times 10^{-4}$	1.229	—	—	—	33.3	33.1	33.5
64	1.25	1.211	$1.319 \times 10^{-4}$	1.215	—	—	—	37.2	35.9	26.9
64	1.50	1.275	$1.232 \times 10^{-4}$	1.184	—	—	—	42.3	40.4	17.3
64	1.75	1.341	$1.141 \times 10^{-4}$	1.145	—	—	—	47.4	45.2	7.4
65	1.06	1.307	$1.138 \times 10^{-4}$	1.098	—	—	—	34.4	55.6	—
65	1.25	1.371	$1.127 \times 10^{-4}$	1.104	—	—	—	37.3	62.7	—
65	1.50	1.343	$1.115 \times 10^{-4}$	1.110	—	—	—	41.8	58.2	—
65	1.75	1.369	$1.090 \times 10^{-4}$	1.114	—	—	—	46.9	53.1	—
65	2.00	1.394	$1.070 \times 10^{-4}$	1.114	—	—	—	52.0	48.0	—
65	2.25	1.426	$1.045 \times 10^{-4}$	1.110	—	—	—	58.4	41.6	—
65	2.50	1.460	$1.018 \times 10^{-4}$	1.099	—	—	—	65.2	34.8	—
65	2.75	1.497	$0.990 \times 10^{-4}$	1.082	—	—	—	72.5	27.5	—
65	3.25	1.574	$0.930 \times 10^{-4}$	1.037	—	—	—	88.1	11.9	—
66	General	1.634	$0.883 \times 10^{-4}$	1.000	—	—	—	100.0	—	—
75	1.06	1.566	$0.997 \times 10^{-4}$	1.191	—	—	27.0	27.4	45.6	—
75	1.25	1.604	$0.973 \times 10^{-4}$	1.193	—	—	29.4	29.8	40.8	—
75	1.50	1.664	$0.935 \times 10^{-4}$	1.189	—	—	33.3	33.3	33.3	—
75	1.75	1.732	$0.892 \times 10^{-4}$	1.174	—	—	37.8	37.0	25.1	—
75	2.00	1.803	$0.847 \times 10^{-4}$	1.151	—	—	42.4	41.3	16.3	—
75	2.25	1.876	$0.801 \times 10^{-4}$	1.121	—	—	46.9	45.8	7.2	—
76	1.06	1.802	$0.816 \times 10^{-4}$	1.072	—	—	28.5	71.5	—	—
76	1.25	1.814	$0.812 \times 10^{-4}$	1.077	—	—	30.6	69.4	—	—
76	1.50	1.833	$0.804 \times 10^{-4}$	1.082	—	—	33.8	66.2	—	—
76	1.75	1.855	$0.795 \times 10^{-4}$	1.068	—	—	37.5	62.5	—	—
76	2.00	1.890	$0.785 \times 10^{-4}$	1.060	—	—	41.7	58.3	—	—
76	2.25	1.908	$0.774 \times 10^{-4}$	1.066	—	—	46.5	53.5	—	—
76	2.50	1.934	$0.764 \times 10^{-4}$	1.067	—	—	50.8	49.2	—	—
76	2.75	1.967	$0.751 \times 10^{-4}$	1.094	—	—	56.5	43.5	—	—
76	3.75	2.036	$0.722 \times 10^{-4}$	1.078	—	—	68.7	31.3	—	—
76	3.75	2.118	$0.690 \times 10^{-4}$	1.047	—	—	82.3	17.7	—	—
77	General	2.224	$0.648 \times 10^{-4}$	1.000	—	—	100.0	—	—	—
85	1.06	1.883	$0.873 \times 10^{-4}$	1.261	—	22.2	22.4	22.4	33.0	—
85	1.25	1.943	$0.841 \times 10^{-4}$	1.253	—	23.9	24.2	24.3	27.6	—
85	1.50	2.039	$0.791 \times 10^{-4}$	1.232	—	26.7	27.4	26.8	19.2	—
85	1.75	2.138	$0.738 \times 10^{-4}$	1.201	—	29.8	30.4	29.5	10.5	—
86	1.06	2.058	$0.742 \times 10^{-4}$	1.151	—	22.6	23.0	54.3	—	—
86	1.25	2.067	$0.732 \times 10^{-4}$	1.156	—	24.3	24.5	51.2	—	—
86	1.50	2.133	$0.717 \times 10^{-4}$	1.162	—	26.8	27.0	46.3	—	—
86	1.75	2.165	$0.699 \times 10^{-4}$	1.164	—	29.4	30.0	40.6	—	—
86	2.00	2.247	$0.678 \times 10^{-4}$	1.181	—	32.8	33.2	33.9	—	—
86	2.25	2.315	$0.656 \times 10^{-4}$	1.153	—	36.9	36.0	27.1	—	—
86	2.50	2.365	$0.633 \times 10^{-4}$	1.138	—	40.6	39.7	19.7	—	21.7
86	2.75	2.455	$0.610 \times 10^{-4}$	1.119	—	44.5	43.3	12.2	—	—

TABLA 5.2

FACTORES DE SERVICIO (DESPUES BROWN, DAY, Y BYRD)

SERVICIO	API C	API D
no corrosivo	1.00	1.00
agua salada	0.65	0.90
sulfhídrico	0.50	0.70

TABLA 5.3

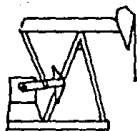
DIAMETRO MAXIMO DE BOMBA (DESPUES BROWN, DAY, Y BYRD)

TIPO DE BOMBA	diámetro de T.P. en pg.			
	1.900	2 3/8	2 7/8	3 1/2
T.P. una pieza barril de pared delgada (TW)	1 1/2	1 3/4	2 1/4	2 3/4
T.P. una pieza barril de pared gruesa (TH)	1 1/2	1 3/4	2 1/4	2 3/4
T.R. barril (TL)	---	1 3/4	2 1/4	2 3/4
varilla de una pieza barril de pared delgada (RW)	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2
varilla de una pieza barril de pared gruesa (RH)	1 1/16	1 1/4	1 3/4	2 1/4
barril de varilla de revestimiento	---	1 1/4	1 3/4	2 1/4

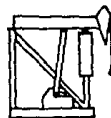
TABLA 5.4

DATOS DE VARILLA DE SUCCION (DESPUES BROWN, DAY, Y BYRD)

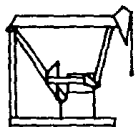
1	2	3	4
diámetro de varilla	área en $\text{pg}$	peso de varilla en el aire (lb/pie)	constante elástica $E_r$ $\text{pg/lb-pie}$
1/2	0.196	0.72	1.990x10
5/8	0.307	1.13	1.270x10
3/4	0.442	1.63	0.883x10
7/8	0.601	2.22	0.649x10
1	0.785	2.90	0.497x10
1 1/8	0.994	3.67	0.393x10



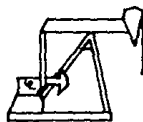
TIPO I



TIPO II



TIPO III



TIPO IV

Fig. 5 . 1 . - TIPOS DE UNIDADES DE BOMBEO

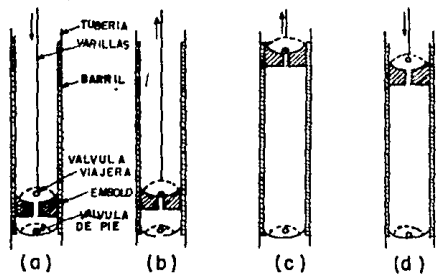


Fig. 5.2.- CICLO DE BOMBEO

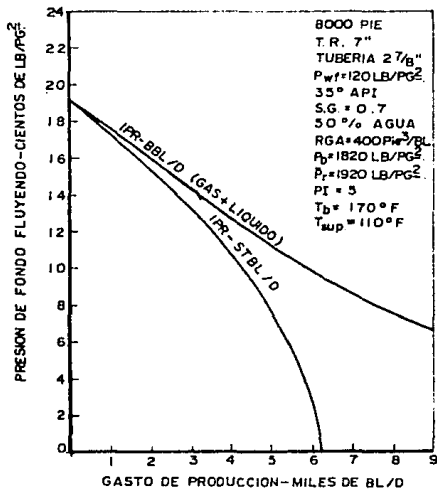


Figura 5.3.-COMPORTAMIENTOS DE AFLUENCIA.

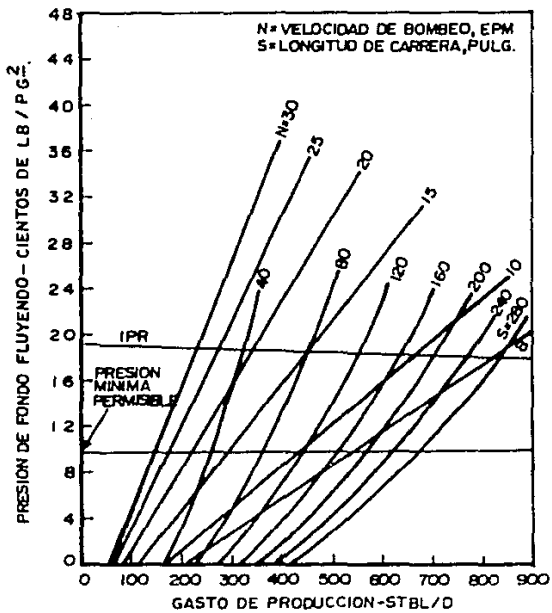


Figura. 5.4.-CURVAS DE COMPORTAMIENTO PARA BOMBEO MECANICO (BOMBEANDO LIQUIDO)



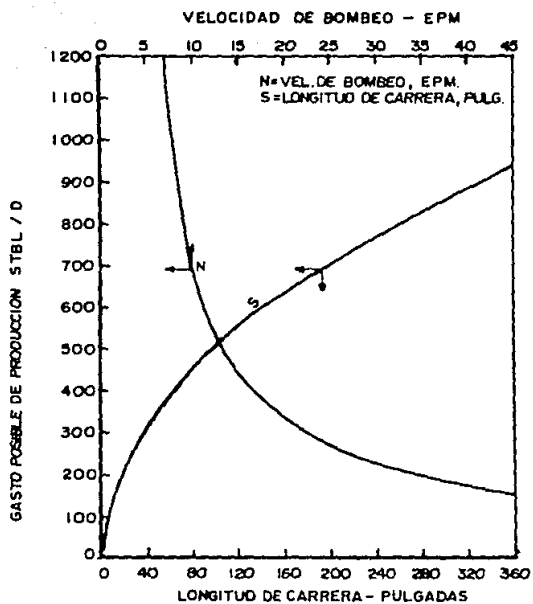


Figura 5.5.-GASTO DE PRODUCCION POSIBLE PARA BOMBEO MECANICO Vs. N y S (LIQUIDO)

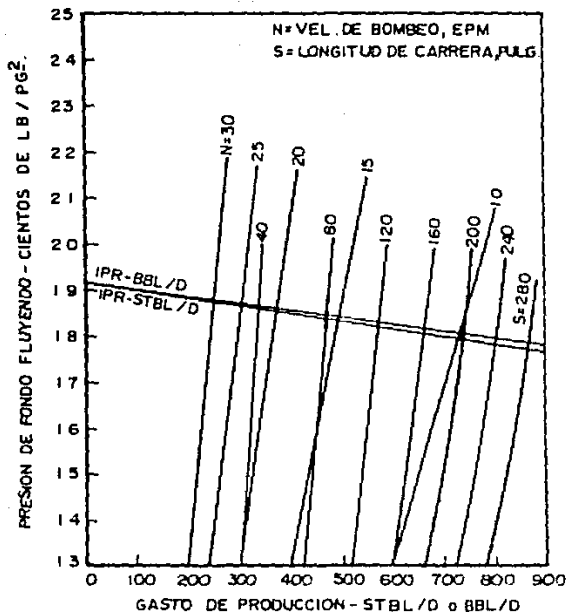


Figura 5.6.- CURVAS DE COMPORTAMIENTO PARA  
 BOMBEO MECANICO (LIQUIDO Y GAS)

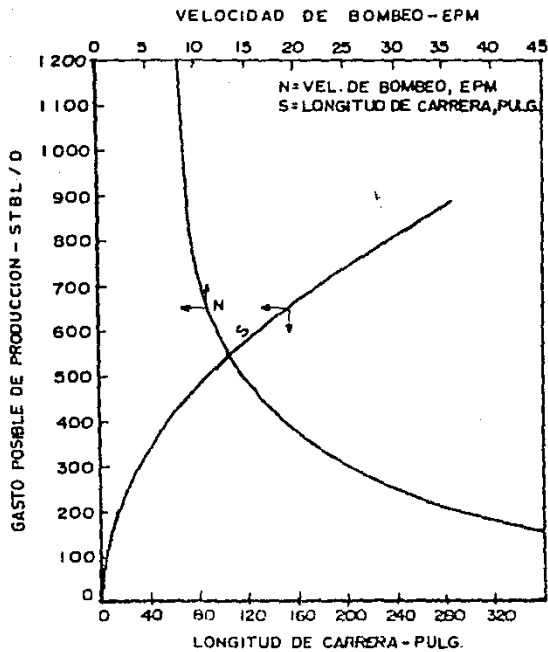


Figura 5.7.-GASTO DE PRODUCCION POSIBLE PARA —  
BOMBEO MECANICO Vs. N y S (LIQUIDO Y GAS).

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

1. Kermit E. Brown  
Technology of Artificial Lift Methods  
Capítulo 5: Artificial Lift (por Bashir Agena y Kermit E. Brown)
2. Paul M. Bommer, Bommer Engineering Co.  
Sucker Rod Pumping Systems Design—Another Look  
SPE 10255
3. J.J. Day, and J.P. Byrd.  
The Technology of Artificial Lift Methods.  
Vol. 2a. Chapter 2. Tulsa Oklahoma.  
The Petroleum Publishing Co., 1980
4. Nind, T.E.W. Principles of Oil Well Production.  
Chapter 10. New York: Mc Graw-Hill Book, Co., 1964.
5. Ramón Rodrigo Aguilar Marurí.  
Aplicación del Análisis Rodal al sistema Artificial de -  
Bombeo Mecánico.  
Tesis Profesional, Pac. de Ing., U.N.A.M.  
México, D. F. 1986.
6. Z. Schmidt and D.R. Doty, U. of Tulsa.  
System Analysis for Sucker Rod Pumping.  
SPE 15426. 1986.
7. Paul Bennett, Manager  
Artificial Lift Concepts And Timing,  
Kepling and Associates Inc., Dallas, Texas.

A P E N D I C E 2

## N O M E N C L A T U R A

SIMBOLO		UNIDADES
$A_j$	Area de tobera	$ng^2$
$A_s$	Area neta de la cámara de mezclado	$ng^2$
$A_t$	Area total de la cámara de mezclado	$ng^2$
$B_G$	Factor de volumen del gas	adim.
$B_o$	Factor de volumen del aceite	adim.
$B_{ob}$	Factor de volumen del aceite en el punto de burbuja	adim.
$B_w$	Factor de volumen del agua	adim.
B.M.	Bombeo mecánico	
B.N.	Bombeo neumático	
B.N.C.	Bombeo neumático continuo	
B.N.I.	Bombeo neumático intermitente	
CPF	Sistema de inyección en circuito cerrado	
D	Profundidad del pozo	pie
d.t	Diámetro de T.P.	pg
e.a.	Espacio anular	
$G_G$	Gradiente del gas	$lb/og^2/pie$
IP	Índice de productividad	$\frac{bl/dfn}{lb/ng^2}$
IPR	Comportamiento de efluencia	adim.

SIEMBOLO

UNIDADES

I.D.	Diámetro interno	pg
LF	Línea de flujo	
O.D.	Diámetro externo	pg
OPF	Sistema de inyección en circuito abierto	
P	Presión	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>so</sub>	Presión de operación	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>wf</sub>	Presión de fondo fluyendo	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>wh</sub>	Presión en la cabeza del pozo	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>sen</sub>	Presión de separación	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>wfs</sub>	Presión de succión de la bomba	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>ws</sub>	Presión de fondo estática	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>1</sub>	Presión del fluido matriz	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>2</sub>	Presión de descarga	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>3</sub>	Presión de succión	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>s</sub>	Presión de operación en la superficie	lb/pg <sup>2</sup>
Q	Gasto de producción	bl/día
Q <sub>1</sub>	Gasto de fluido matriz	bl/día
Q <sub>2</sub>	Gasto total de líquidos en la tubería de retorno	bl/día
RGL	Relación gas-líquido	adim.
R <sub>s</sub>	Relación gas disuelto-aceite	adim.
RGA	Relación gas-aceite instantánea	adim.

## SÍMBOLO

## UNIDADES

RGLF	Relación gas-líquido de la formación	adim.
RGLI	Relación gas-líquido inyectado	adim.
RGLT	Relación gas-líquido total	adim.
$R_{sw}$	Relación gas disuelto-agua	adim.
$S_t$	Número total de etapas	
T.P.	Tubería de producción	
T.R.	Tubería de revestimiento	
$T_q$	Tanque de almacenamiento	
V	Volumen de succión o entrada	bl/día
WC	Fracción de agua	frac.
$\gamma_g$	Densidad específica del gas	adim.
$\gamma_f$	Gravedad específica del fluido	adim.
$\gamma_o$	Densidad relativa del aceite	adim.