

01124  
12



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

"SIMULADOR DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO"

T E S I S       P R O F E S I O N A L

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O   P E T R O L E R O

P R E S E N T A

JORGE IVAN GARCÍA BOSTELMANN

DIRECTOR DE TESIS: Ing. Eva Sánchez Olea

MEXICO, D. F., CIUDAD UNIVERSITARIA, 2003



a



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# **PAGINACIÓN DISCONTINUA**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-1216

Se le a la Dirección General de Bibliotecas...  
Ma a diluir en formato electrónico e impreso e  
entendido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Jorge Ivan Garcia Bostelmann  
FECHA: 6-5-03  
FIRMA: [Firma manuscrita]

**SR. JORGE IVAN GARCÍA BOSTELMANN**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Ing. Eva Sánchez Olea y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

**SIMULADOR DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO**

- INTRODUCCIÓN
- I GENERALIDADES DEL BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO
- II FLUJO EN TUBERÍAS VERTICALES
- III COMPORTAMIENTO DE VÁLVULAS DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO
- IV DISEÑO DE SISTEMAS DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO
- V PROGRAMA DE CÓMPUTO
- VI APLICACIONES
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- NOMENCLATURA
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria, D. F., a 17 de octubre de 2002  
EL DIRECTOR

[Firma manuscrita]  
**ING. GERARDO FERRANDO BRAVO**

GFB\*RLLR\*gtg

ff

b



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS: "SIMULADOR DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO"

PRESENTADA POR: JORGE IVAN GARCÍA BOSTELMANN

DIRIGIDA POR: ING. EVA SÁNCHEZ OLEA

JURADO PARA EL EXAMEN PROFESIONAL

PRESIDENTE: M.I. JOSÉ ÁNGEL GÓMEZ CABRERA

VOCAL: ING. EVA SÁNCHEZ OLEA

SECRETARIO: M.I. JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ GUEVARA

1<sup>ER</sup> SUPLENTE: ING. HORACIO ZÚÑIGA PUENTE

2<sup>DO</sup> SUPLENTE: M.I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ

MÉXICO, D.F., CD. UNIVERSITARIA, ABRIL 2003

---

A Dios, por colmarme de bendiciones a lo largo de mi vida.

A mi padre, por el amor incondicional que me has dado, por la amistad que tenemos y por ser tan paciente.

A mi madre, por el gran amor que me has dado, por cubrir mis necesidades afectivas y por el gran ejemplo de vida.

A mis abuelos, por los grandes consejos que me han dado, por compartir su experiencia y sabiduría.

A mis tíos, por su gran apoyo, por hablarme tan honestamente en los momentos necesarios.

A mis hermanos, por que cada uno de ellos me ha dado un ejemplo de vida para seguir.

A Arath, por hacerme una mejor persona, por mostrarme el potencial que tengo y por traer alegría a mi vida.

A mis asesores de tesis, a la Ing. Eva Sánchez y al M.I José González por su amistad, su dedicación y orientación en el desarrollo de este trabajo de tesis.

A mis amigos, Raúl, Emilio, Gerardo, Luis, Daniel, Fidel, Antelmo, Octavio, José Luis, Carlos, Julio, Erik, Toño, Tzompa, por hacer de mi estancia en la universidad una experiencia de amistad y compañerismo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por la gran educación con la que me han formado y por haberme permitido ser parte de esa gran comunidad universitaria.

A todas aquellas personas, que de alguna u otra forma participaron moralmente o físicamente en la elaboración de este trabajo de tesis

---

---

# Índice

## Introducción

## 1.- Generalidades del bombeo neumático continuo

- 1.1 Aplicaciones
- 1.2 Ventajas del bombeo neumático
- 1.3 Desventajas del bombeo neumático
- 1.4 Instalaciones de bombeo neumático
  - 1.4.1. Instalaciones subsuperficiales
    - 1.4.1.1. Instalaciones abiertas
    - 1.4.1.2. Instalaciones semicerradas
    - 1.4.1.3. Instalaciones cerradas
    - 1.4.1.4. Tuberías Macarroni
    - 1.4.1.5. Instalaciones dobles
    - 1.4.1.6. Configuración de flujo
  - 1.4.2. Instalaciones superficiales
    - 1.4.2.1. Acondicionamiento del gas
    - 1.4.2.2. Sistema de distribución

## 2.- Flujo en tuberías verticales

- 2.1 Ecuación general de energía
- 2.2 Bases para el desarrollo de las correlaciones de flujo multifásico
- 2.3 Patrones de flujo
- 2.4 Flujo multifásico vertical
- 2.5 Flujo multifásico horizontal
- 2.6 Flujo multifásico a través de estranguladores
- 2.7 Curvas de gradiente
  - 2.7.1 Transformar la RGA a RGL

---

### **3.- Comportamiento de válvulas de bombeo neumático continuo**

- 3.1 Características de las válvulas de bombeo neumático
- 3.2 Consideraciones de Diseño
  - 3.2.1. Válvulas operadas por la presión en la TR
  - 3.2.2. Válvula balanceada
  - 3.2.3. Válvula operada por fluido
- 3.3 Consideraciones dinámicas
- 3.4 Aplicación de las válvulas
- 3.5 Desempeño de las válvulas de bombeo neumático
  - 3.5.1. Equipo de prueba estática
  - 3.5.2. Equipo de prueba dinámica
  - 3.5.3. Características del desempeño de las válvulas
    - 3.5.3.1. Comportamiento del flujo orificio
    - 3.5.3.2. Comportamiento del flujo estrangulado
    - 3.5.3.3. Comportamiento del flujo transicional
  - 3.5.4. Características específicas del comportamiento de flujo
    - 3.5.4.1 Criterio de transición
    - 3.5.4.2. Pendientes de las curvas de comportamiento de flujo estrangulado
    - 3.5.4.3. Presiones de cierre de la producción
    - 3.5.4.4. Presión crítica en el flujo orificio

### **4.- Diseño de sistemas de bombeo neumático continuo**

- 4.1 Diseño de bombeo neumático continuo
- 4.2 Factores a considerar en el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo
  - 4.2.1. Requerimientos de las válvulas para flujo continuo
  - 4.2.2. Presión en el separador y presión de flujo en la cabeza del pozo
  - 4.2.3. Localización de la válvula superior
  - 4.2.4. Volumen y presión del gas de inyección



- 
- 4.2.5. Temperatura de fondo y gradiente de temperatura fluyendo
    - 4.2.5.1. Solución de Kirkpatrick
    - 4.2.5.2. Correlación de Shiu
  - 4.2.6. Configuración del diámetro de tuberías para los gastos de producción
  - 4.2.7. Calibración de las válvulas
  - 4.2.8. Aproximaciones que pueden emplearse en el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo
  - 4.2.9. Uso de las correlaciones de flujo multifásico
  - 4.3 Procedimiento de diseño para instalaciones de bombeo neumático continuo
    - 4.3.1. Determinación del punto de inyección del gas y del gasto que puede producir un pozo cuando se inyecta cierta cantidad definida de gas
    - 4.3.2. Determinación del espaciamiento de las válvulas
      - 4.3.2.1. Procedimiento gráfico para el espaciamiento de válvulas balanceadas
      - 4.3.2.2. Procedimiento gráfico para el espaciamiento de válvulas desbalanceadas

## **5.- Programa de cómputo**

- 5.1 Características del programa
- 5.2 Información necesaria
  - 5.2.1. Datos requeridos para el uso del programa
- 5.3 Programa
  - 5.3.1. Sistema de unidades
  - 5.3.2. Introducción de la información en el orden necesario para realizar una simulación
    - 5.3.2.1. Ventana de inicio y ventana principal
    - 5.3.2.2. Ventana de descripción del pozo en estudio
    - 5.3.2.3. Ventana de propiedades del fluido
    - 5.3.2.4. Ventana de las propiedades PVT
    - 5.3.2.5. Ventana de las condiciones de trabajo

- 
- 5.3.2.6 Ventana del estado mecánico del pozo
  - 5.3.2.7. Ventana de las opciones de cálculo y la ventana de las opciones de diseño
  - 5.3.2.8. Ventana del perfil de presiones
  - 5.3.2.9. Ventana del espaciamiento de las válvulas
  - 5.3.2.10. Ventana del comportamiento respecto al volumen de gas inyectado
  - 5.3.2.11. Ventana del gasto de líquido producido v.s. profundidad de inyección
  - 5.3.2.12. Ventana de la calibración de las válvulas
  - 5.3.2.13. Ventana de la caracterización dinámica
  - 5.3.2.14. Ventana del comportamiento dinámico de la válvula

## **6. Aplicaciones**

- 6.1 Diseño de bombeo neumático continuo con datos de campo
  - 6.1.1. Ejemplo para determinar la  $P_{wf}$
- 6.2 Análisis de sensibilidad para el estudio de un pozo fluyente
- 6.3 Análisis de sensibilidad para el estudio de bombeo neumático continuo

## **Conclusiones y recomendaciones**

### **Nomenclatura**

### **Bibliografía**

### **Apéndice**

- Gradiente de gas
- Factores de corrección de temperatura
- Reporte del diseño
- Reporte del perfil
- Reporte del espaciamiento

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

Reporte del gas inyectado  
Reporte del líquido producido  
Reporte de la calibración

---

## INTRODUCCIÓN

Los yacimientos después de un periodo de explotación pierden su energía y por consiguiente dejan de producir hidrocarburos, es ante esta situación que surgen los distintos métodos de recuperación de hidrocarburos, encaminados a mantener o recuperar la producción de hidrocarburos. Ante la gran variedad de condiciones de operación que se presentan en los yacimientos surgen una gran cantidad de métodos de recuperación de hidrocarburos, algunos presentan ciertas ventajas sobre otros, algunos son más caros que otros, pero a fin de cuentas todos encaminados a maximizar la recuperación de los hidrocarburos.

Con la finalidad de lograr esto último, los ingenieros muchas veces emplean simultáneamente varios métodos de recuperación de hidrocarburos, es decir junto con un sistema artificial de producción aplican técnicas de recuperación secundaria o mejorada.

La recuperación máxima de los hidrocarburos de manera segura, rentable y con calidad es la tarea principal del ingeniero petrolero, basado en todo el conocimiento adquirido durante su formación profesional para garantizar que esto suceda. Nunca debe olvidar que en sus manos está un recurso no renovable, propiedad de todos los mexicanos y que estos le están confiando para su mejor explotación.

En este trabajo de tesis se aborda el sistema artificial de producción por bombeo neumático continuo, que por sus características de operación lo hace un sistema de uso frecuente a nivel mundial. El objetivo de este trabajo es elaborar un programa de cómputo que ayude al ingeniero petrolero a diseñar las instalaciones de bombeo neumático continuo de manera rápida, confiable y con la ventaja de hacerlo sin modificar ni poner en riesgo las instalaciones petroleras.

---

## Capítulo 1. Generalidades del bombeo neumático continuo

Cuando se terminan los pozos, es usual que fluyan naturalmente debido a la expansión de la roca y del fluido que se encuentra en el yacimiento, pero después de un periodo en la vida del mismo las presiones de la formación disminuyan y por tanto el flujo cese o decline hasta un punto en que ya no es rentable su explotación o bien los fluidos no tienen la energía necesaria para llegar hasta la superficie. En los yacimientos el aceite sin recuperar representa una gran oportunidad económica, cuando esto sucede se cuenta con las siguientes opciones cuya finalidad es aumentar la producción o poner a producir pozos que no fluyen:

- (a) Sistemas artificiales de producción.
- (b) Recuperación secundaria.
- (c) Recuperación mejorada.

Un sistema artificial de producción se define como cualquier método que se emplee en la producción de aceite de un pozo, el cual ayuda a la energía propia del yacimiento cuando ésta ya no es capaz de mantener la producción de aceite desde el fondo del pozo hasta la superficie; todos los yacimientos a lo largo de su vida productiva se explotan bajo algún método artificial.

En este trabajo se describirá el sistema artificial de bombeo neumático, el cual es un método de levantamiento del fluido desde el fondo del pozo hasta la superficie mediante la inyección de gas a alta presión al espacio anular, el cual pasa a la tubería de producción a través de válvulas colocadas en uno o más puntos de inyección, o con la variante de la inyección del gas a través de la tubería de producción, el cual pasará al espacio anular a través de las válvulas de inyección.

El comportamiento de flujo en los pozos con bombeo neumático continuo es similar al flujo natural. La operación del bombeo neumático continuo consiste en la inyección controlada de gas a alta presión en la columna de fluido, para originar un aligeramiento de la columna a partir del punto de inyección del gas hasta la superficie. La cantidad

predeterminada de gas que se inyecta sirve para mantener la presión de fondo fluyendo requerida para obtener el gasto de producción que puede aportar el pozo.

Los pozos generalmente presentan una cierta RGA la cual es propia de las características de los fluidos que se encuentran en el yacimiento, esta RGA es capaz de aligerar la columna de fluidos desde el fondo del pozo hasta la superficie. En la figura 1.1 se muestra el comportamiento del perfil de presión del fluido desde el fondo del pozo hasta la superficie, en este caso el pozo es capaz de producir los fluidos por sí sólo, esto se observa ya que la curva del perfil de presión del fluido alcanza la superficie.

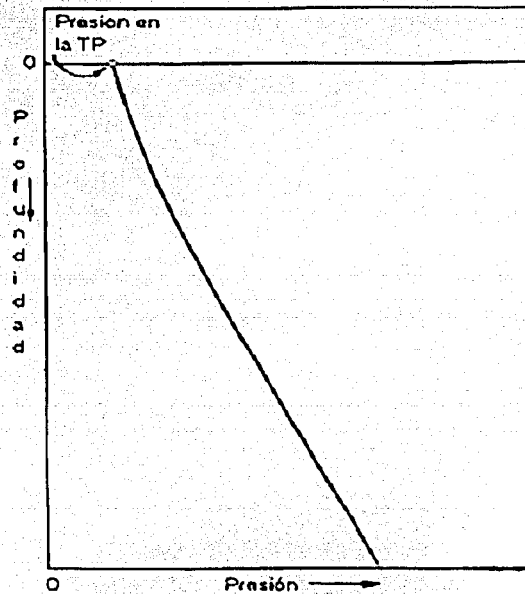


Fig. 1.1. Perfil de presión del fluido. Pozo fluyente.

En la figura 1.2 se muestra el comportamiento del perfil de presión del fluido desde el fondo del pozo, en este caso el pozo no es capaz de producir los fluidos por sí sólo. Por lo que es un candidato a aplicarle un sistema artificial de producción.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

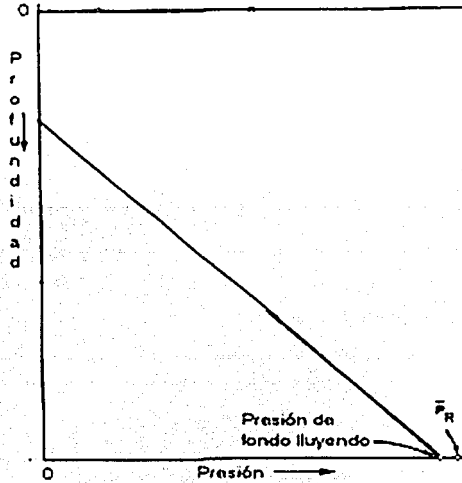


Fig. 1.2 Perfil de presión del fluido.

En caso de que se le aplique bombeo neumático continuo, es necesario conocer correctamente el comportamiento de los fluidos dentro del pozo, lo que implica conocer el valor de la RGA dentro del pozo, al comenzar a inyectar gas el valor de la RGA se incrementa. Para conocer correctamente estos valores se emplean las siguientes ecuaciones:

$$Q_{gp} = Q_l \times RGA \quad (1.1)$$

$$Q_{gt} = Q_{gp} + Q_{gi} \quad (1.2)$$

$$RGA_t = Q_{gt} / Q_l \quad (1.3)$$

Donde:

- $Q_l$  Gasto de líquido.
- $Q_{gp}$  Gasto de gas producido.
- $Q_{gi}$  Gasto del gas de inyección.
- $Q_{gt}$  Gasto de gas total.
- $RGA_t$  RGA total.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El valor de la  $RGA_i$  es muy importante ya que este valor es el que se usa para calcular el perfil de presión del fluido por arriba del punto de inyección, mientras que el valor de la  $RGA$  natural del yacimiento se usará para calcular el perfil de presión del fluido por debajo del punto de inyección.

En la figura 1.3 se observa que tanto el perfil de presión del fluido, el punto de inyección así como la presión de fondo fluyendo se modifican cuando se tiene un valor distinto de la  $RGA_i$ . El perfil de presiones debajo del punto de inyección es el mismo para los dos casos ya que este depende de la  $RGA$  natural.

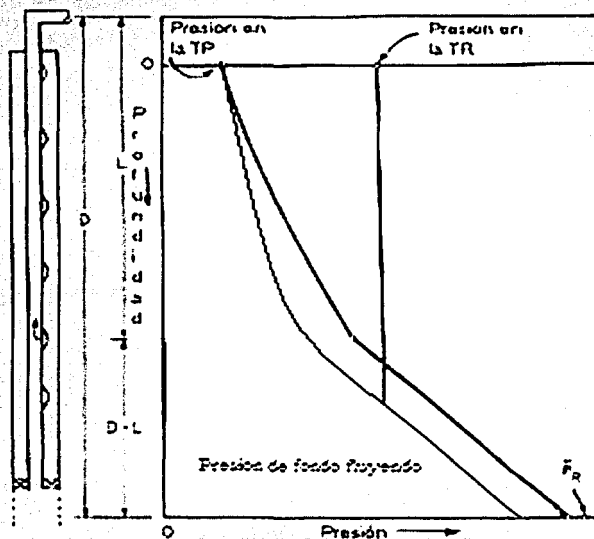


Fig. 1.3 Variación del perfil de presiones.

### 1. Bombeo Neumático Continuo

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En este método se inyecta un volumen continuo de gas a alta presión a través del espacio anular a la tubería de producción, o como ya se mencionó a través de la tubería de producción al espacio anular, para aerear o aligerar la columna de fluido hasta que la



reducción en la presión del fondo permita un diferencial suficiente a través de la formación, originando que el pozo produzca al gasto deseado. Para lograr esto, se emplea una válvula de flujo, la cual permite la inyección de gas lo más profundo posible con la presión disponible del gas de inyección en un punto específico para poder levantar la columna de fluido.

En este tipo de pozos, el rango de producción de fluidos puede variar considerablemente dependiendo del índice de productividad y del diámetro de la tubería de flujo (T.P. o T.R.). Volúmenes menores pueden ser levantados eficientemente al usar inyección de flujo continuo y una tubería denominada "macarroni"; como un ejemplo de este tipo de configuración se puede citar que gastos tan bajos como de 25 B/D se pueden producir eficientemente a través de una tubería de 1 pulgada e inyección de flujo continuo.

En la figura 1.4 se muestra una instalación de bombeo neumático que consiste de una estación de compresión que provee el gas para la inyección en cuatro pozos. Los volúmenes de gas de inyección son controlados y medidos independientemente para cada pozo permitiendo con esto la optimización del sistema. El líquido y el gas que se produce son conducidos a un separador convencional. La mayoría del gas seco se comprime y se usa como gas de inyección mientras que el resto se envía para la línea de venta.

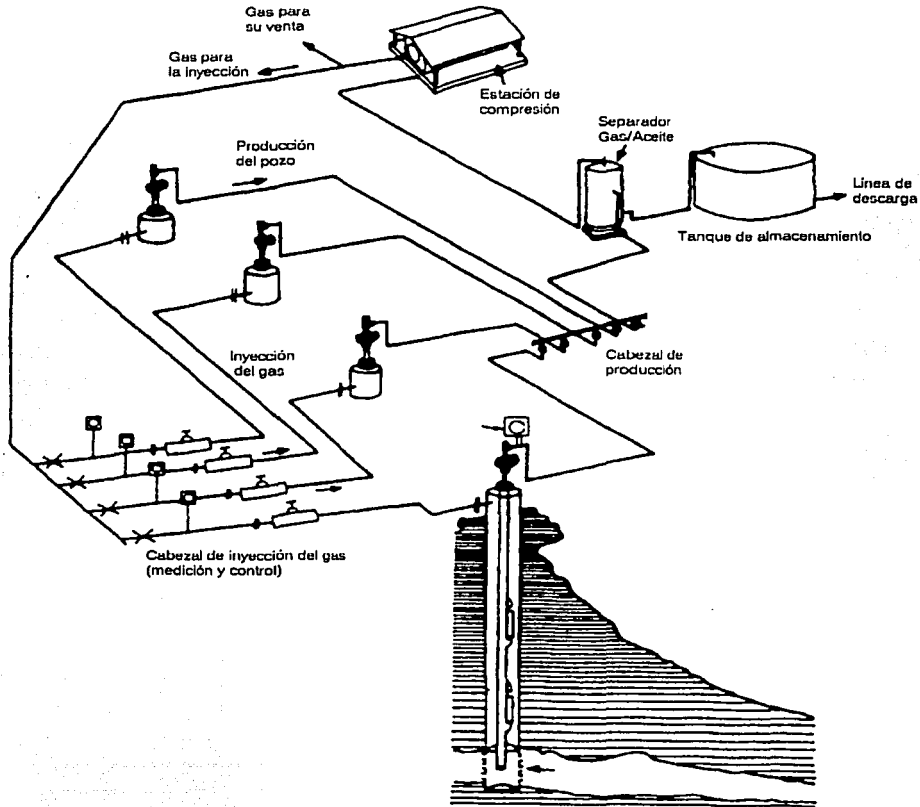


Fig. 1.4 Sistema de bombeo neumático e instalaciones superficiales

## 2. Bombeo Neumático Intermitente

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Este método consiste en producir periódicamente un determinado volumen de aceite impulsado por un volumen de gas que se inyecta a alta presión desde la superficie y a través del espacio anular por medio de un regulador, un interruptor o por la combinación de ambos; este gas pasa posteriormente del espacio anular a la TP a través de una válvula que va instalada en la tubería de producción. Cuando la válvula abre, el fluido proveniente de la formación que se ha estado acumulando dentro de la TP, es llevado hasta la superficie en

forma de un tapón o bache de aceite a causa de la energía del gas. Sin embargo, debido al fenómeno de resbalamiento del líquido que ocurre dentro de la tubería de producción, sólo una parte del volumen de aceite inicial se recupera en la superficie, mientras que el resto del aceite cae al fondo del pozo integrándose al bache de aceite en formación. Después que la válvula cierra, transcurre un período de inactividad aparente, en el cual la formación productora continúa aportando fluido al pozo hasta formar un determinado volumen de aceite con el que se inicia otro ciclo y en el espacio anular se va acumulando el gas hasta que alcanza la presión definida para poder llevar hasta la superficie el bache de aceite que se ha formado.

En el bombeo neumático intermitente, el gas se inyecta a intervalos regulares, de manera tal que el ciclo se regula para que coincida con la relación de fluidos que está produciendo la formación hacia el pozo. Se usa en pozos con gastos relativamente bajos.

El flujo intermitente también se lleva a cabo con la inyección de gas en distintos puntos, es decir, a través de más de una válvula de inyección. La instalación se debe diseñar de manera tal que las válvulas de bombeo neumático abran justo cuando la parte inferior del bache pase por cada una de ellas.

El porcentaje de pozos que utilizan bombeo neumático se ha incrementado considerablemente en los últimos años, particularmente desde el final de la segunda guerra mundial. Esta popularidad se debe al mejoramiento del equipo, así como otros avances técnicos. La investigación de 1952-1977 ha sido considerable, y todo con la finalidad de determinar con más exactitud las caídas de presión en flujo de dos fases, tanto horizontal como vertical. También ha aumentado su popularidad gracias a que se ha realizado trabajo de investigación para todos los tipos de flujo que se presentan en los arreglos de tuberías.

### **1.1 Aplicaciones**

El bombeo neumático continuo es un método extremadamente versátil para hacer producir un pozo. Aunque el bombeo neumático se emplea en una gran variedad de configuraciones de pozos, generalmente se recomienda para las siguientes condiciones:

- Pozos con una gran capacidad de producción.
- En pozos con producción de arena.
- En pozos con producción de agua.
- Pozos con alta relación gas-líquido.
- Pozos desviados

## 1.2 Ventajas del bombeo neumático

- El bombeo neumático puede manejar una pequeña cantidad de arenas; es el único en que el mecanismo de desplazamiento de los fluidos no se ve afectado por la presencia de sólidos, ya que éstos no pasan a través de él.
- Puede manejar grandes volúmenes de producción.
- La tasa de producción puede controlarse desde la superficie.
- Es un método flexible, fácilmente se puede convertir una instalación de flujo continuo en una instalación de flujo intermitente conforme la productividad declina. Ofrece una amplia flexibilidad dentro de diferentes rangos de producción. Puede manejar producciones de miles de barriles, hasta una producción de solo unos cuantos barriles por día.
- Las pocas partes móviles en el sistema de bombeo neumático permiten una larga vida de servicio cuando se compara con otros sistemas artificiales de producción.
- Los costos de operación son relativamente bajos.
- La compresión del gas se puede localizar a distancia. Esto representa una gran ventaja en las instalaciones marinas.
- Fácilmente se pueden obtener los gradientes de presión necesarios para producir el pozo. Esto es posible aún en pozos desviados, o pozos profundos.
- Se puede instalar en pozos con diferentes diámetros en su terminación, así como en pozos con diámetros pequeños.
- El compresor se instala en la superficie donde puede revisarse, repararse y darle mantenimiento fácilmente. Este puede funcionar ya sea con gas o con electricidad.
- Se pueden recuperar las válvulas sin necesidad de sacar el aparejo de producción.

- El bombeo neumático incrementa la recuperación final. Se tienen reportes<sup>1</sup> de diferentes campos en los que se ha aumentado la recuperación de hidrocarburos, como en el campo Nasser donde se informa que varios pozos se encontraban produciendo hasta casi la fecha de abandono prevista, antes de que ya no fuera rentable su explotación.

### 1.3 Desventajas del bombeo neumático

- Es impráctico si no se cuenta con gas natural para la inyección, la compra de éste puede hacer que el proyecto no sea rentable.
- No resulta muy atractivo en la producción de aceites viscosos.
- No es rentable cuando se tiene la presencia de gas corrosivo<sup>2</sup>.
- En zonas climáticas frías presenta problemas de congelamiento de gas, así como presencia de hidratos.
- La tubería debe resistir las altas presiones de inyección
- En pozos altamente desviados se tiene dificultad para recuperar las válvulas.

### 1.4 Instalaciones de bombeo neumático

Los pozos bajo bombeo neumático son sólo parte del sistema que incluye al yacimiento, tuberías, línea de distribución, separadores, instalaciones para su tratamiento, compresores, registradores de flujo, mandriles y válvulas. La máxima producción, el uso efectivo del gas y los menores costos de inversión, así como de operación, resultan cuando se realiza el diseño apropiado considerando todo el sistema.

#### 1.4.1. Instalaciones subsuperficiales

Como parte de las instalaciones subsuperficiales se considera el aparejo de producción, el tipo de terminación del pozo, los mandriles, así como los tipos de válvulas empleadas para la inyección del gas. Generalmente la instalación se ve influenciada principalmente por el

esquema de explotación en la que se pondrá a producir el pozo, es decir bajo bombeo neumático continuo o intermitente

En la figura 1.5 se muestra un esquema de las instalaciones subsuperficiales para el bombeo neumático, en ésta se muestran las válvulas en el aparejo de producción. En este caso la inyección del gas se da a través del espacio anular y la producción de aceite y gas a través de la tubería de producción. Los sistemas pueden configurarse para inyectar el gas a través de la tubería de producción mientras que la producción de los líquidos del yacimiento se obtiene a través del espacio anular. El espaciado de las válvulas de inyección se determina por las características de operación y se ajustan de tal manera que el pozo sea capaz de descargar los fluidos.

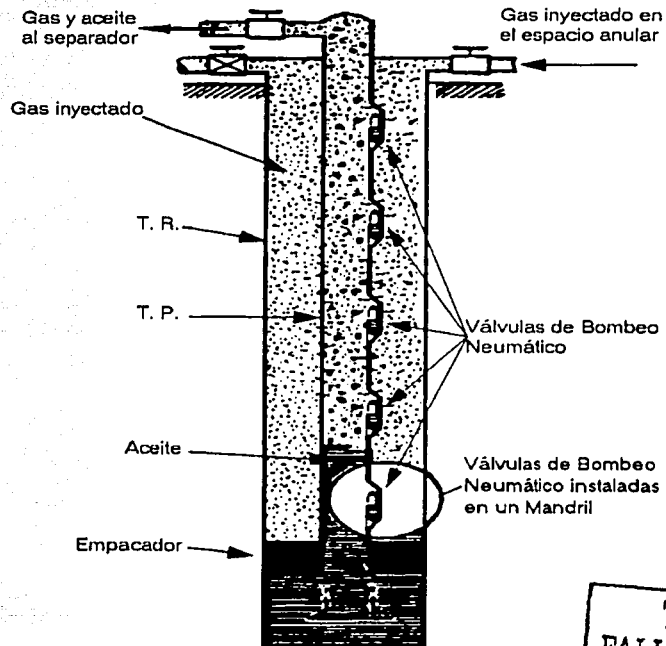


Fig. 1.5 Instalaciones subsuperficiales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las válvulas de bombeo neumático se instalan en mandriles, que representan una parte integral del aparejo de producción, los cuales deben ser correctamente instalados en la tubería. Se usan dos tipos básicos de mandriles con la tubería convencional, estos son mandriles convencionales, en los cuales se instala la válvula en la parte exterior de la tubería, en el espacio anular, estos presentan la desventaja que para recuperarlos es necesario extraer la tubería además que su tamaño se ve restringido por el espacio anular, y los mandriles de bolsillo, que almacenan la válvula en el interior de la tubería y se recuperan de manera más fácil al usar un cable de acero. Estos se observan en la figura 1.6.

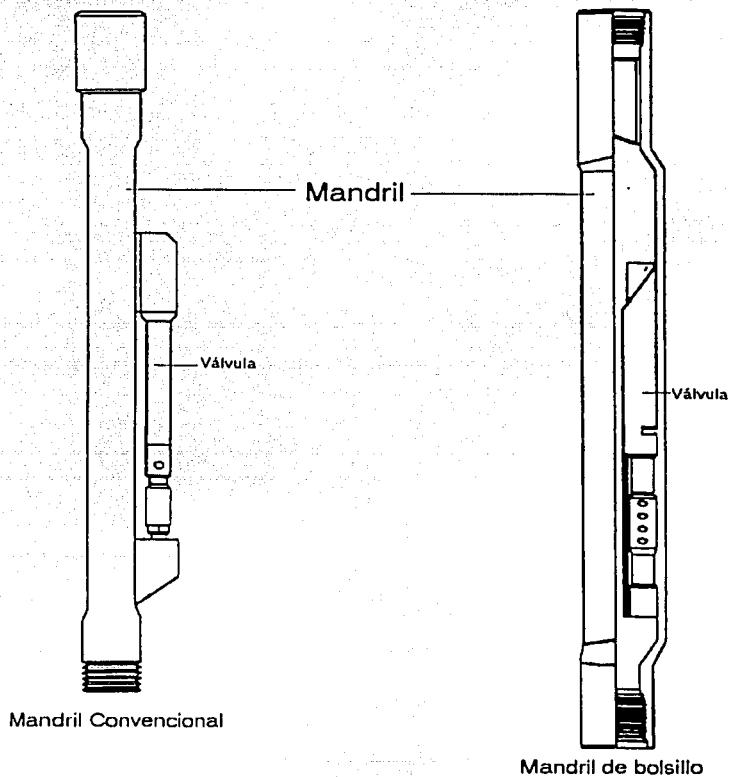


Fig. 1.6 Tipos de mandriles.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 1.4.1.1. Instalaciones abiertas

En esta instalación, el aparato de producción se encuentra suspendido dentro del pozo sin empacador, el gas se inyecta a través del espacio anular entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento y los fluidos se recuperan a través de la TP. Esto permite la comunicación entre la TR y la TP, debido a esto, este tipo de instalación se restringe a pozos con buenas características para la extracción del fluido y que muestren el espejo del fluido.

Aunque este método se usa para flujo continuo es extremadamente difícil encontrar el punto correcto para la inyección del gas, este debe inyectarse cerca del fondo del aparato de producción, lo que presenta la desventaja que a grandes profundidades se requiere una alta presión de inyección para poder elevar el fluido hasta la superficie.

Otro problema con las instalaciones abiertas es que las variaciones en la presión en la línea de descarga causa que los niveles del fluido aumenten o disminuyan su altura dentro del espacio anular en la TR, debido a esto las válvulas de bombeo neumático bajo el punto de inyección se encuentran sujetas a una severa condición de erosión por el fluido. En este tipo de instalaciones todas las válvulas que se encuentran bajo el punto de inyección del gas estarán completamente erosionadas por el fluido, por lo que no tienen caso y deberán ser reemplazadas por válvulas tipo dummy, las cuales son más resistentes y protegen los mandriles que se encuentren por debajo del punto de inyección. Estos mandriles son colocados considerando condiciones futuras de producción del pozo para una fácil instalación de las válvulas.

Debido a todas estas desventajas, es evidente que las instalaciones abiertas no son recomendadas, sin embargo hay circunstancias en las cuales no es posible instalar un empacador debido a la corrosión, una mala cementación, etc., por lo tanto es necesario tener una instalación abierta que producirá satisfactoriamente en la mayoría de los casos.



#### 1.4.1.2. Instalaciones semicerradas

Este tipo de instalaciones cuentan con un empacador entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento y además ofrecen ciertas ventajas sobre las instalaciones abiertas. Primero, una vez que el pozo ha sido descargado no existe la posibilidad que el fluido regrese a través del espacio anular, debido a que todas las válvulas de inyección cuentan con un controlador de flujo inverso. Segundo, el empacador evita que el fluido circule de la parte inferior de la tubería de producción y de la tubería de revestimiento al espacio anular.

Este tipo de instalaciones se emplean para el bombeo neumático continuo e intermitente, en las cuales el empacador evita que la presión de inyección del gas actúe sobre la formación. En este tipo de instalaciones cuando se tiene bombeo neumático intermitente debido a la gran presión del gas de inyección que se requiere en un instante determinado, el gas una vez que entra a la tubería de producción actúa sobre la formación.

#### 1.4.1.3. Instalaciones cerradas

Este tipo de instalaciones es similar a las instalaciones semicerradas excepto que se instala una válvula de pie dentro del aparejo de producción, generalmente se posiciona bajo la válvula de inyección más profunda. Esta válvula evita que la presión de inyección del gas a través del aparejo de producción actúe en la formación.

En la figura 1.7 se muestran diagramas de los diferentes tipos de terminaciones, así como para el tipo de flujo en el cual se pueden emplear.

#### 1.4.1.4. Tuberías Macarroni

En la industria petrolera se usan terminaciones con agujeros ultra delgados, esto significa una tubería de  $2 \frac{3}{8}$  a  $3 \frac{1}{2}$  pulgadas de diámetro exterior para la TR; y una vez que la tubería ha sido colocada es necesario usar una tubería de menor diámetro ( $1 - 1 \frac{1}{2}$  pulgadas) para poder implementar el bombeo neumático en el pozo. Estos tubos de diámetro pequeño

son conocidos como tubos Macarroni. El tamaño de los tubos macarroni que se puede usar dentro de una terminación de agujero ultra delgado se ve limitado al máximo diámetro exterior del tubo macarroni, así como el diámetro exterior de la válvula de inyección de gas y del mandril.

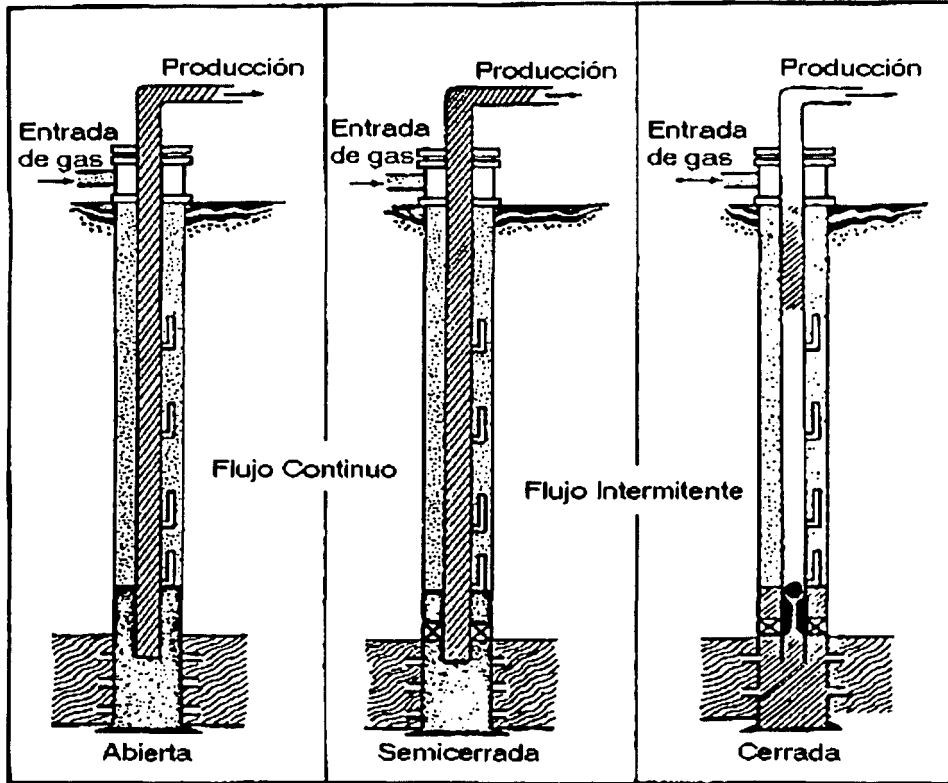


Fig. 1.7 Tipo de terminaciones de pozos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 1.4.1.5. Instalaciones dobles

Las instalaciones dobles se han vuelto necesarias en la actualidad, es una terminación en la cual se pueden producir dos zonas en la superficie a través de dos configuraciones separadas, esto se logra a través de dos aparejos paralelos. Este tipo de instalaciones son difíciles de diseñar, ya que en la mayoría de los casos las dos zonas de producción son completamente diferentes.

La solución ideal para instalaciones dobles sería contar con una tubería de inyección de gas para cada aparejo de producción que operara de manera independiente, esto significa que la tubería de inyección operará independiente de la presión de inyección, por supuesto es posible usar válvulas con las cuales cada zona opere de manera independiente de la presión en la TR.

#### 1.4.1.6. Configuración de flujo

En flujo anular o flujo en la TR se inyecta gas a través de la tubería de producción lo que provoca que los fluidos del pozo sean expulsados del espacio anular. Este tipo de flujo se usa cuando se tienen que remover grandes volúmenes de fluidos, particularmente cuando la capacidad de la TP se exceda. Hay algunas circunstancias por las cuales puede ser necesario este tipo de flujo, por ejemplo gastos de 5,000-80,000 B/D. En la actualidad hay pozos que manejan gastos de 50,000-60,000 B/D usando flujo anular.

Aunque se pueden producir los fluidos a través de la tubería o a través del espacio anular a continuación se enumeran algunas razones (dadas por Thrash) que recomiendan extraer los fluidos a través de la tubería de producción:

1. Para gastos de producción en flujo continuo se necesita mayor volumen de gas inyectado en el espacio anular para alcanzar el gradiente con que se logra el levantamiento de los fluidos.

2. En bombeo neumático intermitente nunca se producen los fluidos por el espacio anular.
3. Los efectos de erosión y de corrosión no están confinados a la superficie interior de la tubería de producción, en vez de esto el interior de la TR y el exterior de la TP están sujetos a daño por el flujo anular.
4. El depósito de parafinas no puede controlarse ni removerse efectivamente cuando se tiene flujo a través del espacio anular.

#### 1.4.2. Instalaciones superficiales.

La tecnología actual provee programas de cómputo para analizar sistemas de tal manera que se puedan seleccionar los valores óptimos para la presión de separación, presión de inyección, así como tamaños y diámetros para las tuberías de descarga, de producción y de revestimiento, además se pueden estimar los requerimientos de gas desde el inicio del proyecto hasta una etapa futura. El capital invertido en programas de cómputo se recupera al tener un mayor gasto de producción, menor cantidad de problemas operacionales y menor inversión, ya que se evita la instalación de equipo innecesario.

Una buena fuente de gas para el bombeo neumático debe tener una presión constante, debe ser un gas seco tal como el que se obtiene del procesado en una planta de gas, sin hidrocarburos líquidos ni agua, de manera tal que se reduzcan los problemas operacionales tales como la corrosión, la formación de hidratos (agua e hidrocarburos congelados). Si se tienen que emplear otras fuentes tales como gas obtenido del separador, este tiene que ser tratado para su deshidratación, compresión, procesamiento de hidrocarburos o endulzamiento en caso de que lo requiera antes de emplearse.

El sistema de distribución del gas puede adaptarse a cualquiera de los dos diseños básicos siguientes:

1. Una conexión directa desde el compresor o punto de distribución a cada pozo.
2. Una línea troncal principal de distribución la cual surte de gas a varios pozos.

La ventaja del sistema de conexión directa es que cualquier problema en la tubería afecta solamente a un pozo, es muy conveniente para sistemas pequeños que tienen un número limitado de pozos. El segundo método es aplicable para sistemas grandes, permite varias estaciones de compresión conectadas en paralelo por lo que la pérdida de una estación no afecta a todo el sistema, con un sistema tal el gas puede mantener presión gracias a las otras estaciones de bombeo (cuando se tiene la suficiente capacidad de compresión).

Una modificación al sistema de línea troncal principal de distribución es el uso de un anillo de distribución, de manera que el gas pueda fluir a un cabezal de distribución desde cualquier dirección, en el cabezal el gas se envía a cada pozo conectado directamente a la tubería. Este método de línea troncal principal o de anillo de distribución minimiza la inversión requerida para campos grandes, debido a que la línea troncal principal es más barata que una gran cantidad de líneas directamente conectadas a cada pozo. Sin embargo se deben realizar estudios para cada campo, los que deben incluir una comparación de costos entre cada método ya que el costo de la tubería y de su instalación varía entre locaciones.

#### 1.4.2.1. Acondicionamiento del gas

Los hidrocarburos más pesados presentes en el gas se condensan en el sistema de distribución y originan la formación de hidratos o de líquido, es por esto que los componentes más pesados deben removerse por una planta de procesamiento, un método de enfriamiento para la corriente de gas puede emplearse y con esto condensar los hidrocarburos líquidos. Solamente un gas muy rico en su composición permite la condensación de los hidrocarburos, generalmente ocurre cuando se presentan las siguientes condiciones:

1. Separación a presiones muy bajas en las que la corriente de gas que va al compresor tiene una alta fracción de hidrocarburos pesados.
2. En lugares donde la temperatura del ambiente enfría la corriente de gas y se condensan los elementos pesados.

Una estación de enfriamiento para quitar los hidrocarburos generalmente quita una gran cantidad de vapor de agua en la corriente de gas, si ésta es insuficiente entonces se instala un sistema deshidratador. El agua en el sistema de bombeo neumático causa corrosión, baches de líquido y formación de hidratos y es por esto que tiene que removerse totalmente de la corriente de gas.

Cuando se tiene gas con exceso de dióxido de carbono o ácido sulfhídrico no se puede usar por que causa problemas de operación, tales como corrosión, costos excesivos de mantenimiento del compresor, así como contaminación de los combustibles. Estas impurezas también representan riesgos de seguridad, por lo que se emplean instalaciones para su endulzado, en las que se remueven tanto el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), como el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

#### 1.4.2.2. Sistema de distribución

La conducción a través de tuberías, las instalaciones para la separación, el enfriamiento y la compresión del gas, también deben diseñarse para proveer una correcta operación y facilidad para su mantenimiento. Uno de los principales requerimientos en el manejo del gas es la correcta separación de las fases en la corriente de flujo, lo que evita que lleguen líquidos al compresor. Se necesita un adecuado sistema de descarga y de distribución alejado de los compresores para alimentar el gas a los enfriadores y separadores.

---

## Capítulo 2. Flujo en tuberías verticales

Para analizar el comportamiento de un pozo fluente terminado es necesario reconocer que hay tres etapas de flujo, las cuales se tienen que estudiar en forma separada y unir las antes de obtener una imagen de conjunto del comportamiento del pozo fluente. Estas etapas son: comportamiento del flujo de entrada, comportamiento del flujo en una tubería vertical y comportamiento de flujo en el estrangulador.

El comportamiento del flujo de entrada se tipifica por las ecuaciones que más representen el flujo de hidrocarburos del yacimiento hacia el pozo.

El comportamiento de flujo a través de la tubería vertical, implica un estudio de pérdidas por presión en tuberías verticales que conducen mezclas en dos fases (gas y líquido). Las pérdidas de presión que acompañan al flujo de aceite, agua y gas a través de una línea de flujo restringida (estrangulador) en la superficie se conocen como comportamiento del estrangulador.

En el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo, es necesario predecir adecuadamente las caídas de presión en la tubería; la habilidad de predecir adecuadamente estas caídas de presión recae en la exactitud de la correlación empleada. Se tienen correlaciones de flujo en dos fases para flujo vertical, horizontal e inclinado. Por ejemplo, las correlaciones de flujo vertical difieren de las correlaciones de flujo horizontal o de las correlaciones de flujo inclinado principalmente en lo que respecta a la predicción del régimen de flujo presente. La mayoría de las instalaciones de bombeo neumático continuo consideran principalmente correlaciones para flujo vertical en el pozo, pero para pozos altamente desviados y líneas de descarga superficiales se debe considerar correlaciones para flujo horizontal, así como para flujo inclinado.

## 2.1 Ecuación general de energía

Para llegar a la ecuación básica para el cálculo de gradiente en tuberías, se considera la ecuación general de energía, ya que ésta gobierna el flujo de fluidos a través de tuberías, a partir de un balance macroscópico de la energía asociada a la unidad de masa de un fluido que pasa a través de un elemento aislado. Fig. 2.1.

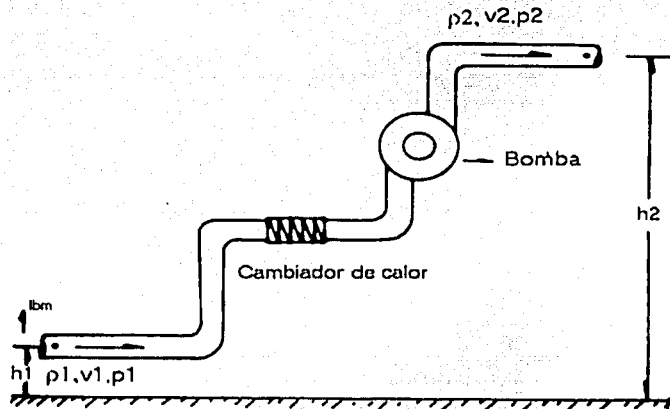


Fig. 2.1 Diagrama de flujo en un conducto aislado.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De acuerdo con la ley de la conservación de la energía:

$$E_1 + \Delta W_f + \Delta W_s = E_2 \quad (2.1)$$

Donde:

$$E_1 = \text{energía por unidad de masa, en la posición uno.} \left( \frac{\text{lb}_f \cdot \text{pie}}{\text{lb}_m} \right)$$

$\Delta W_f$  = pérdidas de energía por fricción. Estas pérdidas corresponden a la fricción interna del fluido (viscosidad) y a la fricción del fluido con las paredes rugosas de las tuberías.



$\Delta W_s$  = pérdidas de energía por trabajo externo.

$E_2$  = energía por unidad de masa, en la posición dos.  $\left( \frac{\text{lb}_f - \text{pie}}{\text{lb}_m} \right)$

### Energía de expansión. ( $E_e$ )

La energía de expansión esta dada por:

$$E_e \left( \frac{\text{lb}_f - \text{pie}}{\text{lb}_m} \right) = p \left( \frac{\text{lb}_f}{\text{pie}^2} \right) v \left( \frac{\text{pie}^3}{\text{lb}_m} \right) = pv \quad (2.2)$$

Donde:

$v$  = volumen específico  $\left( \frac{\text{pie}^3}{\text{lb}_m} \right) \left( v = \frac{1}{\rho} \right)$

### Energía potencial. ( $E_p$ )

La energía potencial está dada por la expresión siguiente:

$$E_p \left( \frac{\text{lb}_f - \text{pie}}{\text{lb}_m} \right) = g \left( \frac{\text{pie}}{\text{seg}^2} \right) \frac{1}{g_c} \left( \frac{\text{lb}_f - \text{seg}^2}{\text{lb}_m - \text{pie}} \right) h(\text{pie}) = \frac{g}{g_c} h \quad (2.3)$$

### Energía cinética. ( $E_c$ )

La energía cinética se expresa como sigue:

$$E_c \left( \frac{\text{lb}_f - \text{pie}}{\text{lb}_m} \right) = \frac{v^2}{2} \left( \frac{\text{pie}^2}{\text{seg}^2} \right) \frac{1}{g_c} \left( \frac{\text{lb}_f - \text{seg}^2}{\text{lb}_m - \text{pie}} \right) = \frac{v^2}{2g_c} \quad (2.4)$$

Donde:

$$v = \text{velocidad} \left( \frac{\text{pie}}{\text{seg}} \right)$$

Al sustituir las energías correspondientes a las posiciones 1 y 2 en la ecuación de la ley de la conservación de la energía se obtiene:

$$p_1 v_1 + \frac{g}{g_c} h_1 + \frac{v_1^2}{2g_c} + \Delta W_f + \Delta W_s = p_2 v_2 + \frac{g}{g_c} h_2 + \frac{v_2^2}{2g_c} \quad (2.5)$$

Agrupando términos semejantes se obtiene:

$$v \Delta p + \frac{g}{g_c} \Delta h + \frac{\Delta v^2}{2g_c} + \Delta W_f + \Delta W_s = 0 \quad (2.6)$$

Multiplicando la ecuación 2.6 por  $\rho/\Delta L$  y considerando despreciables las pérdidas de energía por trabajo externo, se tiene:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} + \rho \frac{g \Delta \Delta}{g_c \Delta L} + \rho \frac{\Delta v^2}{2g_c \Delta L} + \rho \frac{\Delta W_f}{\Delta L} = 0 \quad (2.7)$$

Considerando positiva la caída de presión en la dirección del flujo se tiene:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \rho \frac{g \Delta \Delta}{g_c \Delta L} + \rho \frac{\Delta v^2}{2g_c \Delta L} + \rho \frac{\Delta W_f}{\Delta L} \quad (2.8)$$

A esta ecuación se le acostumbra escribir en la forma siguiente:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_T = \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_e + \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{ac} + \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_f \quad (2.9)$$

Donde:

$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_T$  = gradiente de presión total.

$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_e$  = gradiente de presión debido a la elevación.

$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{ac}$  = gradiente de presión debido a la aceleración.

$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_f$  = gradiente de presión debido a la fricción.

## 2.2 Bases para el desarrollo de las correlaciones de flujo multifásico

Las primeras correlaciones de flujo multifásico se basaron en el factor de pérdida de energía total o en una mezcla homogénea sin resbalamiento para altos gastos de producción, el flujo homogéneo sin resbalamiento se refiere a que el gas y el líquido tienen la misma velocidad, por consiguiente, la densidad de la mezcla puede calcularse para cualquier presión deseada sin tener que emplear ninguna correlación compleja para el colgamiento del líquido o para el desprendimiento del gas, en otras palabras, los cálculos de caídas de presión para flujo multifásico y para este tipo de flujo en una sola fase son similares. La distribución del líquido y del gas se basa en la producción diaria sin la acumulación de líquido en el conducto de producción. Estos métodos simplificados para el cálculo de las caídas de presión en flujo de una fase, al emplear el factor de pérdida total o al suponer una mezcla homogénea sin resbalamiento no requieren que se defina el régimen o patrón de flujo, para flujo multifásico se debe determinar el régimen de flujo antes de que se calculen las pérdidas de presión para la

mayoría de las correlaciones. Cada tipo de régimen de flujo tiene diferentes ecuaciones y parámetros para el cálculo de las pérdidas de presión. Si no se puede determinar adecuadamente el régimen de flujo, la pérdida de presión calculada tendrá un error, así como manifestaciones de discontinuidades en la pendiente de las curvas de gradiente de presión de flujo.

El flujo multifásico implica la presencia de gas libre y líquido, muchos de los parámetros importantes en las correlaciones se calculan empíricamente debido a que la solución matemática no existe, en la actualidad no se cuenta con ninguna correlación de flujo multifásico que sea universalmente aceptada por la industria petrolera para predecir adecuadamente los gradientes de presión de flujo en todos los tamaños de las tuberías de producción, para los rangos de gas y de líquido que se encuentran en la operación en el campo.

La exactitud en la predicción de la presión fluyendo en las tuberías es esencial para un diseño eficiente en las instalaciones de bombeo neumático continuo, seleccionar la mejor correlación para las condiciones específicas de producción de los pozos y de los diámetros de las tuberías no siempre es fácil. Los estudios de la presión de fondo fluyendo con instrumentos calibrados y la medición adecuada de la producción es esencial para verificar la funcionalidad de la correlación de flujo a emplear. En otras palabras la única forma de evaluar apropiadamente la correlación de flujo multifásico o un conjunto de curvas de gradiente, es comparar datos confiables tomados del pozo con las presiones a profundidad o con presiones determinadas por curvas de gradiente publicadas.

La importancia de seleccionar el orificio adecuado para medir el gas no puede ser obviado, ya que el volumen de gas es uno de los parámetros más importantes para determinar el régimen de flujo. La selección de las ecuaciones correctas para los cálculos de flujo multifásico dependen de la correcta predicción del régimen de flujo.

### 2.3 Patrones de flujo

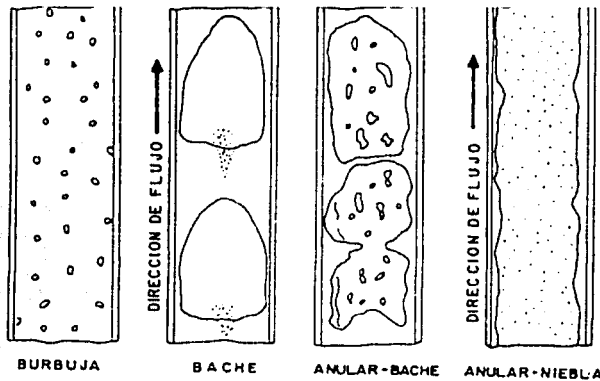
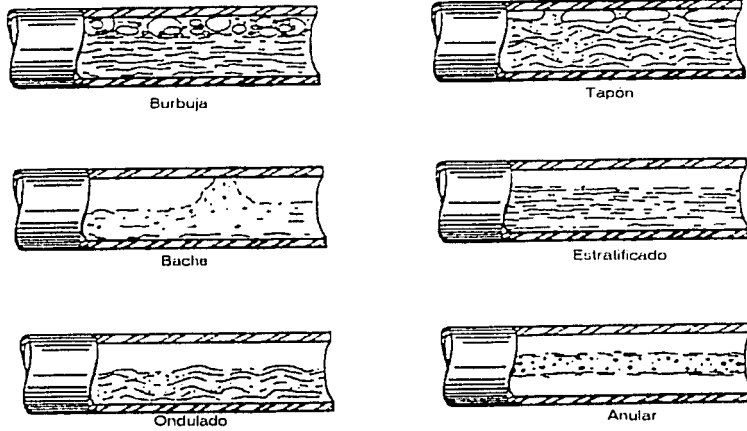
Al fluir dos fases simultáneamente lo pueden hacer en formas diversas, cada una de estas formas presenta una distribución relativa de una fase con respecto a la otra, constituyendo un patrón o tipo de flujo. Las figuras 2.2 y 2.3 muestran los diferentes patrones de flujo observados en tuberías horizontales y verticales por Beggs<sup>3</sup> y Orkiszewsky<sup>4</sup> respectivamente.

En las tuberías verticales puede existir más de un patrón de flujo entre la parte inferior de la tubería y la parte superior de la misma, por ejemplo el régimen de flujo a mayores presiones cerca de la zona más profunda de la tubería puede ser de una sola fase o flujo burbuja y cambiar a flujo bache a menores presiones cerca de la superficie.

La ecuación para el cálculo del gradiente de presión para al menos un régimen de flujo incluye el colgamiento del líquido basado en el resbalamiento del gas, que se define como la relación entre el volumen de líquido existente en una sección de tubería a las condiciones de flujo y el volumen de la sección aludida, esta relación de volúmenes depende de la cantidad de líquido y gas que fluyen simultáneamente en la tubería. Generalmente la velocidad con que fluye el gas es diferente de la velocidad con que fluye el líquido, propiciando un resbalamiento entre las fases.

El término resbalamiento se usa para describir el fenómeno natural del flujo a mayor velocidad de una de las dos fases, la diferencial de presión por fricción es mucho menor en la fase gaseosa que en la fase líquida. La diferencia de compresibilidades entre el gas y el líquido hace que el gas en expansión viaje a mayor velocidad que el líquido

Para predecir las pérdidas de presión por elevación (carga hidrostática), es necesario predecir con precisión el colgamiento considerando el resbalamiento entre las fases.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.4 Flujo multifásico vertical

Al pasar los fluidos a través de la tubería de producción se consume la mayor parte de la presión disponible para llevarlos desde el fondo del pozo hasta la superficie, por lo que es de suma importancia realizar una evaluación precisa de la distribución de la presión a lo largo de dichas tuberías. Al hacerlo conjuntamente con un análisis integral del sistema de producción es posible:

- a) Diseñar las tuberías de producción y líneas de descarga.
- b) Proyectar aparejos de producción artificial (neumático, mecánico, eléctrico).
- c) Obtener la presión de fondo fluyendo, sin intervenir los pozos.
- d) Calcular el efecto de los estranguladores sobre el gasto.
- e) Determinar la vida fluyente de los pozos.
- f) Corroborar los datos obtenidos con las correlaciones para su ajuste.

Se tienen cuatro métodos con los cuales se calculan los gradientes de presión a través de las tuberías:

- El primer método emplea curvas de presión de flujo multifásico publicadas.
- El segundo método es el uso de correlaciones de flujo multifásico.
- El tercer método son los modelos mecanísticos.
- El cuarto método son los modelos hidrodinámicos.

En la actualidad se cuenta con programas de cómputo los cuales pueden hacer uso de uno o más métodos de los antes mencionados para calcular el gradiente de presión a lo largo de toda la tubería.

Las curvas de gradiente de presión son los resultados obtenidos de las correlaciones de distintos autores y que fueron graficadas para una fácil consulta; estas fueron creadas ante la necesidad de conocer el comportamiento de las presiones dentro de las tuberías y la carencia de equipo de computo para realizar los cálculos de manera rápida y exacta, es por esta razón que se cuenta con curvas para determinadas condiciones de operación.

Estas curvas tienen ciertas limitaciones. Primero el fluido debe estar libre de emulsiones, la tecnología actual no puede predecir las pérdidas de presión en dos fases con emulsiones presentes; además no consideran irregularidades en la geometría de la tubería, por ejemplo restricciones al flujo tales como las causadas por la acumulación de parafinas o por la destrucción de juntas que no hayan sido consideradas; finalmente suponen un patrón de flujo

estable, el cabeceo o bacheo severo representa un flujo intermitente o inestable y sus efectos no han sido considerados. Además las curvas de gradiente requieren que el pozo sea completamente vertical. Aunque la exactitud de las correlaciones es generalmente aceptable para inclinaciones dentro de los  $\pm 30^\circ$ .

Las correlaciones de flujo multifásico vertical son lo suficientemente exactas para ser útiles. Son los métodos o modelos matemáticos que se utilizan para calcular las caídas de presión por las tuberías. La mayoría de ellos se basan en un desarrollo empírico o semiempírico para tratar de reproducir los valores medidos en campo. Cada correlación en forma particular tiene limitantes para su aplicación de acuerdo a los rangos de valores de las variables utilizadas en su desarrollo. Generalmente es necesario seleccionar el método o correlación que reproduzca con mayor precisión la información medida en campo para él o los pozos en estudio, con el fin de tener una predicción confiable de las condiciones del pozo que se desea simular.

Aunque las ecuaciones finales y los parámetros varían entre los investigadores, la ecuación básica para el cálculo del gradiente de presión para el flujo multifásico vertical consiste en los siguientes términos:

Gradiente de presión total = Término de elevación + Término de fricción + Término de aceleración

El término de elevación incluye la corrección por colgamiento y por resbalamiento. El término de aceleración generalmente se desprecia en todos los regímenes de flujo excepto cuando existe una alta velocidad en el fluido. Por lo que se emplea la siguiente ecuación para el cálculo del gradiente:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_T = \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_e + \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_f \quad (2.10)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## 2.5 Flujo multifásico horizontal

Aunque las correlaciones de flujo multifásico horizontal no juegan un rol directamente en el análisis del diseño de los sistemas de bombeo neumático, estas son usadas para estimar las pérdidas de presión en superficie para determinar la presión en la cabeza del pozo. En pozos horizontales las válvulas de bombeo neumático generalmente se instalan en la sección vertical del pozo, ya que la función del bombeo neumático es reducir la presión de la columna hidrostática para disminuir la presión de fondo fluyendo.

Para flujo horizontal, el gradiente de presión debido al cambio de elevación es igual a cero, por lo que para su cálculo se cuenta con la siguiente ecuación:

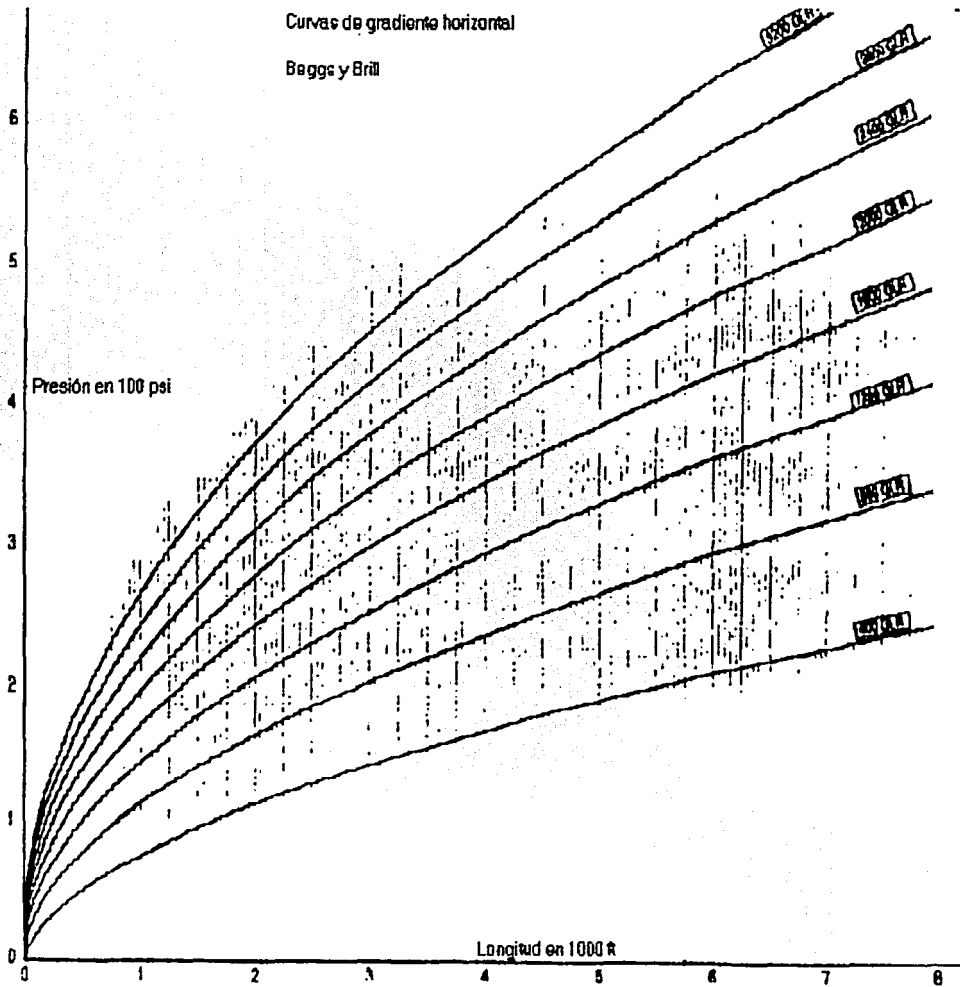
$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_T = \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{ac} + \left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_f \quad (2.11)$$

Al comparar las curvas de gradiente de flujo horizontal con las de flujo vertical (Fig. 2.4 y 2.5) se observa una diferencia importante, conforme la relación gas-líquido se incrementa en el gradiente vertical, la caída de presión disminuye debido a la disminución del gradiente hidrostático por el incremento del volumen del gas. En los gradientes horizontales, conforme se incrementa la relación gas-líquido también se incrementa la caída de presión ya que el gas adicional no tiene efecto sobre la presión hidrostática en tuberías horizontales. Esta diferencia puede crear problemas en el diseño del bombeo neumático. Si la relación gas-líquido producida por la inyección del gas necesario para la producción de los fluidos alcanza niveles altos, la caída de presión en la línea de flujo puede causar una pérdida en los niveles de producción. Solo con el completo entendimiento del flujo multifásico a través de tuberías verticales y horizontales se puede diseñar un sistema de bombeo neumático para que opere eficientemente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.4 Curvas de gradiente de flujo horizontal.





## 2.6 Flujo multifásico a través de estranguladores

Cuando se diseña un estrangulador en un pozo fluyente se hace de tal modo que las variaciones de la presión corriente abajo del estrangulador (en la línea de descarga) no afecten la presión corriente arriba del estrangulador a fin de evitar variaciones en la presión de fondo fluyendo y por consiguiente variaciones en el gasto, esto se logra bajo la condición de flujo sónico, es decir, cuando la velocidad del fluido es igual a la velocidad del sonido. Para que exista esta condición de flujo se requiere que:

$$R_o = \left( \frac{2}{K + 1} \right)^{K / (K - 1)} = \text{Relación de presión para el flujo crítico.} \quad (2.12)$$

Una regla de campo es:

$$\frac{P_2}{P_1} \leq 0.5283$$

Donde:

$K = C_p / C_v$  (aproximadamente 1.31 para gases naturales)

$P_1$  = Presión antes del estrangulador. (Presión en la cabeza del pozo).

$P_2$  = Presión después del estrangulador. (Presión en la línea de descarga).

El comportamiento de flujo a través de un estrangulador cuando el flujo es sónico se determina con la siguiente ecuación, según Ros:

$$P_{th} = \frac{CRGL^{0.5}q}{s^2} \quad (2.13)$$

Donde:

$P_{th}$  = Presión en la cabeza del pozo, lb/pg<sup>2</sup>.

- RGL = Relación gas-líquido, miles de pies<sup>3</sup>/bl.  
 q = Producción bruta (aceite + agua), bl/día.  
 S = Diámetro del estrangulador, 1/64 pg.  
 C = Constante que depende de las unidades que se usen. (17.4 para las establecidas).

Basado en el estudio de muchos pozos, Gilbert obtuvo la siguiente fórmula empírica:

$$P_{th} = \frac{435RGL^{0.546} q}{S^{1.89}} \quad (2.14)$$

En la cual  $P_{th}$  está dada en lb/pg<sup>2</sup> manométricas. Esta ecuación también se cumple cuando se tiene flujo sónico.

La predicción del comportamiento del flujo de mezclas gas-líquido en orificios no es un problema que pueda considerarse resuelto. Existen numerosos estudios sobre este tema y se han encontrado varias correlaciones que relacionan el gasto a través del orificio, la presión y temperatura antes del orificio y el área de estrangulamiento, cuando se trata de flujo crítico. Algunas de las correlaciones obtenidas están basadas en trabajos experimentales y se ajustan razonablemente a los rangos probados; sin embargo, se desconoce su precisión fuera de esos límites.

En el desarrollo de sus correlaciones los autores han supuesto diversas relaciones de presión crítica, establecer un valor fijo para dicha relación implica una simplificación que indudablemente se reflejará en la exactitud de las predicciones que se obtengan al aplicar las correlaciones citadas.

Para determinar el comportamiento del flujo multifásico en estranguladores se cuenta correlaciones y modelos dados por los siguientes autores:

- Correlaciones de Gilbert<sup>5</sup>, Ros<sup>6</sup> y Achong<sup>7</sup>.

- Correlación de Poettmann y Beck<sup>8</sup>.
- Ecuación de Ashford<sup>9</sup>.
- Modelo de Ashford y Pierce<sup>10</sup>.
- Correlación de Omaña R<sup>11</sup>.

## 2.7 Curvas de gradiente

La mayoría de las curvas de gradiente usan los mismos parámetros pero se grafican de manera diferente, generalmente se muestran un conjunto de curvas de gradiente de presión para un diámetro determinado de tubería, una densidad del aceite determinada, una densidad del gas, así como una producción dada y un porcentaje de agua el cual puede ser cero. Las curvas de presión fluyendo contra profundidad se grafican para diferentes relaciones gas-líquido (RGL), desde cero para un fluido de una sola fase, hasta el máximo RGL dependiendo del diámetro de la tubería y su tasa de producción. En general el máximo valor de RGL se encuentra asociado con las tasas de producción mínimas y los mínimos valores de RGL se encuentran asociados a las tasas de producción máximas.

### 2.7.1 Transformar la RGA a RGL

Este grupo de curvas siempre debe definirse en términos de la RGL y no de la relación gas aceite (RGA). La RGA es la RGL sólo cuando el porcentaje de agua es cero. El primer paso después de seleccionar el grupo adecuado de curvas de gradiente es convertir la RGA total en la RGL total antes de poder determinar la presión fluyendo a la profundidad buscada. Se cuenta con la siguiente ecuación:

$$RGL = f_o * RGA \quad (2.15)$$

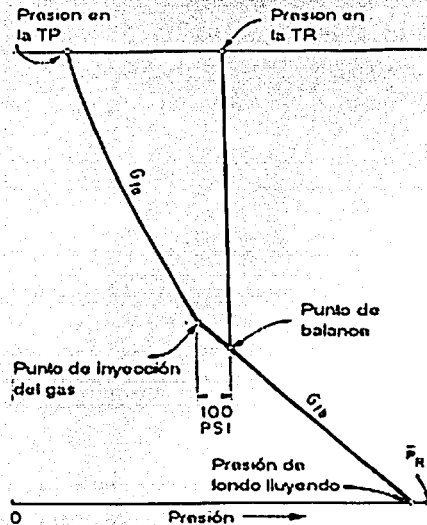
Donde:

RGL = relación gas-líquido. Scf/STB.

RGA = relación gas-aceite. Scf/STB.

$f_o$  = porcentaje de aceite (1.0 menos el porcentaje de agua), fracción.

Las curvas de RGL siempre representan la RGL total, la cual es la RGL de la formación debajo del punto de inyección del gas y la suma del gas inyectado por encima del punto de inyección del gas. En la figura 2.6 se observa que el gradiente promedio de flujo debajo del punto de inyección es mayor al compararlo con el gradiente promedio de flujo por arriba del punto de inyección, esto se debe a que a partir del punto de inyección se considera el gas adicionado con la inyección y en consecuencia el aligeramiento de la columna del fluido.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.6 Gradiente de flujo en un pozo de BN

Donde:

$G_{fa}$  = gradiente promedio de flujo sobre el punto de inyección.

$G_{fb}$  = gradiente promedio de flujo bajo el punto de inyección.

---

## Capítulo 3. Comportamiento de válvulas de bombeo neumático continuo

### 3.1 Características de las válvulas de bombeo neumático

Una instalación no puede diseñarse adecuadamente y operarse de manera eficiente a menos que el comportamiento de las válvulas se comprenda claramente.

La industria ha clasificado a las válvulas de bombeo neumático en distintos tipos de acuerdo a la presión a la que son más sensibles para la apertura, esta sensibilidad se determina por la construcción mecánica de ellas, la presión dominante de dicha válvula es la presión a la cual se encuentra expuesta una mayor área de la misma. A continuación se indica la clasificación de estas:

1. *Válvula operada por la presión en la TR* (usualmente llamada válvula de presión). Esta válvula es en un 50 a un 100% sensible a la presión en la TR en la posición cerrada y en un 100% sensible a la presión en la TR en la posición abierta. Se requiere de un incremento en la presión en la TR para abrir así como una reducción en la presión de la TR para cerrar. Fig. 3.1



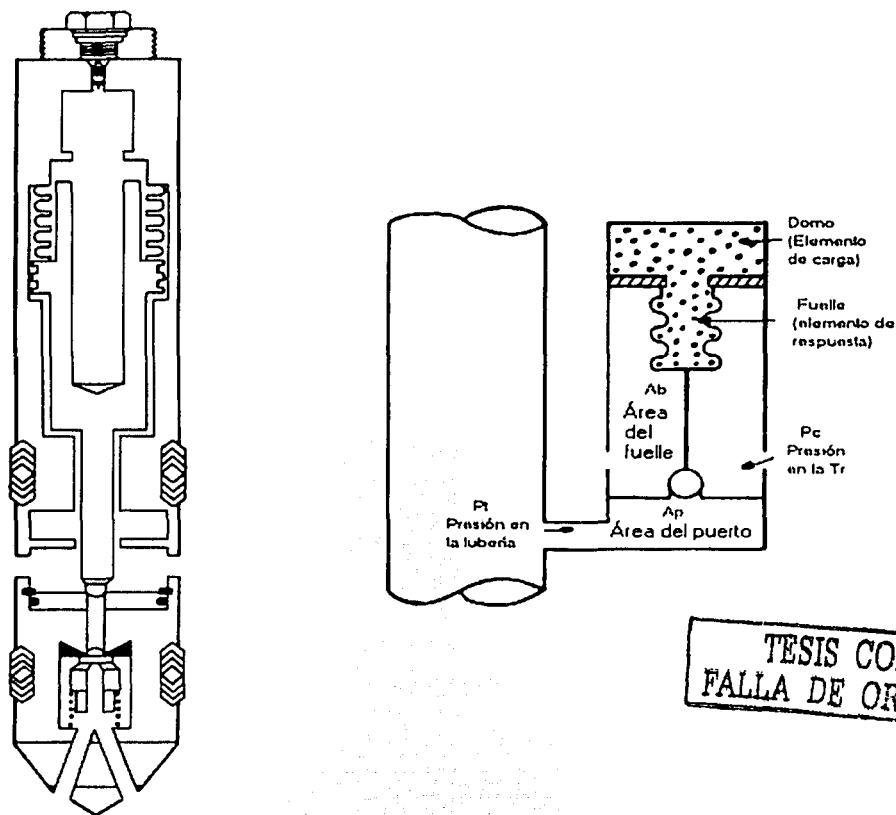


Fig. 3.1 Válvula operada por presión en TR

2. *Válvula balanceada.* Esta válvula también es llamada como válvula proporcional o válvula de flujo continuo. Actúa igual que la válvula operada por presión en TR cuando se encuentra cerrada. Sin embargo, una vez que se encuentra abierta es sensible a la presión en la TP. Se requiere de un incremento en la presión de la TR para abrir y una reducción en la presión de la TP para cerrar. Fig. 3.2

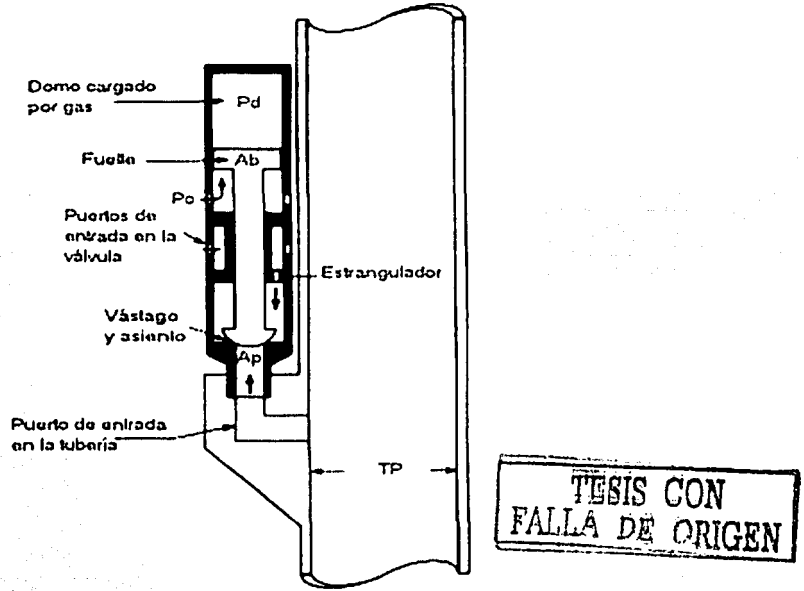


Fig. 3.2 Válvula balanceada o de flujo continuo.

3. *Válvula operada por fluido.* Esta válvula es en un 50 a un 100% sensible a la presión de la TP en la posición cerrada y 100% sensible en la posición de apertura. Esta válvula requiere de un incremento de presión en la TP para abrir, así como una reducción de presión para cerrar. La presión de la TR solo actúa sobre el área del puerto por lo que no tiene una gran influencia para la apertura de la válvula. Fig. 3.3

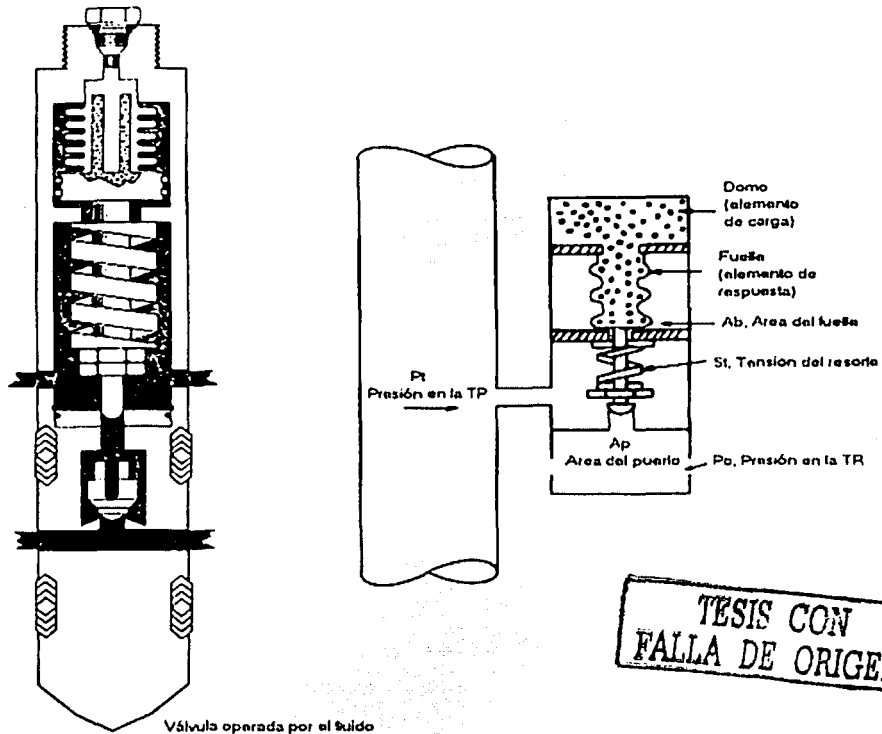


Fig. 3.3 Válvula operada por el fluido

### 3.2 Consideraciones de Diseño

Antes de seleccionar el tipo de válvula que será empleada, se debe decidir si el pozo se pondrá a producción bajo bombeo neumático continuo o intermitente. Cuando no se tiene información para la toma de esta decisión o cuando el pozo se encuentra a la hora del diseño entre la posibilidad de bombeo neumático continuo o bombeo neumático intermitente y no se sabe bajo cual esquema será más conveniente producirlo se cuenta con válvulas que funcionan para los dos tipos de inyección de gas, dependiendo del espaciamiento entre las válvulas y del

control de inyección de gas en la superficie. En general estas válvulas son más deseables debido a sus características.

### Flujo continuo

Una válvula empleada para flujo continuo debe ser sensible a la presión en la TP cuando se encuentre en la posición de apertura, esta debe responder proporcionalmente al incremento o disminución de la presión en la TP. Conforme la presión en la TP disminuye, la válvula debe comenzar a desplazarse al cierre para disminuir la inyección de gas; conforme se incrementa la presión en la TP, la válvula debe comenzar a desplazarse hacia la apertura con lo que se incrementará la inyección de gas. Esta respuesta proporcional mantiene la presión en la TP constante para permitir el flujo.

### Flujo intermitente

Las instalaciones de flujo intermitente pueden plantearse con casi cualquier tipo de válvulas si se diseñan adecuadamente. Existen básicamente dos tipos de flujo intermitente, el de inyección en un solo punto y el de múltiples puntos de inyección. En el flujo intermitente de inyección en un solo punto todo el gas necesario para levantar el bache a la superficie se inyecta a través de la válvula inyectora. Esta válvula debe expandirse a un tamaño de puerto tan grande como sea posible simultáneamente a la apertura y debe permanecer en posición de apertura hasta el cierre. El tamaño de puerto varía en un rango de  $\frac{1}{4}$  de pulgada a una pulgada, dependiendo de la terminación del pozo, el que generalmente limita el tamaño de la válvula que puede instalarse en el mismo. En la inyección en múltiples puntos, la válvula inyectora debe permitir el paso de gas suficiente para crear el bache y expandirlo hasta la siguiente válvula en la parte superior. En este momento la presión bajo el bache abre la válvula siguiente con lo que se convierte en una válvula inyectora. Todas las válvulas por las que ha pasado el bache permanecen abiertas hasta que éste alcanza la superficie. No todas las válvulas en la tubería necesitan estar abiertas en la inyección en múltiples puntos. El número de válvulas abiertas depende del tipo de válvulas usadas, el diseño de bombeo neumático, y las condiciones de terminación.

### 3.2.1. Válvulas operadas por la presión en la TR.

- ❖ *Válvula de fuelle desbalanceado con domo cargado a presión como mecanismo de desplazamiento.*

Ésta es una válvula de un solo elemento de desplazamiento, el domo cargado de nitrógeno. El elemento de respuesta son los fuelles los que permiten que el vástago mueva la bola de su asiento. Ya que la presión en la TP actúa en el área del puerto, esta provee la fuerza de apertura. Consecuentemente este tipo de válvulas son llamadas válvulas de presión desbalanceada.

#### Presión de apertura de la válvula bajo condiciones de operación

Debido a que esta válvula es más sensible a la presión en la TR, la presión de apertura está definida como la presión en la TR requerida para abrir la válvula bajo las condiciones de operación. Se debe obtener una ecuación para conocer la presión de apertura de la válvula. Para obtener esta ecuación se investiga la posición de cierre de la válvula justo antes de la apertura. En este instante las fuerzas que están tratando de abrir la válvula son iguales a las fuerzas que tratan de mantenerla cerrada, por lo que se puede escribir la siguiente ecuación:

$$F_o = F_c \quad (3.1)$$

Donde:

$F_o$  = Sumatoria de todas las fuerzas tratando de mover la bola de su lugar.

$F_c$  = Sumatoria de todas las fuerzas tratando de mantener la bola en su lugar.

Fuerzas que tratan de mantener la válvula cerrada:

$$F_c = P_d A_b \quad (3.2)$$

Fuerzas que tratan de abrir la válvula:

$$F_o = P_c (A_b - A_p) + P_t A_p \quad (3.3)$$

Las que al sustituir en la ecuación 3.1 se tiene:

$$P_c (A_b - A_p) + P_t A_p = P_d A_b \quad (3.4)$$

Donde:

$P_d$  = Presión en el domo, psig

$A_b$  = Área inferior total efectiva,  $pg^2$

$P_c$  = Presión en la TR a la profundidad de la válvula requerida para abrir la válvula bajo condiciones de operación,  $lb/pg^2$ .

$A_p$  = Área de asiento,  $pg^2$ .

$P_t$  = Presión en la TP a la profundidad de la válvula cuando ésta abre,  $lb/pg^2$ .

Despejando  $P_c$  para conocer la presión en la TR a la profundidad requerida para abrir la válvula bajo las condiciones de operación:

$$P_c (A_b - A_p) = P_d A_b - P_t A_p \quad (3.5)$$

Dividiendo cada término por  $A_b$ :

$$P_c (1 - A_p / A_b) = P_d - P_t A_p / A_b \quad (3.6)$$

Si hacemos:

$$A_p / A_b = R \quad (3.7)$$

Entonces:

$$P_c (1 - R) = P_d - P_t R \quad (3.8)$$

Dividendo ambos lados por  $1 - R$ :

$$P_c = \frac{P_d - P_t R}{1 - R} \quad (3.9)$$

Para saber qué tanto efecto tiene la presión en la TP en la apertura de la válvula se reacomoda la ecuación anterior:

$$P_c = \frac{P_d}{1 - R} - \frac{P_t \times (R)}{1 - R} \quad (3.10)$$

En la ecuación 3.10 se observa que el término de presión en la TP disminuye la presión en la TR requerida para abrir la válvula. Esto es, conforme la presión en la TP se incrementa, la presión en la TR necesaria para abrir la válvula disminuye. El término de presión en la TP se conoce como *efecto de tubería* (T.E.)

$$T.E. = P_t \frac{R}{(1 - R)} \quad (3.11)$$

La relación  $\frac{R}{(1 - R)}$  es llamada factor de efecto de tubería (T.E.F.) y es reportado por la mayoría de los fabricantes como porcentaje.

$$T.E.F. = \frac{R}{1 - R} \quad (3.12)$$

Por lo tanto:

$$T.E. = P_t \times T.E.F. \quad (3.13)$$

Presión de cierre de la válvula bajo condiciones de operación

Se toma en cuenta la misma ecuación de balance de fuerzas que se consideró para la posición de apertura de la válvula, sólo que ahora en el instante anterior al cierre de la misma. Todas las presiones y áreas son idénticas excepto que ahora la presión bajo la bola se considera como la presión en la TR y no la presión en la TP.

En el instante anterior al cierre se puede escribir la siguiente ecuación:

$$F_o = F_c \quad (3.14)$$

(1) Fuerzas que tratan de mantener la válvula cerrada:

$$F_c = P_d A_b \quad (3.15)$$

(2) Fuerzas que tratan de abrir la válvula:

$$F_o = P_c (A_b - A_p) + P_c A_p \quad (3.16)$$

Las que sustituyendo en la ecuación (3.14) se tiene:

$$P_c (A_b - A_p) + P_c A_p = P_d A_b \quad (3.17)$$

Debido a que estamos buscando la presión en la TR a la profundidad de la válvula donde ésta cierra, es necesario hacer la siguiente sustitución:

$$P_{vc} = P_c \quad (3.18)$$

Donde:



$P_{vc}$  = Presión en la TR a la cual la válvula cerrará bajo condiciones de operación,  $lb/pg^2$ .

$$P_{vc} (A_b - A_p) + P_{vc} A_p = P_d A_b \quad (3.19)$$

$$P_{vc} A_b - P_{vc} A_p + P_{vc} A_p = P_d A_b \quad (3.20)$$

Y finalmente:

$$P_{vc} = P_d \quad (3.21)$$

De esta ecuación se deduce que la presión en la TR debe reducirse a la presión de domo a la profundidad de la válvula para poder cerrarla.

#### Amplitud de la válvula (Spread)

La diferencia entre la presión de apertura de la válvula y la presión de cierre de la válvula se llama amplitud de la válvula, para calcular la amplitud de la válvula la presión de cierre debe restarse de la presión de apertura de la válvula, es decir:

$$\text{Spread} = \Delta P = P_c - P_{vc} = \frac{P_d - P_t R}{1 - R} - P_{vc} \quad (3.22)$$

Agrupando términos:

$$\Delta P = \frac{P_d - P_t R}{1 - R} - \frac{(1 - R) P_d}{1 - R} \quad (3.23)$$

Desarrollando:

$$\Delta P = \frac{P_d - P_t R - P_d + P_d R}{1 - R} \quad (3.24)$$

$$\Delta P = \frac{R}{1-R} (P_d - P_t) \quad (3.25)$$

Ya que:

$$\text{T.E.F.} = \frac{R}{1-R} \quad (3.26)$$

Entonces:

$$\Delta P = \text{T.E.F.} \times (P_d - P_t) \quad (3.27)$$

En esta ecuación se observa que la amplitud de la válvula es controlada por dos factores, el factor de efecto de tubería (T.E.F.) y la presión en la TP. El valor mínimo de la amplitud de la válvula se tiene cuando la presión en la TP iguala a la presión del domo de la válvula. El valor máximo de la amplitud de la válvula se tiene cuando la presión en la TP es cero, por lo tanto:

$$\text{Spread\_Máximo} = \Delta P_{\text{max}} = \text{T.E.F.} (P_d) \quad (3.28)$$

La amplitud de la válvula puede ser controlada mediante el diseño de grandes cargas de presión en la TP, sin embargo una gran carga de presión en la TP puede requerir un espaciamiento entre válvulas irreal. La amplitud de la válvula puede ser importante en las instalaciones de bombeo neumático continuo pero es particularmente importante en instalaciones de bombeo neumático intermitente donde son empleadas válvulas que responden a la variación de la presión. La amplitud de la válvula controla la cantidad de gas usada por cada ciclo. Conforme aumenta la presión requerida para cerrar las válvulas, la cantidad de gas inyectada durante ese ciclo aumenta. Obviamente la amplitud de la válvula debe ser regulada para evitar el paso de una mayor cantidad de gas por ciclo. Sin embargo la potencia y la eficiencia de levantamiento del fluido son sacrificadas si el tamaño del puerto de la válvula a través del cual circula el gas durante el ciclo es restringido.

### Presión del gas a profundidad

La presión de apertura y de cierre de estas válvulas en la superficie es diferente de la presión que se tiene a la profundidad de la válvula. En condiciones reales la presión de superficie es la presión controlada; así la superficie (0 pie) se usa como dato para comparar y relacionar los datos de las válvulas. Para corregir los datos de las válvulas, tanto en superficie como a profundidad, el diseñador debe predecir el cambio en la presión debido al peso de la columna de inyección del gas, así como las pérdidas por fricción sobre la válvula de inyección bajo condiciones de flujo estáticas o dinámicas.

La diferencia entre la presión estática y dinámica se debe a las pérdidas por fricción del gas fluyendo. Si el conducto de flujo es pequeño o la tasa de inyección de gas es relativamente alta, estas pérdidas deben considerarse. Las pérdidas por fricción que se extienden hacia abajo en la dirección del flujo de gas en el espacio anular pueden despreciarse sin que se ocasione un error considerable ya que son muy pequeñas. Es debido a esta razón que la mayoría de las instalaciones de bombeo neumático se diseñan usando incrementos de presión estáticos en el gas conforme la profundidad aumenta.

El cálculo del incremento de presión debido al peso de la columna de gas se basa en la ecuación de balance de energía en el gas fluyendo entre cualesquiera dos puntos del sistema, esto es:

$$\int_1^2 v dP + \Delta \frac{v^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} \Delta X + lw + w = 0 \quad (3.29)$$

Para una columna de gas en condiciones estáticas, sin velocidad, fricción o trabajo, la ecuación anterior se reduce a:

$$\int_1^2 v dP + \frac{g}{g_c} \Delta X = 0 \quad (3.30)$$

Resolviendo esta ecuación para un gas real y asumiendo la temperatura promedio así como el factor de compresibilidad se tiene la siguiente ecuación:

$$P_{\text{depth}} = P_{\text{surface}} \exp\left(\frac{0.01877 \gamma_g L}{ZT}\right) \quad (3.31)$$

Donde:

- $P_{\text{depth}}$  = Presión a profundidad de la columna de gas, lb/pg<sup>2</sup>.
- $P_{\text{surface}}$  = Presión en la superficie en la cabeza del pozo, lb/pg<sup>2</sup>.
- $\gamma_g$  = Densidad relativa del gas.
- $L$  = Profundidad, pie.
- $T$  = Temperatura promedio, °R
- $Z$  = Factor de compresibilidad basado en  $\bar{T}$  y  $\bar{P}$ .

Esta ecuación se resuelve a través de ensaye y error ya que  $Z$  depende de la  $P_{\text{depth}}$  y viceversa, debido a esto se han desarrollado gráficas basadas en esta ecuación, las cuales dan buenos resultados. Para presiones y temperaturas normales, el incremento de presión conforme la profundidad (gradiente de presión) es aproximadamente constante para una presión dada en la superficie. Por consiguiente, la presión en la TR puede describirse gráficamente por una línea recta desde la presión de superficie a la presión en la profundidad. Una de estas gráficas se puede observar en el apéndice A.1.

#### Prueba de presión de apertura en el taller

Una vez que la presión de apertura y de cierre se establecen por el diseñador, la válvula debe calibrarse a una presión de apertura en el taller que corresponda a la presión de apertura deseada en el pozo. Esto se conoce como prueba de presión de apertura en el taller ( $P_{\text{tro}}$ ). En la prueba de presión de apertura en el taller la presión en la TP es de 0 psig. Si la presión en la

tubería  $P_i$  se establece en cero en la ecuación 3.10, entonces la ecuación para calcular la presión en la TR ahora resulta como:

$$P_c = \frac{P_d}{1-R} \quad (3.32)$$

El domo de la válvula de bombeo neumático se considera de volumen constante. Es por esto que la presión en el domo cargado de nitrógeno se incrementa conforme se incrementa la temperatura. La presión en el domo ( $P_d$ ) es conocida a la profundidad de la válvula, esto significa que si se emplea la ecuación 3.32 para determinar la presión de apertura en el taller, cada válvula tendría que ser calentada a una temperatura igual a la que se tendría al operar la válvula a profundidad. Claro que esto es impráctico, la mayoría de los fabricantes enfrían sus válvulas a 60°F antes de instalarlas, esto lo hacen al sumergirlas en agua a una temperatura de 60°F, por lo tanto para calcular la presión de apertura en el taller la presión del domo a profundidad debe ser corregida a 60°F. La ecuación empleada para determinar la presión de apertura en el taller es:

$$P_{tro} = \frac{P_d @ 60^\circ F}{1-R} \quad (3.33)$$

Para corregir  $P_d$  a  $P_d @ 60^\circ F$  se emplea la ley de los gases reales:

$$\frac{P_d}{Z_d T_d} = \frac{P_d @ 60^\circ F}{Z_{60} 520} \quad (3.34)$$

O bien:

$$P_d @ 60^\circ F = \frac{P_d Z_{60} 520}{Z_d T_d} \quad (3.35)$$

Obviamente que se puede emplear cualquier temperatura como base. Por lo que la ecuación para calcular la presión en la TR cuando la presión en la TP es cero tiene que

modificarse a la nueva temperatura base. Algunos fabricantes usan una temperatura base de 80°F. Debido a que la ecuación anterior se resuelve a través de ensayo y error se han desarrollado gráficas de fácil uso. El apéndice A.2 muestra una tabla con los factores de corrección de temperatura para válvulas con domo cargado con nitrógeno a una temperatura base de 60°F.

- ❖ *Válvula de fleje desbalanceado con domo cargado a presión y resorte como elemento elevador.*

Este tipo de válvulas de presión son llamadas como válvulas de doble elemento debido a que cuentan con dos elementos para la elevación. Este tipo de válvulas son empleadas tanto en bombeo neumático continuo como en bombeo neumático intermitente.

#### Presión de apertura de la válvula bajo condiciones de operación

Así como en las válvulas de un simple elemento, de la misma manera se puede escribir una ecuación de balance de fuerzas para la válvula en la posición de cierre justo antes de su apertura. En este instante las fuerzas que están tratando de abrir la válvula son iguales a las fuerzas que están tratando de mantenerla cerrada.

$$F_o = F_c \quad (3.36)$$

Donde:

$F_o$  = Sumatoria de todas las fuerzas tratando de empujar la bola de su asiento.

$F_c$  = Sumatoria de todas las fuerzas tratando de mantener la bola en su asiento.

Fuerzas que tratan de mantener la válvula cerrada:

$$F_c = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.37)$$

Fuerzas que tratan de abrir la válvula:

$$F_o = P_{vo} (A_b - A_p) + P_t A_p \quad (3.38)$$

Las que sustituyendo en la ecuación 3.36 se tiene:

$$P_{vo} (A_b - A_p) + P_t A_p = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.39)$$

Donde:

- $P_d$  = Presión en el domo, psig
- $A_b$  = Área inferior total efectiva,  $pg^2$
- $P_{vo}$  = Presión en la TR a la profundidad de la válvula requerida para abrir la válvula bajo condiciones de operación,  $lb/pg^2$ .
- $A_p$  = Área de asiento,  $pg^2$
- $P_t$  = Presión en la TP a la profundidad de la válvula cuando esta abre,  $lb/pg^2$ .
- $S_t$  = Una presión equivalente causada por la tensión en el resorte, se asume que actúa en el área:  $A_b - A_p$ . Esta es dada por el fabricante.

Resolviendo para obtener  $P_{vo}$ :

$$P_{vo} (A_b - A_p) + P_t A_p = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.40)$$

Dividiendo cada termino por  $A_b$ :

$$P_{vo} (1 - A_p/A_b) + P_t (A_p/A_b) = P_d + S_t (1 - A_p/A_b) \quad (3.41)$$

Si hacemos:

$$A_p / A_b = R \quad (3.42)$$

Entonces:

$$P_{vo} (1 - R) + P_t (R) = P_d + S_t (1 - R) \quad (3.43)$$

Dividiendo por (1-R):

$$P_{vo} = \frac{P_d}{1 - R} + S_t - \frac{P_t R}{1 - R} \quad (3.44)$$

Si el domo no está cargado, todas las fuerzas de cierre serán proporcionadas por el resorte, por lo que la ecuación anterior se reduce a:

$$P_{vo} = S_t - \frac{P_t R}{1 - R} \quad (3.45)$$

Si la presión del domo es necesaria para complementar la fuerza del resorte o si la fuerza del resorte no es suficiente, entonces el diseñador generalmente escoge un  $S_t$  que asegure que el resorte no se atascará bajo condiciones de operación. Una vez que se selecciona un  $S_t$ , se puede calcular la  $P_d$ .

#### Presión de cierre de la válvula bajo condiciones de operación

Cuando la válvula esta abierta, la presión bajo la bola se supone es la presión en la TR (no la presión en la TP). En el instante anterior al cierre de la válvula, la ecuación de balance de fuerzas se puede escribir de la siguiente manera:

$$F_o = F_c \quad (3.46)$$

Fuerzas que tratan de mantener la válvula cerrada:

$$F_c = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.47)$$



Fuerzas que tratan de mantener la válvula abierta:

$$F_o = P_c (A_b - A_p) + P_c A_p \quad (3.48)$$

Las que sustituyendo en la ecuación (3.46) se tiene:

$$P_c (A_b - A_p) + P_c A_p = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.49)$$

O bien:

$$P_c A_b = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.50)$$

Reemplazando  $P_c$  con  $P_{vc}$  y despejando  $P_{vc}$  se tiene:

$$P_{vc} = P_d + S_t (1-R) \quad (3.51)$$

#### Amplitud de la válvula

La amplitud de la válvula se encuentra al sustraer la presión de cierre de la ecuación de presión de apertura de la válvula.

$$\text{Spread} = \Delta P = P_{vo} - P_{vc} \quad (3.52)$$

$$\Delta P = \left[ \frac{P_d}{1-R} + S_t \left( \frac{P_t R}{1-R} \right) \right] - [P_d + S_t (1-R)] \quad (3.53)$$

$$\Delta P = \frac{R}{1-R} [P_d + S_t (1-R) - P_t] \quad (3.54)$$

O bien:

$$\Delta P = [TEF]P_d + S_t(1-R) - P_t \quad (3.55)$$

Se nota que si no existe resorte ( $S_t=0$ ), la ecuación anterior se reduce a la misma ecuación para la amplitud de la válvula de un solo elemento con domo de  $N_2$  como carga de la presión.

#### ❖ Válvula de presión balanceada.

Este tipo de válvulas no se ve influenciada por la presión en la TP cuando se encuentran en la posición de cierre o de apertura. La presión en la TR actúa en toda el área del pistón durante todo el tiempo, esto significa que la válvula abre y cierra a la misma presión que tiene el domo. La expansión es cero sin importar el tamaño del asiento. El elemento principal en este tipo de válvulas es una manga elástica flexible la cual sella el domo de la válvula. El domo es cargado con gas a determinada presión, y la manga elástica flexible sella la inyección de gas a través de la válvula.

Por consiguiente este tipo de válvulas actúan como un orificio regulador, abriendo al paso del gas inyectado desde la superficie. Si se necesita más gas, este es inyectado desde la superficie y la válvula abre, si se necesita menos gas se hace un ajuste en la superficie y la válvula se cierra parcialmente para controlar la menor tasa de gas.

#### Flujo de gas

El flujo de gas a través de la válvula puede ser calculado con la siguiente ecuación dada por Craft, Holden & Graves<sup>12</sup>.

$$Q = \frac{155.5 C_d A P_t}{\sqrt{\gamma T}} \sqrt{2 g \frac{K}{K-1} \left( R^{2/k} - R^{K+1/k} \right)} \quad (3.56)$$

Donde:

- $Q$  = Flujo de gas en Mpcd @14.65 lb/pg<sup>2</sup> y 60° F  
 $C_d$  = Coeficiente de descarga.  
 $A$  = Área de estrangulamiento, pg<sup>2</sup>  
 $P_1$  = Presión corriente arriba, lb/pg<sup>2</sup>  
 $P_2$  = Presión corriente abajo, lb/pg<sup>2</sup>  
 $g$  = 32.17 pie/sec<sup>2</sup>  
 $K$  =  $C_p / C_v$  (aproximadamente 1.31 para gases naturales)  
 $R$  =  $P_2 / P_1 > R_c$   
 $R_c = \left( \frac{2}{K + 1} \right)^{K / (K - 1)}$  = Relación de presión para el flujo crítico.  
 $\gamma$  = Densidad relativa (1.00 para el aire)  
 $T$  = Temperatura de entrada, °R

### 3.2.2. Válvula balanceada

Este tipo de válvula también se conoce como válvula de flujo continuo. Los componentes básicos en la válvula son los mismos que los de la válvula operada a presión, sin embargo se les han hecho ciertas modificaciones las cuales las hacen más sensibles a la presión en la TP en la posición de apertura, esto puede lograrse mediante el estrangulamiento del puerto de entrada de la válvula con lo que se logra una disminución en la presión en la TR hasta igualarla con la presión en la TP o mediante el uso de un asiento que permita que el área del puerto sea sensible a la presión en la TP cuando la válvula se encuentre abierta. Es necesario recordar que las válvulas de presión intermitente son sensibles a la presión en la TR únicamente en la posición de apertura, lo que significa que la presión en la TR debe disminuir hasta la presión del domo para que la válvula cierre. La presión en la TR no tiene que disminuir hasta la presión del domo para que la válvula balanceada cierre, de hecho esta válvula cerrará ante una reducción en la presión en la TP aunque la presión en la TR se mantenga constante.

Para este tipo de válvulas también se puede emplear la ecuación de balance de fuerzas que se ha utilizado anteriormente para determinar la presión necesaria para abrir la válvula, sin embargo se debe completar con una prueba dinámica para mostrar como este tipo de válvulas reaccionan ante la presión en la TP cuando estas se encuentran abiertas. La válvula responde al cambio de presión en la TP, estas abren ante mayores cargas de presión y cierran conforme la presión en la TP disminuye, esto generalmente se define como respuesta proporcional. Estas válvulas se calibran a la presión del domo.

### 3.2.3. Válvula operada por fluido

Estas válvulas son idénticas a las válvulas operadas por presión excepto que ahora la presión en la TP actúa en un área mayor de los fuelles y la presión en la TR actúa en el área del puerto. Esta es una válvula de doble elemento con resorte y domo a presión para proporcionar las fuerzas para cerrar la válvula, la mayoría de los fabricantes de este tipo de válvulas cargan el domo únicamente cuando se requieren altas presiones para complementar la fuerza al resorte. Las ecuaciones generales de balance de fuerzas se pueden emplear para:

1. Resorte sin carga en el domo.
2. Carga en el domo sin resorte.
3. Combinación de resorte y carga en el domo.

### Presión de apertura de la válvula operada por fluido bajo condiciones de operación

Ya que la válvula operada por fluido es más sensible a la presión en la TP, la presión de apertura esta definida como la presión en la TP requerida para abrir la válvula bajo condiciones de operación. Así como en las válvulas operadas por presión, la presión de apertura se investiga cuando la válvula se encuentra en la posición de cierre en el instante anterior a la apertura de la válvula, en este instante se puede escribir la siguiente ecuación:

$$F_o = F_c \quad (3.57)$$

Donde:

$F_o$  = Sumatoria de todas las fuerzas tratando de empujar la bola de su asiento.

$F_c$  = Sumatoria de todas las fuerzas tratando de mantener la bola en su asiento.

(1) Fuerzas que tratan de mantener la válvula cerrada:

$$F_c = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.58)$$

(2) Fuerzas que tratan de mantener la válvula abierta:

$$F_o = P_c A_p + P_t (A_b - A_p) \quad (3.59)$$

Las que sustituyendo en la ecuación 3.57 se tiene:

$$P_c A_p + P_t (A_b - A_p) = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.60)$$

Despejando  $P_t$  en la forma que se ha realizado con anterioridad se tiene:

$$P_t = \frac{P_d}{1-R} + S_t - P_c \frac{R}{1-R} \quad (3.61)$$

Con esta ecuación se puede calcular la presión en la TP requerida para abrir la válvula operada por fluido bajo las condiciones de operación. De esta ecuación se puede saber que conforme la presión en la TR aumenta, la presión en la TP requerida para abrir la válvula disminuye. El término de presión en la TR en la ecuación anterior es llamado Efecto de la TR (C.E.).

$$C.E. = P_c \frac{R}{1-R} \quad (3.62)$$

La relación  $\frac{R}{1-R}$  en las válvulas operadas por fluido es llamada factor de efecto de la TR (C.E.F.) y es reportado por la mayoría de los fabricantes como un porcentaje:

$$C.E.F. = \frac{R}{1-R} \quad (3.63)$$

$$C.E. = P_c \times C.E.F. \quad (3.64)$$

### Presión de cierre de la válvula operada por fluido bajo condiciones de operación

Cuando la válvula se encuentra en la posición de apertura, la presión bajo la bola se supone que es la presión en la TP y no la presión en la TR. Esto significa que el asiento en este tipo de válvulas debe ser suficientemente pequeño para permitir la disminución de la presión en la TR hasta la presión en la TP conforme el gas fluye a través de la válvula.

Ya que la disminución de la presión se da a través de un orificio, esta se encuentra relacionada con el volumen del flujo, por lo que se pueden emplear asientos mayores si la diferencial entre la TP y la TR es lo suficientemente grande para permitir el paso de grandes volúmenes de gas.

En el instante anterior al cierre de la válvula, se puede escribir la siguiente ecuación:

$$F_o = F_c \quad (3.65)$$

Fuerzas que tratan de mantener la válvula cerrada:

$$F_c = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.66)$$

Fuerzas que tratan de mantener la válvula abierta:

$$F_o = P_t A_p + P_t (A_b - A_p) \quad (3.67)$$

O bien:

$$F_o = P_t A_b. \quad (3.68)$$

Las que sustituyendo en la ecuación 3.65 se tiene:

$$P_t A_b = P_d A_b + S_t (A_b - A_p) \quad (3.69)$$

Despejando  $P_t$ :

$$P_t = P_d + S_t (1-R) \quad (3.70)$$

Para determinar la presión en la TP a la cual la válvula cierra, haremos lo siguiente:

$$P_{vc} = P_t \quad (3.71)$$

$$P_{vc} = P_d + S_t (1-R) \quad (3.72)$$

El diseñador deberá estimar el valor de  $P_{vc}$  y calcular los demás valores basados en ese estimado.

### Prueba de presión de apertura en el taller

Una vez que se han determinado las presiones de apertura y de cierre, la válvula operada por fluido debe ser calibrada a una presión de apertura la cual corresponde a la presión de apertura deseada en el pozo. Esto se conoce como prueba de presión de apertura en el taller ( $P_{tro}$ ). En la prueba de presión de apertura en el taller la presión en la TR es de 0 psig. Por lo que  $P_c$  se establece en cero, y la ecuación para calcular la presión en la TR ahora resulta como:

$$P_t = \frac{P_d}{1-R} + S_t \quad (3.73)$$

Si la presión en el domo es corregida a 60°F la ecuación anterior se transforma en la ecuación para determinar la presión de apertura en el taller:

$$P_{tro} = \frac{P_d @ 60 \text{ } ^\circ\text{F}}{1 - R} + S_t \quad (3.74)$$

Cuando la carga del domo es cero se tiene:

$$P_{tro} = S_t \quad (3.75)$$

Cuando se necesita carga en el domo para complementar la fuerza del resorte, el diseñador debe seleccionar alguna constante para el valor de  $S_t$ , esta selección depende en la constante del resorte de la válvula que se va a utilizar. Una vez que  $S_t$  es seleccionado la válvula es abierta a esa presión en la prueba de apertura en el taller con una carga en el domo de cero, esto alista  $S_t$  en la válvula. No es necesaria una corrección por la temperatura para obtener  $S_t$ .

### Características del flujo de gas

Las técnicas de diseño usadas para las válvulas operadas por fluido están basadas en las características de flujo del gas a través de la válvula. El tamaño del asiento debe ser lo suficientemente pequeño para crear una caída de presión a través de la válvula

Si la presión en la TP esta dentro del rango de estrangulamiento de la válvula, la presión disminuye a través del asiento y junto con el efecto del resorte se origina que la válvula responda proporcionalmente para incrementar y disminuir la presión en la TP.

❖ *Válvula diferencial.*



Estas válvulas fueron las primeras en usarse ampliamente para el bombeo neumático. En este tipo de válvulas la presión de apertura y la presión de cierre serán la presión en la TP definida en términos de la presión en la TR.

Presión de apertura de las válvulas diferenciales bajo condiciones de operación

Se puede escribir la siguiente ecuación de balance de fuerzas en el instante anterior a la apertura de la válvula:

$$F_o = F_c \quad (3.76)$$

Donde:

$F_o$  = Sumatoria de todas las fuerzas tratando de empujar la bola de su asiento.

$F_c$  = Sumatoria de todas las fuerzas tratando de mantener la bola en su asiento.

El resorte en las válvulas diferenciales trata de empujar la bola de su asiento.

Fuerzas que tratan de mantener la válvula cerrada:

$$F_c = P_c A_p \quad (3.77)$$

Fuerzas que tratan de mantener la válvula abierta:

$$F_o = S_t A_p + P_t A_p \quad (3.78)$$

Las que sustituyendo en la ecuación 3.77 se tiene:

$$P_t A_p + S_t A_p = P_c A_p \quad (3.79)$$

Donde:

$A_p$  = Área del asiento de la válvula en la parte superior de la válvula,  $\text{pg}^2$ .

$P_c$  = Presión en la TR a la profundidad de la válvula cuando está abierta,  $\text{lb}/\text{pg}^2$ .

$P_t$  = Presión en la TP a la profundidad de la válvula requerida para abrir la válvula bajo condiciones de operación,  $\text{lb}/\text{pg}^2$ .

$S_t$  = Presión equivalente causada por la tensión del resorte actuando en el área  $A_p$ .

Despejando  $P_t$  y dividiendo cada término por  $A_p$  en la ecuación (3.79):

$$P_t + S_t = P_{vo} \quad (3.80)$$

O bien:

$$P_t = P_{vo} - S_t \quad (3.81)$$

### Presión de cierre de las válvulas diferenciales bajo condiciones de operación

Cuando la válvula se encuentra en la posición de apertura, la presión bajo la bola se supone es la presión en la TP y no la presión en la TR. Para que esto sea cierto los estranguladores de la válvula deben ser pequeños en relación al área de asiento de la bola. En el instante anterior al cierre de la válvula se puede escribir la siguiente ecuación de balance de fuerzas:

$$P_o = F_c \quad (3.82)$$

Debido a que la presión y las áreas se suponen iguales cuando la válvula se encuentra cerrada, la presión en la TP requerida para cerrar la válvula será la misma que la presión de apertura:

$$P_t = P_c - S_t \quad (3.83)$$

Si los estranguladores de la válvula son demasiado grandes para disminuir la  $P_c$  a la  $P_i$  conforme el gas circula a través de la válvula, esta no cerrará. La presión de apertura y la presión de cierre de la válvula se incrementarán conforme se incremente la presión en la TR.

### 3.3 Consideraciones dinámicas

Los fuelles en las válvulas de bombeo neumático son los elementos que se comprimen y se extienden para permitir el movimiento de la bola para separarse del asiento. Para evitar que los fuelles fallen la mayoría de las válvulas están equipadas para limitar el desplazamiento de los fuelles. Algunos de los métodos empleados son los siguientes:

1. Anillos de soporte.
2. Deformación hidráulica.
3. Líquido confinado.
4. Topes mecánicos.
5. Aislamiento de los fuelles.

El máximo desplazamiento de los fuelles en las válvulas de bombeo neumático está afectado por el sistema de protección de los mismos, los cuales dependen del tamaño del asiento. El vástago debe viajar lo menos posible con la finalidad de alcanzar una posición de apertura completa. Es por esto que el flujo de gas se puede ver fuertemente afectado si el viaje completo del fuelle se detiene o se restringe antes que se alcance la posición de apertura completa. Las pruebas dinámicas muestran que el flujo de gas continúa aumentando con el sobre viaje del vástago para algunos tipos de asientos.

### 3.4 Aplicación de las válvulas

En algunos casos los fabricantes hacen sólo cierto tipo de válvulas y estas deben usarse en situaciones en las que tal vez no sean la mejor opción, pero que a falta de válvulas se deben emplear. Halliburton ha creado una serie completa de válvulas y su aplicación se debe limitar a la siguiente nomenclatura:

1. *Serie L*, de resorte, estrangulamiento.

2. *Serie N*, domo cargado a presión.
3. *Serie R*, de resorte sensible a la presión en la tubería.
4. *Serie WF*, de resorte operada por piloto.

❖ *Serie L* – Válvula de resorte diseñada específicamente para operaciones de flujo continuo.

#### Ventajas:

- 1) Sensible continuamente a la presión en la TP así como la presión en la TR. Puede ser diseñada para usar presión constante en la TR y permitir que la presión en la TP determine si la válvula abre o cierra. Una presión constante en la TR es importante por varias razones:
  - a) Permite que cada válvula sea ajustada para una presión constante en la TR asegurando que la máxima presión se utilice en la más profunda.
  - b) Permite tener producción anular doble.
  - c) Asegura la inyección a la mayor profundidad para una relación gas-líquido mínima.
- 2) La válvula responde proporcionalmente a la presión en la TP. Si la presión en la TP es menor que la calculada, la válvula se cierra; si se tiene una presión mayor que la calculada, la válvula se abre para regular la cantidad de gas requerida dentro de la tubería.
- 3) Las pruebas dinámicas de flujo deben realizarse en la válvula y con esto el diseñador conoce la cantidad de gas que se espera circule a través de la misma, lo cual es un punto muy importante, si no se cuenta con esta información el diseñador debe suponer que la válvula permitirá el paso de gas requerido, lo cual es una suposición peligrosa.
- 4) No son sensibles a la temperatura. Las temperaturas exactas son difíciles de calcular en pozos fluyentes y se pueden dar una mayor cantidad de errores al suponer las temperaturas.

- 5) Bolas de carburo de tungsteno, así como asientos que resisten la corrosión permiten a las válvulas mantener sus características de cierre.
- 6) Asientos grandes para un solo punto de inyección.

Desventajas:

- 1) En algunas ocasiones se requiere una válvula adicional para alcanzar la profundidad deseada.
- 2) Los ajustes de presión son más complicados que en otro tipo de válvulas.
- 3) Ya que se cuenta con más información los diseños son más técnicos, detallados y debido a esto más exactos.

❖ *Serie N* – Válvula de domo cargado.

Ventajas:

- 1) Tienen un gran rango de aplicaciones y generalmente se usa tanto en bombeo neumático continuo como en intermitente.
- 2) Se ajusta fácilmente la presión de trabajo de la válvula.
- 3) Ha estado en servicio durante muchos años y la mayoría de los operadores están familiarizados con su diseño y con su desempeño.
- 4) Asientos grandes para un solo punto de inyección.

Desventajas:

- 1) Sensible a la temperatura y requiere una correcta predicción de las temperaturas de operación.
- 2) La exactitud al ajustar la presión es difícil ya que se tiene que ajustar a 60°F; los factores que afectan al ajustar la presión es:
  - a) Temperatura del agua en el baño.
  - b) Tiempo fuera del baño antes del ajuste de la presión.
  - c) Transferencia de la temperatura de la mano del mecánico al área de los fuelles.
- 3) La presión de los fuelles puede cambiar si la válvula tiene fugas.

- 4) Cuando se usan para flujo continuo, no se tiene la habilidad de regular la válvula y por tanto puede estar tanto cerrada como abierta.
- 5) Para diseños exactos, el diseño se debe basar en la disminución de la presión superficial de operación de manera que permita al operador cerrar la válvula superior y compensar por errores en la corrección de la temperatura.

❖ *Serie R* – Válvulas sensibles a la presión en la TP.

Ventajas:

- 1) Básicamente es insensible a la presión en la TR lo que la hace una válvula funcional para instalaciones con líneas de presión fluctuantes.
- 2) Puede usar la presión de inyección máxima disponible en la válvula más profunda.
- 3) Se puede emplear en terminaciones dobles ya que su control se da exclusivamente por la presión en la TP y la presión en la TR se puede mantener constante.
- 4) Se puede emplear tanto en bombeo neumático continuo o bombeo neumático intermitente.

Desventajas:

- 1) El gas que circula a través de la válvula está limitado, por tanto se requieren múltiples puntos de inyección.
- 2) El control de la válvula depende casi completamente del diámetro de la tubería, el cual limita el control que puede ser impuesto por la válvula. La presión superficial de retorno que difiere del diseño causa serios problemas ya que la válvula es completamente sensible a la presión en la TP.
- 3) El gradiente final es interrumpido y por tanto no puede ser reducido tanto como lo puede hacer una válvula de asiento grande, lo que limita la disminución de presión que puede alcanzarse.

❖ *Serie WF* – Válvula operada por piloto, para flujo intermitente.

Ventajas:

- 1) Apertura controlada, se puede tener cualquier apertura con cualquier tipo de puerto.
- 2) Puerto grande para inyección en un solo punto a la máxima profundidad.
- 3) Los gradientes resultantes pueden reducirse a su menor nivel debido a la dimensión del asiento. La mayor disminución de presión es posible, lo que representa una producción máxima.

**Desventajas:**

- 1) Fluidos con contenidos de arena pueden causar que la válvula falle más rápidamente que una válvula de un solo elemento.
- 2) Se requiere más cuidado y precisión durante su fabricación y su instalación.
- 3) Es una válvula más costosa que las válvulas de un solo elemento.

### **3.5 Desempeño de las válvulas de bombeo neumático**

El comportamiento dinámico de las válvulas de bombeo neumático se determina por la magnitud de la presión de inyección. Se tienen dos características de desempeño distintas para las válvulas operadas por presión: el flujo estrangulado y el flujo orificio. Estos dos tipos de flujo se diferencian por la presión de apertura en el taller ( $P_{tro}$ ). Se han desarrollado modelos semi-mecánicos para predecir el tipo de flujo del que se trata.

#### **3.5.1. Equipo de prueba estática**

Estos equipos son diseñados para medir las presiones corriente abajo (presión en la TP) y la presión corriente arriba (presión en la TR) cuando la válvula abre y cierra. Su propósito es medir la presión de cierre de la válvula ( $P_{vc}$ ) y la presión de apertura en el taller ( $P_{tro}$ ) de las válvulas cargadas con nitrógeno. Los equipos de la prueba estática deben resistir la presión máxima de trabajo.

En estos equipos la válvula se coloca tanto para tensar el resorte de la válvula como para cargar el domo con nitrógeno. Las válvulas cargadas con nitrógeno son colocadas en un baño de agua para establecer y medir la temperatura del domo, después la válvula es instalada

en el equipo de prueba estática y se miden la presión de cierre y la presión de apertura en el taller. La tensión del resorte o la presión del domo se ajustan y se repite el procedimiento de prueba estática hasta que se ajustan la presión de cierre y la presión de apertura en el taller deseadas; una vez que se logra esto la válvula es transportada al equipo de prueba dinámico.

### 3.5.2. Equipo de prueba dinámica

Los equipos de prueba dinámica miden el comportamiento del flujo de gas a través de las válvulas de bombeo neumático bajo condiciones simuladas de operación. Para usar el equipo de prueba dinámica las válvulas que controlan el flujo corriente abajo se cierran y el gas es admitido dentro del ciclo de flujo al abrir las válvulas que controlan la corriente de flujo corriente arriba. Una vez que se ha admitido suficiente presión para que la válvula de prueba abra y para que las presiones corriente arriba y corriente abajo se equilibren a las presiones en TR y en TP deseadas, las válvulas que controlan el flujo corriente abajo son abiertas lentamente para reducir la presión corriente abajo y para iniciar el flujo a través de la válvula. En toda la prueba de comportamiento de flujo, las válvulas de control del flujo corriente arriba son ajustadas para mantener constante la presión de inyección y la presión corriente abajo es reducida mediante decrementos de presión de 25 a 100 lb/pg<sup>2</sup> hasta que la válvula cierra o la presión corriente abajo se reduce hasta la presión atmosférica. Para cada decremento de presión en la presión corriente abajo, se estabilizan las condiciones de flujo con las válvulas de control de flujo y la obtención de datos del sistema se hace manualmente para cada caso.

### 3.5.3. Características del desempeño de las válvulas

En la figura 3.4 se muestra una familia de curvas de desempeño de flujo, la gráfica es el resultado de graficar las presiones de producción y la tasa de flujo de gas, el grupo de curvas representa el desempeño de flujo de la válvula de bombeo neumático para una presión constante de cierre y un tamaño de asiento específico, las diferentes curvas difieren en la presión corriente abajo o presión de producción. Como se explicó en la descripción del procedimiento del equipo de prueba dinámica, la presión de inyección se mantiene constante

FALLA DE ORIGEN



mientras la presión corriente abajo o presión de producción se reduce durante cada prueba del desempeño de flujo.

Mediante el agrupamiento de las curvas relativas a cada prueba individual del desempeño de flujo, los efectos de diferentes presiones de inyección y de presiones de producción en la tasa de flujo de gas a través de la válvula de bombeo neumático pueden ser más fácilmente apreciados en la gráfica a que si se tabularan los datos por separado.

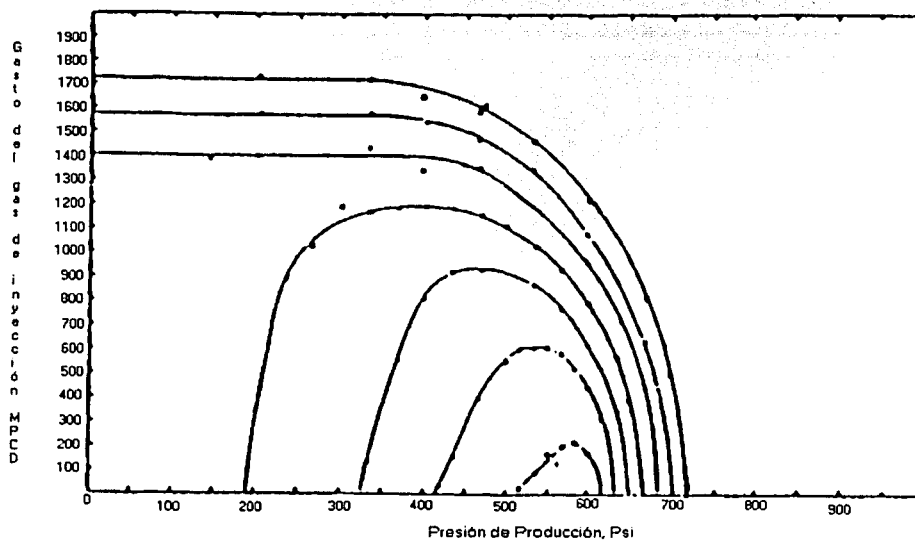


Fig. 3.4 Curvas de desempeño del flujo.

En la figura 3.5 se muestran los tres tipos de comportamientos de flujo observados a través de las válvulas de bombeo neumático. Como se menciona en la gráfica estos tres tipos de comportamientos son llamados flujo orificio, flujo transicional y flujo estrangulado debido al comportamiento de la corriente de gas conforme la presión de producción es reducida.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

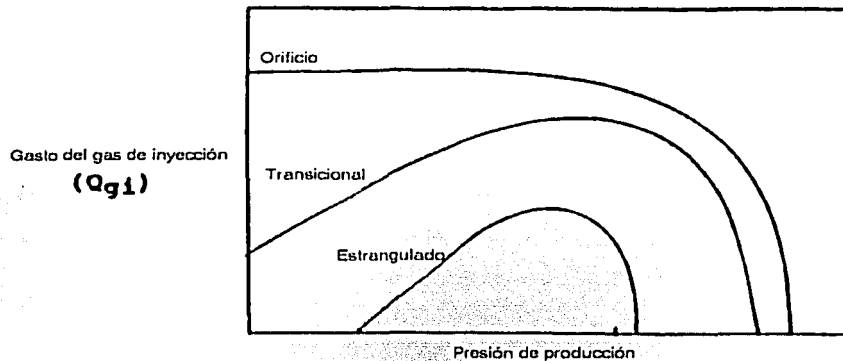


Fig. 3.5 Tipos de flujo presentes en las válvulas de bombeo neumático.

Cuando la presión de inyección es igual a la presión de producción fluyendo y ambas presiones son mayores a la presión de cierre de la válvula, la válvula se encuentra abierta pero no ocurre el flujo de gas ya que no se cuenta con un diferencial de presión a través de la válvula. Cuando se tiene un diferencial positivo ( $P_{iny} - P_{pd}$ ) el gas fluirá a través de la válvula. Cuando existe un diferencial negativo a través de la válvula, no se tendrá flujo a través de la válvula ya que el dispositivo de control de la válvula no permitirá el flujo.

En general, la tasa de flujo de gas se incrementará conforme la presión de producción se reduce hasta que la tasa de flujo alcance un máximo. Más allá de este punto, conforme la presión de producción se reduce, el flujo de gas a través de la válvula también disminuye o se mantiene constante; el tipo de curva de desempeño del flujo revela el comportamiento de la corriente de gas conforme la presión de producción se reduce.

#### 3.5.3.1. Comportamiento del flujo orificio

Si, conforme la presión de producción es disminuida hasta un valor de cero mientras se mantiene constante la presión de inyección, la tasa de flujo de gas se incrementa y alcanza un

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

valor máximo y se mantiene constante, el comportamiento de la válvula es llamado comportamiento de flujo orificio, debido a la semejanza con el flujo en un orificio.

Como se muestra en la figura 3.6 el comportamiento del flujo orificio se divide en dos regiones de flujo; la región crítica y la región subcrítica. En la región subcrítica la tasa de flujo del gas se incrementa conforme la presión de producción disminuye y la presión de inyección se mantiene constante. La presión de producción a la cual se tiene la máxima tasa de flujo de gas es llamada presión crítica, esta presión separa la región de flujo subcrítica de la región de flujo crítica. Para cualquier presión de producción menor que la presión crítica, la corriente de gas se mantiene constante. En la región de flujo crítica la presión de inyección es suficiente para mantener la válvula abierta sin la necesidad de ayuda de la presión de producción:

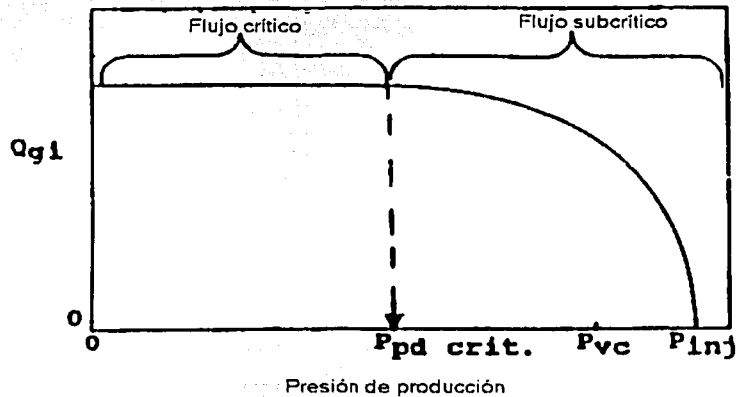


Fig. 3.6 Comportamiento del flujo orificio.

### 3.5.3.2. Comportamiento del flujo estrangulado

Si conforme la presión de producción se reduce de la presión de inyección hasta cero mientras se mantiene constante la presión de inyección y la tasa de flujo de gas se incrementa, alcanza un valor máximo, disminuye y entonces cesa en una presión positiva de producción, entonces se presenta el llamado flujo estrangulado, como se muestra en la figura 3.7.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

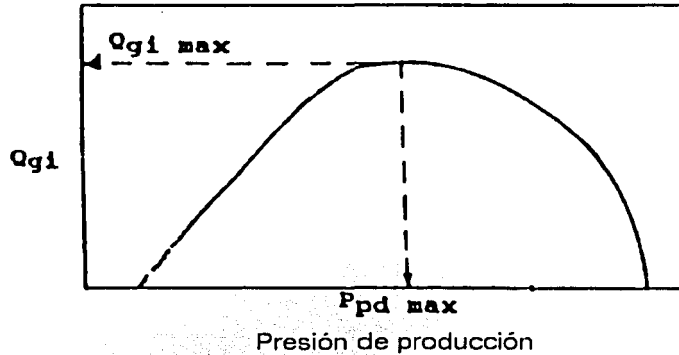


Fig. 3.7 Comportamiento del flujo estrangulado.

En la parte de mayor presión en la sección superior de la curva, la presión de producción y la presión de inyección son suficientes para vencer la presión del domo de la válvula para mantener ésta abierta. Después que se alcanza el punto de flujo máximo el comportamiento de flujo regulado se caracteriza por el decremento o la regulación del flujo hasta que se presenta el cese del flujo de gas.

En el flujo estrangulado, la presión de producción asiste a la presión de inyección para mantener la válvula abierta. Cuando la presión de producción se reduce por debajo del punto de flujo máximo, la combinación de las presiones de inyección y de producción son insuficientes para vencer la presión del domo, de manera que la válvula se cierra. Conforme el vástago se mueve hacia el asiento, el área del asiento que se encuentra abierta se reduce y por tanto la tasa de flujo de gas disminuye. Cuando el área del asiento es reducida, y la presión diferencial a través de la válvula se incrementa, la tasa de flujo de gas que circula a través del asiento de la válvula se reduce. Una mayor reducción en la presión de producción resulta en un mayor viaje del vástago hacia el asiento de la válvula y un menor flujo de gas. Finalmente la presión de producción se reduce hasta la presión de cierre de la producción ( $P_{pd\ c}$ ) a la cual la bola cubre totalmente el asiento de la válvula, lo que cierra la válvula impidiendo el flujo de gas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.5.3.3. Comportamiento del flujo transicional

Un tercer tipo de comportamiento del flujo es el llamado flujo transicional debido a que ocurre entre el flujo orificio y el flujo estrangulado. Para este tipo de comportamiento de la válvula, conforme la presión de producción se reduce de la presión de inyección hasta cero, la tasa de flujo de gas se incrementa, alcanza un máximo y entonces disminuye como en el comportamiento de flujo estrangulado, pero no cesa aunque la presión de producción se reduzca hasta la presión atmosférica. Este tipo de comportamiento de flujo se observó en solamente 5 de 476 pruebas de comportamiento de flujo, este se presentó en la mayoría de las pruebas para válvulas con asiento pequeño. Debido a que este tipo de comportamiento de flujo casi no ocurre, no se tiene un modelo para el mismo.

### 3.5.4. Características específicas del comportamiento de flujo

#### 3.5.4.1 Criterio de transición

En la gráfica de comportamiento de la válvula, figura 3.4, la familia de curvas representa el comportamiento de flujo en distintas pruebas de válvulas con distintas presiones de inyección. Las temperaturas de flujo, la presión del domo de la válvula, y el tamaño del asiento se consideran constantes para todas las curvas en la gráfica. El comportamiento de flujo estrangulado normalmente se presenta para presiones de inyección entre la presión de cierre de la válvula ( $P_{vc}$ ) y la presión de apertura en el taller ( $P_{tro}$ ). Para presiones de inyección mayores a la  $P_{tro}$  se tiene comportamiento de flujo orificio. Conociendo este criterio el comportamiento del flujo en la válvula se puede dividir en dos regiones: flujo estrangulado y flujo orificio, debido a esto el tipo de comportamiento se puede predecir si se conocen la presión de inyección y la presión del domo de la válvula. Ya que la presión en el domo de la válvula es sensible a la temperatura, es necesario conocer la temperatura del domo. Esta temperatura se puede suponer igual a la temperatura del gas de inyección. Esta suposición puede fallar, especialmente, si la temperatura del domo de la válvula se ve afectada por otros factores tales como la temperatura de los fluidos producidos.

### 3.5.4.2. Pendientes de las curvas de comportamiento de flujo estrangulado

Para las curvas de comportamiento de flujo estrangulado, la región de regulación tiene una pendiente definida entre el punto de flujo máximo y el cierre de la presión de producción. En una gráfica dada, esta pendiente tiende a incrementarse conforme la presión de inyección se incrementa. Así para el mismo tamaño de asiento, las pendientes de las curvas de comportamiento de flujo estrangulado tienden a incrementarse conforme la presión del domo de la válvula se incrementa. Finalmente la pendiente se incrementa conforme el tamaño del asiento sea mayor. Cuando la presión de inyección se incrementa, la influencia de la presión de producción en el comportamiento de la válvula disminuye debido a la cercanía de esta con la presión de apertura en el taller, ya que la presión de inyección por sí sola es capaz de mantener la válvula abierta.

Cuando la presión de domo de la válvula se incrementa, existe un mayor diferencial de presiones a través de la misma, lo que resulta en un mayor flujo de gas a través de la válvula. Aun así, para presiones de domo mayores, la región de flujo estrangulado existe para un cierto rango de presiones de inyección. Las válvulas con un asiento mayor serán más sensibles a las presiones de producción y por tanto tendrán pendientes mayores que las válvulas con asientos de tamaño menor.

### 3.5.4.3. Presiones de cierre de la producción

En la figura 3.4 las curvas fueron dibujadas mediante la extrapolación de la región de flujo estrangulado hasta intersectar el eje horizontal o el eje de la presión de producción. La presión de producción en este punto se define como la presión de cierre de la producción, sin embargo esta presión de cierre de la producción no concuerda con la presión de cierre de la producción obtenida de la ecuación de balance de fuerzas:

$$P_{vc} * (A_b) = P_{iny} * (A_b - A_p) + P_{pdc} * (A_p) \quad (3.84)$$

Para resolver esta discordancia se llevaron a cabo pruebas para investigar la presión de producción a la cual la válvula realmente se cerraba. Los resultados de estas pruebas mostraron que las curvas de comportamiento estrangulado al final de las mismas tendían a elevarse, este levantamiento no ocurre sino hasta que la tasa de flujo de gas se reduce hasta por debajo de 75 Mscf/d. El levantamiento causa que la presión de cierre extrapolada sea mayor por 50 lb/pg<sup>2</sup> que la presión de cierre calculada con la ecuación de balance de fuerzas. Además la presión de cierre real tampoco concuerda con la presión de cierre calculada con la ecuación de balance de fuerzas, por lo que la presión de cierre de la producción extrapolada resulta ser más cercana a la presión de cierre de la producción real que la presión de cierre de la producción calculada por la ecuación de balance de fuerzas.

#### 3.5.4.4. Presión crítica en el flujo orificio

Una cuarta característica especial del comportamiento de una válvula es la presión de producción en la cual se cambia de flujo subcrítico a flujo crítico en el comportamiento de flujo orificio. Esta presión es conocida como presión de producción crítica.

---

## Capítulo 4. Diseño de sistemas de bombeo neumático continuo

En el diseño de las instalaciones de bombeo neumático se deben considerar muchos factores, uno de los primeros es determinar si el pozo será producido bajo flujo intermitente o continuo. Algunas instalaciones de bombeo neumático deben ser diseñadas sin saber bajo que tipo de instalación de bombeo neumático tendrá mejor comportamiento el pozo. Estos pozos conocidos como pozos límite presentan dificultad en su diseño, aunque se cuenta con válvulas de inyección que pueden instalarse para los dos tipos de patrones de flujo, hay que estar conscientes que algunas válvulas sólo pueden instalarse en alguno de los dos tipos de flujo.

Así como para todos los demás tipos de recuperación artificial, el bombeo neumático genera la presión de fondo fluyendo necesaria para que el pozo pueda producir a un gasto deseado, esto se logra a través de las válvulas de inyección de gas. El propósito de las válvulas de bombeo neumático como ya se describió es descargar los fluidos del pozo, por lo que el gas debe inyectarse en el punto óptimo de la tubería y controlar el flujo del mismo inyectado bajo la descarga y las condiciones de operación

La ubicación de las válvulas de bombeo neumático en la configuración del flujo está influenciada por la presión de gas disponible para la descarga, el peso del fluido o gradiente de los fluidos en el pozo, el comportamiento de flujo del pozo, la presión superficial de retorno en la cabeza del pozo contra la cual los fluidos del pozo deben ser descargados y producidos, el nivel de fluido en la TR y considerar si el pozo se encuentra lleno con fluido de control así como la presión de fondo del pozo, y finalmente las características de producción.

En la mayoría de los casos esta información está disponible, sin embargo en algunas ocasiones el comportamiento de flujo dentro del pozo es desconocido, si este es el caso se deben hacer suposiciones basadas en el conocimiento del operador del pozo para llevar el diseño a la tasa de producción deseada. La selección de tal tasa de producción no significa que la instalación produzca lo diseñado, solamente sirve como un criterio para asegurar que la localización de la válvula sea capaz de descargar el pozo en el punto óptimo de operación mientras el pozo es alimentado por los fluidos.



Las instalaciones de bombeo neumático son lo suficientemente flexibles para ajustarse fácilmente para producir prácticamente a cualquier gasto. Si se supone un gasto alto sería necesario poner válvulas extras, aún así el comportamiento de la instalación será satisfactorio para un gasto de producción menor. Una suposición lógica del gasto asegura que el número de válvulas usadas y su ubicación en la tubería sean consistentes con las condiciones existentes en el pozo.

En las instalaciones de bombeo neumático la ubicación de todas las válvulas debe ser conocida para que los ajustes a la presión del domo se realicen en el taller de manera que puedan desarrollar el comportamiento deseado una vez que son instaladas.

#### **4.1 Diseño de bombeo neumático continuo**

En la figura 4.1 se muestra una instalación de bombeo neumático continuo, ésta presenta seis válvulas de inyección de gas en el pozo, las cuatro válvulas superiores son usadas como válvulas de descarga de los fluidos del pozo hasta alcanzar la quinta válvula, la cual es la válvula operativa; se cuenta con una válvula adicional más profunda que el punto de inyección y es instalada como medida de seguridad o por considerar variaciones futuras en las condiciones del pozo. Debido a que se cuenta con una válvula por debajo de la válvula operacional, el fluido de control en la TR se mantiene en un punto de balance entre la presión en la TR y la presión en la Tubería. Si no se cuenta con esta válvula en el pozo, el nivel del líquido en la TR se mantendrá a la profundidad de la válvula 5 (válvula operacional). Las 4 válvulas de descarga se mantienen sin operar hasta que sea necesaria nuevamente la descarga del pozo. Si los dispositivos de control inverso funcionan correctamente, el nivel del líquido en la TR no variará después de que se hayan alcanzado condiciones de estabilidad.

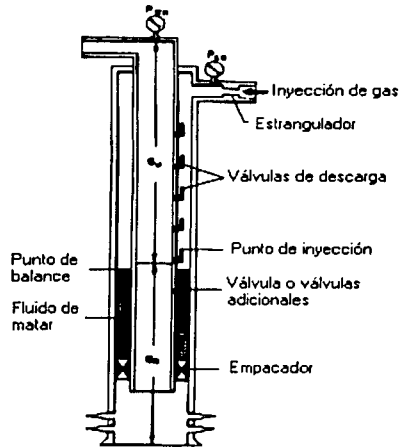


Fig. 4.1 Instalación de bombeo neumático continuo.

La figura 4.2 muestra los gradientes y las presiones involucradas en el bombeo neumático en un pozo. En esta ilustración se grafica la profundidad contra la presión.

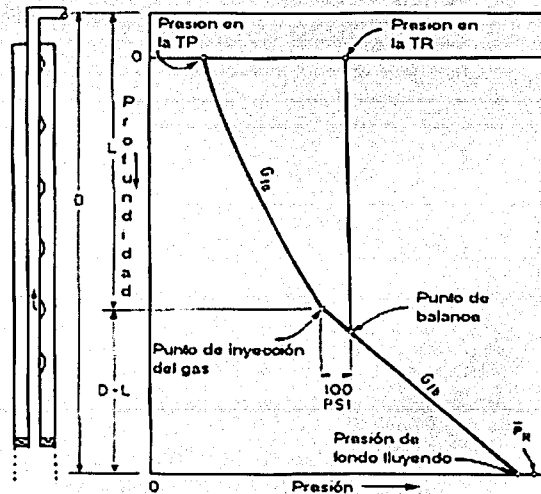


Fig. 4.2 Diagrama del perfil de presiones.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

La presión que presentan los fluidos se calcula comenzando desde la presión de fondo fluyendo en la parte más profunda del pozo y se dirige hasta la superficie. Se supone un gradiente de flujo promedio debajo del punto de inyección del gas y un gradiente de flujo promedio sobre el punto de inyección del gas; la presión de fondo fluyendo se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{wr} = P_{wh} + G_{fa} L + G_{fb} (D - L) \quad (4.1)$$

Donde:

- $P_{wh}$  = presión en la cabeza del pozo.
- $G_{fa}$  = gradiente promedio de flujo sobre el punto de inyección.
- $L$  = profundidad del punto de inyección del gas.
- $G_{fb}$  = gradiente promedio de flujo bajo el punto de inyección.
- $D$  = profundidad total de pozo.
- $P_{wr}$  = presión de fondo fluyendo.

Esta es la base del diseño para el bombeo neumático continuo, ya que éste necesita de la presión de fondo fluyendo para permitir al pozo producir los fluidos; lo hace mediante la inyección de gas en un determinado punto de manera tal que la presión necesaria para la descarga sea alcanzada. Factores como la presión de inyección disponible, el volumen de gas disponible, la configuración de los distintos diámetros de flujo, y presión superficial de flujo en la tubería influenciarán la producción.

## 4.2 Factores a considerar en el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo

### 4.2.1. Requerimientos de las válvulas para flujo continuo

Las válvulas de bombeo neumático continuo tienen características de operación diferentes a las válvulas de bombeo neumático intermitente, la principal diferencia es la característica de estrangulamiento para las válvulas de bombeo neumático continuo, en las

cuales el gas es inyectado desde la superficie y la válvula abre para permitir el flujo del mismo, si se necesita más o menos gas la válvula deberá responder a los ajustes realizados en la superficie, (presión en la TR) o a un cambio en la presión en la TP. Por lo tanto para condiciones de bombeo neumático continuo se pueden emplear válvulas operadas por presión de inyección así como válvulas operadas por fluido.

#### 4.2.2. Presión en el separador y presión de flujo en la cabeza del pozo

La presión en la superficie es un factor de diseño importante en el levantamiento de los fluidos bajo el esquema del bombeo neumático continuo, se debe conocer si el pozo debe o no ser descargado a la presión del sistema o a una presión menor para poder localizar la primera válvula. Se deben emplear correlaciones de flujo horizontal para obtener la presión necesaria para producir ciertas tasas de flujo desde la cabeza del pozo hasta el separador.

#### 4.2.3. Localización de la válvula superior.

Aunque en las instalaciones de bombeo neumático las válvulas superiores se usan únicamente para descargar el pozo, la localización de la válvula superior es extremadamente importante.

La válvula superior debe instalarse a una altura suficiente a la cual el pozo pueda ser descargado, y a una profundidad suficiente para que continúe siendo eficiente bajo las condiciones de operación.

#### 4.2.4. Volumen y presión del gas de inyección

Son dos los factores que permiten incrementar la producción de un pozo, la presión de inyección del gas y el volumen de gas inyectado. Conforme se tiene una mayor presión de gas disponible, el punto de inyección puede profundizarse progresivamente, causando un aligeramiento del gradiente de flujo en un punto cada vez más profundo.

Si se cuenta con un suministro ilimitado de gas, el gradiente mínimo se puede lograr en cualquier instalación para cualquier presión de gas.

Para los pozos con bombeo neumático continuo no se puede obtener un gasto de producción mayor si no se incrementa la presión de operación en la superficie. Una buena aproximación es recordar que un pozo puede ser puesto bajo flujo continuo a la siguiente profundidad para la mayoría de los tamaños de tuberías:

$$\text{Profundidad inyección} = \frac{P_{so} - P_{wh}}{0.15} \quad (4.2)$$

Para tuberías mayores a 4" y para flujo anular esta regla no se aplica debido al incremento en el gradiente de flujo.

#### 4.2.5. Temperatura de fondo y gradiente de temperatura fluyendo

Un factor importante en el diseño de cualquier instalación de bombeo neumático es la temperatura del pozo, tanto para el cálculo de las propiedades del fluido como para la calibración de las válvulas cargadas con domo de  $N_2$ . Cuando las válvulas sólo tienen resorte, la temperatura no afecta su calibración.

Para determinar la temperatura a lo largo de la tubería se tiene una solución rigurosa dada por Ramey, la cual ha sido incorporada en algunas correlaciones de flujo multifásico. Una gran desventaja de esta solución es que se requieren los valores correctos de los coeficientes de transferencia de calor para la TR, la TP, el espacio anular con varios fluidos así como para las formaciones de los alrededores. La mayoría de los diseñadores de instalaciones de bombeo neumático han supuesto un comportamiento lineal entre la temperatura de flujo en el fondo del pozo y la temperatura en la superficie, sin embargo existe una curvatura diferente entre la temperatura en el fondo y la temperatura en la superficie para pozos con altos gastos de flujo. Kirkpatrick ofrece una solución práctica a este problema, para pozos que caen dentro del rango de esta correlación los resultados son razonables.

#### 4.2.5.1. Solución de Kirkpatrick.

Kirkpatrick elaboró una correlación para predecir la temperatura dependiendo del gradiente geotérmico y del total del gasto del líquido. Su correlación es válida únicamente para tuberías de 2", 2 1/2", y 3" de diámetro. También se cuenta con un gasto límite de 2000 B/D. De conocer la temperatura en el fondo del pozo, el tamaño de la tubería y el gradiente geotérmico podemos obtener el gradiente de temperatura de flujo para el cual podemos obtener la temperatura de flujo en la superficie.

#### 4.2.5.2. Correlación de Shiu.

Shiu realizó un estudio de 370 pozos de diferentes áreas geográficas, el primer grupo contiene 219 pozos direccionales del Golfo de México; el segundo grupo contiene 41 pozos verticales de Alaska; un grupo de 110 pozos verticales del lago Maracaibo en Venezuela. La información en el primer grupo fue tomada del banco de datos de la universidad de Tulsa, mientras que los pertenecientes al segundo y tercer grupo fueron originalmente contabilizados en las gráficas de estudio de temperaturas para cada pozo.

Las bases del estudio fueron el uso de la ecuación general de energía que fue utilizada por Ramey en su aproximación al problema de transmisión de calor del pozo. La expresión general de la ley de conservación de la energía establece que el cambio total de energía en el sistema es la suma del cambio de la energía cinética, la energía potencial, la entalpía y la transferencia de calor debida al trabajo del flujo. Shiu comenzó con la siguiente ecuación:

$$dH + \frac{gdz}{g_c J} + \frac{udu}{g_c J} = dQ - \frac{dWf}{J} \quad (4.3)$$

Llegó a la ecuación final en la siguiente forma:

$$T_{\text{surf}} = T_{\text{BH}} - g_T z + g_T A - g_T A C^{(-z/A)} \quad (4.4)$$

La temperatura en superficie ( $T_{surf}$ ) es una función no lineal de  $z$  y de  $A$ . Shiu empleó una regresión lineal múltiple la cual ajusta la ecuación a la siguiente forma:

$$Y = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n \quad (4.5)$$

Finalmente llegó a una ecuación para determinar el valor de  $A$  el cual es:

$$A = e^{-5.065} W_1^{0.4882} d^{-0.3476} V_0^{0.2519} V_g^{7.724} P_T^{-2.915} P_{Tr}^{0.2219} \quad (4.6)$$

El método de Shiu se extiende más allá del rango de operación de Kirkpatrick, en esto es mejor para otros diámetros de tuberías y para todas las tasas de producción, así mismo los perfiles de temperatura obtenidos por Kirkpatrick fueron graficados como líneas rectas, mientras que los obtenidos por Shiu son curvas similares a los perfiles de temperatura generados por datos de campo.

#### 4.2.6. Configuración del diámetro de tuberías para los gastos de producción

La selección del correcto diámetro de las tuberías es importante tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista del gasto de producción.

Como una aproximación se muestra la siguiente tabla, la cual sirve como guía para determinar los gastos de flujo máximos posibles, así como los gastos mínimos a las cuales se deben procurar las operaciones de flujo continuo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<b>Diámetro de la tubería (pg)</b>	<b>Gasto mínimo de producción (bl/D)</b>	<b>Gasto máximo de producción (bl/D)</b>
1	25-50	350
1 ¼	50-75	600
1 ½	75-125	1,000
2	200-250	2,500
2 ½	350-500	3,000
3	500-750	4,000
4	1,000-1,500	10,000
5 ½	3,000-5,000	30,000
7	5,000-7,000	50,000

<b>Configuración anular. (pg)</b>	<b>Gasto mínimo de producción. (bl/D)</b>	<b>Gasto máximo de producción. (bl/D)</b>
5 ½ - 2 ¾	3,000	8,000
7 - 2 ¾	5,000	15,000
7 - 2 7/8	4,000	12,000
7 - 3 ½	3,500	10,000
9 ¾ - 3 ½	5,000	15,000
9 ¾ - 4	6,000	20,000
10 ¾ - 4	8,000	40,000
13 ¾ - 4	10,000	60,000

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



#### 4.2.7. Calibración de las válvulas

Debido a que las válvulas tienen diferentes condiciones de operación, sus ajustes de fábrica son diferentes. Estos ajustes de fábrica dependen de varios factores, incluyendo si la válvula es operada por presión o por fluido, cargada a presión o cargada por un resorte, o una combinación de éstas. La temperatura, la presión de la columna de gas, y la presión de la tubería afectan la calibración de las válvulas. Para asegurar que las válvulas no interfieran unas con otras se pueden fijar para abrir con una diferencia de 15-25 lb/pg<sup>2</sup>. entre cada válvula, aunque se pueden ajustar todas a la misma presión de superficie para abrir o a la misma presión de cierre. Esta disminución en la presión es la diferencia en la presión de operación en superficie de una válvula a la siguiente

Un diseño apropiado para la instalación de válvulas de fuelle puede ser con todas las válvulas a la misma presión de apertura en superficie o presión de cierre. Estas válvulas son sensibles a la presión en la TP, por lo que la válvula más profunda será la primera en abrir ya que se encuentra expuesta a la mayor presión de retorno de la columna de líquido actuando sobre ella.

Para poder calibrar las válvulas se puede recurrir a las siguientes ecuaciones estudiadas con anterioridad:

- Válvulas operadas por la presión en la TR.
  - Válvulas con fuelle y domo cargado de N<sub>2</sub>.
    - Ecuaciones 3.9, 3.21, 3.33.
  - Válvulas con fuelle, domo cargado de N<sub>2</sub> y resorte.
    - Ecuaciones 3.44, 3.45, 3.51.
- Válvulas operadas por el fluido.
  - Válvulas sin carga en el domo, con carga en el domo sin resorte o una combinación de resorte y carga en el domo.
    - Ecuaciones 3.62, 3.73, 3.75, 3.76.

- Válvula diferencial.
  - Ecuaciones 3.82, 3.84.

#### 4.2.8. Aproximaciones que pueden emplearse en el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo

Aunque se deben usar procedimientos detallados de diseño, en la mayoría de los casos las siguientes reglas de dedo darán una idea rápida de varios factores a considerarse en el diseño de instalaciones de bombeo neumático continuo.

1. Presión necesaria: 100 lb/pg<sup>2</sup> por cada 1000 pie de profundidad hasta 1500 lb/pg<sup>2</sup> con un máximo de 300 lb/pg<sup>2</sup> adicionales. Se han usado válvulas a presiones tan altas como 1800-2200 lb/pg<sup>2</sup>, pero para una vida adecuada del equipo no se recomienda tener presiones mayores a 1800 lb/pg<sup>2</sup>. Cuando se trata de orificio se puede emplear cualquier presión.
2. Volumen de gas necesario: 150-250 pie<sup>3</sup>/bl por cada 1000 pie. de elevación del fluido. En la actualidad las curvas de gradiente de flujo y computadoras permiten cálculos exactos de los volúmenes de gas necesarios.
3. Profundidad aceptable de inyección para el bombeo neumático continuo: (únicamente para tuberías de diámetro exterior de 2 3/8" y 2 7/8")

$$\text{Profundidad} = \frac{P_{so} - P_{wh}}{0.15} \quad (4.7)$$

4. Profundidad aceptable de inyección en el espacio anular para bombeo neumático continuo:

$$\text{Profundidad} = \frac{P_{so} - P_{wh}}{0.20} \quad (4.8)$$

$P_{so}$  = Presión superficial del gas de operación (lb/pg<sup>2</sup>).

$P_{wh}$  = Presión de flujo en la cabeza del pozo (lb/pg<sup>2</sup>).

5. Presión de gas en el fondo del pozo. Esta ecuación se desarrolló para un gradiente geotérmico de  $1.6^{\circ}\text{F}/1000$  pie, un gas con una densidad relativa de 0.65 y una temperatura en superficie de  $70^{\circ}\text{F}$ .

$$P_l = P_{so} + 2.3 \times \left( \frac{P_{so}}{100} \right) \times \left( \frac{L}{1000} \right) \quad (4.9)$$

$P_l$  = Presión del gas en el fondo.

$P_{so}$  = Presión de inyección en la superficie ( $\text{lb}/\text{pg}^2$ )

$L$  = Profundidad total de la columna del gas (pie)

6. En el bombeo neumático continuo normalmente se emplean las siguientes válvulas, es por esta razón que aquí se muestran las ecuaciones correspondientes a estas válvulas para poder determinar su comportamiento tanto en condiciones de operación (pozo) así como para su ajuste en el taller.

a. Válvulas de Fuelle con domo de  $\text{N}_2$  (tipo Camco)

Para las condiciones de operación se emplean las siguientes ecuaciones:

$$P_{vo} = \frac{P_d - P_l R}{1 - R} \quad (4.10)$$

$$P_{vc} = P_{vo}(1 - R) + P_l R \quad (4.11)$$

Para realizar los ajustes necesarios en el taller se emplean las siguientes ecuaciones:

$$P_o = \frac{P_d}{1 - R} \quad (4.12)$$

$$P_c = P_o(1 - R) \quad (4.13)$$

## b. Válvulas de resorte (tipo Teledyne)

Para las condiciones de operación se emplean las siguientes ecuaciones:

$$P_{vo} = P_{st} - \frac{P_t R}{1 - R} \quad (4.14)$$

$$P_{vc} = P_{st}(1 - R) \quad (4.15)$$

Para realizar los ajustes necesarios en el taller se emplean las siguientes ecuaciones:

$$P_o = P_{st} \quad (4.16)$$

$$P_c = P_{st}(1 - R) \quad (4.17)$$

Donde:

- $P_{st}$  Dato proporcionado por el fabricante.
- $P_{so}$  Presión superficial de apertura. Presión del gas de inyección en la superficie cuando la válvula abre.
- $P_{sc}$  Presión superficial de cierre. Presión del gas de inyección en la superficie cuando la válvula cierra.
- $P_{vo}$  Presión de apertura de la válvula. Presión del gas de inyección frente a la válvula cuando esta abre.  
 $P_{vo} = P_{so} + \text{Presión ejercida por la columna de gas.}$
- $P_{vc}$  Presión de cierre de la válvula  
 $P_{vc} = P_{sc} + \text{Presión ejercida por la columna de gas.}$
- $P_o$  Presión de apertura en el taller.
- $P_c$  Presión de cierre en el taller.
- $P_d$  Presión en el domo @ 60°F.
- $P_t$  Presión en la TP a la profundidad de la válvula cuando ésta abre.

R       $A_p / A_b$

#### 4.2.9. Uso de las correlaciones de flujo multifásico

Cuando sea posible se deben emplear las correlaciones de flujo multifásico para cada zona ya que estas son más exactas, así como incorporar los datos de campo y las propiedades de los fluidos obtenidas por análisis en los laboratorios. La mayoría de las compañías han elaborado curvas para poder trabajar que deben emplearse con cuidado ya que fueron elaboradas para condiciones de trabajo específicas y pueden no ser parecidas a las condiciones de trabajo en las que las queremos emplear y por tanto cometer un error para ciertas condiciones de flujo.

### **4.3 Procedimiento de diseño para instalaciones de bombeo neumático continuo**

Para el diseño de instalaciones de bombeo neumático continuo se debe obtener la siguiente información:

#### (1) Propiedades de los fluidos

- Densidad del aceite @ c.s.
- Densidad del agua @ c.s.
- Densidad del gas producido @ c.s.
- Fracción de agua.
- Relación gas-aceite.
- Viscosidad del crudo, tensión superficial, etc.

#### (2) Condiciones de trabajo

- Temperatura en la cabeza del pozo.
- Temperatura en el fondo del pozo.
- Profundidad media desarrollada de los disparos
- Temperatura y presión de separación.

- (3) Estado mecánico del pozo.
  - Profundidad del pozo.
  - Diámetros y longitudes de la TP y de la TR.
  - Presión y temperatura de separación.
  - Profundidad y tipo del empacador.
- (4) Datos de la prueba de producción.
  - Gasto de líquido.
  - Presión de fondo fluyendo.
  - Presión estática.
  - Presión de saturación.
- (5) Datos del bombeo neumático continuo.
  - Densidad relativa del gas inyectado.
  - Densidad relativa del fluido de control.
  - Temperatura de calibración en el taller.
  - Presión en la cabeza del pozo.
  - Presión de inyección del gas y volumen disponible del mismo en el pozo (a menos que sea especificado).
  - Volumen del gas de inyección.

Estos puntos son empleados en el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo, mientras más información se tenga mejor será el diseño de las instalaciones. En muchas ocasiones se tendrá falta de información, lo que no permitirá un diseño óptimo.

#### 4.3.1. Determinación del punto de inyección del gas y del gasto que puede producir un pozo cuando se inyecta cierta cantidad definida de gas

Una vez que se cuenta con suficiente información, el primer paso en el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo es determinar el punto de inyección del gas. En el procedimiento descrito a continuación se tiene que determinar el gasto de líquido que puede producir el pozo bajo bombeo neumático cuando se inyecta cierta cantidad de gas.

El siguiente procedimiento sirve como una guía para el diseño de las instalaciones.

1.- Con una ecuación de productividad se genera la curva de capacidad de flujo del pozo. Esto se hace para saber cual es el gasto máximo que puede aportar el pozo.

2.- En este procedimiento se toma el setenta por ciento del valor del gasto máximo y se divide en diez partes y para cada una de estas partes se calcula la RGA total empleando las siguientes ecuaciones:

$$Q_{gp} = Q_l \times RGA \quad (4.18)$$

$$Q_{gt} = Q_{gp} + Q_{gi} \quad (4.19)$$

$$RGA_t = Q_{gt} / Q_l \quad (4.20)$$

Donde:

- $Q_l$  Gasto de líquido.
- $Q_{gp}$  Gasto de gas producido.
- $Q_{gi}$  Gasto del gas de inyección.
- $Q_{gt}$  Gasto de gas total.
- $RGA_t$  RGA total.

3.- Para facilitar el procedimiento se recomienda graficarlo, por tanto en una hoja de papel milimétrico se traza la profundidad en el eje de las ordenadas con la profundidad de cero en la parte superior y la máxima profundidad en la parte inferior. La presión debe trazarse sobre el eje de las abscisas comenzando desde cero en la extrema izquierda del eje. Si se van a emplear curvas de gradiente las escalas necesitan ser las mismas

4.- Con las correlaciones de flujo multifásico o las curvas de gradiente y la  $RGA_t$  correspondiente a la décima parte del gasto que se está estudiando, se obtiene el perfil de presiones del fluido a lo largo del pozo, este perfil se debe trazar en la hoja de diseño (papel milimétrico) partiendo desde la presión en la cabeza del pozo a una profundidad de cero.

5.- Se calcula el gradiente de presión del gas de inyección el cual se traza desde la presión de operación en superficie y se extiende hacia la profundidad del pozo (respetando el

valor del gradiente) hasta intersectar la línea del perfil de presiones del fluido. Es decir estos dos gradientes se van comparando hasta que la presión del gradiente del fluido sea mayor que la del gas de inyección, y es en este momento en el que se realiza una interpolación lineal para encontrar el punto de equilibrio (mismo valor) entre estos gradientes. Al punto de equilibrio se le restan veinte metros lo que nos indicará la profundidad de inyección del gas y se calcula la presión correspondiente a este punto, la cual será la presión de inyección del gas. A partir del punto de inyección se usa la RGA natural del pozo para calcular el gradiente de presión del fluido producido hasta llegar al fondo del pozo para finalmente determinar la  $P_{wf}$  para el gasto producido.

6.- El procedimiento anterior se realiza para cada uno de los gastos a probar con la finalidad de obtener las distintas  $P_{wf}$ .

7.- Las distintas presiones de fondo fluyendo obtenidas se grafican ahora en la gráfica correspondiente a la curva de capacidad de flujo del pozo con lo que se obtiene la curva de afluencia. La intersección entre la curva de capacidad de flujo del pozo y la curva de afluencia será el gasto que el sistema puede manejar respecto a la presión de fondo fluyendo y al gasto de gas inyectado. Para obtener la intersección se usa un método de interpolación lineal. Si la curva de afluencia no interseca la curva de capacidad de flujo del pozo, entonces el pozo no es capaz de producir fluidos y por lo tanto se requiere más gas de inyección o realizar un análisis nodal para determinar que acción correctiva se debe llevar a cabo para poner a producir al pozo.

8.- A manera de comprobar si la interpolación llevada a cabo para determinar el gasto que puede manejar el pozo es correcta, se verifica que la presión de fondo fluyendo obtenida con el método de productividad sea prácticamente igual que la presión de fondo fluyendo obtenida con el análisis del comportamiento en el pozo. Para hacer esto se recurre a la curva de capacidad de flujo del pozo para determinar el valor de la  $P_{wf}$  el cual se compara con el valor de la  $P_{wf}$  obtenida con el análisis del comportamiento del pozo (procedimiento descrito anteriormente), estos valores se aceptan hasta que son iguales o se encuentren dentro de una tolerancia.



### 4.3.2. Determinación del espaciamiento de las válvulas

Las técnicas descritas a continuación solo son algunas de todas las técnicas posibles para el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo. Todos los métodos deben asegurar que el gas se inyecte en un solo punto después que se realice la descarga del pozo, este punto deberá ser el más profundo posible. Para hacer un diseño correcto, las válvulas deben colocarse de manera tal que permitan descargar el pozo desde la válvula operante. Se requiere un diseño apropiado de las válvulas para asegurar que cada una de ellas sea capaz de permitir la inyección suficiente de gas y que cada válvula abra y cierre a la presión correcta para permitir que el ciclo de inyección de gas de una válvula a la siguiente conforme el pozo se descargue sea el adecuado. Los procedimientos descritos a continuación involucran el diseño gráfico del sistema de bombeo neumático continuo y emplean gráficas de curvas de gradiente o correlaciones de flujo multifásico vertical, las cuales proveen la información básica de diseño, así como la predicción del comportamiento del pozo. Una vez que se termina el diseño, se llevan a cabo cálculos finales para proveer al fabricante de válvulas la información necesaria para que realice el ajuste correcto de presión de apertura y de cierre de las válvulas bajo condiciones de operación.

#### 4.3.2.1. Procedimiento gráfico para el espaciamiento de válvulas balanceadas

El espaciamiento de las válvulas en una instalación de bombeo neumático continuo depende de los siguientes factores:

- 1.- Tipo de válvula subsuperficial empleada.
- 2.- Descarga del pozo a la presa o a la batería (separador).
- 3.- Profundidad del nivel estático del fluido.
- 4.- Presión disponible para descargar el pozo (presión extra o presión normal del gas de inyección).
- 5.- Volumen disponible del gas de inyección durante la descarga del pozo.

Después de determinar el punto de inyección mediante el procedimiento descrito anteriormente, el espaciamiento de las válvulas balanceadas en una instalación de bombeo neumático se determina con el siguiente procedimiento con diferencial de presión:

Paso1.- Partiendo de la gráfica donde se determino el punto de inyección, trazar la línea de gradiente del fluido de control, partiendo de la presión en la cabeza del pozo ( $P_{wh}$ ), esta presión es igual a cero si el pozo descarga al quemador o presa y tiene un valor positivo si el pozo descarga al separador.

Paso2.- Extender esta línea hasta intersectar el gradiente de la presión disponible del gas de inyección, esta profundidad corresponde a la posición de la primera válvula. Reducir el gradiente de presión del gas de inyección en  $25 \text{ lb/pg}^2$  del punto de intersección determinado y trazar hacia abajo una línea paralela a la línea de gradiente de presión del gas de inyección. La línea del gradiente de la presión disponible del gas de inyección se obtiene al unir la presión superficial de operación con la presión de inyección del gas en la profundidad de inyección o mediante la ecuación 4.9

Paso3.- Desde el punto anterior, trazar una línea horizontal hasta intersectar la línea de gradiente de flujo arriba del punto de inyección.

Paso4.- Del punto de intersección anterior, trazar una paralela a la línea de gradiente del fluido de control hasta intersectar la línea de gradiente de presión disponible, esta profundidad corresponde a la segunda válvula.

Paso5.- Nuevamente se debe reducir el gradiente de presión del gas de inyección en  $25 \text{ lb/pg}^2$  del punto de intersección determinado y trazar hacia abajo una línea paralela a la línea de gradiente de presión del gas de inyección. Trazar una línea horizontal desde la posición de la válvula 2 a la izquierda, hasta intersectar la línea de gradiente de flujo, arriba del punto de inyección.

Paso6.- Desde este punto, trazar una línea paralela al gradiente del fluido de control, hasta intersectar la nueva línea de gradiente del gas determinado en el paso 5, esta profundidad corresponde a la válvula número 3

Paso7.-. Repetir el procedimiento descrito en los pasos 5, y 6 hasta alcanzar el punto de inyección del gas.

Paso8.- Colocar una o dos válvulas abajo del punto de inyección previendo posibles reducciones en la presión media del yacimiento y cambios en la productividad del pozo.

Paso9.- Trazar la línea de gradiente geotérmico desde la temperatura de flujo en la superficie hasta la temperatura de flujo en el fondo del pozo.

Paso10.- Determinar la temperatura correspondiente de cada válvula a la profundidad de colocación.

#### 4.3.2.2. Procedimiento gráfico para el espaciado de válvulas desbalanceadas

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

Paso1.- Partiendo de la gráfica donde se determino el punto de inyección adicionar 200 lb/pg<sup>2</sup> a la presión en la TP fluyendo en la cabeza del pozo y marcar este punto a la profundidad de cero. Trazar una línea recta desde este punto, al correspondiente punto de inyección del gas, esta línea representa la presión en TP de diseño.

Paso2.- Trazar la línea de gradiente del fluido de control, partiendo de una presión de cero o de la presión fluyendo en la cabeza del pozo, ya sea que el pozo descargue al quemador (presa) o al separador, hasta intersectar la línea de gradiente que corresponde a la presión disponible del gas de inyección, este punto determina la profundidad de la primera válvula.

Paso3.- Trazar una línea horizontal, desde el punto determinado en el paso anterior, hasta intersectar la línea que corresponde al gradiente de presión en la TP de diseño.

Paso4.- Desde la intersección anterior, trazar una paralela a la línea de gradiente del fluido de control hasta intersectar la línea correspondiente a la presión de operación del gas de inyección. Este punto determina la profundidad de la segunda válvula.

Paso5.- Repetir el procedimiento anterior entre los gradientes de presión en TP de diseño y la presión de operación del gas de inyección hasta alcanzar el punto de inyección.

Paso6.- Trazar un gradiente lineal entre la temperatura en la cabeza del pozo y la temperatura de fondo para conocer la temperatura a la que operará cada válvula.

Paso7.- Determinar la presión en TP de cada válvula a la profundidad correspondiente.

Paso8.- Tabular la presión en TP de diseño y la presión fluyendo en TP real para cada válvula a la profundidad correspondiente.

---

## Capítulo 5. Programa de cómputo

Como se vio anteriormente existen varios métodos para el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo, de correlaciones de flujo multifásico para predecir el comportamiento de los fluidos a través de las tuberías, así como una gran cantidad de correlaciones y por consiguiente de curvas de gradiente de presión para distintas condiciones de operación. Trabajar con toda esta información es muy laborioso; como el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo generalmente se realiza a través de métodos gráficos, se presenta una gran posibilidad de error debido a la falta de habilidad por parte del diseñador, error por causa de una deficiencia visual, cansancio, mala iluminación, etc.

El uso de programas de cómputo en la industria petrolera es una herramienta valiosa que facilita la tarea del ingeniero, que representa un ahorro significativo en el tiempo de diseño, así como brindarle la posibilidad de modificar (al menos en teoría), las condiciones de trabajo presentes en las instalaciones de manera que pueda diseñar las instalaciones ante distintos escenarios de producción y además con la posibilidad de realizar una gran cantidad de diseños y así seleccionar el más apropiado.

Es por lo mencionado anteriormente que surge la necesidad de hacer un programa de cómputo que realice el diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo, de manera eficaz, oportuna y confiable. El programa que se desarrolla en este trabajo, emplea distintas correlaciones de flujo multifásico para predecir el comportamiento de los fluidos a través de las tuberías, predice el perfil de presión del gas de inyección así como el gradiente de temperatura que se encuentra a lo largo de todo el pozo; además cuenta con las ecuaciones correspondientes para la predicción del comportamiento de las válvulas que se instalarán en el aparejo de producción, tanto a condiciones estáticas como a condiciones dinámicas.

El programa realiza un análisis del gasto que se puede obtener en un pozo al inyectar cierta cantidad de gas fijo; presenta la variación de realizar un análisis del gasto de líquido que se puede obtener en un pozo ante distintos gastos de inyección de gas, con la finalidad de mostrar la opción más rentable; para el cálculo de estas dos opciones se toma en cuenta la

curva IPR. Finalmente permite el cálculo de la presión de fondo fluyendo ante distintos gastos de producción del pozo, para el cálculo de esta última opción no se considera la curva de IPR, ya que las condiciones de producción son fijadas por el usuario.

En la parte correspondiente al diseño de las instalaciones de bombeo neumático continuo, el programa realiza el cálculo del punto de inyección del gas, así como el espaciamiento de las válvulas de inyección para las condiciones de operación, más adelante se dará una explicación más detallada de las opciones de cálculo del programa.

El programa se desarrolló en dos lenguajes de programación, una parte se programó en FORTRAN 95, debido a la exactitud y rapidez que presenta este lenguaje al realizar operaciones matemáticas, mientras que segunda parte relativa a la interfaz del usuario así como a ciertas operaciones matemáticas se programó en Visual Basic 6.0, con lo que se le da al programa una fortaleza en su interfaz gráfica, además de representarle un ambiente amigable y familiar al usuario (finalmente ambiente Windows). La comunicación entre estos dos lenguajes se realiza mediante una librería dinámica (dll), lo que le da al programa una gran velocidad de procesamiento de la información.

Para ahondar en esta explicación cabe mencionar que el cálculo del gradiente de presión de los fluidos, la determinación del punto de inyección, la presión en el punto de inyección, el cálculo de la presión de fondo fluyendo, así como el cálculo de la curva de capacidad de flujo del pozo se realizan en la parte programada en Fortan 95, mientras que la calibración de las válvulas, así como la parte relativa al análisis del comportamiento dinámico de las válvulas se programó en Visual Basic 6.0.

Con este programa se puede realizar el diseño de instalaciones de bombeo neumático continuo de manera fácil y rápida, solamente es necesario alimentarlo con cierta información y obtener los resultados.

## 5.1 Características del programa

El programa tiene dos opciones principales de cálculo:

1. Bombeo neumático continuo.
2. Pozo fluyente.

En la primera opción se realiza el diseño de las instalaciones, por lo que se requiere una gran cantidad de información. El programa tiene la posibilidad de realizar el espaciamiento de las válvulas mediante dos métodos:

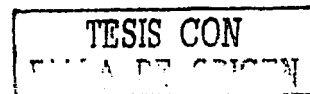
- Método de espaciamiento universal.
- Método de diferencial de presión.

Dentro de la primera opción de cálculo se tienen tres opciones más para el análisis de las instalaciones de bombeo neumático. La primera realiza el diseño de las instalaciones para un gasto de inyección (Considera la curva IPR). La segunda obtiene los gastos del líquido producido ante distintos gastos de inyección de gas, con lo que se puede realizar el diseño para el gasto de inyección de gas más rentable (Considera la curva IPR). Y la tercera opción calcula la presión de fondo fluyendo ante un gasto inicial de líquido producido con los incrementos y la cantidad de veces deseadas, con lo que se obtienen distintas profundidades de inyección del gas y por consiguiente todo un nuevo diseño de las instalaciones. (Sin considerar la curva IPR). Para la parte correspondiente a la calibración de las válvulas se determinan las condiciones estáticas a las cuales se deben ajustar estas en el taller para su correcto funcionamiento dentro del pozo. Finalmente para el análisis del comportamiento dinámico de las válvulas se procede a obtener las condiciones de operación dinámicas a las que estas operan. En esta opción se obtiene este comportamiento para los tres tipos de válvulas incluidos en el programa:

- Con domo cargado de  $N_2$ .
- Operadas por resorte.
- Operadas por fluido.

Y solo para algunos modelos y algunas características físicas de las mismas (diámetro del asiento). Esta limitante se debe a que no se han realizado los estudios necesarios para otros tipos de válvulas:

- Camco-R20.
- Camco BK.
- Teledyne Merla NM-16R.
- McMurry Hughes JR-STD.
- Camco BK-1



En la segunda opción se obtiene el comportamiento de los fluidos a través de la tubería de producción (perfil de presión) así como el gasto de líquido producido, ya sea de forma ascendente o de forma descendente y como sólo se está calculando el comportamiento del pozo, en esta opción no es necesario introducir la información correspondiente al bombeo neumático.

## 5.2 Información necesaria

Para poder diseñar las instalaciones de bombeo neumático continuo es necesario predecir el comportamiento de los fluidos a través de la tubería de producción, y las modificaciones que estos sufren al adicionarle el gas de inyección, por lo que se requiere de la siguiente información:

- Información obtenida de los instrumentos instalados en el campo, para medir presiones, temperaturas y gastos, así como la información obtenida de pruebas de producción.
- Características mecánicas del sistema, (condiciones de operación) como son diámetros de la TP y de la TR, longitudes de las mismas, así como las secciones de desviación dentro del pozo, y finalmente el tipo de válvula que se instalará para poner a producir el pozo.



- Propiedades de los fluidos producidos, las cuales se obtienen en el laboratorio mediante el análisis de los mismos.
- Las características propias del sistema de bombeo neumático, como son los gastos de inyección de gas que se aplicarán, las caídas de presión en las válvulas, presiones de operación, sólo por mencionar algunas.
- Las correlaciones PVT, así como las correlaciones de flujo multifásico.

La exactitud en los resultados obtenidos dependerá de la calidad de los datos con los que se alimente al programa.

#### 5.2.1. Datos requeridos para el uso del programa

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para el estudio de bombeo neumático continuo se requiere la información referente a las propiedades de los fluidos, correlaciones PVT que se emplearán, condiciones de trabajo, estado mecánico del pozo, información de la prueba de producción, datos del sistema de bombeo neumático, tipo de espaciamento de las válvulas, así como la selección de la opción de cálculo que se quiere realizar. Para la calibración de las válvulas así como para el estudio referente al comportamiento dinámico de las válvulas se requiere seleccionar el tipo de válvula así como las condiciones de operación de estas.

Para el estudio de pozo fluyente es necesaria la información referente a las propiedades de los fluidos, datos PVT, condiciones de trabajo, estado mecánico del pozo, información de la prueba de producción, así como indicar si se quiere que el cálculo del comportamiento del pozo se realice de forma ascendente o descendente.

### **5.3 Programa**

Este programa respecto a otros programas de bombeo neumático tiene la opción de obtener el comportamiento dinámico de las válvulas, así como la determinación del comportamiento de los fluidos a través de la tubería de producción de forma ascendente para la opción de pozo fluyente.

### 5.3.1. Sistema de unidades

El programa ofrece la facilidad de escoger un SISTEMA DE UNIDADES para los datos que se van a introducir, si las unidades requeridas no están dentro de un sistema establecido, el usuario tiene la posibilidad de elaborar un sistema de unidades personalizado.

Los datos similares (presiones, temperaturas, etc.) cambiarán a la unidad elegida; pero en caso de que se requiera un dato con diferente unidad a la especificada inicialmente, cada pantalla se podrá realizar el cambio a la unidad deseada.

Los sistemas de unidades disponibles son:

- Sistema Petrolero
- Sistema Inglés
- Sistema Métrico
- Sistema Internacional
- Sistema Personalizado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Si se desea una unidad en especial para algún dato, éste debe ser cambiado después de seleccionar el sistema de unidades.

### 5.3.2. Introducción de la información en el orden necesario para realizar una simulación

Para facilidad del usuario, los botones de comando que le permiten a éste introducir la información necesaria al programa se irán habilitando en el orden apropiado de acuerdo a la opción de cálculo que se haya seleccionado, pero para una mayor comprensión del orden para introducir la información a continuación se describe el procedimiento que se debe seguir.

### 5.3.2.1. Ventana de inicio y ventana principal

La primera ventana que aparece al ejecutarse el programa (ventana de inicio, Fig. 5.1) muestra la información referente al programa, después de unos segundos esta ventana se cierra y se muestra la ventana principal del programa, Fig. 5.2.



Fig. 5.1 Ventana de inicio.

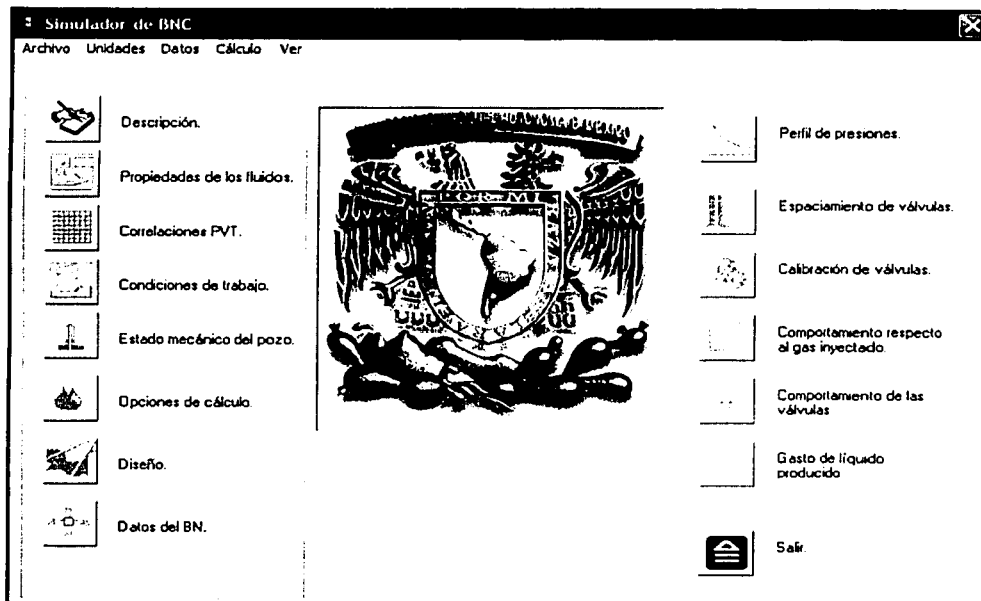
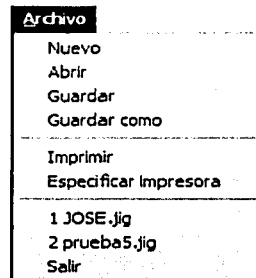


Fig.5.2 Ventana principal.

En esta ventana se encuentra la barra de menús así como los botones de comando, los cuales permiten el acceso a las distintas aplicaciones que componen el programa. En la barra de menús se encuentran los menús de Archivo, Unidades, Datos, Cálculo, Ver

Para iniciar un nuevo proyecto es necesario hacer click en el menú Archivo, Nuevo. Fig. 5.3, si se desea abrir un archivo ya existente se puede hacer click en el menú Archivo, Abrir o también se puede abrir un archivo ya existente si éste se encuentra en la lista de últimos archivos consultados.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.3 Menú Archivo.

Las demás opciones que se tienen en el menú archivo no se explican ya que estas funcionan de la misma forma en que lo hacen en los demás programas basados en el ambiente Windows.

En el menú de las unidades es donde se selecciona el tipo de unidades a emplearse durante el estudio, Fig. 5.4.



Fig. 5.4 Menú del sistema de unidades

El menú de los datos nos muestra las mismas opciones para introducir la información que los botones que se encuentran en la pantalla de la ventana principal, estos submenús al igual que los botones de la ventana principal se van habilitando conforme se va introduciendo la información, Fig. 5.5

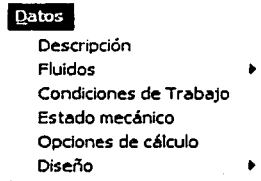
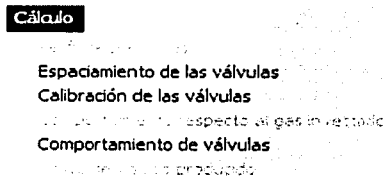


Fig. 5.5 Menú Datos

El menú cálculo nos indica los análisis a los que tenemos acceso en función del tipo de estudio que se esta realizando, los submenús en este menú se van habilitando conforme se va avanzando en el análisis, Fig. 5.6.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.6 Menú Cálculo

El menú ver nos da acceso a los reportes que se elaboran después que se ha realizado un estudio, por lo que estos estarán en función del tipo de estudio que se este analizando, Fig. 5.7.

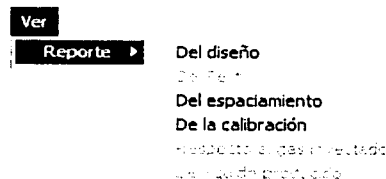

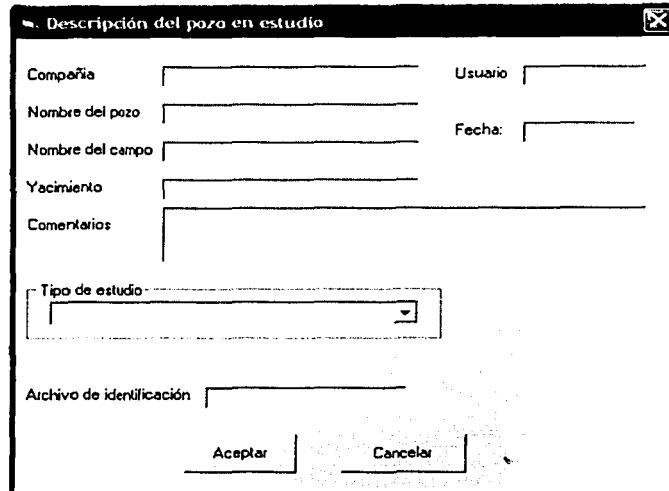


Fig. 5.7 Menú ver

### 5.3.2.2. Ventana de descripción del pozo en estudio

Una vez que se inicia un estudio se habilita el botón  Descripción y el menú correspondiente a la descripción del pozo en estudio, con lo que se tiene acceso a la ventana que se muestra a continuación.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN


Fig. 5.8 Ventana de descripción.

En esta ventana se introduce la información que identificará el estudio realizado, se introduce la información relativa a la compañía para la cual se realiza el estudio, el nombre del pozo que se está estudiando, a que campo pertenece, así como el yacimiento en el que se localiza, además se cuenta con espacios para introducir el nombre del usuario que llevó a cabo el estudio, así como la fecha la cual será la que tiene internamente la computadora. En caso de editar un archivo ya existente, la fecha será aquella en la cual se creó el archivo de datos.

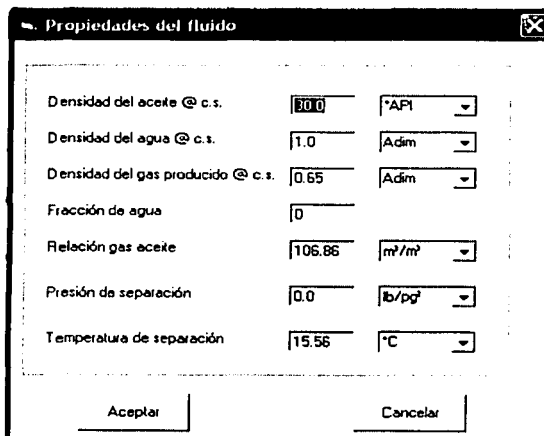
El espacio correspondiente a los comentarios, en este espacio el usuario tiene la posibilidad de escribir una nota para identificar su problema rápidamente. Cuando se está

creando un archivo nuevo, estos espacios aparecen vacíos, en caso de editar un archivo ya existente, su contenido será el que se ingresó en la última edición.

En esta ventana se selecciona el tipo de estudio que se quiere realizar (bombeo neumático continuo o pozo fluente), así como el nombre del archivo de identificación.

Al aceptar la información introducida se habilita el botón  Propiedades de los fluidos, y el menú correspondiente a las propiedades de los fluidos con lo que se tiene acceso a la siguiente ventana.

### 5.3.2.3. Ventana de propiedades del fluido



Propiedades del fluido		
Densidad del aceite @ c. s.	800	*API
Densidad del agua @ c. s.	1.0	Adm
Densidad del gas producido @ c. s.	0.65	Adm
Fracción de agua	0	
Relación gas aceite	106.86	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Presión de separación	0.0	lb/pg <sup>2</sup>
Temperatura de separación	15.56	*C
Aceptar		Cancelar


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.9 Ventana de propiedades del fluido.


A continuación se da una breve descripción de la información de esta ventana:

- Densidad del aceite.- Es la densidad que tiene el aceite a la presión atmosférica.
- Densidad del agua.- Es la densidad del agua que se produce asociada con el aceite.

- Densidad del gas producido.- Es la densidad del gas asociado con el aceite producido, medida generalmente en la última etapa de separación y reportada a condiciones estándar.
- Fracción de agua.- Es la cantidad de agua, en fracción, que se tiene presente en la corriente del fluido producido.
- Relación gas aceite.- Es el gasto total de gas (gas libre más gas disuelto) medido a condiciones estándar entre el gasto de aceite a condiciones estándar.
- Presión de separación.- Es la presión a la cual se encuentran sometidos los fluidos dentro del separador, en el momento de medir la densidad del gas producido.
- Temperatura de separación.- Es la temperatura a la cual se encuentran sometidos los fluidos dentro del separador, en el momento de medir la densidad del gas producido.

Una vez introducidos los datos en esta ventana, se habilita el botón  Correlaciones PVT. y el menú correspondiente a las correlaciones PVT con lo que se muestra la ventana de la Fig. 5.10.

#### 5.3.2.4. Ventana de las propiedades PVT

En esta ventana se seleccionan las correlaciones que se desean emplear para determinar las propiedades PVT de los fluidos. En ella se destaca la posibilidad de realizar el cálculo de la relación de solubilidad para la región marina; para el cálculo de la viscosidad del aceite se tiene la posibilidad de obtenerla para datos de laboratorio, una vez que se ha introducido la información necesaria para el cálculo de las propiedades PVT se habilita el botón  Condiciones de trabajo. y el menú correspondientes a las condiciones de trabajo del pozo, con lo que se tiene acceso a la ventana de la Fig. 5.11.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Correlaciones PVI

Selección del cálculo de las propiedades

**Correlaciones**

Cálculo de Bo

- Vázquez-Beggs
- Distein-Glaso
- Standing
- Zona marina

Relación de solubilidad

- Lasater
- Standing
- Vázquez-Beggs
- Distein-Glaso
- Zona marina

Viscosidad del aceite

- Beggs-Robinson
- Beal-Chew-Connally
- Distein-Glaso
- Datos de laboratorio

Viscosidad del gas

- Lee
- Carr

Compresibilidad del gas

- Hall-Yarborough
- Benedict et al
- Dranchuk-Abou Kesseem

Campo de relación

- Akal-Nohoch-Chac
- Abkatun-Pol-Chuc
- Ku
- Chiapas-Tabasco

Viscosidad y temperatura de laboratorio

Viscosidad 1

Temperatura 1

Viscosidad 2

Temperatura 2

Aceptar Cancelar

Fig. 5.10 Ventana de opciones PVT

### 5.3.2.5. Ventana de las condiciones de trabajo

Condiciones de trabajo

Temperatura en la cabeza del pozo  °C


Temperatura en el fondo del pozo  °C

Profundidad media desarrollada de los pozos  m

Aceptar Cancelar

Fig. 5.11 Ventana de condiciones de trabajo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Una vez introducida la información correspondiente a las condiciones de trabajo, se habilita el botón  Estado mecánico del pozo y el menú correspondiente al estado mecánico del pozo Fig. 5.12.

### 5.3.2.6 Ventana del estado mecánico del pozo

En esta ventana se indican las variaciones de profundidad y de diámetro que se tienen en el pozo, tanto para la TP, como para la TR; además también se indica la desviación que tiene el pozo, esto se hace al marcar la diferencia entre la profundidad vertical y la profundidad desarrollada. Para facilitar la selección de los diámetros de la tubería, el programa tiene una base de datos con los diámetros de TP, de TR y su peso usados en el campo.

Estado mecánico del pozo

Diámetros en la TP    Diámetros de TR, liners    Secciones de desviación

No. de diámetros 3

D.E.	Peso	D.I.
1.05	1.2	0.824
1.315	1.8	1.049
1.66	2.4	1.38
1.9	2.9	1.61

TP	D.E.	Peso	D.I.	Prof. Superior	Prof. Inferior
1	4.5	12.75	3.958	0	1908.37
2	5.5	17	4.892	1908.37	3524.61
3	4.5	12.75	3.958	3524.61	3687.5



Tipo de unidades


Diámetro: pg    Peso: lb/pie    Profundidad: m

Aceptar    Cancelar

Fig. 5.12 Ventana del estado mecánico del pozo.

### 5.3.2.7. Ventana de las opciones de cálculo y la ventana de las opciones de diseño

Cuando ya se ha introducido la información del estado mecánico y si el tipo de estudio que se está realizando es el de bombeo neumático continuo, entonces se habilita el botón  Opciones de cálculo, y el menú correspondiente a las opciones de cálculo, Fig. 5.13. En caso de que el estudio que se esté realizando sea el de un pozo fluyente se activara el botón  Diseño, y el menú correspondiente a las opciones de diseño, Fig. 5.14.

En la ventana de opciones de cálculo se presentan tres opciones de análisis dentro del estudio de bombeo neumático continuo, las dos primeras toman en cuenta la curva IPR, mientras que la tercera no. La primera opción obtiene el punto de inyección en un pozo para un gasto de inyección de gas establecido, la presión en ese punto, así como el gasto de líquido que el pozo puede producir, por lo que para esta opción es necesario introducir el gasto del gas de inyección. Para la segunda opciones obtiene el gasto de líquido que un pozo puede producir para un grupo de gastos de inyección de gas, por lo que en esta opción no es necesario introducir ningún dato en la ventana de opciones de cálculo. La tercera opción obtiene la presión de fondo fluyendo ante la inyección de un cierto volumen de gas, la diferencia es que el gasto producido se va variando por un cierto incremento durante un determinado número de veces, toda esta información es introducida al programa por el usuario. En caso de que se haya seleccionado la tercera opción, entonces es necesaria la información relativa al gasto del gas de inyección, al gasto inicial del líquido, al incremento de gastos del líquido, y al número de incrementos para los cuales se quiere realizar el análisis. Una vez que se introduce la opción deseada y se hace click en el botón de aceptar se habilita el botón  Diseño, y el menú correspondiente a las opciones de diseño.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

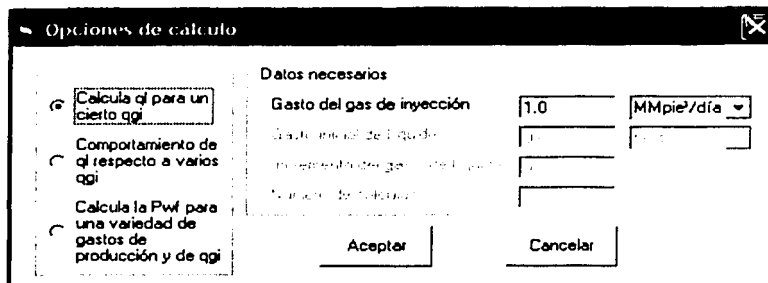


Fig. 5.13 Opciones de cálculo.

En la ventana de diseño Fig. 5.14 se decide que correlación de flujo multifásico se va a emplear para calcular el comportamiento de los fluidos a través de la tubería. Los botones que se habilitarán en esta ventana dependen del tipo de estudio que se está realizando. Si se trata de un estudio de bombeo neumático continuo se habilitarán los botones correspondientes a la información de la prueba de producción y a la información propia del bombeo neumático, se debe recordar que si se seleccionó la opción tres en la ventana de opciones de cálculo, entonces el botón relativo a la prueba de producción no se encontrará habilitado ya que no se toma en cuenta la curva IPR. Si el estudio es el correspondiente a un pozo fluyente, se habilitarán los botones correspondientes a la información de la prueba de producción.

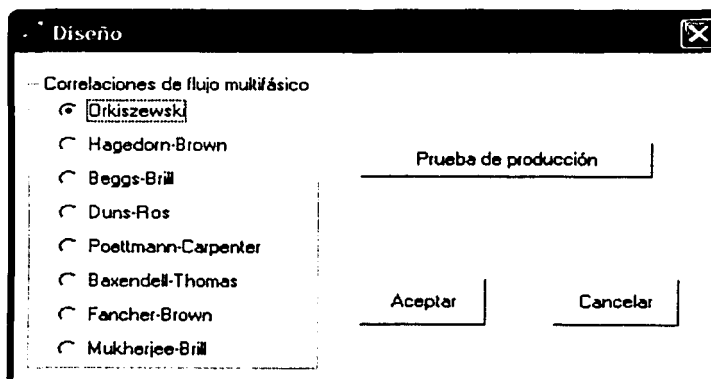


Fig. 5.14 Ventana de opciones de diseño.

Cuando se ha llenado la información correspondiente en todas las ventanas anteriores, se pueden comenzar a realizar los cálculos correspondientes a las opciones del estudio establecidas en la ventana de descripción del estudio.

#### 5.3.2.8. Ventana del perfil de presiones

Si se trata de un estudio de un pozo fluyente, entonces se habilita el botón



Perfil de presiones.

y el menú correspondiente al perfil de presiones, con lo que se tiene acceso a la ventana del perfil de presiones, Fig. 5.15 y es en ésta donde se establece la presión que se tiene en la cabeza del pozo, en caso de que el estudio se desee realizar en forma descendente o la presión en el fondo del pozo, en caso de que el estudio se desee realizar en forma ascendente. Para obtener el perfil de presiones dentro del pozo se hace click en el botón calcular, los resultados se tabulan y se grafican para una mejor comprensión del comportamiento del perfil de presión de los fluidos a través de la tubería. Al hacer click en el botón de aceptar se concluye el estudio correspondiente a un pozo fluyente.

Una vez que se ha realizado el estudio, se tiene la posibilidad de ver el reporte relativo a las condiciones de trabajo del caso en estudio y el del perfil de presiones a través de la tubería, estos se consultan al hacer click en el menú Ver, Reporte, Del diseño y en el menú Ver, Reporte, Del perfil respectivamente como se muestra en la figura 5.16. Estos reportes se pueden ver en el apéndice B.1 y en el apéndice B.2. Estos menús se han habilitado gracias a que ya se ha introducido la información y a que se ha realizado un análisis.

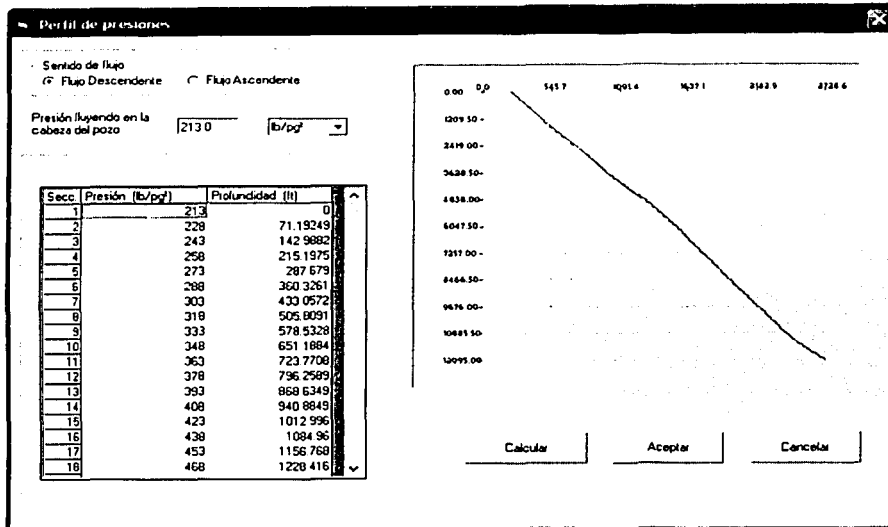


Fig. 5.15 Ventana del perfil de presiones.

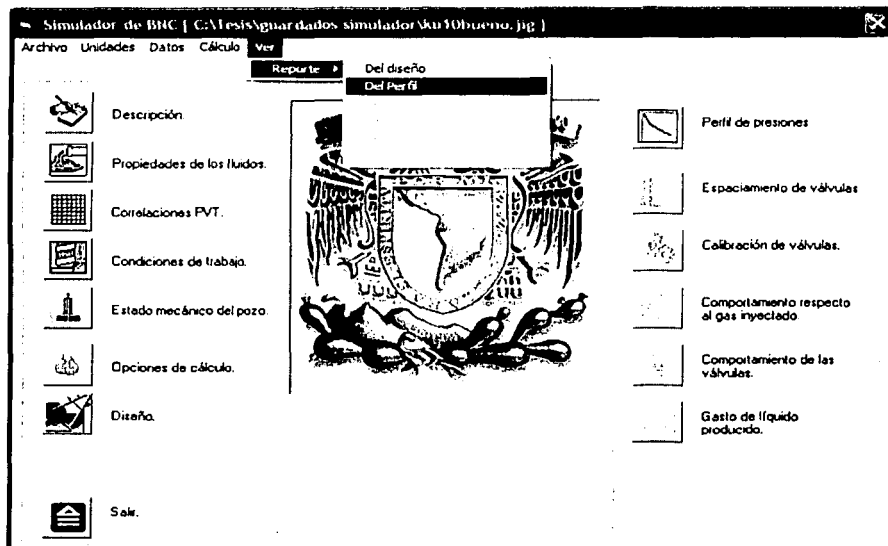



Fig. 5.16. Ventana para consultar el reporte del estudio realizado.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.3.2.9. Ventana del espaciamiento de las válvulas

Si se trata de un estudio de bombeo neumático continuo y se ha seleccionado la primera opción en la ventana de opciones de cálculo, entonces se habilita el botón  Espaciamiento de válvulas, y el menú correspondiente al espaciamiento de las válvulas, con lo que se tiene acceso a la ventana de espaciamiento de las válvulas Fig. 5.17. En esta ventana se selecciona el método de espaciamiento de las válvulas que se desea:

- Espaciamiento universal.
- Espaciamiento con diferencial de presión

Si se selecciona el espaciamiento con diferencial de presión, entonces es necesario introducir el valor de esa diferencial, esto se hace en esta misma ventana.

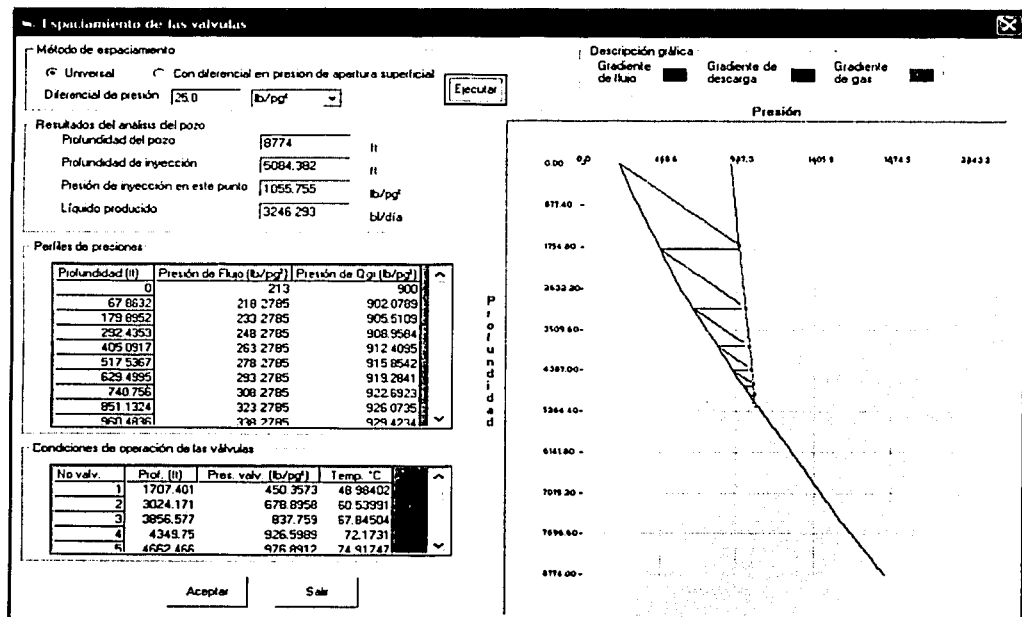


Fig. 5.17 Ventana del espaciamiento de las válvulas.




TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Al hacer click en el botón ejecutar se calcula la profundidad del punto de inyección del gas, la presión que se tiene en este punto, el gasto producido de líquido, así como el perfil de presiones a través de la tubería ya considerando el gas de inyección. Se tabula este perfil de presión a través de la tubería así como el perfil de presión del gas de inyección y como información adicional el perfil de presión del fluido de control; además se obtiene el espaciamento de las válvulas y se tabula la profundidad, presión y temperatura que tendrá cada una de estas dentro del pozo.

Toda la información anterior se grafica, la línea negra indica el perfil de presión de los fluidos dentro del pozo, la línea verde indica el perfil de presión del gas de inyección, mientras que la línea roja indica el perfil de presión del fluido de control. Los puntos azules indican la presencia de una válvula.

Para el espaciamento de las válvulas se toma en cuenta la restricción de la existencia de un diferencial de presión entre cada una de ellas de  $25 \text{ lb/pg}^2$ , con lo que se garantiza que no se tenga interferencia entre las válvulas y con lo que a su vez se reduce el número de válvulas necesarias. Una vez que se ha realizado el espaciamento de las válvulas se pueden consultar los resultados al hacer click en el menú Ver, Reporte, Del espaciamento. Este reporte se puede ver en el apéndice B.3. Aquí también se pueden consultar las condiciones de trabajo del caso en estudio.

### 5.3.2.10. Ventana del comportamiento respecto al volumen de gas inyectado

Si se ha seleccionado la opción dos en la ventana de opciones de cálculo, entonces se habilita el botón  Comportamiento respecto al gas inyectado y el menú correspondiente al comportamiento respecto al gas inyectado. Al hacer click en este botón, se realiza el cálculo del gasto del líquido ante distintos gastos de gas de inyección con lo que se tiene acceso a la ventana de comportamiento respecto al volumen de gas inyectado, Fig. 5.18. En esta ventana también se grafica la profundidad contra el gasto del gas de inyección, el usuario debe hacer click en el botón correspondiente al cambio de gráfica  o bien . En esta ventana



se debe seleccionar el gasto para el cual se desea realizar el espaciamiento de las válvulas, esto se logra al hacer click en el volumen del gasto de inyección deseado o al introducirlo directamente en el espacio correspondiente al gasto del gas de inyección; una vez hecho esto es necesario hacer click en el botón **Realizar el espaciamiento** para realizar el espaciamiento con lo que se cierra esta ventana y se presenta nuevamente la ventana principal en la que se tiene que hacer click al botón del espaciamiento de las válvulas **Espaciamiento de válvulas** y continuar con la metodología descrita anteriormente para este fin. Para poder consultar los resultados respecto al volumen de gas inyectado, es necesario hacer click en el menú Ver, Reporte, Respecto al gas inyectado, en la ventana principal. Este reporte se puede ver en el apéndice B.4.

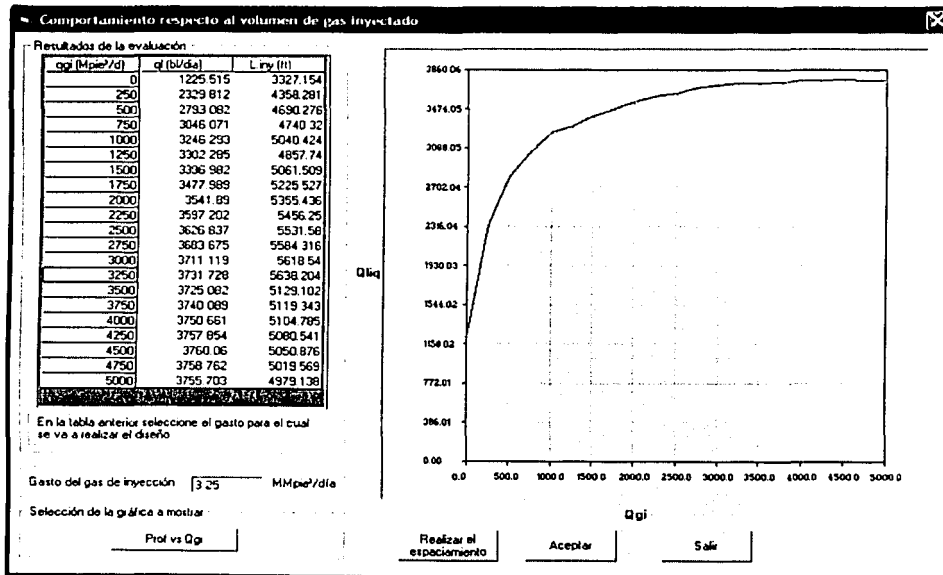



Fig. 5.18 Ventana del comportamiento de la producción respecto al gas inyectado.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.3.2.11. Ventana del gasto de líquido producido v.s. profundidad de inyección

Si se ha seleccionado la tercera opción en la ventana de opciones de cálculo, entonces se habilita el botón  Gasto de líquido producido. y menú correspondiente al gasto de líquido producido. Para esta opción no se toma en cuenta la IPR y es por esto que la información necesaria para esta opción se introduce en la ventana de opciones de cálculo.

En esta ventana se tabula y grafica la información correspondiente a la Pwf y a la profundidad de inyección correspondiente al gasto de líquido producido, ver Fig. 5.19

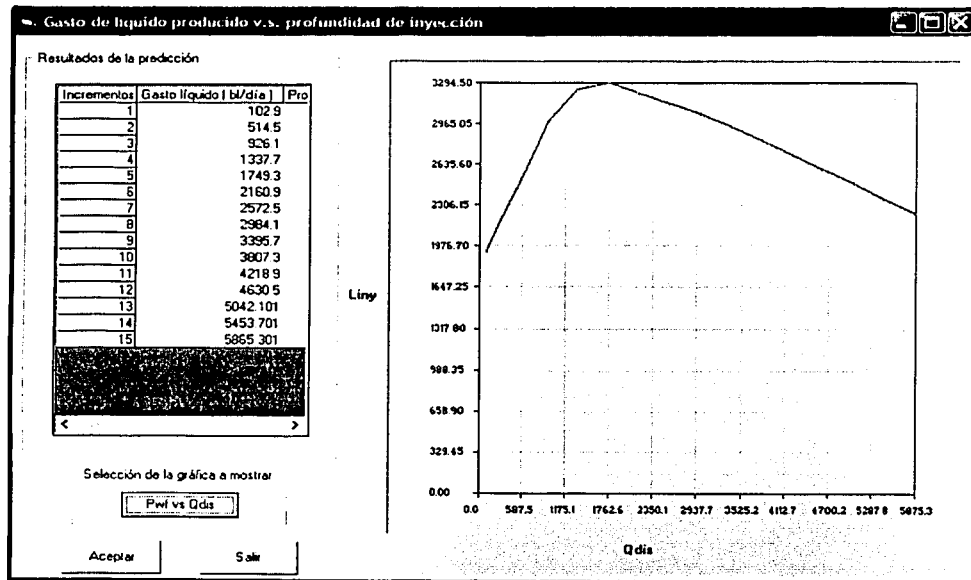



Fig. 5.19 Ventana del gasto del líquido producido vs la profundidad de inyección.

Para consultar el reporte de este estudio es necesario hacer click en el menú Ver, Reporte, Del líquido producido en la ventana principal. Este reporte se puede ver en el apéndice B.5

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.3.2.12. Ventana de la calibración de las válvulas

Una vez que se ha realizado el espaciamento de las válvulas se habilita el botón  y el menú correspondiente a la calibración de válvulas, con lo que se tiene acceso a la ventana de calibración de válvulas en la que se determinan las condiciones estáticas a las que se deben ajustar las válvulas para las condiciones de trabajo consideradas. En la calibración de válvulas se determina la presión de apertura, de cierre de las válvulas y la presión de apertura en el taller, así como las profundidades ajustadas en que éstas se deben instalar. Para realizar la calibración de válvulas es necesario hacer click en el botón de calibrar válvulas. Fig.5.20.

**Calibración de las válvulas**

Información referente a las válvulas.

Número de válvulas:

No valv	Prof. (ft)	Pres. valv (lb/pg <sup>2</sup> )
1	1716.429	956.2137
2	2686.782	989.3619
3	3497.618	1017.649

**DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO**

MÉTODO DE ESPACIAMIENTO: UNIVERSAL

DATOS DE LA VÁLVULA

VALVULAS CAMCO TIPO J-40 (CONVENCIONALES)

DIAM. EXT. DE LA VÁLVULA: 1 pg. ÁREA DE FUELLES: 0.31 pg<sup>2</sup>

DIAM. DE ORIFICIO: 1/8 pg. PASO DE GAS: 231.09 MPCC

$R(Av/Ab) = .0429$   $(1 - R) = .9571$

Válvula N°	Profundidad	Tv	Pso	Pvo	Pip	Pvc	Psc	Pd	Pto	
Des. Vert.	dis	dis	dis	dis	=Pd		@16.0°C			
M	M	°C	PSI	PSI	PSI	PSI	PSI	PSI	PSI	
1	536.1	523.3	91.2	885	942	573	928	873	785	820
2	889.1	819.1	94.8	885	975	783	965	877	811	850
3	1124.2	1066.3	97.7	885	1003	963	997	860	833	875

Válvula N°	Profundidad	Tv	Pip	Pvo	Pso	Pvc	Psc	
Des. Vert.	real	real	=Pd					
M	M	°C	PSI	PSI	PSI	PSI	PSI	
1	536.1	523.3	91.2	565	944	888	928	873

Fig. 5.20 Ventana de calibración de válvulas.

El resultado de la calibración de las válvulas además de mostrarse en esta ventana también se puede consultar en el menú Ver, Reporte, De la calibración. Este reporte se puede ver en el apéndice B.6

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.3.2.13. Ventana de la caracterización dinámica

Una vez que se realizó el análisis de las válvulas para condiciones estáticas se habilita el botón y el menú correspondiente al comportamiento dinámico de las válvulas. En esta ventana se determina el tipo de válvula que se quiere analizar; para las válvulas de domo cargado es necesario determinar la temperatura a la que ésta trabaja para poder aplicarle el factor de corrección por temperatura. Fig. 5.21.

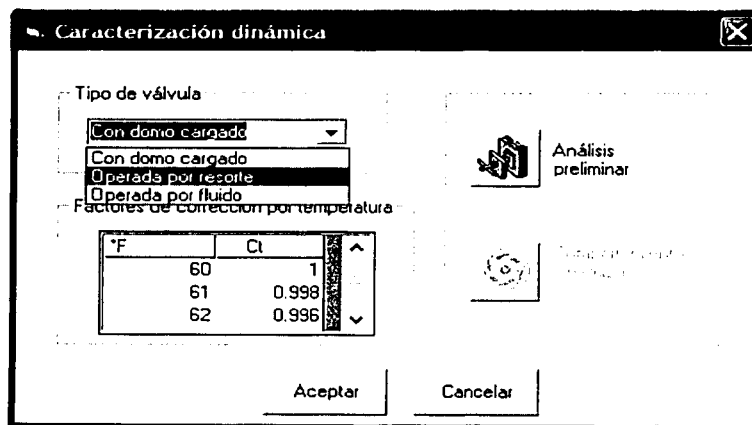


Fig. 5.21 Ventana de la caracterización dinámica.

### 5.3.2.14. Ventana del comportamiento dinámico de la válvula

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Una vez seleccionadas las características de la válvula, se tiene acceso a la ventana del comportamiento dinámico de la válvula Fig. 5.22 para saber si la válvula a la que se le hará el análisis se encuentra abierta o cerrada, conocer su presión de apertura en el taller, así como el gasto de gas que circula a través de ella, todo esto a condiciones dinámicas. Las ecuaciones que se emplean determinan las condiciones estáticas de las válvulas pero toman la consideración de realizar el cálculo en el instante inmediato anterior al cierre de la válvula en condiciones de operación, es por esto que aunque se están obteniendo los valores de condiciones estáticas de las válvulas, estos en realidad se están haciendo a condiciones

dinámicas. Primero es necesario seleccionar la válvula que se desea analizar en la tabla que aparece en la ventana del comportamiento dinámico de la válvula y a continuación hacer click en el botón de graficar.

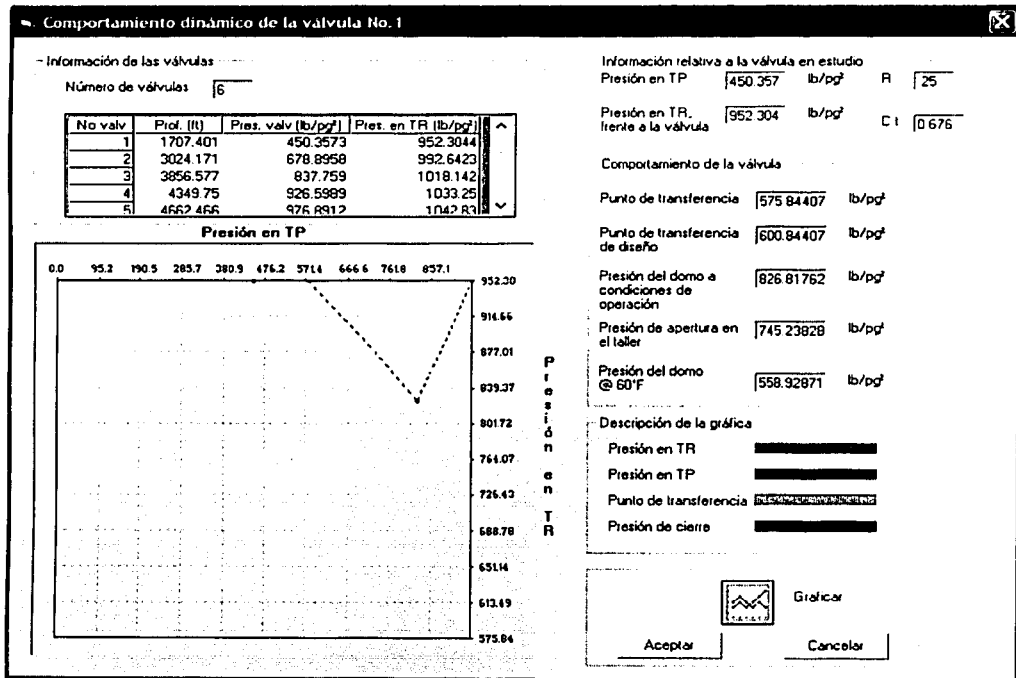


Fig. 5.22 Ventana del comportamiento dinámico de la válvula.

En esta ventana se grafican las condiciones de operación de la válvula para comprenderlas de manera fácil y rápida, así como saber el estado en que ésta se encuentra. Al observar la gráfica rápidamente se puede saber que para la válvula en estudio los pares de presiones (presión en TP vs presión en TR) que quedan comprendidos dentro de la línea punteada y el eje horizontal superior indican que la válvula se encuentra abierta, mientras que todos los pares de presiones que se encuentran fuera de esta área indican que la válvula está cerrada.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El punto de transferencia que se determina en esta ventana se refiere a la presión a la cual la válvula inmediata inferior comienza a inyectar gas, en este punto se está inyectando gas a través de dos válvulas, esto sucede en la realidad y hace que la inyección del gas se haga en forma gradual. Por razones de seguridad se considera un punto de transferencia de diseño de 25 lb/pg<sup>2</sup> mayor.

En esta ventana también se obtiene la presión de cierre de la válvula (o presión del domo de la válvula en caso de que se trate de una válvula con domo de nitrógeno), así como la presión de apertura en el taller necesaria.

Para poder analizar el comportamiento dinámico de las válvulas es necesario primero graficar las características estáticas de las mismas. Una vez hecho esto se tiene acceso a la ventana de comportamiento dinámico de la válvula Fig.5.23, en esta ventana es necesario seleccionar alguno de los modelos así como alguno de los diámetros de asiento con los que cuenta el programa para realizar el estudio correspondiente al comportamiento dinámico. Una vez hecho esto se obtienen las condiciones de operación de la válvula. Se indica que tipo de flujo se presenta en la válvula (estrangulado u orificio), así como las condiciones que presenta éste (crítico o subcrítico, ver capítulo tres).

En este análisis se obtiene también el gasto máximo de gas que se tiene en la válvula para las condiciones de operación (presión en TP y presión en TR) de la misma. Finalmente se puede graficar el comportamiento del flujo de gas a través de la válvula de inyección seleccionada. Esta gráfica se obtiene al variar la presión en la TP, desde el valor de la presión de inyección hasta cero.

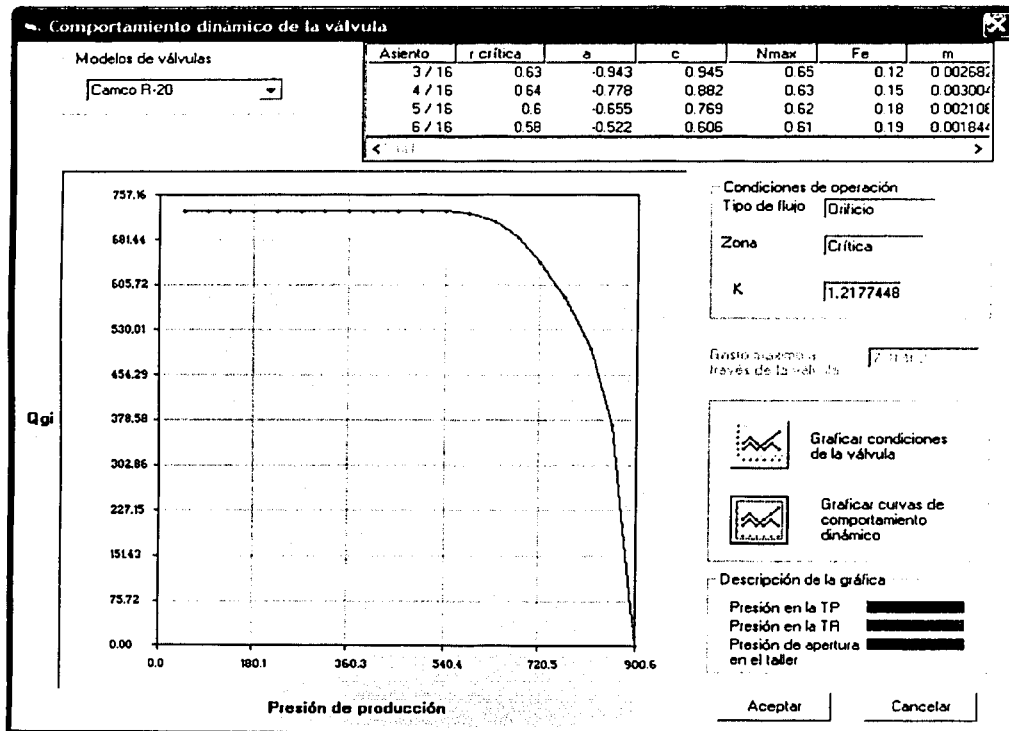


Fig. 5.23 Ventana del comportamiento dinámico de la válvula, tipo de flujo.

Con lo que se termina el análisis del bombeo neumático continuo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

## Capítulo 6. Aplicaciones

En este capítulo se presentan tres simulaciones realizadas con el programa de cómputo, los datos empleados en los ejemplos son de pozos reales y se reportan los resultados obtenidos para cada uno de ellos.

En primer lugar y para aclarar un poco más el orden en que se deben introducir los datos al programa de cómputo, se realiza una simulación de un pozo con bombeo neumático continuo y se imprimen los botones necesarios para accionar las ventanas en el orden secuencial adecuado para introducir los datos; una vez que se lleva a cabo esto se realizan los cálculos necesarios para el análisis seleccionado y se muestran los resultados. En segundo lugar se realiza la simulación para un pozo fluente y se analizan los resultados obtenidos para este estudio y finalmente en tercer lugar se realiza la simulación para un pozo con bombeo neumático continuo y nuevamente se analizan los resultados obtenidos para el estudio.


### 6.1. Diseño de bombeo neumático continuo con datos de campo

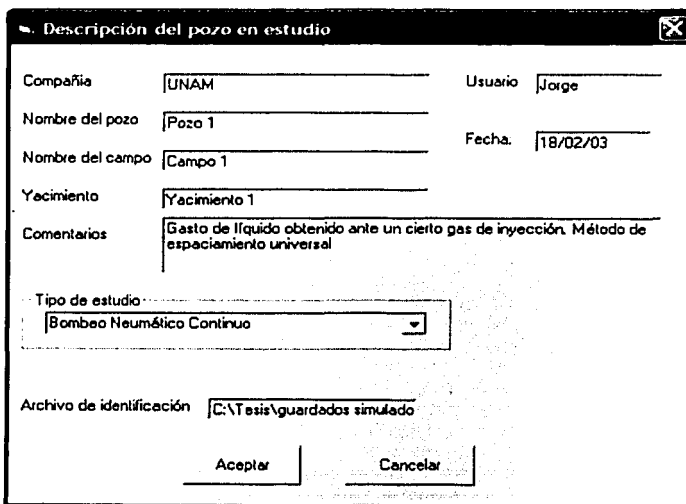
Se desea saber el gasto que puede producir un pozo al instalarle un sistema de bombeo neumático continuo, por lo que se realiza la simulación con la finalidad de evaluar el diseño de las instalaciones de bombeo neumático. Los datos empleados son de condiciones reales tomadas en el campo.

El estudio del pozo que se va a realizar es el relativo al análisis del gasto de líquido que puede aportar el pozo respecto a un cierto volumen de gas inyectado; el espaciamiento de las válvulas se realiza a través del método universal. A continuación se presentan las ventanas que se observan en el programa al realizar el estudio; estas se presentan de manera secuencial conforme se avanza en el programa.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



➤ Al hacer click en el botón  Descripción, se tiene acceso a la ventana de descripción del pozo en estudio, en donde se introducen los datos que identifican al estudio que se va a realizar y en la que a su vez se elige el tipo de estudio que se desea:



Descripción del pozo en estudio

Compañía UNAM Usuario Jorge

Nombre del pozo Pozo 1 Fecha: 18/02/03

Nombre del campo Campo 1


Yacimiento Yacimiento 1

Comentarios Gasto de líquido obtenido ante un cierto gas de inyección. Método de espaciamiento universal

Tipo de estudio: Bombeo Neumático Continuo

Archivo de identificación C:\Tesis\guardados simulado

Aceptar Cancelar


➤ Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de descripción del pozo en estudio se tiene acceso nuevamente a la ventana principal del programa, en la que es necesario hacer clic en el botón  Propiedades de los fluidos, para poder introducir las propiedades de los fluidos producidos:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Propiedades del fluido**

Densidad del aceite @ c.s.	0.891	gr/cm <sup>3</sup>
Densidad del agua @ c.s.	1.0	Adim
Densidad del gas producido @ c.s.	0.878	Adim
Fracción de agua	0	
Relación gas aceite	47.3	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Presión de separación	0.0	lb/pg <sup>2</sup>
Temperatura de separación	20.0	°C

Aceptar Cancelar

➤ Nuevamente, al hacer click en el botón aceptar en la ventana de las propiedades del fluido se tiene acceso a la ventana principal del programa, en ésta, es necesario hacer click en el botón  Correlaciones PVT. para poder elegir las correlaciones para el cálculo del factor de volumen del aceite, la relación de solubilidad y la viscosidad del aceite:

**Correlaciones PVT**

Selección del cálculo de las propiedades **Correlaciones**

<b>Cálculo de Bo</b> <input type="radio"/> Vázquez-Beggs <input type="radio"/> Distein-Glaso <input checked="" type="radio"/> Standing <input type="radio"/> Zona marina	<b>Relación de solubilidad</b> <input type="radio"/> Lasater <input type="radio"/> Standing <input type="radio"/> Vázquez-Beggs <input checked="" type="radio"/> Distein-Glaso <input type="radio"/> Zona marina	<b>Viscosidad del aceite</b> <input checked="" type="radio"/> Beggs-Robinson <input type="radio"/> Beal-Chew-Connally <input type="radio"/> Datos de laboratorio	<input type="radio"/> Akal-Nohoch-Chac <input type="radio"/> Abkatun-Pol-Chuc <input type="radio"/> Ku
--	---	---	--

Viscosidad 1     Viscosidad 2      
 Temperatura 1     Temperatura 2

Aceptar Cancelar

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

➤ Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de las correlaciones PVT se habilita nuevamente la ventana principal del programa en la que es necesario hacer click en el botón



Condiciones de trabajo.

para poder proporcionar las temperaturas en la cabeza y el fondo del pozo, y la profundidad media desarrollada de los disparos:

**Condiciones de trabajo**


Temperatura en la cabeza del pozo: 34.0 °C

Temperatura en el fondo del pozo: 111.0 °C

Profundidad media desarrollada de los disparos: 2675.0 m

Aceptar Cancelar

➤ Al hacer click en el botón de aceptar en la ventana de las condiciones de trabajo, nuevamente se tiene acceso a la ventana principal del programa en la que es necesario hacer

click en el botón  Estado mecánico del pozo, para introducir los números de diámetros y las longitudes correspondientes a la TP:

**Estado mecánico del pozo**

Diámetros en la TP | Diámetros de TR, liners | Secciones de desviación

Na. de diámetros: 2

D.E.	Peso	D.I.
1.05	1.2	0.824
1.315	1.8	1.049
1.66	2.4	1.38
1.9	2.9	1.61

TP	D.E.	Peso	D.I.	Prof. Superior	Prof. Inferior
1	4.5	12.75	3.958	0	20.69
2	3.5	9.3	2.992	20.69	26.32.82

Tipo de unidades:  
 Diámetro: [m] | Peso: [lb/pe] | Profundidad: [m]

Aceptar Cancelar

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

➤ Para poder introducir los números de diámetros y longitudes correspondientes a la TR es necesario que en la ventana del estado mecánico del pozo se haga click en la pestaña correspondiente a los diámetros de TR, lanners.

Estado mecánico del pozo

Diámetros en la TP    Diámetros de TR, lanners    Secciones de desviación

No. de diámetros: 2

DE	Peso	D1
4.5	9.5	4.09
4.5	10.5	4.052
4.5	11.6	4
4.5	13.5	3.92

TR	DE	Peso	D1	Prof. Superior	Prof. Inferior
1	9.625	47	6.681	0	1599
2	7	29	6.184	1599	2675

Tipo de unidades:

Diámetro: [pp]    Peso: [lb/pe]    Profundidad: [m]

Aceptar    Cancelar

➤ Es necesario introducir el número de secciones de desviación que se tienen en el pozo y sus profundidades vertical y desarrollada; para poder hacer esto es necesario hacer click en la pestaña relativa a las secciones de desviación que se encuentra en la ventana relativa al estado mecánico del pozo:

Estado mecánico del pozo

Diámetros en la TP    Diámetros de TR, lanners    Secciones de desviación

No. de desviaciones: 14

Sección	Profundidad desarrollada	Profundidad Vertical
Sección 1	852	851.78
Sección 2	1009	1006.38
Sección 3	1188	1179.26

Tipo de unidades:


Diámetro: [pp]    Peso: [lb/pe]    Profundidad: [m]

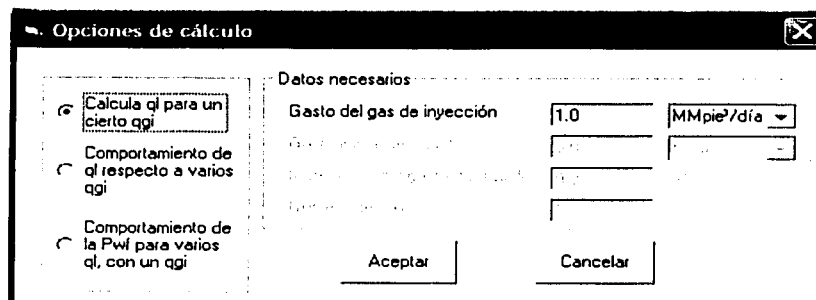
Aceptar    Cancelar

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Como en la pantalla anterior no se pueden ver todas las secciones de desviación a continuación se muestran las secciones de desviación correspondientes:

Profundidad desarrollada (m)	Profundidad vertical (m)
852	851.78
1009	1006.38
1188	1179.26
1345	1323.24
1524	1485.52
1638	1589.41
1800	1736.67
1941	1863.69
2062	1970.89
2152	2050.19
2412	2280.53
2600	2448.23
2630	2475.41
2675	2516.5

➤ Una vez que se termina de introducir la información relativa al estado mecánico del pozo y se hace clic en el botón aceptar, nuevamente se habilita la ventana principal del programa, en la que es necesario hacer clic en el botón  Opciones de cálculo, para especificar qué procedimiento se va a realizar y es en esta ventana donde se proporcionan los datos necesarios para la opción seleccionada:




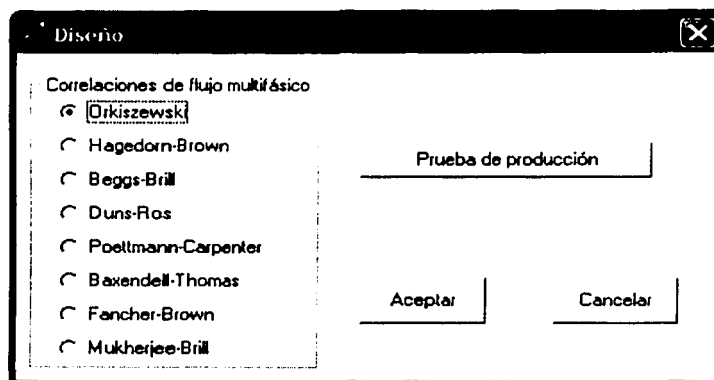
**Opciones de cálculo**

Calcula  $q_l$  para un cierto  $q_{gi}$   
 Comportamiento de  $q_l$  respecto a varios  $q_{gi}$   
 Comportamiento de la  $Pwf$  para varios  $q_l$ , con un  $q_{gi}$

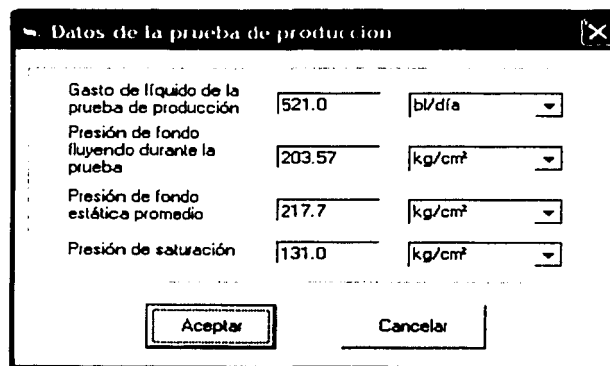
**Datos necesarios**

Gasto del gas de inyección:


➤ Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de opciones de cálculo se habilita la ventana principal del programa, en la que se tienen que hacer click en el botón  Diseño para poder seleccionar la correlación de flujo multifásico que se desea usar:



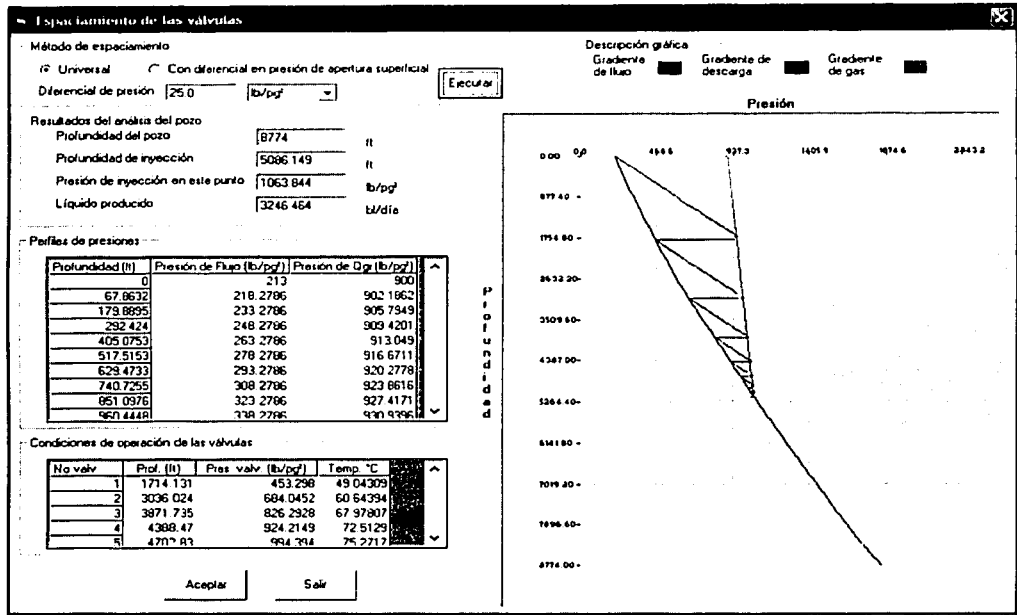
➤ En la ventana correspondiente al diseño se encuentran habilitados los botones correspondientes a la prueba de producción y a los datos del bombeo neumático. El botón correspondiente a la prueba de producción se encuentra habilitado debido a que el tipo de estudio que se lleva a cabo considera la curva de IPR para encontrar el gasto de líquido que puede aportar el pozo, por lo que es necesario introducir los datos obtenidos de la prueba de producción.



➤ Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de los datos de la prueba de producción, se habilita la ventana del diseño en la que el botón correspondiente a los datos del bombeo neumático se encuentra habilitado ya que se trata de un estudio de bombeo neumático continuo, por lo que es necesario introducir los datos adicionales que se requieren para diseñar el sistema de bombeo neumático continuo.

➤ En este punto ya se ha introducido toda la información necesaria para el estudio seleccionado, por lo que ahora ya se pueden realizar los cálculos necesarios. En la ventana principal del programa se encuentra habilitado el botón  Espaciamento de válvulas, que permite analizar la opción de cálculo seleccionada en la ventana relativa a la opción de cálculo. Al hacer click en este botón se tiene acceso a la siguiente ventana en la que se debe seleccionar el método de espaciamento de las válvulas se desea usar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN




Al hacer click en el botón de ejecutar se obtienen los resultados de la simulación los cuales se muestran a continuación:

<b>Profundidad del pozo, pie:</b>	8774
<b>Profundidad de la inyección, pie</b>	5086.149
<b>Presión de inyección, lb/pg<sup>2</sup></b>	1063.844
<b>Líquido producido, bl/día</b>	3246.464

Los detalles del espaciamiento de las válvulas, del perfil de presión del fluido, del perfil de presión del gas de inyección, y las condiciones de operación de las válvulas se encuentran en el apéndice B.3. Las últimas dos válvulas se sugieren por tomar en cuenta condiciones futuras de producción y es por esta razón que no se realiza un análisis sobre las condiciones de operación de éstas. La restricción sobre estas últimas válvulas es que no pueden instalarse más allá del empacador.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



➤ Al hacer click en el botón aceptar de la ventana del espaciamiento de las válvulas se habilita nuevamente la ventana principal y como ya se tienen las condiciones de operación de las válvulas ahora se tiene la posibilidad de realizar la calibración de éstas, para esto es necesario hacer click en el botón  Calibración de válvulas. con lo que se activa la ventana correspondiente a la calibración de las válvulas y en la que es necesario hacer click en el botón de calibrar válvulas.

Calibración de las válvulas

Información referente a las válvulas:

Número de válvulas: 7

No valv	Prof. (ft)	Pres. valv (lb/pg <sup>2</sup> )
1	1716.997	454.5129
2	3041.168	686.2558
3	3878.253	829.0917
4	4395.858	927.3887
5	4710.749	997.7983
6	4900.101	1024.345
7	5037.361	1055.537

Calibrar válvulas      Aceptar      Salir

DISEÑO DE LA INSTALACIÓN  
DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO


MÉTODO DE ESPACIAMIENTO: UNIVERSAL

DATOS DE LA VÁLVULA  
VALVULAS CAMCO TIPO J-40 (CONVENCIONALES)  
DIAM. EXT. DE LA VÁLVULA: 1 pg. ÁREA DE FUELLES 0.31 pg<sup>2</sup>  
DIAM. DE DRIFIDIO: 1/8 pg. PASO DE GAS 138.86 MPCD  
R(Av/Ab) = .0429 [1 - R] = .9571

Válvula	Profundidad	Tv	Pso	Pvo	Ptp	Pvc	Prc	Pd	Ptlo	
Nº	Des. Vert.	ds	dis	dis	-Pd	@15 0°C				
	m	m	°C	psi	psi	psi	psi	psi	psi	
1	523.6	523.5	49.1	885	907	455	904	883	837	875
2	928.6	927.2	60.7	885	923	686	911	874	822	865
3	1191.4	1182.4	68.0	885	934	829	924	876	821	860
4	1363.7	1340.2	72.6	885	941	927	932	878	820	860
5	1469.6	1436.2	75.3	885	945	998	937	879	820	860
6	1533.2	1493.9	77.0	885	947	1024	940	879	819	860
7	1579.2	1535.8	78.2	885	949	1056	942	879	819	860

Válvula Profundidad Tv Ptp Pvo Pso Pvc Psc

Los resultados de la calibración de las válvulas se muestran en el apéndice B.6.

➤ Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de calibración de las válvulas nuevamente se habilita la ventana principal del programa en la que es necesario hacer click en el botón  Comportamiento de las válvulas. para determinar el comportamiento dinámico de las válvulas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Caracterización dinámica**

Tipo de válvula

Con domo cargado  
 Con domo cargado  
 Operada por resorte  
 Operada por fluido

Factores de corrección por temperatura

*F	Ct
60	1
61	0.998
62	0.996

➤ En esta ventana es necesario seleccionar el tipo de válvula que se desea analizar y que será la que usaremos físicamente en las instalaciones. Una vez seleccionado el tipo de válvula a la que se le quiere realizar el análisis, se hace click en el botón correspondiente al análisis preliminar, con lo que se tiene acceso a la siguiente ventana.

**Comportamiento dinámico de la válvula No. 1**

Información de las válvulas

Número de válvulas: 7

No. valv.	Prof. (ft)	Pres. valv. (lb/pg <sup>2</sup> )	Pres. en TR (lb/pg <sup>2</sup> )
1	1716.937	454.5123	956.4593
2	3041.169	686.2558	1000.002
3	3879.253	829.0317	1027.526
4	4395.658	927.3687	1044.548
5	4717.749	997.7933	1054.911

Información relativa a la válvula en estudio

Presión en TP: 454.512 lb/pg<sup>2</sup> R: 25

Presión en TR, frente a la válvula: 956.459 lb/pg<sup>2</sup>

Comportamiento de la válvula

Punto de transferencia: 579.9962 lb/pg<sup>2</sup>


Punto de transferencia de diseño: 604.9962 lb/pg<sup>2</sup>

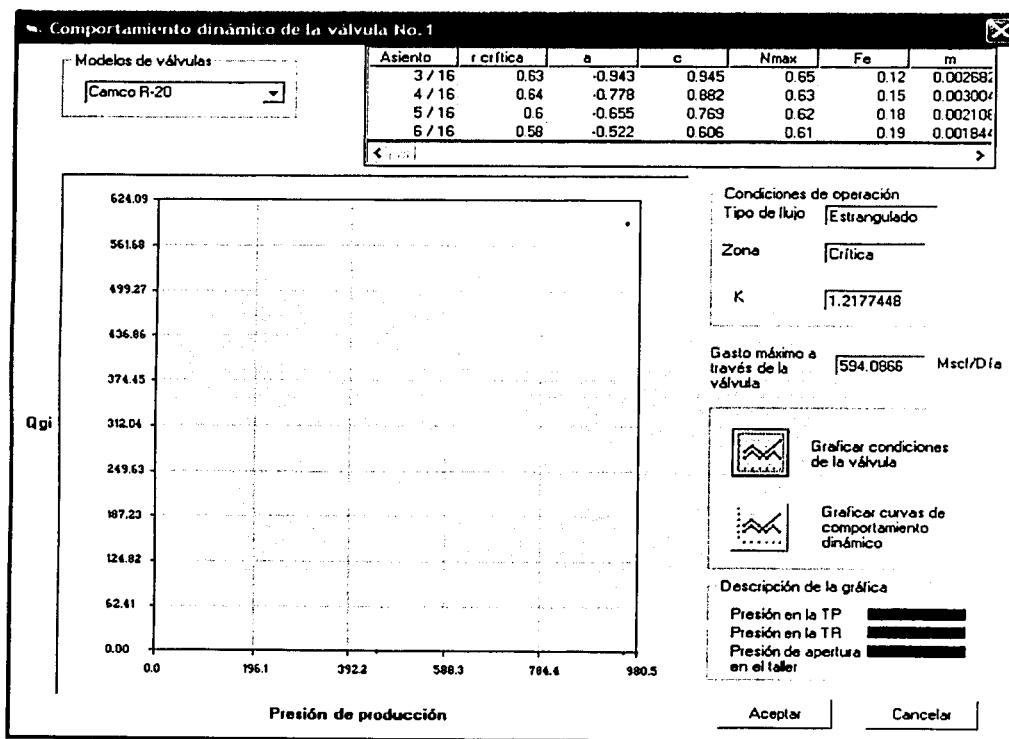
Presión de cierre: 830.97307 lb/pg<sup>2</sup>

Presión de apertura en el taller: 1107.9641 lb/pg<sup>2</sup>

Gráfico

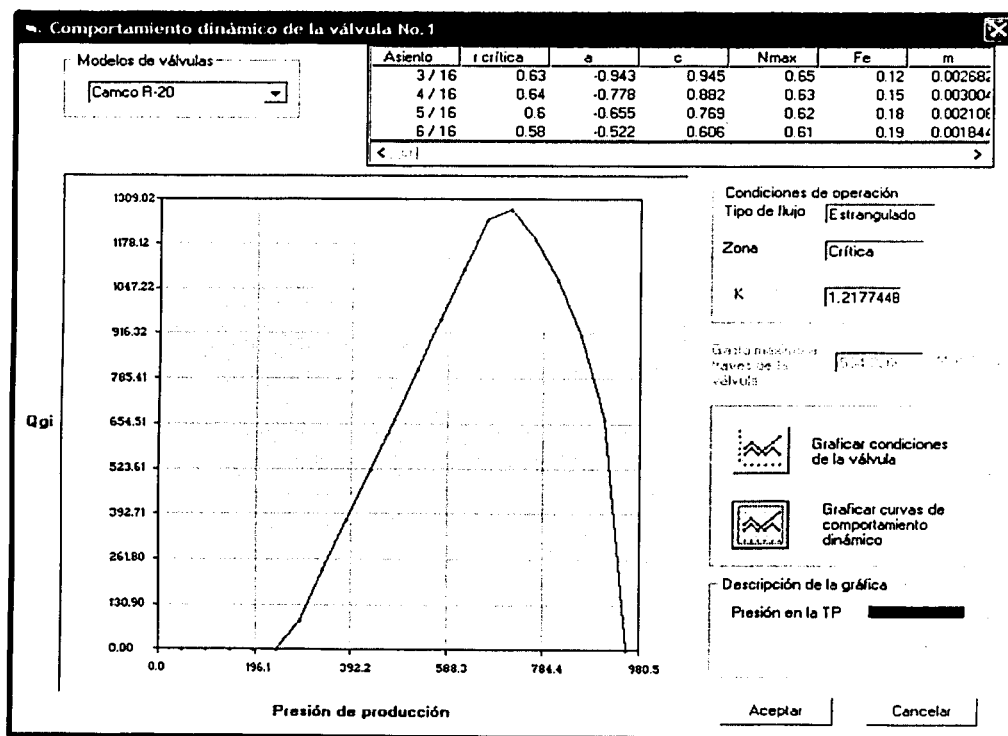
En esta ventana es necesario seleccionar la válvula que se quiere analizar e introducir el valor de R correspondiente a la válvula (valor dado por el fabricante) para realizar el estudio de manera correcta. Para obtener el comportamiento de la válvula es necesario hacer click en el botón graficar.

➤ Al hacer click en el botón Aceptar se habilita nuevamente la ventana de las caracterización dinámica y al hacer click en el botón  Comportamiento dinámico se tiene acceso a la segunda ventana correspondiente al análisis del comportamiento de flujo a través de las válvulas, la cual se muestra a continuación:



En esta ventana se muestra el gasto máximo de gas de inyección que circula a través de la válvula de BN seleccionada para las condiciones de operación que ésta presenta, es decir para la válvula seleccionada en este caso se tiene una presión en TP de 454.512 lb/pg<sup>2</sup> y para la presión en TR de 956.459 lb/pg<sup>2</sup>.

Para obtener la curva de comportamiento dinámico de la válvula, es necesario hacer click en el botón correspondiente con lo que se obtiene dicha gráfica para la válvula en estudio.



Esta gráfica se obtiene al variar la presión en la TP desde el valor de la presión en la TR hasta cero. En esta grafica se observa que la válvula es capaz de permitir un gasto mayor

de gas de inyección a través de la válvula del que se ha determinado como gasto máximo de inyección ya que éste está en función de las presiones de operación y las características mecánicas de la válvula. Esta es la última ventana correspondiente al tipo de estudio seleccionado con lo que se termina el mismo.

### 6.1.1. Ejemplo para determinar la $P_{wr}$

Se desea saber como se comporta la  $P_{wr}$  al producir el mismo pozo y por lo tanto con las mismas condiciones de operación, ante distintos gastos de producción de fluido establecidos por el diseñador; las consideraciones para el cálculo de la  $P_{wr}$  se introducen en la siguiente ventana. Para poder acceder a esta ventana es necesario hacer click en el botón



Opciones de cálculo. que se encuentra en la ventana principal del programa.

**Opciones de cálculo**

Calcula  $q_l$  para un cierto  $q_{gi}$   
 Comportamiento de  $q_l$  respecto a varios  $q_{gi}$   
 Comportamiento de la  $P_{wf}$  para varios  $q_l$ , con un  $q_{gi}$

**Datos necesarios**

Gasto del gas de inyección	0	MMpie <sup>3</sup> /día
Gasto inicial de líquido	102.9	bl/día
Incremento del gasto de líquido	411.6	bl/día
Número de cálculos	15	

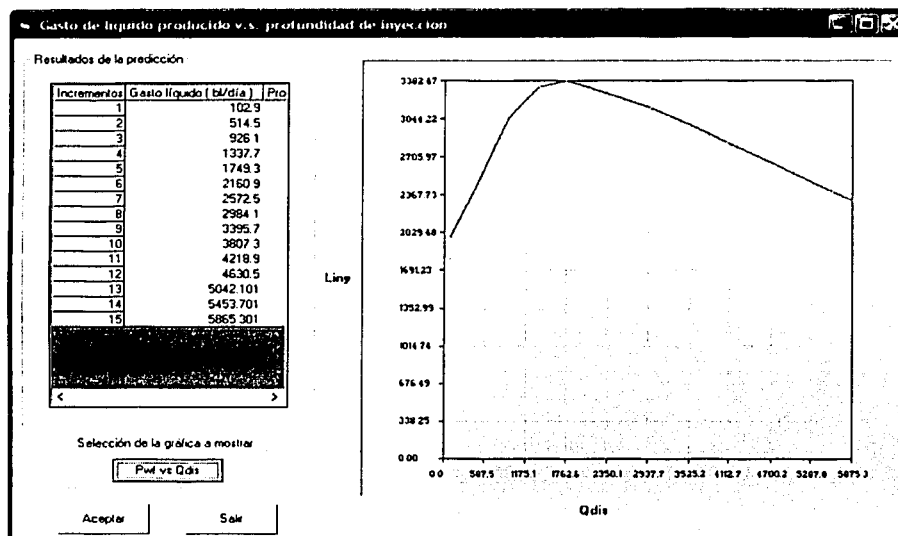
➤ En este caso no se utiliza la curva IPR y por tanto no es necesaria la información de la prueba de producción. Al hacer click en el botón aceptar en la ventana opciones de cálculo se habilita la ventana principal del programa y ahora se encuentra habilitado el botón



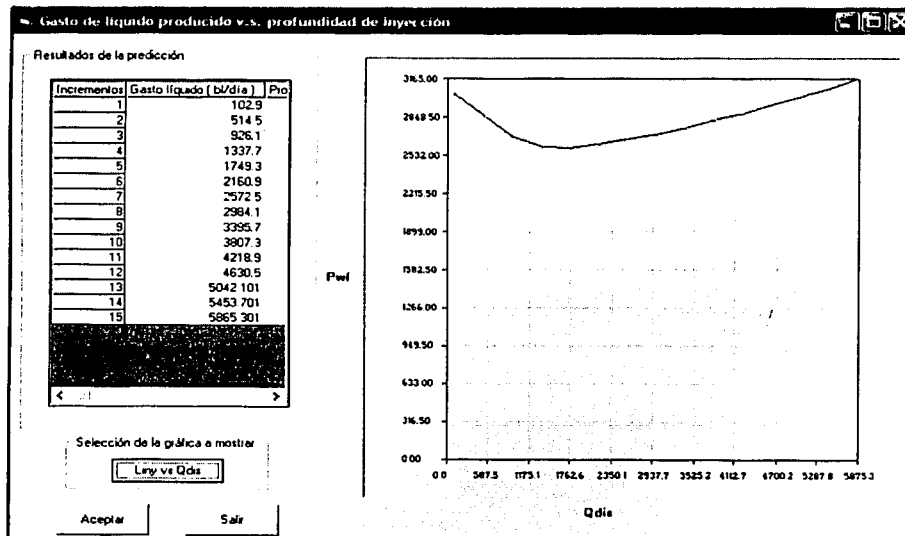
Gasto de líquido producido.

que es el correspondiente a la opción de cálculo seleccionada. En primer lugar se obtiene la gráfica correspondiente al gasto del líquido producido contra la profundidad de inyección como se muestra en la siguiente figura:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



En esta ventana también se puede mostrar la gráfica correspondiente al gasto de líquido producido contra la presión de fondo fluyendo, como se muestra en la siguiente figura:



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los detalles del análisis para el pozo en estudio se pueden consultar en el apéndice B.5. Con esto se finaliza el estudio para determinar la  $P_{wf}$  ante distintos gastos de producción.

## 6.2. Análisis de sensibilidad para el estudio de un pozo fluyente

Ejemplo 1.- Se desea saber como varía el gasto de líquido que puede producir el pozo, las condiciones de operación iniciales son las siguientes:

- Propiedades de los fluidos:
  - Densidad del aceite @ c.s. 0.891 gr/cm<sup>3</sup>
  - Densidad del agua @ c.s. 1.0 gr/cm<sup>3</sup>
  - Densidad del gas producido @ c.s. 0.878 gr/cm<sup>3</sup>
  - Fracción de agua 0.0
  - Relación gas aceite 47.3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>
  - Presión de separación 0.0 lb/pg<sup>2</sup>
  - Temperatura de separación 20.0°C
  
- Correlaciones PVT:
  - Factor de volumen del aceite Vázquez-Beggs
  - Relación de solubilidad Lasater
  - Viscosidad del aceite Beggs-Robinson
  
- Condiciones de trabajo:
  - Temperatura en la cabeza del pozo 34.0°C
  - Temperatura en el fondo del pozo 111.0°C
  - Profundidad media desarrollada de los disparos 2675.0 m
  
- Estado mecánico del pozo:
  - Número de secciones en la TP 2

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Profundidad 1 20.69 m,  $\sigma = 3.958$  pg.
  - Profundidad 2 2632.82 m,  $\sigma = 2.992$  pg.
- Numero de secciones en la TR 2
  - Profundidad 1 1599.0 m,  $\sigma = 8.681$  pg.
  - Profundidad 2 2675.0 m,  $\sigma = 6.184$  pg.
- Secciones de desviación 1
  - Profundidad vertical 2675.0 m
  - Profundidad desarrollada 2675.0 m
- Condiciones de diseño
  - Correlación de flujo multifásico Orkiszweski
- Prueba de producción
  - Gasto de líquido de la prueba de producción 521.0 bl/día
  - Presión de fondo fluyendo durante la prueba 2895.44 lb/pg<sup>2</sup>
  - Presión de fondo estática promedio 3096.42 lb/pg<sup>2</sup>
  - Presión de saturación 1863.25 lb/pg<sup>2</sup>

a) Para flujo descendente y con una presión en la cabeza de 213 lb/pg<sup>2</sup>, los resultados obtenidos para la presión de fondo fluyendo y del gasto de líquido que puede producir el pozo son:

Profundidad, pie	$P_{wf}$ , lb/pg <sup>2</sup>	Gasto de líquido producido, bl/día
8774	2654.378	1143.453

b) Para flujo ascendente a una profundidad de 8774 pie y con una presión en el fondo fluyendo de 2654.378 lb/pg<sup>2</sup>, los resultados obtenidos fueron:

Profundidad, pie	$P_{wh}$ , lb/pg <sup>2</sup>	Gasto de líquido producido, bl/día
0	212.57	1145.905

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



La variación en los resultados es mínima, esta variación se da por el redondeo a la hora de hacer las aproximaciones, por lo que se aceptan los valores obtenidos del programa tanto para flujo descendente como para flujo ascendente.

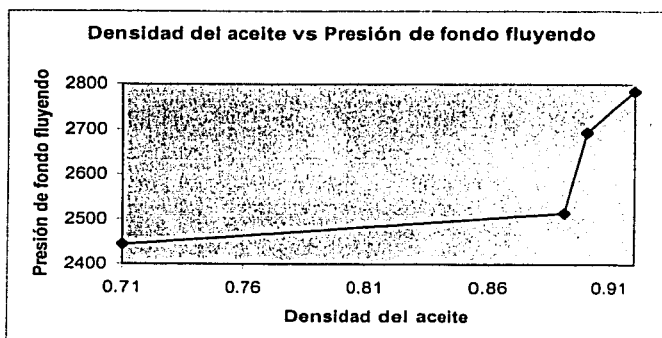
Se realizaron una serie de simulaciones y se modificaron los datos de entrada (uno a la vez) con la finalidad de realizar un análisis de sensibilidad del programa.

#### Variación de la densidad del aceite

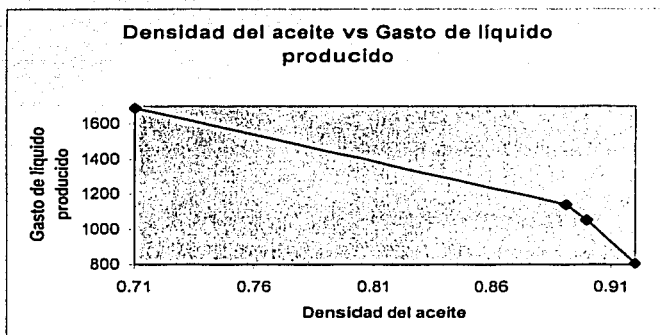
Se realizaron varias simulaciones con 4 valores de densidad del aceite, con lo que se observa que al modificar el valor de la densidad del aceite se presentan los siguientes resultados de presión en el fondo del pozo y de gasto de líquido producido:

Densidad del aceite, gr/cm <sup>3</sup>	P <sub>wf</sub> , lb/pg <sup>2</sup>	Gasto de líquido producido, bl/día
0.71	2443.58	1690.097
0.891	2654.378	1143.453
0.9	2692.493	1056.441
0.92	2784.239	806.865

La gráfica que muestra el comportamiento de la presión en el fondo del pozo respecto a la variación de la densidad del aceite es la siguiente:



La gráfica que muestra el comportamiento del gasto del líquido que puede producir el pozo respecto a la variación de la densidad del aceite es la siguiente:



Estos resultados muestran que cuando se tiene un aceite más pesado la presión en el fondo del pozo es mayor y el gasto del líquido producido es menor, lo que es correcto ya que la columna del fluido es más pesada y por lo tanto se produce una menor cantidad de fluido ya que la energía del yacimiento continua siendo la misma, es decir al tener una mayor presión de fondo fluyendo se tiene una menor caída de presión en el yacimiento y por tanto una menor producción. La presión de fondo fluyendo es inversamente proporcional respecto al gasto de líquido que puede producir el pozo.

Los resultados de la variación se muestran en la siguiente tabla:

Porcentaje de variación de la densidad del aceite	Porcentaje de variación de la $P_{wf}$	Porcentaje de variación del gasto producido
-20.31	-7.94	47.80
0	0	0
1.01	1.43	-7.609
3.25	4.89	-29.43

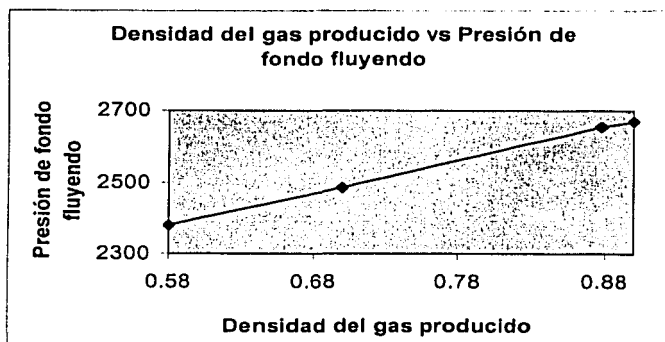
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Variación de la densidad del gas producido

Al modificar el valor de la densidad del gas producido se presentan los siguientes resultados de presión en el fondo del pozo y de gasto de líquido producido:

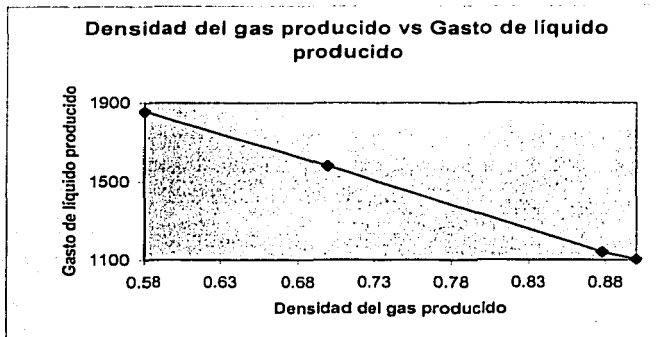
Densidad del gas producido, $\text{gr/cm}^3$	$P_{wf}$ , $\text{lb/pg}^2$	Gasto de líquido producido, $\text{bl/día}$
0.58	2380.284	1854.353
0.7	2486.145	1579.88
0.878	2654.378	1143.453
0.9	2669.592	1104.39

La gráfica que muestra el comportamiento de la presión en el fondo del pozo respecto a la variación de la densidad del gas producido es la siguiente:



La gráfica que muestra el comportamiento del gasto de líquido que puede aportar el pozo respecto a la variación de la densidad del gas producido es la siguiente:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Estos resultados muestran que cuando se produce un gas más denso la presión en el fondo del pozo es mayor y la caída de presión en el yacimiento que aporta los fluidos es menor.

Los resultados de la variación se muestran en la siguiente tabla:

Porcentaje de variación de la densidad del gas producido	Porcentaje de variación de la $P_{wf}$	Porcentaje de variación del gasto producido
-33.94	-10.32	62.17
-20.27	-6.33	38.16
0	0	0
2.5	0.573	-3.41

#### Variación de la relación gas aceite

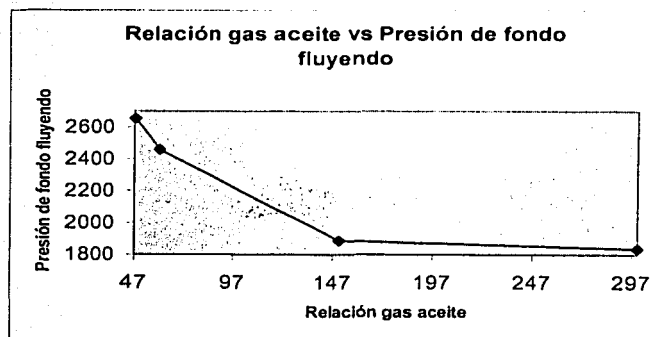
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Al modificar el valor de la relación gas aceite se presentan los siguientes resultados de presión en el fondo del pozo y de gasto de líquido producido:

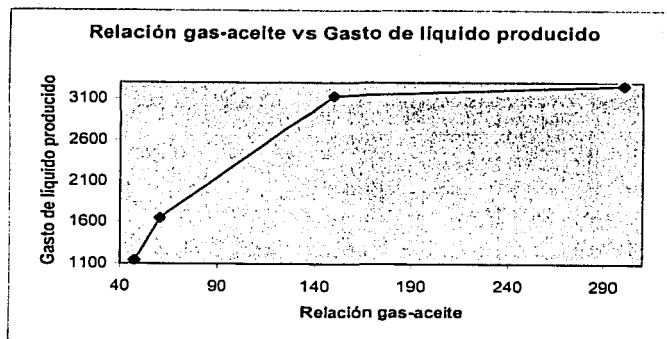
Relación gas aceite, $m^3/m^3$	$P_{wf}$ , lb/pg <sup>2</sup>	Gasto de líquido producido, bl/día
47.3	2654.378	1143.453
60	2458.954	1650.759

150	1886.677	3133.912
300	1838.862	3257.156

La gráfica que muestra el comportamiento de la presión en el fondo del pozo respecto a la variación de la relación gas-aceite es la siguiente:



La gráfica que muestra el comportamiento del gasto de líquido que puede producir el pozo respecto a la variación de la RGA es la siguiente:



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Estos resultados muestran que cuando se tiene una mayor cantidad de gas la presión en el fondo del pozo es menor, lo que es correcto ya que el gas aligera la columna de fluido y por lo mismo se tiene una mayor producción de fluidos por parte del pozo.

Los porcentajes de variación se muestran en la siguiente tabla:

Porcentaje de variación de la RGA	Porcentaje de variación de la $P_{wr}$	Porcentaje de variación del gasto producido
0	0	0
26.8498	-7.3623	44.366
217.124	-28.922	174.074
534.2494	-30.723	184.852

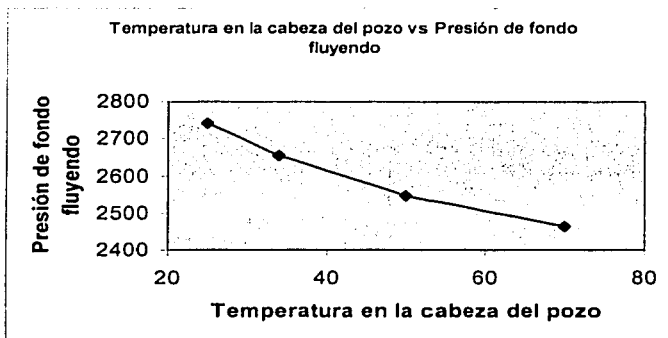
#### Variación de la temperatura en la cabeza del pozo

Al modificar el valor de la temperatura en la cabeza del pozo se presentan los siguientes resultados de presión en el fondo del pozo y de gasto de líquido producido:

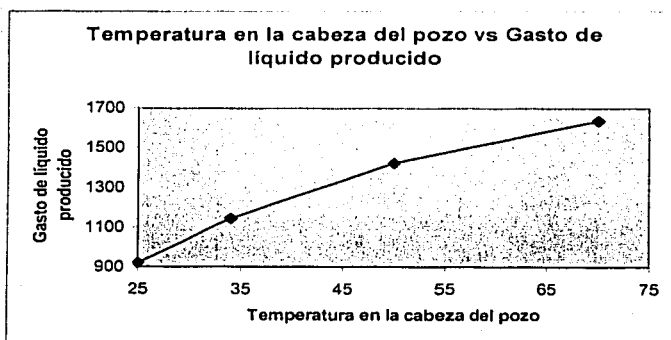
Temperatura en la cabeza del pozo, °C.	$P_{wr}$ , lb/pg <sup>2</sup>	Gasto de líquido producido, bl/día
25	2740.625	919.777
34	2654.378	1143.453
50	2546.692	1422.723
70	2464.553	1635.454

La gráfica que muestra el comportamiento de la presión en el fondo del pozo respecto a la variación de la temperatura en la cabeza del pozo es la siguiente:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



La gráfica que muestra el comportamiento del gasto de líquido que puede producir el pozo respecto a la variación de la temperatura en la cabeza del pozo es la siguiente:



Debido a que se tiene una mayor temperatura en la cabeza del pozo esto reduce la viscosidad del aceite con lo que se tiene una menor resistencia al flujo a lo largo de todo el aparejo de producción y por lo tanto una menor presión de fondo fluyendo, es debido a esto que el pozo puede producir un mayor gasto de líquido.

Los porcentajes de la variación se muestran en la siguiente tabla:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

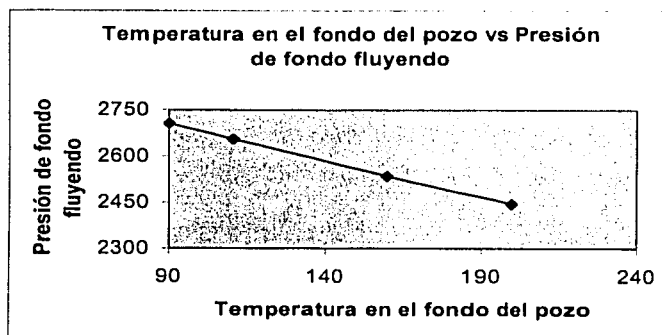
Porcentaje de variación de la temperatura en la cabeza del pozo	Porcentaje de variación de la $P_{wf}$	Porcentaje de variación del gasto producido
-26.47	3.249	-19.561
0	0	0
47.058	-4.056	24.423
105.882	-7.151	43.027

### Variación de la temperatura en el fondo del pozo

Al modificar el valor de la temperatura en el fondo del pozo se presentan los siguientes resultados de presión de fondo fluyendo y de gasto de líquido producido:

Temperatura en el fondo del pozo, °C.	$P_{wf}$ , lb/pg <sup>2</sup>	Gasto de líquido producido, bl/día
90	2706.941	1007.56
111	2654.378	1143.453
160	2535.613	1451.201
200	2445.176	1688.64

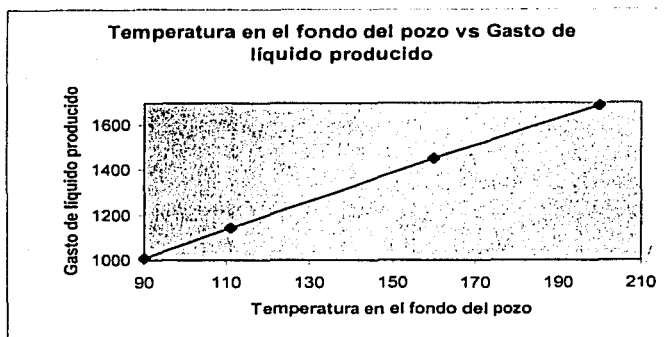
La gráfica que muestra el comportamiento de la presión en el fondo del pozo respecto a la variación de la temperatura en el fondo del pozo es la siguiente:



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



La gráfica que muestra el comportamiento del gasto de líquido que puede producir el pozo respecto a la variación de la temperatura en el fondo del pozo es la siguiente:



Ya que se tiene una mayor temperatura en el fondo del pozo se tiene una mayor temperatura a lo largo del pozo, esto significa una menor viscosidad del aceite y una menor resistencia al flujo y por tanto una menor presión de fondo fluyendo, es por esto que el pozo es capaz de producir un mayor gasto de líquido.

Los porcentajes de la variación se muestran en la siguiente tabla:

Porcentaje de variación de la temperatura en el fondo del pozo	Porcentaje de variación de la $P_{wf}$	Porcentaje de variación del gasto producido
-18.918	1.980	-11.884
0	0	0
44.144	-4.474	26.913
80.180	-7.881	47.679

Se concluye que el valor de la densidad del aceite es la variable que tiene mayor influencia en el gasto que se obtiene del pozo y es por que a mayor densidad del aceite el peso de la columna de fluido que tiene que vencer el yacimiento para producir los fluidos es mayor, en segundo lugar se tiene el valor de la RGA ya que al aumentar éste se aligera más la columna de fluido y por lo tanto se tiene una menor presión de fondo fluyendo y una mayor

producción de fluidos, esto se logra hasta que se alcanza el gradiente mínimo ya que a partir de este punto aunque se tenga una mayor cantidad de gas, este ya no es capaz de aligerar la columna de fluido y debido al resbalamiento entre las dos fases y al colgamiento el fluido se deposita en el fondo del pozo generando una mayor presión de fondo fluyendo y por consiguiente una menor producción de fluidos y la variable que menos afecta el gasto que se obtiene del pozo es la temperatura en la cabeza del pozo.

### 6.3 Análisis de sensibilidad para el estudio de bombeo neumático continuo

Ejemplo 2.- Se quiere saber cómo se comporta el pozo de la sección anterior al instalarle el bombeo neumático continuo por lo que se toman los datos de la sección anterior y se adicionan los datos necesarios para diseñar el sistema de bombeo neumático.

- Datos para bombeo neumático continuo
  - Densidad relativa del gas de inyección 0.8 adim
  - Densidad relativa del fluido de control 1.0 adim
  - Volumen del gas de inyección 1.0 MMpie<sup>3</sup>/día
  - Temperatura de calibración en el taller 16.0 °C
  - Presión en la cabeza del pozo 213.0 lb/pg<sup>2</sup>
  - Presión de operación del gas de inyección 900.0 lb/pg<sup>2</sup>
  - Presión máxima de operación del gas 1000.0 lb/pg<sup>2</sup>
  - Caída de presión en la válvula de BN 100.0 lb/pg<sup>2</sup>
  - Empacador Sí
    - Posición del empacador Fija
    - Profundidad del empacador 2630.82 m

Para las condiciones de operación originales se tienen los siguientes resultados:

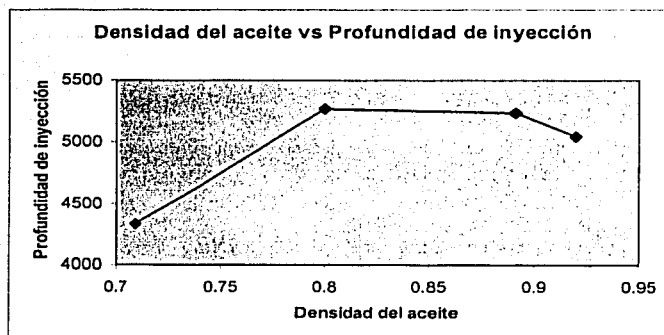
<b>Profundidad de inyección (pies)</b>	5236.589
<b>Presión de inyección a profundidad (lb/pg<sup>2</sup>)</b>	1073.592
<b>Gasto de líquido producido (bl/día)</b>	3076.691
<b>Número de válvulas</b>	7

### Variación de la densidad del aceite

Al modificar el valor de la densidad del aceite se obtienen los siguientes resultados en la profundidad de inyección, en el gasto de líquido producido que puede aportar el pozo, así como en el número de válvulas obtenidas para las condiciones de operación del pozo, el método de espaciamento de las válvulas que se empleó fue el de espaciamento universal.

Densidad del aceite gr/cm <sup>3</sup>	Profundidad de inyección pie	Gasto de líquido producido bl/día	Número de válvulas
0.71	4330.62	2309.741	5
0.8	5264.81	2903.294	6
0.891	5236.589	3076.691	7
0.92	5048.004	2969.075	6

La gráfica que muestra el comportamiento de la profundidad de inyección respecto a la densidad del aceite producido es la siguiente:



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Se observa que para aceites de mayor densidad se requiere una mayor presión de inyección para poder producir los fluidos, esto se debe a que la columna de fluido es más pesada; al comparar el segundo y el tercer caso se observa que para un aceite menos pesado se requieren menos válvulas y por lo tanto se aligera menos la columna del fluido y en consecuencia se obtiene una menor producción de fluidos, esto no sucede en el último caso y se debe a que la profundidad de inyección es menor y por lo tanto menos válvulas y en consecuencia un menor aligeramiento de la columna del fluido.

Los resultados del porcentaje de variación respecto a los resultados obtenidos para las condiciones iniciales del caso en estudio se muestran en la siguiente tabla:

Porcentaje de variación de la densidad del aceite	Porcentaje de variación de la profundidad de inyección	Porcentaje de variación del gasto de líquido producido
-20.314	-17.30	-24.92
-10.213	0.533	-5.635
0	0	0
3.254	-3.606	-3.497

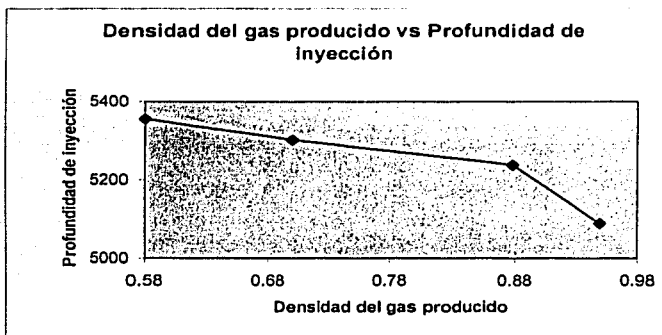
#### Variación de la densidad del gas producido

Al modificar el valor de la densidad del gas producido se obtienen los siguientes resultados en la profundidad de inyección, en el gasto de líquido que puede aportar el pozo, así como en el número de válvulas obtenidas para las condiciones de operación del pozo, el método de espaciamiento de las válvulas empleado fue el de espaciamiento universal.

Densidad del gas producido, $\text{gr/cm}^3$	Profundidad de inyección, pie	Gasto de líquido producido, $\text{bl/día}$	Número de válvulas
0.58	5354.391	3351.11	7
0.7	5301.025	3258.427	7
0.878	5236.589	3076.691	7
0.95	5087.451	2980.068	5

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La gráfica que muestra el comportamiento de la profundidad de inyección respecto a la densidad del gas producido es la siguiente:



Cuando se produce un gas más denso se tiene una columna de fluido más pesada, por lo que la profundidad del punto de inyección disminuye, lo que justifica que la presión de inyección en este punto sea menor y que el gasto que puede aportar el pozo también sea menor.

Los resultados del porcentaje de variación respecto a los resultados obtenidos para las condiciones iniciales del caso en estudio se muestran en la siguiente tabla:

Porcentaje de variación de la densidad del gas producido	Porcentaje de variación de la profundidad de inyección	Porcentaje de variación del gasto de líquido producido
-33.940	2.249	8.919
-20.273	1.230	5.906
0	0	0
8.2	-2.847	-3.140

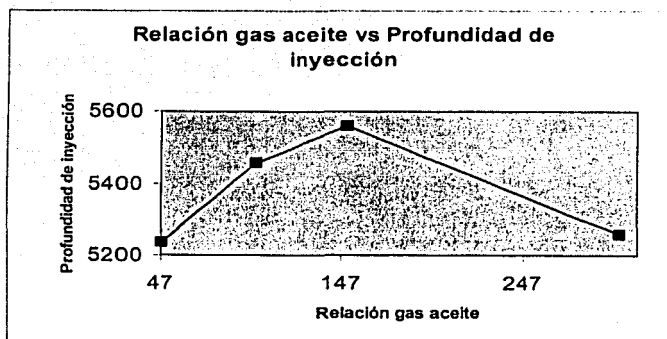
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### Variación de la relación gas aceite

Al modificar el valor de la relación gas aceite se obtienen los siguientes resultados en la profundidad de inyección, el gasto de líquido que puede aportar el pozo, así como en el número de válvulas obtenidas para las condiciones de operación del pozo, el método de espaciamiento de las válvulas empleado fue el de espaciamiento universal.

Relación gas aceite, $m^3/m^3$	Profundidad de inyección, pie	Gasto de líquido producido, bl/día	Número de válvulas
47.3	5236.589	3076.691	7
100	5457.592	3398.331	6
150	5561.063	3576.64	8
300	5258.07	3587.986	8

La gráfica que muestra el comportamiento de la de la profundidad de inyección respecto a la relación gas aceite es la siguiente:



Cuando se cuenta con una mayor RGA, es posible inyectar el gas a una profundidad mayor. Se alcanza un punto que aunque se tenga una mayor RGA, esto ya no ayuda a conseguir una mayor profundidad de inyección, esto se debe a que aumentan las pérdidas por fricción y se puede ver al comparar el tercer y el cuarto caso.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Los resultados del porcentaje de variación respecto a los resultados obtenidos para las condiciones iniciales del caso en estudio se muestran en la siguiente tabla:

Porcentaje de variación de la RGA	Porcentaje de variación de la profundidad de inyección	Porcentaje de variación del gasto de líquido producido
0	0	0
111.416	4.220	10.454
217.124	6.1962	16.249
534.248	0.4102	16.618

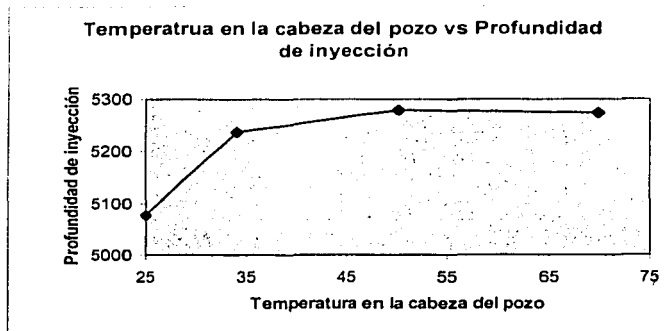
#### Variación de la temperatura en la cabeza del pozo

Al modificar el valor de la temperatura en la cabeza del pozo se obtienen los siguientes resultados en la profundidad de inyección, en el gasto de líquido que puede aportar el pozo, así como en el número de válvulas necesarias para las condiciones de operación del pozo, el método de espaciamiento de las válvulas empleado fue el de espaciamiento universal.

Temperatura en la cabeza del pozo, °C.	Profundidad de inyección, pie	Gasto de líquido producido, bl/día	Número de válvulas
25	5077.735	3007.229	6
34	5236.589	3076.691	7
50	5278.485	3142.142	7
70	5273.216	3191.741	6

La gráfica que muestra el comportamiento de la profundidad de inyección respecto a la temperatura en la cabeza del pozo es la siguiente:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Debido a que se tiene una mayor temperatura en la cabeza del pozo, esto implica que se tenga una mayor temperatura a lo largo del pozo, lo que significa una menor viscosidad del aceite producido y es la razón de que se tenga una menor presión de inyección y una mayor profundidad de inyección conforme se tiene una mayor temperatura en la cabeza del pozo.

Los resultados del porcentaje de variación respecto a los resultados obtenidos para las condiciones iniciales del caso en estudio se muestran en la siguiente tabla:

Porcentaje de variación de la temperatura en la cabeza del pozo	Porcentaje de variación de la profundidad de inyección	Porcentaje de variación del gasto de líquido producido
-26.470	-3.0335	-2.2576
0	0	0
47.058	0.8	2.1273
105.882	0.6994	3.7394

#### Variación de la temperatura en el fondo del pozo

Al modificar el valor de la temperatura en el fondo del pozo se obtienen los siguientes resultados en la profundidad de inyección, en el gasto de líquido que puede aportar el pozo, así



**FALTA**

**PAGINA**

**158**

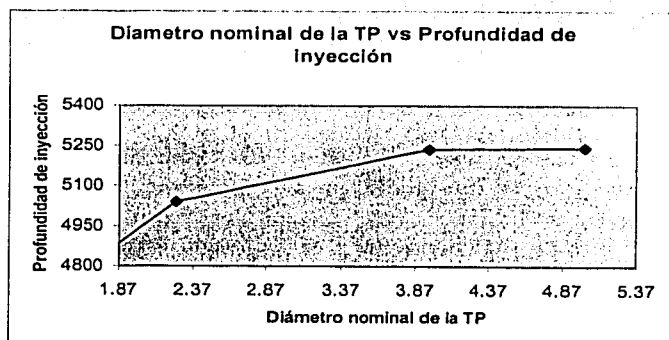
Porcentaje de variación de la temperatura en el fondo	Porcentaje de variación de la profundidad de inyección	Porcentaje de variación del gasto de líquido producido
-18.9189	-1.300	-2.2244
0	0	0
44.1441	0.0647	3.2759
80.1801	-0.2183	5.3998

### Variación del diámetro interior de la TP

Al modificar el valor del diámetro interno de la TP se obtienen los siguientes resultados en la profundidad de inyección, así como en el número de válvulas necesarias para las condiciones de operación del pozo, el método de espaciamiento de las válvulas empleado fue el de espaciamiento universal.

Diámetro interior de la TP, pg <sup>2</sup> (1ª sección)	Profundidad de inyección, pie	Gasto de líquido producido, bl/día	Número de válvulas
1.867	4883.518	2931.916	6
2.259	5038.935	3011.096	5
3.958	5236.589	3076.691	7
5.012	5241.417	3079.265	6

La gráfica que muestra el comportamiento de la profundidad de inyección respecto al diámetro interno de la TP es la siguiente:



Conforme se tiene un mayor diámetro en la TP, se tienen menos pérdidas por fricción y por lo tanto se tiene una mayor profundidad de inyección. Se observa que conforme se tiene una mayor profundidad de inyección, se aligera más columna de fluido y por lo tanto se tiene una mayor producción de fluidos del pozo.

Los resultados del porcentaje de variación respecto a los resultados obtenidos para las condiciones iniciales del caso en estudio se muestran en la siguiente tabla:

Porcentaje de variación de la TP (1ª sección)	Porcentaje de variación de la profundidad de inyección	Porcentaje de variación del gasto de líquido producido
-52.8297	-6.7423	-4.7055
42.9257	-3.7744	-2.1319
0	0	0
26.6296	0.0921	0.0836

Se concluye que el factor que más afecta el gasto que puede producir el pozo es el de la densidad del aceite y esto es lógico ya que este le da un mayor peso a la columna de fluido, la cual tratamos de aligerar al instalarle el bombeo neumático continuo. La variable que menos afecta el gasto que se obtiene del pozo es la densidad del gas de inyección y esto se debe a que como es el único valor que se está modificando, esto quiere decir que se esta inyectando la misma cantidad de gas solo que a profundidades y presiones distintas para lograr el aligeramiento de la columna de fluido, y por lo tanto se reporta la misma cantidad de fluidos producidos por el pozo; y lo mismo sucede para la variación de la presión superficial del gas de inyección.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

## Conclusiones y recomendaciones

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El programa de cómputo objeto de esta tesis es amigable ya que se realizó en Visual Basic 6.0 que es un ambiente gráfico y para una plataforma de trabajo Windows, lo que le da familiaridad al usuario con el programa. La información necesaria para usar el programa se introduce de manera fácil y lo mismo sucede para manipular los resultados que este le reporte ya que estos se presentan tanto de manera tabulada como de manera gráfica para facilitar su comprensión.

Es más conveniente realizar el diseño de una instalación de bombeo neumático considerando la capacidad de flujo del yacimiento.

La colocación de válvulas adicionales más allá del punto de inyección y arriba del empacador, hacen que el aparejo de bombeo neumático sea más flexible en caso de que se llegara a contar con una mayor energía en la superficie para la inyección del gas.

El programa objeto de este trabajo de tesis realiza el análisis del comportamiento dinámico de las válvulas, para los tipos de válvulas de bombeo neumático de las que se tiene la información necesaria. El comportamiento dinámico de las válvulas es una nueva área de investigación cuya finalidad es conocer con mayor exactitud el comportamiento del flujo de gas a través de las válvulas de bombeo neumático, lo que nos significa un mejor diseño de las instalaciones de bombeo neumático y un mejor aprovechamiento de la energía empleada en el aligeramiento de la columna de fluido y por consiguiente un mejor control en la producción del pozo.

El ingeniero petrolero al simular los fenómenos que trata de analizar tiene una mejor comprensión y por lo tanto un mejor análisis de los mismos, los programas de cómputo le representan una herramienta de trabajo confiable y rápida para la simulación del problema en estudio, lo que le permite concentrar su energía en el análisis del fenómeno; por lo tanto la programación es una herramienta que le facilita su trabajo y como tal la debe saber emplear correctamente para aprovecharla al máximo.

Al comparar los resultados obtenidos del análisis de las válvulas a condiciones estáticas contra los resultados obtenidos del comportamiento dinámico de válvulas se observa una gran diferencia en los valores reportados, es por esto que se recomienda realizar más estudios respecto al comportamiento dinámico de las válvulas, así como a un mayor número de válvulas ya que la información con la que se cuenta en este momento no es suficiente.

Se recomienda ampliar el área de aplicación de este trabajo más allá de la cabeza del pozo, es decir incluir el análisis del comportamiento de flujo a través del estrangulador, así como el análisis correspondiente a la línea de descarga. Sería un gran avance si se pudiera desarrollar este programa hasta tener un alcance del análisis de una red de pozos, con el que se pudiera analizar y diseñar todo un sistema de producción de los hidrocarburos, desde el fondo de cada pozo hasta la batería de separación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- 
- <sup>1</sup> Blann, J. R., "Improving Gas Lift Performance in a Large North African Oil Field", JPT (Dec, 1980) 1436-39, Trans. AIME 269
  - <sup>2</sup> Brown, K. E., "Overview of Artificial Lift Systems", JPT (Mar. 1982) 2384-96; Trans., AIME, 273
  - <sup>3</sup> Beggs, H.D. and Brill, J.P.: "A study of two phase Flow in Inclined Pipes". Transactions AIME 1973
  - <sup>4</sup> Orkiszewski: "Predicting Two-Phase Pressure Drops in Vertical Pipes", J.P.T. April 1967
  - <sup>5</sup> Gilbert, W.E.: "Flowing and Gas Lift Well Performance". Drill and Prod. Pract. (1954)
  - <sup>6</sup> Ros, N.C.: "An Analysis of Critical Simultaneous Gas/Liquid Flow Through a Restriction and its Application to Flow metering". Appl. Sciences Res., Sec. A. (1960)
  - <sup>7</sup> Beggs, H.D. and Brill, J.P.: "Two-Phase Flow in Pipes". Tulsa University (1975)
  - <sup>8</sup> Poetmann, F.H. and Beck, R.L.: "New Charts Developed to Predict Gas Liquid Flow Through Chokes". World Oil (March 1963).
  - <sup>9</sup> Ashford, F.E.: "An Evaluation of Critical Multiphase Flow Performance Through Wellhead Chokes". J.P.T. (August, 1974).
  - <sup>10</sup> Ashford, F.E. and Pierce, P.E.: "The Determination of Multiphase Pressure Drops and Flow Capacities in Down-Hole Safety Valves", J.P.T. (September, 1975).
  - <sup>11</sup> Omaña, R.: "Multiphase Flow Through Chokes". SPE 2682. 44<sup>th</sup> Fall Meeting. (September-October 1969).
  - <sup>12</sup> Brown, K.E., "Gas lift theory and practice", Petroleum Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1972.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

## NOMENCLATURA

A	Área de estrangulamiento.
$A_b$	Área inferior total efectiva.
$A_p$	Área de asiento.
C	Constante que depende de las unidades que se usen.
$C_d$	Coefficiente de descarga.
D	Profundidad total de pozo.
$E_1$	Energía por unidad de masa, en la posición uno.
$E_2$	Energía por unidad de masa, en la posición dos.
$E_c$	Energía cinética.
$E_e$	Energía de expansión.
$E_p$	Energía potencial.
$F_c$	Sumatoria de todas las fuerzas tratando de mantener la bola en su lugar.
$f_o$	Porcentaje de aceite.
$F_o$	Sumatoria de todas las fuerzas tratando de mover la bola de su lugar.
g	Fuerza de gravedad.
$G_{fa}$	Gradiente promedio de flujo sobre el punto de inyección.
$G_{fb}$	Gradiente promedio de flujo bajo el punto de inyección.
K	$C_p / C_v$ (aproximadamente 1.31 para gases naturales).
L	Profundidad del punto de inyección del gas.
$P_1$	Presión antes del estrangulador. Presión corriente arriba.
$P_2$	Presión después del estrangulador. Presión corriente abajo.
$P_c$	Presión en la TR a la profundidad de la válvula requerida para abrir la válvula bajo condiciones de operación.
$P_d$	Presión en el domo.
$P_{depth}$	Presión a profundidad de la columna de gas.
$P_l$	Presión del gas en el fondo.
$P_o$	Presión de apertura en el taller.
$P_{sc}$	Presión superficial de cierre. Presión del gas de inyección en la superficie cuando la válvula cierra.

$P_{so}$	Presión superficial de apertura. Presión del gas de inyección en la superficie cuando la válvula abre.
$P_{st}$	Una presión equivalente causada por la tensión en el resorte, dato proporcionado por el fabricante.
$P_{surface}$	Presión en la superficie en la cabeza del pozo.
$P_t$	Presión en la TP a la profundidad de la válvula cuando ésta abre.
$P_{th}$	Presión en la cabeza del pozo.
$P_{tro}$	Presión de apertura en el taller.
$P_{vc}$	Presión en la TR a la cual la válvula cerrará bajo condiciones de operación.
$P_{vo}$	Presión en la TR a la profundidad de la válvula requerida para abrir la válvula bajo condiciones de operación. Presión del gas de inyección frente a la válvula cuando esta abre.
$P_{wf}$	Presión de fondo fluyendo.
$P_{wh}$	Presión en la cabeza del pozo.
$q$	Producción bruta (aceite + agua).
$Q$	Flujo de gas en Mpcd @14.65 psi y 60° F
$Q_{gi}$	Gasto del gas de inyección.
$Q_{gp}$	Gasto de gas producido.
$Q_{gt}$	Gasto de gas total.
$Q_l$	Gasto de líquido.
$R$	$A_p / A_b$
$R$	$P_2 / P_1 > R_o$
$RGA$	Relación gas-aceite.
$RGA_t$	RGA total.
$RGL$	Relación gas-líquido.
$RGL$	Relación gas-líquido.
$R_o$	Flujo crítico.
$S$	Diámetro del estrangulador.
$S_t$	Una presión equivalente causada por la tensión en el resorte, se asume que actúa en el área: $A_b - A_p$ . Esta es dada por el fabricante.
$T$	Temperatura de entrada.



---

T	Temperatura promedio.
T <sub>surf</sub>	Temperatura en la superficie.
V	velocidad.
Z	Factor de compresibilidad del gas.
v	Volumen específico.
γ	Densidad relativa (1.00 para el aire).
γ <sub>g</sub>	Densidad relativa del gas.
ΔW <sub>r</sub>	Pérdidas de energía por fricción.
ΔW <sub>s</sub>	Pérdidas de energía por trabajo externo.
$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_{ac}$	Gradiente de presión debido a la aceleración.
$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_e$	Gradiente de presión debido a la elevación.
$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_f$	Gradiente de presión debido a la fricción.
$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L}\right)_T$	Gradiente de presión total.

---

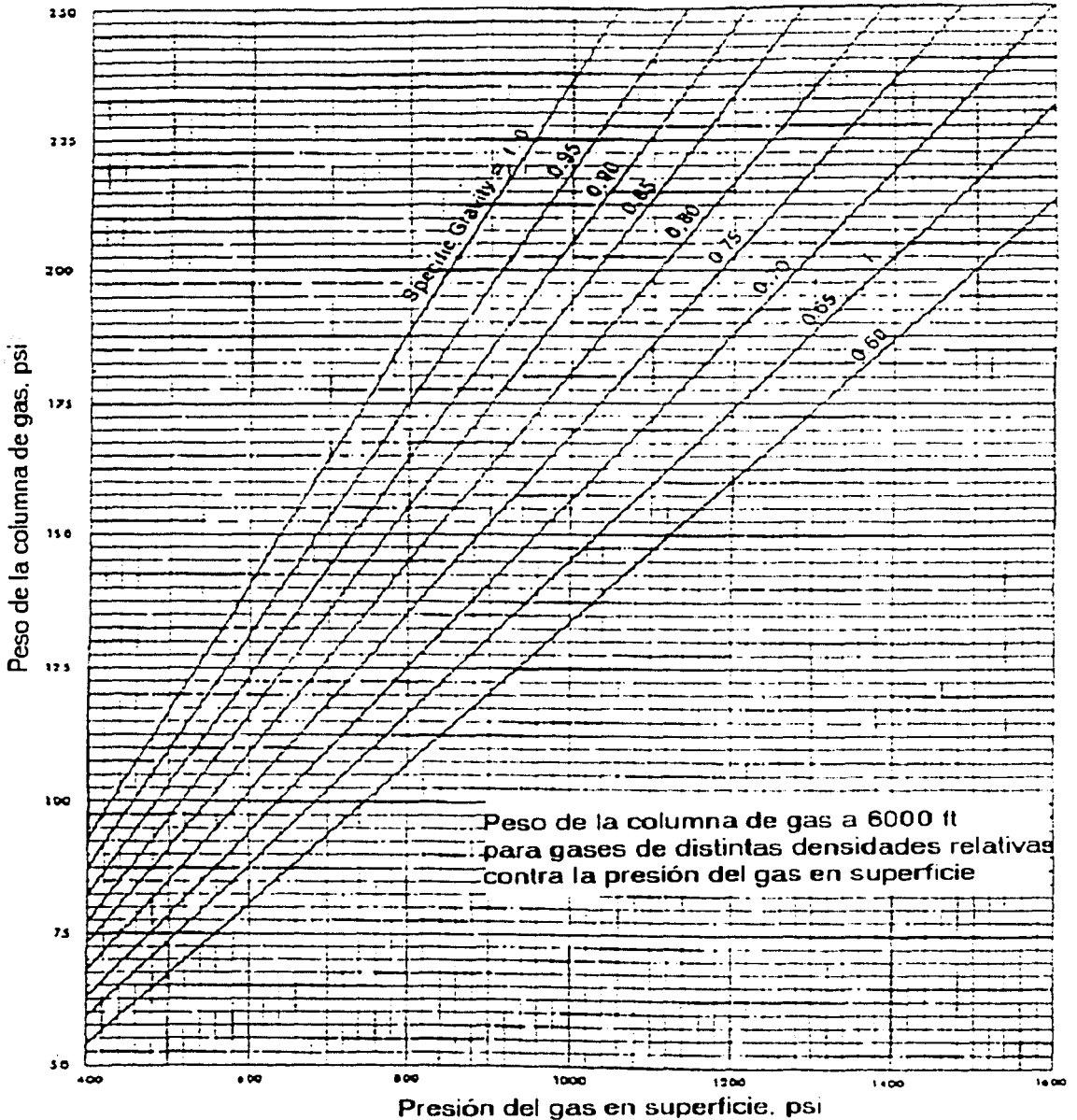
## Bibliografía

- M.I. José Angel Gómez Cabrera. *Producción de pozos 1*, Facultad de ingeniería. UNAM
- Brown, K. E., *The technology of artificial lift methods, vol. 2a*, Petroleum publishing co., Tulsa, Oklahoma, 1980
- Leo. C. Osuji. "Review of advances in gas-lift operations", SPE 28292, 1994
- Dr. Michael R. Wells., *Gas Lift Seminar*, 1999
- *Gas Lift, book 6 of the vocational training series.*, Production Department., American Petroleum Institute
- Hegguler, G., Schmidt, Z., Blais, R.N., Doty, D.R., "Dynamic Model of Gas-Lift Valve Performance", SPE 21637, 1993
- T. Tokar, Z. Schmidt, C. Tuckness., "New Gas Lift Valve Design Stabilizes Injection Rates: Case Studies", SPE 36597, 1996
- Alhanati, F.J.S., Schmidt, Zelimir, Doty, D.R. Lagerl., "Continuous Gas-Lift Instability: Diagnosis, Criteria, and Solutions", SPE 26554, 1993
- Acuna, H.G. Schmidt, Z.X., Doty, D.R., "Modeling of Gas Rates Through 1-in., Nitrogen-Charged Gas-Lift Valves", SPE 24839, 1992
- Hasan, A.R.; Kabir, C.S., "A Mechanistic Model for Computing Fluid Temperature Profiles in Gas-Lift Wells", SPE 26098, 1996
- James W. Hall, Kenneth L. Decker, "Gas-Lift Unloading and Operating Simulation as Applied to Mandrel Spacing and Valve Design", SPE 29450, 1995
- Winkler H.W., "Continuous-Flow Gas-Lift Installation Design Utilizing Production-Pressure-Operated Valve Performance", SPE 29451, 1995
- Winkler, H. W., "Misunderstood or Overlooked Gas-Lift Design and Equipment Considerations", SPE 27991, 1994
- Lagerlef, D.L., "Quality Assurance: Bellows-Operated Gas-Lift Valves", SPE 26100, 1993
- Decker, K.L., "Gas-Lift Valve Performance Testing", SPE 25444, 1993

- Decker, K.L., "Gas-Lift Valve Performance Testing and Data Correlation", SPE 22789, 1993
- Ferrer, A.A., Maggiolo, R., Zulia U., "Use of a Computerized Model in the Optimization of Continuous Gas-Lift Operations", SPE 21641, 1991
- Winkler, H.W., Eads, P.T., "Applying the Basic Performance Concepts of Single-Element Unbalanced Gas-Lift Valves for Installation Design", SPE 21636, 1991
- Ortiz, J.L., "Gas-Lift Troubleshooting Engineering: An Improved Approach", SPE 20674, 1990
- Nieberding, M.A., Schmidt, Z.X., Blais, R.N., Doty, D.R., "Normalization of Nitrogen-Loaded Gas-Lift Valve Performance Data", SPE 20673, 1990
- Stinson, R., "The Use of Systems Analysis in the Design of a Gas-Lift System", SPE 17584, 1988
- Asheim, Harald., "Criteria for Gas-Lift Stability", SPE 16468, 1988
- Blick, E.F., Enga, P.N., Lin, P.C., "Theoretical Stability Analysis of Flowing Oil Wells and Gas-Lift Wells", SPE 15022, 1988
- Winkler, H.W., Camp, G.F., "Dynamic Performance Testing of Single-Element Unbalanced Gas-Lift Valves", SPE 14348, 1987
- Mach, J.M., Flopetrol Proano, Mukherjee, H., Brown, K.E., "A New Concept in Continuous-Flow Gas-Lift Design", SPE 8026, 1983
- Glass, Eugene D., "Continuous gas-lift theory", SPE 5458, 1975
- Mayhill, T.D., "Simplified Method for Gas-Lift Well Problem identification and Diagnosis" SPE 5151, 1974
- Redden, J. David, Sherman, T.A. Glen and Blann, Jack R., "Optimizing Gas-Lift Systems", SPE 5150, 1974
- DeMoss, E.E., Ellis, R.C., Kingsley, G.S., "New Gas-Lift Concept-Continuous-Flow Production Rates From Deep, Low-Pressure Wells", SPE 4174, 1974
- Gary Cornell., *Visual Basic 6.0, Manual de referencia*, Osborne, Mc. Graw Hill, 2000
- Arturo López García, *Guía de programación en Fortran 90*, Instituto Politécnico Nacional, 1998
- Félix García Merayo, *Lenguaje de programación Fortran 90*, Paraninfo, 1999

- 
- Gozan Hegguler, *Dynamic model of gas lift valve performance*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the discipline of petroleum engineering, the graduate school, the university of Tulsa, 1998
  - Juan G. Faustinelli, *Temperature and flow performance modeling of gas lift valves*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the discipline of petroleum engineering, the graduate school, the university of Tulsa, 1997
  - Khosrow Biglarbigi, *Gas passage performance of gas lift valves*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the discipline of petroleum engineering, the graduate school, the university of Tulsa, 1985
  - Miguel Antonio Rodriguez Romero, *Normalization of nitrogen charged gas lift valves performance*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the discipline of petroleum engineering, the graduate school, the university of Tulsa, 1992
  - Nobuo Nishikiori, *Gas allocation optimization for continuous flow gas lift system*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the discipline of petroleum engineering, the graduate school, the university of Tulsa, 1989
  - Octavio L. Cordero Díaz, *Flow performance of one inch fluid operated gas lift valves*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the discipline of petroleum engineering, the graduate school, the university of Tulsa, 1993
  - Rajiv, K. Sagar, *An improved dynamic model of gas lift valve performance*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the discipline of petroleum engineering, the graduate school, the university of Tulsa, 1991
  - Sharon Imelda Escalante Nuñez, *Flow performance modeling of pressure operated gas lift valves*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the discipline of petroleum engineering, the graduate school, the university of Tulsa, 1994
  - Tianlu Liao, *Continuous gas lift installation design simulation*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the discipline of petroleum engineering, the graduate school, the university of Tulsa, 1988

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Tabla de factores de corrección de temperatura

'F	C.	'F	C.	'F	C.	'F	C.	'F	C.	'F	C.
61	998	101	919	141	852	181	794	221	743	261	694
62	996	102	917	142	850	182	792	222	742	262	692
63	994	103	915	143	849	183	791	223	740	263	696
64	991	104	914	144	847	184	790	224	739	264	695
65	989	105	912	145	845	185	788	225	738	265	694
66											
67	987	106	910	146	844	186	787	226	737	266	693
68	985	107	908	147	842	187	786	227	736	267	692
69	983	108	906	148	841	188	784	228	735	268	691
70	981	109	905	149	839	189	783	229	733	269	690
71	979	110	903	150	838	190	782	230	732	270	689
72											
73	977	111	901	151	836	191	780	231	731	271	688
74	975	112	899	152	835	192	779	232	730	272	687
75	973	113	898	153	833	193	778	233	729	273	686
76	971	114	896	154	832	194	776	234	728	274	685
77	969	115	894	155	830	195	775	235	727	275	684
78											
79	967	116	893	156	829	196	774	236	725	276	683
80	965	117	891	157	827	197	772	237	724	277	682
81	963	118	889	158	826	198	771	238	723	278	681
82	961	119	887	159	825	199	770	239	722	279	680
83	959	120	886	160	823	200	769	240	721	280	679
84											
85	957	121	884	161	822	201	767	241	720	281	678
86	955	122	882	162	820	202	766	242	719	282	677
87	953	123	881	163	819	203	765	243	718	283	676
88	951	124	879	164	817	204	764	244	717	284	675
89	949	125	877	165	816	205	762	245	715	285	674
90											
91	947	126	876	166	814	206	761	246	714	286	673
92	945	127	874	167	813	207	760	247	713	287	672
93	943	128	872	168	812	208	759	248	712	288	671
94	941	129	871	169	810	209	757	249	711	289	670
95	939	130	869	170	809	210	756	250	710	290	669
96											
97	938	131	868	171	807	211	755	251	709	291	668
98	936	132	866	172	806	212	754	252	708	292	667
99	934	133	864	173	805	213	752	253	707	293	666
100	932	134	863	174	803	214	751	254	706	294	665
101	930	135	861	175	802	215	750	255	705	295	664
102											
103	928	136	860	176	800	216	749	256	704	296	663
104	926	137	858	177	799	217	748	257	702	297	662
105	924	138	856	178	798	218	746	258	701	298	662
106	923	139	855	179	796	219	745	259	700	299	661
107	921	140	853	180	795	220	744	260	699	300	660

C<sub>1</sub> - gas lift valve dome pressure at 60 °F  
 C<sub>2</sub> - gas lift valve dome pressure at well temperature

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## TIPO DE ESTUDIO: BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO

## CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL POZO EN ESTUDIO

Densidad relativa del aceite 0.890999973 gr/cm<sup>3</sup>  
 Densidad relativa del gas 0.878000021 Adim  
 Densidad relativa del agua 1.00000000 Adim  
 Relación gas-aceite 47.2999992 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 Relación agua-aceite 0.00000000E+00 %  
 Presión de separación 0.00000000E+00 lb/pg<sup>2</sup>  
 Temperatura de separación 20.0000000 °C

## OPCIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES PVT

Se emplea Vazquez-Beggs para calcular Bo  
 Se emplea Lasater para calcular Rs  
 Se emplea Beggs-Robinson para calcular la viscosidad del aceite

## CONDICIONES DE TRABAJO

Temperatura en la cabeza del pozo 34.0000000 °C  
 Temperatura en el fondo del pozo 111.000000 °C  
 Profundidad intervalo medio disparado 2675.00000 m

## ESTADO MECÁNICO DEL POZO

Número de cambios de diámetros en la TP: 2	
Diámetro interno 1 de la TP 3.95799994 pg,	Profundidad 1 en la TP 20.6900005
Diámetro interno 2 de la TP 2.99200010 pg,	Profundidad 2 en la TP 2632.82007
Número de cambios en la TR: 2	
Diámetro interno 1 de la TR 8.68099976 pg,	Profundidad 1 en la TR 1599.00000
Diámetro interno 2 de la TR 6.18400002 pg,	Profundidad 2 en la TR 2675.00000
Número de secciones de desviación: 1	
Profundidad vertical 1 : 2675.00000 m,	Profundidad desarrollada 1 : 2675.00000 m

## CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Se emplea la correlación de flujo multifásico de Orkiszewski  
 Se toma en cuenta la curva IPR  
 Gasto del líquido de la prueba de producción 521.000000 bl/día  
 Presión de fondo fluyendo 2895.43994 lb/pg<sup>2</sup>  
 Presión de fondo estática 3096.41992 lb/pg<sup>2</sup>  
 Presión de saturación 1863.25806 lb/pg<sup>2</sup>  
 Densidad relativa del gas de inyección 0.800000012 Adim  
 Densidad relativa del fluido de control 1.00000000 Adim  
 Flujo descendente  
 Presión de trabajo 213.000000 lb/pg<sup>2</sup>  
 Presión superficial de operación 900.000000 lb/pg<sup>2</sup>  
 Presión máxima de inyección 1000.00000 lb/pg<sup>2</sup>  
 Caída de presión en la válvula 100.000000 lb/pg<sup>2</sup>  
 El empacador es fijo  
 Profundidad del empacador 2630.82007 m  
 Volumen del gas de inyección 1.00000000 MMpie<sup>3</sup>/día

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

COMPORTAMIENTO DE UN  
POZO FLUYENTE

Resultado del perfil de presiones

Profundidad ft	Presión del fluido lb/pg <sup>2</sup>
0	233.26
67.8632	243.2534
151.4351	258.2534
234.8086	273.2534
317.9724	288.2534
400.9145	303.2534
483.6237	318.2534
566.0867	333.2534
648.3101	348.2534
730.2767	363.2534
811.9704	378.2534
893.371	393.2534
974.4687	408.2534
1055.249	423.2534
1135.699	438.2534
1215.8	453.2534
1295.544	468.2534
1374.919	483.2534
1453.91	498.2534
1532.51	513.2534
1610.708	528.2534
1688.489	543.2534
1765.847	558.2534
1842.777	573.2534
1919.284	588.2534
1995.358	603.2534
2070.985	618.2534
2146.151	633.2534
2220.845	648.2534
2295.057	663.2534
2368.77	678.2534
2441.977	693.2534
2514.664	708.2534
2586.822	723.2534
2658.437	738.2534
2729.501	753.2534
2794.56	767.0958
2865.578	782.0958
2936.001	797.0958
3005.812	812.0958

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



3074.967	827.0958
3143.458	842.0958
3211.269	857.0958
3278.391	872.0958
3309.52	879.126
3376.876	894.126
3443.491	909.126
3509.346	924.126
3556.795	939.126
3604.014	954.126
3651.014	969.126
3697.804	984.126
3744.393	999.126
3790.79	1014.126
3837.002	1029.126
3883.039	1044.126
3896.64	1048.523
3944.874	1063.523
3992.941	1078.523
4040.847	1093.523
4088.6	1108.523
4136.206	1123.523
4183.671	1138.523
4231.001	1153.523
4278.201	1168.523
4325.277	1183.523
4372.234	1198.523
4411.6	1211.033
4458.89	1226.033
4506.165	1241.033
4553.447	1256.033
4600.738	1271.033
4648.036	1286.033
4695.342	1301.033
4742.656	1316.033
4789.979	1331.033
4837.309	1346.033
4884.648	1361.033
4931.996	1376.033
4979.352	1391.033
4998.72	1397.188
5045.845	1412.188
5092.979	1427.188
5140.121	1442.188
5187.272	1457.188
5234.433	1472.188
5281.602	1487.188

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

5328.78	1502.188
5372.64	1516.127
5419.955	1531.127
5467.279	1546.127
5514.613	1561.127
5561.957	1576.127
5609.31	1591.127
5656.672	1606.127
5704.044	1621.127
5751.426	1636.127
5798.817	1651.127
5846.219	1666.127
5893.631	1681.127
5904	1684.422
5951.85	1699.422
5999.71	1714.422
6047.581	1729.422
6095.461	1744.422
6143.352	1759.422
6191.253	1774.422
6239.165	1789.422
6287.086	1804.422
6335.019	1819.422
6366.48	1829.42
6415.23	1844.42
6463.991	1859.42
6512.762	1874.42
6561.544	1889.42
6610.337	1904.42
6659.142	1919.42
6707.957	1934.42
6756.783	1949.42
6763.36	1951.444
6812.464	1966.444
6861.58	1981.444
6910.707	1996.444
6959.845	2011.444
7008.995	2026.444
7058.155	2041.444
7058.56	2041.568
7107.467	2056.568
7156.385	2071.568
7205.314	2086.568
7254.255	2101.568
7303.208	2116.568
7352.171	2131.568
7401.146	2146.568

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

7450.132	2161.568
7499.13	2176.568
7548.139	2191.568
7597.16	2206.568
7646.192	2221.568
7695.236	2236.568
7744.292	2251.568
7793.359	2266.568
7842.438	2281.568
7891.528	2296.568
7911.36	2302.671
7960.134	2317.671
8008.919	2332.671
8057.716	2347.671
8106.524	2362.671
8155.345	2377.671
8204.177	2392.671
8253.021	2407.671
8301.876	2422.671
8350.743	2437.671
8399.622	2452.671
8448.513	2467.671
8497.415	2482.671
8528	2492.082
8576.174	2507.082
8624.359	2522.082
8626.4	2522.709
8636.944	2526.017
8685.137	2541.017
8733.341	2556.017
8774	2568.527

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Gasto del líquido producido: 1366.544 bl/día

DISEÑO DE LA INSTALACIÓN  
DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO

Resultado del espaciamiento de las válvulas

Profundidad ft	Presión del fluido lb/pg <sup>2</sup>	Presión del Qgi lb/pg <sup>2</sup>
0	213	900
67.8632	218.0312	902.2496
184.1155	233.0312	906.1034
301.1389	248.0312	909.9827
418.4815	263.0312	913.8726
535.775	278.0312	917.7608
652.7	293.0312	921.6368
768.9961	308.0312	925.4921
884.4501	323.0312	929.3193
998.8945	338.0312	933.1131
1112.197	353.0312	936.8691
1224.255	368.0312	940.5837
1334.993	383.0312	944.2547
1444.355	398.0312	947.88
1552.301	413.0312	951.4584
1658.807	428.0312	954.9891
1763.863	443.0312	958.4716
1867.467	458.0312	961.9061
1969.65	473.0312	965.2934
2070.388	488.0312	968.6329
2169.703	503.0312	971.9252
2267.615	518.0312	975.1709
2364.148	533.0312	978.3709
2459.33	548.0312	981.5262
2553.191	563.0312	984.6377
2645.764	578.0312	987.7064
2737.081	593.0312	990.7336
2827.175	608.0312	993.7202
2916.079	623.0312	996.6674
3003.829	638.0312	999.5762
3090.457	653.0312	1002.448
3176.009	668.0312	1005.284
3260.522	683.0312	1008.086
3344.028	698.0312	1010.854
3426.561	713.0312	1013.59
3508.154	728.0312	1016.294
3588.84	743.0312	1018.969
3668.649	758.0312	1021.615
3747.614	773.0312	1024.233
3825.763	788.0312	1026.823

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

3903.127	803.0312	1029.388
3979.733	818.0312	1031.927
4058.022	833.0312	1034.522
4135.745	848.0312	1037.099
4212.901	863.0312	1039.657
4289.507	878.0312	1042.196
4365.578	893.0312	1044.718
4441.128	908.0312	1047.222
4516.174	923.0312	1049.71
4590.728	938.0312	1052.182
4664.806	953.0312	1054.637
4738.419	968.0312	1057.078
4811.583	983.0312	1059.503
4884.31	998.0312	1061.914
4956.611	1013.031	1064.31
5028.5	1028.031	1066.694
5099.987	1043.031	1069.063
5171.085	1058.031	1071.42
5241.804	1073.031	1073.765
5312.144	1088.031	1076.096
5382.113	1103.031	1078.416
5451.721	1118.031	1080.723
5520.977	1133.031	1083.019
5589.888	1148.031	1085.303
5658.464	1163.031	1087.577
5726.712	1178.031	1089.839
5794.64	1193.031	1092.091
5862.254	1208.031	1094.332
5929.563	1223.031	1096.564
5996.572	1238.031	1098.785
6063.29	1253.031	1100.997
6129.722	1268.031	1103.199
6195.875	1283.031	1105.392
6261.754	1298.031	1107.576
6327.381	1313.031	1109.751
6392.765	1328.031	1111.919
6457.913	1343.031	1114.078
6522.832	1358.031	1116.23
6587.529	1373.031	1118.375
6652.011	1388.031	1120.513
6716.284	1403.031	1122.643
6780.355	1418.031	1124.767
6844.229	1433.031	1126.885
6907.914	1448.031	1128.996
6971.414	1463.031	1131.101
7034.735	1478.031	1133.2
7097.883	1493.031	1135.293

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

7160.864	1508.031	1137.381
7223.682	1523.031	1139.463
7286.342	1538.031	1141.541
7348.851	1553.031	1143.613
7411.211	1568.031	1145.68
7473.429	1583.031	1147.742
7535.508	1598.031	1149.8
7597.453	1613.031	1151.854
7659.266	1628.031	1153.903
7720.95	1643.031	1155.948
7782.509	1658.031	1157.988
7843.947	1673.031	1160.025
7905.267	1688.031	1162.058
7966.472	1703.031	1164.087
8027.567	1718.031	1166.112
8088.555	1733.031	1168.134
8149.438	1748.031	1170.152
8210.221	1763.031	1172.167
8270.905	1778.031	1174.178
8331.495	1793.031	1176.187
8391.993	1808.031	1178.193
8452.402	1823.031	1180.195
8512.726	1838.031	1182.195
8572.965	1853.031	1184.192
8633.124	1868.031	1186.186
8635.649	1868.662	1186.27
8687.427	1883.662	1187.986
8739.156	1898.662	1189.701
8774	1908.756	1190.856

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Profundidad de inyección: 5236.589 ft  
 Presión de inyección: 1073.592 lb/pg<sup>2</sup>  
 Gasto del líquido producido: 3076.691 bl/día

No.	Válvula		Temperatura
	Válvula ft	Válvula lb/pg <sup>2</sup>	
1	1718.143	956.9561	49.0783
2	3052.947	1001.204	60.79244
3	3964.326	1031.417	68.79065
4	4514.673	1049.66	73.62045
5	4832.99	1060.212	76.41397
6	5044.076	1067.21	78.26645
7	5165.092	1071.222	79.32848

DISEÑO DE LA INSTALACIÓN  
DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO

Resultado respecto al volumen de gas inyectado

Prof. inyección ft	Gasto gas inyección Mpie <sup>3</sup> /d	Líquido producido bl/día
0	210.4292	2443.914
250	2260.674	4286.832
500	2724.862	4484.807
750	3013.72	4565.454
1000	3175.4	4630.313
1250	3283.13	4742.542
1500	3379.311	4957.635
1750	3441.953	4991.788
2000	3500.073	4979.427
2250	3558.178	5072.462
2500	3609.399	5141.27
2750	3617.824	5041.616
3000	3669.571	5071.688
3250	3692.61	5085.564
3500	3709.544	5088.813
3750	3720.841	5081.739
4000	3727.533	5065.498
4250	3728.52	5042.455
4500	3726.679	5016.577
4750	3722.425	4982.715
5000	3716.121	4944.572

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN

DISEÑO DE LA INSTALACIÓN  
DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO

Resultado de la predicción de la presión de fondo fluyendo

Volumen del gas de inyección 0 MMpie<sup>3</sup>/día

Gasto inicial del líquido 102.9 bl/día

Incremento del líquido 411.6 bl/día

Número de incrementos 15

Prof. inyección ft	Gasto líquido bl/día	Presión fondo fluyendo lb/pg <sup>2</sup>
2188.309	102.9	3070.817
2660.038	514.5	2911.267
3160.119	926.1	2748.501
3424.115	1337.7	2666.959
3494.457	1749.3	2651.553
3412.561	2160.9	2688.073
3328.259	2572.5	2727.545
3252.676	2984.1	2766.896
3149.56	3395.7	2817.886
3041.019	3807.3	2872.87
2936.156	4218.9	2929.927
2823.255	4630.5	2992.162
2708.239	5042.101	3058.344
2584.558	5453.701	3131.315
2472.52	5865.301	3203.157

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



DISEÑO DE LA INSTALACIÓN  
DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO

MÉTODO DE ESPACIAMIENTO: UNIVERSAL

DATOS DE LA VÁLVULA

VALVULAS CAMCO TIPO J-40 (CONVENCIONALES)

DIAM. EXT. DE LA VALVULA: 1 pg, ÁREA DE FUELLES: 0.31 pg<sup>2</sup>

DIAM. DE ORIFICIO: 1/8 pg, PASO DE GAS: 138.06 MPCD

$$R(Av/Ab) = .0429 \quad (1 - R) = .9571$$

Válvula N°	Profundidad Des. m	Tv Vert. m	Pso dis psi	Pvo dis psi	Ptp =Pd psi	Pvc psi	Psc @16.0°C psi	Pd psi	Ptro psi	
1	523.8	523.8	49.1	885	907	454	903	882	836	870
2	930.8	930.8	60.8	885	924	659	911	873	822	865
3	1208.6	1208.6	68.8	885	935	830	925	876	820	860
4	1376.4	1376.4	73.6	885	942	940	933	877	819	860
5	1473.5	1473.5	76.4	885	946	992	938	878	819	860
6	1537.8	1537.8	78.3	885	949	1035	941	879	818	860
7	1574.7	1574.7	79.3	885	950	1071	943	879	818	860

Válvula N°	Profundidad Des. m	Tv Vert. m	Pso real psi	Pvo real psi	Ptp real psi	Pso =Pd psi	Pvc psi	Psc psi
1	523.8	523.8	49.1	262	932	910	903	882
2	930.8	930.8	60.8	314	938	899	911	873
3	1208.6	1208.6	68.8	351	951	900	925	876
4	1376.4	1376.4	73.6	374	958	900	933	877
5	1473.5	1473.5	76.4	387	963	901	938	878
6	1537.8	1537.8	78.3	396	966	901	941	879
7	1574.7	1574.7	79.3	401	968	901	943	879

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

DATOS DE LA VÁLVULA

VALVULAS CAMCO TIPO R-20 (RECUPERABLE CON CABLE)

DIAM. EXT. DE LA VALVULA: 1 1/2 pg, ÁREA DE FUELLES: 0.77 pg<sup>2</sup>

DIAM. DE ORIFICIO: 1/8 pg, PASO DE GAS: 138.06 MPCD

$$R(Av/Ab) = .0173 \quad (1 - R) = .9827$$

Válvula N°	Profundidad Des. m	Tv Vert. m	Pso psi	Pvo psi	Ptp psi	Pvc psi	Psc psi	Pd psi	Ptro psi
------------	--------------------	------------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	----------

N°	Des.	Vert.	dis	dis	dis	=Pd	@16.0°C				
	m	m	°C	psi	psi	psi	psi	psi	psi	psi	psi
1	523.8	523.8	49.1	885	907	454	905	884	838	850	
2	930.8	930.8	60.8	885	924	659	918	881	829	845	
3	1208.6	1208.6	68.8	885	935	830	931	882	826	845	
4	1376.4	1376.4	73.6	885	942	940	938	882	824	840	
5	1473.5	1473.5	76.4	885	946	992	943	882	823	840	
6	1537.8	1537.8	78.3	885	949	1035	946	883	822	840	
7	1574.7	1574.7	79.3	885	950	1071	947	883	822	840	

Válvula	Profundidad	Tv	Ptp	Pvo	Pso	Pvc	Psc
N°	Des.	Vert.	real	real	real	=Pd	
	m	m	°C	psi	psi	psi	psi

1	523.8	523.8	49.1	262	917	895	905	884
2	930.8	930.8	60.8	314	929	890	918	881
3	1208.6	1208.6	68.8	351	941	891	931	882
4	1376.4	1376.4	73.6	374	948	891	938	882
5	1473.5	1473.5	76.4	387	953	891	943	882
6	1537.8	1537.8	78.3	396	955	891	946	883
7	1574.7	1574.7	79.3	401	957	891	947	883

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**DATOS DE LA VÁLVULA**  
 VALVULAS CAMCO TIPO BK-1 (RECUPERABLE CON CABLE)  
 DIAM. EXT. DE LA VALVULA: 1 pg, ÁREA DE FUELLES: 0.31 pg<sup>2</sup>  
 DIAM. DE ORIFICIO: 1/8 pg, PASO DE GAS: 138.06 MPCD  
 $R(Av/Ab) = .0429$      $(1 - R) = .9571$

Válvula	Profundidad	Tv	Pso	Pvo	Ptp	Pvc	Psc	Pd	Ptro	
N°	Des.	Vert.	dis	dis	dis	=Pd	@16.0°C			
	m	m	°C	psi	psi	psi	psi	psi	psi	
1	523.8	523.8	49.1	885	907	454	903	882	836	870
2	930.8	930.8	60.8	885	924	659	911	873	822	865
3	1208.6	1208.6	68.8	885	935	830	925	876	820	860
4	1376.4	1376.4	73.6	885	942	940	933	877	819	860
5	1473.5	1473.5	76.4	885	946	992	938	878	819	860
6	1537.8	1537.8	78.3	885	949	1035	941	879	818	860
7	1574.7	1574.7	79.3	885	950	1071	943	879	818	860

Válvula	Profundidad	Tv	Ptp	Pvo	Pso	Pvc	Psc
---------	-------------	----	-----	-----	-----	-----	-----

Nº	Des. m	Vert. m	real °C	real psi	real psi	=Pd psi	psi	psi
1	523.8	523.8	49.1	262	932	910	903	882
2	930.8	930.8	60.8	314	938	899	911	873
3	1208.6	1208.6	68.8	351	951	900	925	876
4	1376.4	1376.4	73.6	374	958	900	933	877
5	1473.5	1473.5	76.4	387	963	901	938	878
6	1537.8	1537.8	78.3	396	966	901	941	879
7	1574.7	1574.7	79.3	401	968	901	943	879

LEGIS COM  
FALTA DE ORIGEN