

34
24

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

APLICACIONES PRACTICAS EN LA PRODUCCION
DE POZOS PETROLEROS

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A N :
NAJERA MORENO CESAR EUGENIO
NOGUEZ LUGO MARIO

Director de Tesis: M.I. José A. Gómez Cabrera

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D.F.

1989





UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	PAGINA
CAPITULO I	
INTRODUCCION	... 1
<hr/>	
CAPITULO II	
CONVERSION DE UNIDADES Y ANALISIS DIMENSIONAL	... 4
<hr/>	
CAPITULO III	
CONCEPTOS FUNDAMENTALES	... 37
<hr/>	
CAPITULO IV	
POZOS FLUYENTES	... 75
<hr/>	
CAPITULO V	
BOMBEO NEUMATICO	... 118
<hr/>	
CAPITULO VI	
BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON	... 227
<hr/>	
CAPITULO VII	
BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET (A CHORRO)	... 302
<hr/>	

CAPITULO I

INTRODUCCION

En la industria petrolera, la explotación de los pozos es de suma importancia ya que ellos representan el medio de obtención de hidrocarburos desde el yacimiento petrolífero a la superficie, lo cual reviste a su vez un interés de aspecto económico para el país.

Por lo anterior, existe una preocupación de los ingenieros petroleros - por lo que la producción de dichos pozos se efectúe en forma óptima; es decir, que el pozo produzca a un gasto tal que la vida productiva de éste sea lo más prolongada posible, claro está que sin dejar de importar el aspecto económico.

Además debe tenerse en cuenta que se debe producir todo el volumen posible de hidrocarburos de los pozos, esto es, que el volumen de aceite - remanente final sea el menor posible.

De esta manera los sistemas artificiales de producción en pozos petroleros, tienen una gran importancia en la explotación de los hidrocarburos sin el empleo de estos sistemas de extracción de hidrocarburos, no sería factible obtener el máximo beneficio del yacimiento.

Cabe mencionar que el empleo de un sistema de bombeo o extracción, incrementa el costo de la explotación del yacimiento, pero por otro lado si este costo es mucho menor el beneficio obtenido del fluido extraído, no solo se cubrirá la inversión sino a su vez se tendrán ganancias adicionales.

El siguiente trabajo tiene como objetivos primordiales analizar desde el pozo fluente hasta los sistemas artificiales de producción (en este caso: bombeo neumático continuo e intermitente, bombeo hidráulico tipo pistón y jet o a chorro), para dar un amplio panorama en la solución a problemas prácticos de optimización de la producción de pozos petroleros.

Además se anexan dos capítulos que contemplan antecedentes necesarios para el mejor aprovechamiento de los problemas. Estos son :

Capítulo II, que trata sobre conversión de unidades y análisis dimensional, tan indispensable no sólo en la industria petrolera sino en --- otras áreas de la ingeniería como una herramienta para facilitar la solución a problemas afines.

Capítulo III, sobre conceptos fundamentales, ya que como es sabido, -- cualquier materia que se desee estudiar, sino se tienen antecedentes -- sobre ésta, resulta ser más complicado su estudio.

Algunos de los capítulos presentan glosario de términos para poder complementar el estudio de la producción de pozos y tener un conocimiento más amplio sobre el tema en cuestión.

En otros capítulos se anexan gráficas y tablas que serán de utilidad en la solución de todos los problemas ahí descritos.

Al final de cada capítulo se anexan las figuras que sirven como base en la solución a los problemas resueltos, todas éstas están señaladas con el número del capítulo correspondiente.

Cabe aclarar que para el capítulo V de bombeo neumático, se emplearon curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tuberías verticales y horizontales, las cuales pueden encontrarse en la referencia -- (2) de dicho capítulo y están referenciadas con Fig. A - No. y B - No.

En los capítulos VI y VII de bombeo hidráulico tipo pistón y jet -- (a chorro), todas las Figuras y Tablas a las que se hacen mención en la solución de los problemas, se encuentran en la referencia (1) de este -- capítulo.

En todos los capítulos se presenta las referencias que se utilizarán para elaborar este trabajo para que el lector pueda profundizar sobre algún tema de su interés.

Además debe mencionarse que las figuras elaboradas para la solución de los problemas resueltos se denotan durante el desarrollo de éstos como sigue:

Número del problema correspondiente, Figura (A,B,C, etc.)

Número del capítulo respectivo y R (problema resuelto) ejemplo:

Fig. 3A.IVR.

CAPITULO II

CONVERSION DE UNIDADES Y ANALISIS DIMENSIONAL

En la solución de problemas relacionados con el flujo de fluidos es muy común que sea necesario algún conocimiento de análisis dimensional y conversión de unidades ya que pocos problemas de ingeniería son resueltos sin la aplicación de alguna de estas técnicas matemáticas.

El objetivo de este capítulo es revisar estas herramientas matemáticas necesarias para analizar trabajos realizados en el área de la ingeniería petrolera, ya que de esta manera se facilitará la solución de algún problema relacionado con ésta.

Aún cuando son utilizados diferentes sistemas de dimensiones, el sistema absoluto es el más común. Es necesario diferenciar entre dimensiones y unidades. Dimensiones son conceptos básicos de medición: longitud, tiempo, masa y temperatura. Las unidades son una forma de expresar las dimensiones: lb o g para masa, pg o m para longitud, hr o seg para tiempo y °C, °K, °F y °R para temperatura.

En el cálculo de constantes de conversión, para obtener una ecuación dimensionalmente correcta, se ha notado que la constante tiene unidades pero no dimensiones. Además es posible tener un número adimensional que debe tener unidades para obtener una ecuación dimensionalmente correcta.

Una de las más poderosas herramientas del análisis dimensional es la habilidad para obtener grupos dimensionales adecuados que describan un experimento particular o sirvan como funciones de correlación de un conjunto de datos.

Se puede definir una ecuación funcional como una ecuación en la cual las cantidades fundamentales en cada miembro de la ecuación son las mismas; es decir, que la ecuación tenga homogeneidad dimensional. Una ecuación funcional es válida en cualquier sistema de unidades, siempre que éstas sean consistentes.

El Teorema Π de Buckingham es un método más generalizado para efectuar el análisis dimensional. Este teorema ha sido usado ampliamente en la solución de problemas de flujo de fluidos y una de sus ventajas principales es que se obtienen grupos adimensionales numérica y dimensionalmente independientes del sistema de unidades empleado.

Este teorema establece que: "si una ecuación es dimensionalmente homogénea, puede reducirse a una relación entre un conjunto de productos adimensionales". Se considera que un conjunto de productos adimensionales de variables dadas es completo si cada producto es independiente de los otros. En general se establece que si hay "n" variables dimensionales en una ecuación dimensionalmente homogénea, descrita por "m" dimensiones fundamentales, se puede obtener:

$$i = n - r$$

donde: i = número de productos adimensionales independientes.
 n = número de variables dimensionales
 r = rango de la matriz dimensional de "m" renglones y "n" columnas ($n \times m$).

El análisis dimensional es un método matemático muy útil en:

- a) Cambio de unidades
- b) Verificación de ecuaciones
- c) Determinación de grupos adimensionales, ésto es, determinar un arreglo conveniente de variables tal que sea obtenido un número adimensional.
- d) Planeación de experimentos sistemáticos.

**CONVERSION DE UNIDADES
Y
ANALISIS DIMENSIONAL
PROBLEMAS RESUELTOS**

1. La ecuación de estado para gases reales en ingeniería está dada como:

$$pV = znRT$$

donde: $R = \text{constante del gas} = 82.06 \frac{(\text{atm}) (\text{cm}^3)}{(\text{g-mole}) (^\circ \text{K})}$

para: p - presión, atm
 V - volumen, cm^3
 n - número de g - mol
 T - temperatura, $^\circ \text{K}$
 z - factor de compresibilidad, adimensional.

Se desea convertir a unidades prácticas en la industria petrolera donde:

p - presión, $\text{lb/pg}^2 \text{ abs.}$
 V - volumen, pie^3
 n - lb-mol
 T - temperatura, $^\circ \text{R}$
 z - factor de compresibilidad, adim.
 $R = \text{constante del gas} = (X) \left[\frac{(\text{lb/pg}^2 \text{ abs}) (\text{pie}^3)}{(\text{lb-mol}) (^\circ \text{R})} \right]$

Los siguientes factores de conversión son necesarios:

$$1 \text{ pie}^3 = (30.48)^3 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ atm} = 14.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$1 \text{ lb.} = 453.6 \text{ g.}$$

$$1 \text{ }^\circ \text{R} = 1.8 \text{ }^\circ \text{K}$$

Empezar con: $82.06 \frac{(\text{atm}) (\text{cm}^3)}{(\text{g-mol}) (^\circ \text{K})}$

y convertir a: $(X) \frac{(\text{lb/pg}^2 \text{ abs}) (\text{pie}^3)}{(\text{lb-mol}) (^\circ \text{R})}$

$$\text{así: } \left| \frac{82.06 \text{ atm} \cdot 14.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs} \cdot \text{cm}^3}{1 \text{ atm} \cdot (30.48)^3 \text{ cm}^3} \right| \left| \frac{453.6 \text{ g-mol}}{1 \text{ lb-mol}} \cdot \frac{1 \text{ }^\circ\text{K}}{1.8 \text{ }^\circ\text{R}} \right|$$

Resolviendo numéricamente se tiene: $\frac{(82.06) (14.7) (453.6) (1.8)}{(30.48)^3} = 10.72$

o: $R = 10.72 \frac{(\text{lb/pg}^2 \text{ abs}) (\text{pie}^3)}{(\text{lb-mol}) (^\circ\text{R})}$

De donde la ecuación general de los gases reales queda como:

$$pV = znRT = (10.72) znT \quad (2.1)$$

donde:

p - presión en lb/pg² abs.

V - volumen en pie³

n - lb-mol

T - temperatura en °R

2. Suponer que se tiene un rectángulo de 7.62 cm. de ancho y 60.96 cm. de largo, (Fig. 2.1)

$$w = 7.62 \text{ cm} = 3 \text{ pg} = 1/4 \text{ pie}$$

$$L = 60.96 \text{ cm} = 2 \text{ pie} = 2/3 \text{ yd}$$

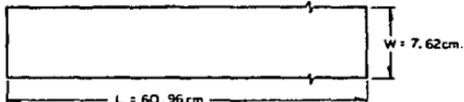


Fig. 2.1

Asignando valores numéricos al rectángulo se puede verificar cualquier conversión que se desee hacer.

Es conocido que la ecuación para el área de un rectángulo es:

$$A = wL \quad (2.2)$$

donde:

A - área en cm²

w - ancho en cm

L - longitud en cm

Suponer que se desea resolver directamente para el área en pie^2 y además sustituir L en yardas y w en pg en la Ec. 2.2. Por lo tanto, se debe determinar un factor de conversión C tal que se pueda multiplicar pg x yd por el factor de conversión y obtener el área en pie^2 .

La ecuación dimensionalmente correcta es:

$$A (\text{cm}^2) = w(\text{cm})L(\text{cm}) \quad (2.3)$$

La ecuación que se desea es:

$$A (\text{pie}^2) = Cw(\text{pg})L(\text{yd}) \quad (2.4)$$

Procedimiento a):

- 1) Iniciar con la ecuación que es dimensionalmente correcta.
- 2) Convertir cada miembro de la ecuación a las unidades deseadas.
- 3) Resolver algebraicamente para la conversión de la constante C.
- 4) Nota: Dejar cualquier constante establecida, tal como $1/2$ en $S = \frac{1}{2}gt^2$, esto es, no cambiar de su posición cuando se resuelva algebraicamente para la constante de conversión.

Solución a):

- 1) La ecuación dimensionalmente correcta es:

$$A (\text{cm}^2) = w(\text{cm})L(\text{cm})$$

Los siguientes factores de conversión serán necesarios en la solución para C en la Ec. 2.4

$$A(\text{pie}^2) = Cw(\text{pg})L(\text{yd})$$

$$30.48 \text{ cm} = 1 \text{ pie}$$

$$2.54 \text{ cm} = 1 \text{ pg}$$

$$3 \text{ pies} = 1 \text{ yd}$$

- 2) Convirtiendo cada miembro de la Ec. 2.4 a las unidades deseadas:

$$\left| \frac{\text{Acm}^2}{30.48 \text{ cm}^2} \right| = C \left| \frac{\text{wcm}}{2.54 \text{ cm}} \frac{\text{Lcm}}{30.48 \text{ cm}} \frac{\text{1 pie}}{3 \text{ pie}} \frac{\text{1 yd}}{\text{1 yd}} \right|$$

3) Resolviendo algebraicamente para C:

$$\frac{1}{(30.48)^2} = \frac{C}{(2.54)(30.48)(3)}$$

$$C = \frac{(2.54)(30.48)(3)}{(30.48)^2} = \frac{1}{4} = 0.25$$

$$C = 0.25 \left[\begin{array}{c|c|c} \text{cm} & \text{cm} & \text{pie}^2 \\ \text{pg} & \text{yd} & \text{cm}^2 \end{array} \right]$$

$$C = 0.25 \left[\begin{array}{c|c|c} L & L & L^2 \\ L & l. & L^2 \end{array} \right] = \underline{0.25}$$

Se puede observar que la constante C tiene las unidades de:

$$\left[\begin{array}{c|c|c} \text{cm} & \text{cm} & \text{pie}^2 \\ \text{pg} & \text{yd} & \text{cm}^2 \end{array} \right]$$

y sin embargo es adimensional.

La ecuación final con unidades es escrita como sigue:

$$A (\text{pie}^2) = \left\{ 0.25 \left[\begin{array}{c|c|c} \text{cm} & \text{cm} & \text{pie}^2 \\ \text{pg} & \text{yd} & \text{cm}^2 \end{array} \right] \right\} \left[\begin{array}{c|c} w \text{ pg} & L \text{ yd} \end{array} \right] \quad (2.5)$$

Notese que la constante C convierte la Ec. 2.5 a las unidades de la Ec. 2.3 la cual es dimensionalmente correcta.

Haciendo referencia a la Fig. 2.1, la Ec. 2.5 puede ser fácilmente comprobada:

$$A(\text{pie}^2) = (0.25)w(\text{pg})L(\text{yd})$$

$$A(\text{pie}^2) = (1/4)(3)(2/3) = 1/2 \text{ pie}^2$$

De la Fig. 2.1 se nota que:

$$w = 1/6 \text{ pie y } L = 2 \text{ pie}$$

$$\text{o: } A(\text{pie}^2) = (1/4 \text{ pie})(2 \text{ pie}) = 1/2 \text{ pie}^2$$

Procedimiento b):

- 1) Iniciar con la Ec. 2.4 con las unidades deseadas.
- 2) Convertir después a una ecuación que sea dimensionalmente correcta.

- 3) No es necesario resolver algebraicamente para la constante de conversión.
- 4) De nuevo, cualquier constante establecida en la ecuación, tal como $1/2$ en $S = \frac{1}{2} g t^2$ no debe ser cambiada de posición.

Este método ofrece la ventaja de no tener que resolver algebraicamente para C.

Solución b):

- 1) $A(\text{pie}^2) = Cw(\text{pg})L(\text{yd})$
- 2) Convirtiendo a las unidades que son dimensionalmente correctas:

$$\left| \frac{A(\text{pie}^2)}{1 \text{ pie}^2} \right| = \left| \frac{w(\text{pg}) L(\text{yd})}{1 \text{ pg} \cdot 1 \text{ yd}} \right| = \left| \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ pg}} \cdot \frac{3 \text{ pies}}{1 \text{ yd}} \cdot \frac{30.48 \text{ cm}}{1 \text{ pie}} \right|$$

- 3) Resolviendo numéricamente:

$$\frac{(30.48)^2}{1} = \frac{(2.54)(3)(30.48)}{1}$$

Agrupando términos en el segundo miembro:

$$\frac{(2.54)(3)(30.48)}{(30.48)^2} = 0.25$$

Nuevamente la constante de conversión queda:

$$0.25 \left[\frac{\text{cm}}{\text{pg}} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{yd}} \cdot \frac{\text{pie}^2}{\text{cm}^2} \right]$$

Cualquiera de estos dos métodos es satisfactorio y una preferencia por el a) o el b) puede ser seleccionada por el lector.

3. La Ley de Darcy para flujo lineal incomprensible está dada como:

$$q = \frac{kA \Delta p}{\mu L} \quad (2.6)$$

donde: q - gasto , cm^3/seg
 k - permeabilidad , darcy
 A - área , cm^2
 Δp - caída de presión , atm
 μ - viscosidad , c.p.
 L - longitud , cm

Se desea obtener una constante de conversión en la Ec. 2.6 tal que:

$$q = C \frac{KA \Delta p}{L}$$

donde: q , bl/día
 k , darcy
 A , pie^2
 Δp , lb/pg^2
 μ , c.p.
 L , pie

Iniciando con las unidades que son dimensionalmente correctas y convirtiendo a las unidades deseadas se tiene:

$$\begin{aligned}
 & \left| \frac{q \text{ cm}^3}{\text{seg}} \left| \frac{0.5434 \text{ bl/día}}{1 \text{ cm}^3/\text{seg}} \right| \right. \\
 = C & \left| \frac{K \text{ darcy}}{1} \left| \frac{A \text{ cm}^2}{(30.48 \text{ cm})^2} \right| \frac{\Delta p_{\text{atm}}}{1 \text{ atm}} \left| \frac{14.7 \text{ lb/pg}^2}{\mu \text{ c.p.}} \right| \frac{L \text{ cm}}{1 \text{ pie}} \right| \left| \frac{30.48 \text{ cm}}{1} \right|
 \end{aligned}$$

Resolviendo numéricamente para C:

$$\frac{0.5434}{1} = \frac{C (14.7)(30.48)}{(30.48)^2}$$

$$C = \frac{(0.5434)(30.48)^2}{(14.7)(30.48)} = 1.127$$

Las unidades de C son:

$$C = 1.127 \left| \frac{\text{bl/día}}{\text{cm}^3/\text{seg}} \left| \frac{\text{cm}^2}{\text{pie}^2} \right| \frac{\text{atm}}{\text{lb/pg}^2} \right| \text{cm}$$

Sin embargo, C es adimensional:

$$C = \left| \begin{array}{c|c|c|c} L^{3_T-1} & L^2 & FL^{-2} & L \\ \hline L^{3_T-1} & L^2 & FL^{-2} & L \end{array} \right|$$

La Ec. 2.6 con las unidades deseadas es:

$$q \text{ (bl/día)} = \left\{ 1.127 \left| \begin{array}{c|c|c|c|c} \text{bl/día} & \text{cm}^2 & \text{atm} & \text{pie} & \\ \hline \text{cm}^3/\text{seg} & \text{pie}^2 & \text{lb/pg}^2 & \text{cm} & \end{array} \right| \right\} \frac{K \text{ (darcy)} A (\text{pie}^2) \Delta p (\text{lb/pg}^2)}{\mu \text{ (cp)} L \text{ (pie)}}$$

generalmente escrita como:

$$q = 1.127 \frac{K A \Delta p}{\mu L}$$

4. Una forma del número de Reynolds adimensional para flujo bifásico es:

$$N_{Re} = \frac{q \ell d}{A \mu} \quad (2.7)$$

donde:

- q - gasto, pie³/seg
- ℓ - densidad, lbm/pie³
- μ - viscosidad, lbm/pie-seg
- d - diámetro, pie
- A - área, pie²

Sin embargo, una forma más útil de este número con respecto al diagrama de Moody para flujo bifásico es:

$$N_{Re} = C \frac{q \ell}{d \mu}$$

donde:

- q - gasto, bl/día
- ℓ - densidad, lbm/bl
- d - diámetro, pie
- μ - viscosidad, c.p.

Determinar la constante C, considerando que $A = \pi d^2/4$

Procedimiento a):

Iniciando con las unidades dimensionalmente correctas y convirtiendo a las unidades deseadas se tiene:

$$N_{Re} = C \left| \frac{q \text{ pie}^3}{\text{seg}} \left| \frac{1 \text{ bl}}{5.61 \text{ pie}^3} \right| \frac{86400 \text{ seg}}{\text{día}} \left| \frac{\ell \text{ lbm}}{\text{pie}^3} \right| \frac{5.61 \text{ pie}^3}{\text{bl}} \left| \frac{4}{\pi d \text{ pie}} \right| \right| \times$$

$$\times \left| \frac{\text{lbm/pie-seg}}{\mu (\text{lbm/pie-seg})} \left| \frac{1.488 \times 10^3 \text{ c.p.}}{1.488 \times 10^3 \text{ c.p.}} \right| \right|$$

La constante $4/\pi$ establecida en la ecuación anterior no será incluida en la constante C. Resolviendo para C se tiene:

$$1 = C \frac{86.400}{1.488 \times 10^3}$$

$$C = 1.722 \times 10^{-2}$$

entonces $N_{Re} = 1.722 \times 10^{-2} \times (4/\pi) \frac{q \ell}{d \mu}$

$$N_{Re} = 2.2 \times 10^{-2} \frac{q \ell}{d \mu}$$

Procedimiento b):

De la ecuación de N_{Re} con las unidades dimensionalmente correctas se tiene:

$$N_{Re} = \left| \frac{q \text{ bl}}{\text{día}} \left| \frac{\ell \text{ lbm}}{\text{bl}} \right| \frac{\text{día}}{86.400 \text{ seg}} \left| \frac{4}{\pi d \text{ pie}} \right| \frac{1.488 \times 10^3 \text{ cp}}{\mu \text{ cp}} \left| \frac{\text{lbm/pie-seg}}{\text{lbm/pie-seg}} \right| \right|$$

$$= \frac{(4)(1.488 \times 10^3)}{(\pi)(86.400)} \frac{q \ell}{d \mu}$$

$$N_{Re} = 2.2 \times 10^{-2} \frac{q \ell}{d \mu}$$

5. Empleando el método de Homogeneidad Dimensional, desarrollar una expresión funcional para el flujo de un fluido incompresible en una sola fase a través de una tubería horizontal.

- 1) Variables posibles:
- Gradiente de presión.
 - Diámetro de la tubería.
 - Densidad del fluido.
 - Viscosidad del fluido.
 - Velocidad del fluido.

- 2) Preparar una tabla de símbolos y dimensiones:

Variable	Símbolo	Dimensiones (MLT)
Gradiente de presión	dp/dL	$ML^{-2}T^{-2}$ (El Newton se utiliza como unidad de fuerza.)
Diámetro	d	L
Densidad	ρ	ML^{-3}
Viscosidad	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
Velocidad	v	LT^{-1}

- 3) Escribiendo las ecuaciones para la solución:

$$\frac{dp}{dL} = f(d, \rho, \mu, v)$$

$$\frac{dp}{dL} = C(d)^a (\rho)^b (\mu)^c (v)^d$$

$$ML^{-2}T^{-2} = (L)^a (ML^{-3})^b (ML^{-1}T^{-1})^c (LT^{-1})^d$$

- 4) Igualando exponentes de dimensiones semejantes:

para M: $1 = b + c$

para L: $-2 = a - 3b - c + d$

para T: $-2 = -c - d$

Resolviendo para a, b y d en función de c se tiene:

$$a = -c - 1$$

$$b = 1 - c$$

$$d = 2 - c$$

Por lo tanto:

$$\frac{dp}{dL} = C d^{-c-1} \ell^{1-c} \mu^c v^{2-c}$$

$$\frac{dp}{dL} = C \frac{\ell v^2}{d} \left(\frac{d v \ell}{\mu} \right)^{-c}$$

$$o: \frac{dp}{dL} \left(\frac{d}{\ell v^2} \right) = C \left(\frac{d v \ell}{\mu} \right)^{-c}$$

$$o: \frac{dp}{dL} \left(\frac{d}{\ell v^2} \right) = f \left(\frac{d v \ell}{\mu} \right)$$

6. Resolver el problema 5 empleando el Teorema π de Buckingham.

1) Preparar una Tabla de Símbolos y dimensiones:

Variable posible	Símbolo	Dimensiones (MLT)
Diámetro	d	L
Densidad	ρ	ML ⁻³
Velocidad	v	LT ⁻¹
Viscosidad	μ	ML ⁻¹ T ⁻¹
Gradiente de presión	dp/dL	ML ⁻² T ⁻²

2) Número de variables dimensionales, $n = 5$

3) Número de dimensiones, $m = 3$

4) Formar una matriz dimensional y obtener su rango.

	d	ρ	v	μ	dp/dL
M	0	1	0	1	1
L	1	-3	1	-1	-2
T	0	0	-1	-1	-2

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -3 & 1 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -2 \end{vmatrix}$$

Esta matriz contiene al menos un determinante de tercer orden diferente de cero:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -2 \\ -1 & -1 & -2 \end{vmatrix} = -1 + 0 - 2 - 1 - 1 - 2 = -7 \neq 0. \therefore r = 3$$

5) $i = (n-r) = (5-3) = 2$. \therefore se requieren 2 grupos adimensionales (π_1 y π_2)

6) Seleccionar ρ , v y μ como variables de repetición, para formar un núcleo de variables, (ρ , v, μ)

Estas contienen M, L y T y no pueden formar un grupo adimensional entre ellas.

- 7) Expresar productos adimensionales de π ; repitiendo las mismas variables del núcleo en cada uno de los grupos y además, incluir alguna de las variables no consideradas en éste.

$$\pi_1 = (\ell)^{a_1} (v)^{b_1} (\mu)^{c_1} (d)$$

$$\pi_2 = (\rho)^{a_2} (v)^{b_2} (\mu)^{c_2} \left(\frac{dp}{dx}\right)$$

- 8) Escribir las ecuaciones dimensionales para cada término:

$$(M^0 L^0 T^0) = (ML^{-3})^{a_1} (LT^{-1})^{b_1} (ML^{-1} T^{-1})^{c_1} (L)$$

$$(M^0 L^0 T^0) = (ML^{-3})^{a_2} (LT^{-1})^{b_2} (ML^{-1} T^{-1})^{c_2} (ML^{-2} T^{-2})$$

- 9) Igualando exponentes de dimensiones semejantes:

para π_1 :

$$\left. \begin{array}{l} \text{para M:} \quad a_1 + c_1 = 0 \\ \text{para L:} \quad -3a_1 + b_1 - c_1 + 1 = 0 \\ \text{para T:} \quad -b_1 - c_1 = 0 \end{array} \right\} \text{Resolviendo} \quad \begin{array}{l} a_1 = 1 \\ b_1 = 1 \\ c_1 = -1 \end{array}$$

para π_2 :

$$\left. \begin{array}{l} \text{para M:} \quad a_2 + c_2 + 1 = 0 \\ \text{para L:} \quad -3a_2 + b_2 - c_2 = 0 \\ \text{para T:} \quad -b_2 - c_2 - 2 = 0 \end{array} \right\} \text{Resolviendo} \quad \begin{array}{l} a_2 = -2 \\ b_2 = -3 \\ c_2 = 1 \end{array}$$

- 10) Sustituir cada uno de los exponentes en los grupos π_1 y π_2 correspondientes:

$$\pi_1 = \ell^{a_1} v^{b_1} \mu^{c_1} d$$

$$\pi_2 = \ell^{a_2} v^{b_2} \mu^{c_2} \left(\frac{dp}{dx}\right)$$

$$\pi_1 = \frac{d v \ell}{\mu}$$

el cual es el número de Reynolds.

$$\pi_2 = \rho^{a_2} v^{b_2} \mu^{c_2} \frac{dp}{dx}$$

$$\pi_2 = \rho^{-2} v^{-3} \mu^1 \frac{dp}{dx} = \left(\frac{dp/dL}{\rho^2 v^3} \right)$$

Sin embargo, π_1 y π_2 no representan todos los grupos adimensionales posibles para el problema de flujo en tubería.

Por el simple recurso de cambiar las variables de repetición se pueden formar más de ocho grupos adimensionales.

Cualquier serie de (n-r) grupos adimensionales (independientes) puede ser convertida a una nueva serie de (n-r) grupos adimensionales independientes por la combinación lineal de la serie original.

7. Resolver las siguientes conversiones deseadas:

a) 82 yardas a cm.

$$\left| \frac{82 \text{ yd}}{1 \text{ yd}} \right| \left| \frac{3 \text{ pie}}{1 \text{ pie}} \right| \left| \frac{30.48 \text{ cm}}{1 \text{ pie}} \right| = 7498.08 \text{ cm}$$

b) 2 millas a pg.

$$\left| \frac{2 \text{ millas}}{1 \text{ milla}} \right| \left| \frac{1609 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right| \left| \frac{100 \text{ cm}}{2.54 \text{ cm}} \right| \left| \frac{1 \text{ pg.}}{1 \text{ pg.}} \right| = 126 \ 692.91 \text{ pg.}$$

c) 200 lb/pg² abs. a atmósferas.

$$\left| \frac{200 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}}{14.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}} \right| \left| \frac{1 \text{ atm.}}{1 \text{ atm.}} \right| = 13.605 \text{ atm.}$$

d) 800 lb/pg² abs. a pg. de Hg.

$$\left| \frac{800 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}}{14.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}} \right| \left| \frac{76 \text{ cm Hg}}{2.54 \text{ cm}} \right| \left| \frac{1 \text{ pg.}}{1 \text{ pg.}} \right| = 1 \ 628.37 \text{ pg. Hg}$$

e) $600 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs. a mm. de Hg}$

$$\left| \frac{600 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs}}{14.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}} \cdot \frac{76 \text{ cm Hg}}{1 \text{ cm}} \cdot \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}} \right| = \underline{31\,020.41 \text{ mm. de Hg}}$$

f) $40 \text{ } \mathcal{R}_m/\text{lt a lbm}/\text{pie}^3$

$$\left| \frac{40 \text{ } \mathcal{R}_m}{1 \text{ lt}} \cdot \frac{1 \text{ lbm}}{454 \text{ } \mathcal{R}_m} \cdot \frac{28.317 \text{ lt}}{1 \text{ pie}^3} \right| = \underline{2.49 \text{ lbm}/\text{pie}^3}$$

8. Expresar la siguiente ecuación en las unidades indicadas. Una columna de acero puede ser diseñada con la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{A} = C \left(\frac{\pi^2 E}{(L/K)^2} \right)$$

donde: $E - \text{lb/pg}^2$ $P - \text{lbs.}$
 $L - \text{cm.}$ $A - \text{pg}^2$
 $K - \text{pg.}$ $C - \text{adim.}$

Determinar el valor de C tal que las siguientes unidades puedan ser usadas:

$E - \text{lb/pg}^2$ $P - \mathcal{R}_m$
 $L - \text{cm}$ $A - \text{cm}^2$
 $K - \text{cm}$

$$P (\text{lb}) = P (\mathcal{R}_m) \cdot \frac{1 \text{ lb}}{454 \mathcal{R}_m} = 0.002203 P$$

$$A (\text{pg}^2) = A (\text{cm}^2) \cdot \frac{1 \text{ pg}^2}{6.4516 \text{ cm}^2} = 0.155 A$$

$$\frac{0.002203P}{0.155 A} = \frac{\pi^2 E}{(L/K)^2}$$

$$\frac{P}{A} = \frac{(0.155) \pi^2 E}{(0.002203) (L/K)^2}$$

$$\frac{P}{A} = 70.358 \frac{\pi^2 E}{(L/K)^2} \quad \therefore C = \underline{70.358}$$

9. Usando el principio de homogeneidad dimensional demostrar que:

$$\Delta p = C \rho g h$$

Usando el sistema FLT:

Variable	Símbolo	Dimensiones (FLT)
Incremento de presión	ΔP	FL^{-2}
Densidad	ρ	$FL^{-4}T^2$
Aceleración de la gravedad	g	LT^{-2}
Altura	h	L

$$\Delta P = C (\rho)^a (g)^b (h)^c$$

$$FL^{-2} = C (FL^{-4}T^2)^a (LT^{-2})^b (L)^c$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Para F: } 1 = a \\ \text{Para L: } -2 = -4a + b + c \\ \text{Para T: } 0 = 2a - 2b \end{array} \right\} \text{Resolviendo} \quad \begin{array}{l} a = 1 \\ 2b = 2a \\ b = 1 \end{array} \quad \begin{array}{l} c = -2 + 4a - b \\ c = 1 \end{array}$$

Por lo tanto: $\Delta P = C \rho^1 g^1 h^1$

$$\Delta P = C \rho g h$$

10. Con el sistema FLT encontrar la altura con la cual un líquido se eleva en un tubo capilar, emplear el método de Homogeneidad Dimensional, usando las siguientes variables:

Variable	Símbolo	Dimensiones
Altura de la columna de líquido	h	L
Densidad del líquido	ρ	$FL^{-4}T^2$
Radio del tubo	r	L
Tensión superficial	t	FL^{-1}
Aceleración de la gravedad	g	LT^{-2}

$$h = f(\rho, r, t, g)$$

$$h = C(\rho)^a (r)^b (t)^c (g)^d$$

$$L^1 = (FL^{-4}T^2)^a (L)^b (FL^{-1})^c (LT^{-2})^d$$

Para F: $0 = a + c$

Para L: $1 = -4a + b - c + d$

Para T: $0 = 2a - 2d$

entonces:

$$a = -c$$

$$c = -a$$

$$d = a$$

$$b = -2(-a)$$

$$b = 4a + c - d$$

$$b = 2a$$

$$= -4c + c - a$$

$$= -3c + c$$

$$b = -2c$$

por lo tanto:

$$h = C \ell^a r^{2a} t^{-a} g^a$$

$$= C \left(\ell g r^2 / t \right)^a$$

$$h = r^2 \ell \left(\frac{\ell g}{t} \right)$$

PROBLEMAS PROPUESTOS

SERIE I. II

- 1.1 El gradiente de presión de un fluido es de $30 \text{ g/cm}^2/\text{pie}$.
Convertir este gradiente a $\text{lb/pg}^2/\text{pie}$.

Solución:

$$G = 0.434 \text{ lb/pg}^2/\text{pie} \quad (\text{gradiente de presión del agua dulce})$$

- 1.2 Demostrar que el número de Reynolds es adimensional :

$$N_{\text{Re}} = \frac{dv\ell}{\mu}$$

donde : d - diámetro, cm o pie
 v - velocidad, cm/seg o pie/seg
 ℓ - densidad, g/cm^3 o lb/pie^3
 μ - viscosidad, poise o $\text{lb/pie}^2\text{-seg}$

- 1.3 De la ley de Darcy, encontrar las dimensiones de "k" :

$$q = \frac{k A \Delta p}{\mu L}$$

donde : q - gasto, cm^3/seg
 A - área, cm^2
 Δp - caída de presión, atm.
 μ - viscosidad, cp.
 L - longitud, cm.
 k - permeabilidad, darcy.

Solución :

$$k = L^2$$

- 1.4 Resolver el problema resuelto 6, utilizando d , v y ℓ como variables de repetición.

Solución :

$$\Pi_3 = \frac{d \left(\frac{dp}{dL} \right)}{v^2 \ell}$$

1.5 Convertir las siguientes cantidades a las unidades deseadas :

a) $200 \text{ lb}_m/\text{pie}^3 = x \text{ lb}_m/\text{gal}$

b) $22 \text{ g}_m/\text{lt} = x \text{ lb}_m/\text{pie}^3$

c). $200 \text{ g}_m/\text{seg}^2 = x \text{ lb}_m/\text{día-año}$

d) $1 \text{ lb}/\text{pg}^2 = x \text{ lb}/\text{pie}^2$

e) $1 \text{ lb}/\text{pg}^2 = x \text{ g}/\text{cm}^2$

Solución:

a) $x = 26.74 \text{ lb}_m/\text{gal}$

b) $x = 1.372 \text{ lb}_m/\text{pie}^3$

c) $x = 1.2 \times 10^{12} \text{ lb}_m/\text{día-año}$

d) $x = 144 \text{ lb}/\text{pie}^2$

e) $x = 70.37 \text{ g}/\text{cm}^2$

SERIE 2. II

- 2.1 Un pozo es perforado a 10400 pie con una barrena de 12 1/4 pg., resultando un agujero de aproximadamente el mismo diámetro. El peso del lodo en todo el pozo hasta la superficie es de 81.12 lb/pie³ (1.3 -- g/cm³). ¿qué presión es ejercida sobre una área de 1 pg², en el fondo del pozo? Expresar la respuesta en lb/pg², g/pg², g/cm² y lb/pie²

Solución :

- a) Ph = 5867.7 lb/pg²
- b) Ph = 2.664 x 10⁶ g/pg²
- c) Ph = 412 911 g/cm²
- d) Ph = 844 949 lb/pie²

- 2.2 Convertir las siguientes cantidades a las unidades deseadas :

a) 5 BTU/gal a m-g_m/pie³

b) 1.21 (ton) (kg) (pie) (milli) (seg) a (poise) (HP) / (stoke)

Solución :

- a) $\frac{4.027 \times 10^6 \text{ m-g}_m/\text{pie}^3}{}$
- b) $\frac{3.241 \times 10^{-5} \text{ poise HP/stoke}}{}$

- 2.3 Convertir la siguiente cantidad a las unidades deseadas :

180 (milli) (lb) (HP) / seg a (cm) (g) (BTU) / (año²)

Solución :

$\frac{1.769 \times 10^{19} \text{ (cm) (g) (BTU) / (año}^2\text{)}}{}$

- 2.4 Convertir las siguientes cantidades a un conjunto de unidades MLT,

usando libra, pie y minuto :

a) 34 (lb/pg²) (cp) / (día) (pie) (HP)

b) 0.01 (watt) (stoke) (hr) / (acre) (pie) (atm)

Solución :

- a) $\frac{4.15 \times 10^{-6} \text{ (lb/pie}^2\text{) (lb/pie-min) / (min) (pie) (lb-pie/min)}}{}$
- b) $\frac{1.859 \times 10^{-8} \text{ (lb-pie/min) (pie}^2\text{/min) (min) / (pie}^2\text{) (pie) (lb/pie}^2\text{)}}{}$

2.5 El volumen de un yacimiento está dado generalmente en pie³, empleando la siguiente fórmula :

$$V = 43560 A h$$

donde : V - volumen, pie³

A - área, acres

h - espesor, pie

Calcular otra constante para sustituir la constante 43560 con las siguientes unidades :

$$V - \text{cm}^3$$

$$A - \text{pq}^2$$

$$h - \text{yd.}$$

Solución :

$$V = 590 A h$$

SERIE 3.II

3.1 Aplicando el principio de Homogeneidad Dimensional, demostrar que :

a) $M = C \rho v A$ (usando el sistema MLT)

donde : M - gasto másico (masa por unidad de tiempo)
 ρ - densidad de la masa
 v - velocidad lineal
 A - área de la sección transversal

b) $q = C(r^4/\mu)(dp/dx)$ (usando el sistema FLT)

donde : q - gasto (volumen por unidad de tiempo)
 r - radio
 μ - viscosidad dinámica
 dp/dx - gradiente de presión

3.2 Determinar una ecuación funcional por medio del Método de Homogeneidad Dimensional :

a) ρ - densidad del fluido, fluyendo alrededor de un misil balístico.
 v - velocidad del misil balístico.
 E - módulo de elasticidad del fluido.

Emplear el sistema FLT.

b) d - diámetro de tubería
 v - velocidad del fluido en la tubería
 ρ - densidad del fluido en la tubería
 μ - viscosidad dinámica del fluido en la tubería

Emplear el sistema MLT.

Solución :

a) $v = C(E/\rho)^{1/2}$

b) $v = C(\mu/d\rho)$

3.3 Convertir las siguientes cantidades del sistema FLT al sistema MLT o viceversa. Demostrar todos los cálculos.

- a) Trabajo (FL), al sistema MLT.
- b) Potencia (ML^2T^{-3}) al sistema FLT
- c) Módulo de elasticidad (FL^{-2}) al sistema MLT
- d) Densidad de la masa (ML^{-3}) al sistema FLT

Solución :

$$a) \underline{W (M^1L^2T^{-2})}$$

$$b) \underline{P (FLT^{-1})}$$

$$c) \underline{E (ML^{-1}T^{-2})}$$

$$d) \underline{\rho (FL^{-4}T^2)}$$

3.4 Encontrar la tensión en un cable con sección transversal circular uniforme, girando en su propio eje perpendicular al plano, empleando el Método de Homogeneidad Dimensional. Suponer que las variables siguientes son necesarias; utilizar el sistema FLT :

Variable	Símbolo
Tensión en el cable	T
Densidad lineal del cable	ρ
Radio del cable	r
Velocidad angular	w

Solución :

$$T = C \rho r^2 w^2$$

3.5 Determinar el volumen de un líquido viscoso fluyendo cada segundo a través de un tubo de sección transversal circular, empleando el Método de Homogeneidad Dimensional, y con el sistema MLT. Se tienen las siguientes variables físicas :

Variable	Símbolo
Volumen por segundo	q
Gradiente de presión	dp/dl
Radio del tubo	r
Viscosidad Dinámica	μ

Solución :

$$q = C \left(\frac{r^4}{\mu} \right) (dp/dl)$$

SERIE 4. II

- 4.1 Usando el Teorema π de Buckingham, encontrar tres grupos adimensionales para las variables involucradas en el flujo de un fluido a través de una presa. Se tienen las siguientes variables :

q - gasto de descarga de fluido

H - altura del fluido

g - aceleración gravitacional

ρ - densidad del fluido

μ - viscosidad dinámica del fluido

σ - tensión interfacial, en la interface aire - fluido

Usar H , q y μ como las tres variables usadas en los cálculos de cada término π_i . Emplear el sistema MLT.

Solución :

$$\pi_1 = H \sqrt{\frac{g \rho}{\mu}}$$

$$\pi_2 = q \sqrt[4]{\frac{g^3 \rho^5}{\sigma^5}}$$

$$\pi_3 = \mu \sqrt[4]{\frac{g}{\rho \sigma^3}}$$

- 4.2 La solución de la ecuación de la constante de los gases reales es :

$$R = \frac{P V}{n T} = 10.73 \frac{(\text{lb/pg}^2 \text{ abs}) (\text{pie}^3)}{(\text{lb-mol}) (^{\circ}\text{R})}$$

donde : P - presión, $\text{lb/pg}^2 \text{ abs}$.

V - volumen, pie^3

n - lb-mol

T - temperatura, $^{\circ}\text{R}$

Z - factor de compresibilidad, adim.

Calcular el valor de R donde :

P - $\text{lb/pie}^2 \text{ abs}$.

V - cm^3

n - g-mol

T - $^{\circ}\text{K}$

Solución :

$$R = 173470.7 \frac{(\text{lb}/\text{pie}^2 \text{ abs}) (\text{cm}^3)}{(\text{g-mol}) (^{\circ}\text{K})}$$

- 4.3 Usando el Método de Homogeneidad Dimensional, derivar una ecuación para el período de un péndulo simple. Suponer que las siguientes variables son involucradas :

Variable	Símbolo
Período	t
Masa	m
Peso	w
Longitud del brazo	L

a) Sistema MLT

b) Sistema FLT

Solución :

$$\begin{aligned} \text{a) } t &= c \sqrt{\frac{m L}{w}} \\ \text{b) } t &= c \sqrt{\frac{m l}{w}} \end{aligned}$$

- 4.4 Dada la siguiente ecuación :

$$P_c = \frac{2 \gamma \cos \theta}{r}$$

donde : P_c - presión capilar, dinas/cm²
 γ - tensión interfacial, dinas/cm
 r - radio del tubo capilar, cm

encontrar una constante "C" para las siguientes unidades :

P_c - lb/pg² man.
 γ - dinas/pie
 r - pg.

Solución :

$$C = 3.746 \times 10^{-7}$$

- 4.5 Encontrar una expresión para la fuerza con la cual el aire se opone a que una gota de lluvia se precipite. Empleando el Método de Homogeneidad Dimensional. Suponer las siguientes variables y usar el sistema FLT :

Variable	Símbolo
Fuerza de resistencia	R
Viscosidad dinámica del aire	μ
Velocidad de la gota de lluvia	V
Radio de la gota de lluvia	r

Solución :

$$R = C \mu^x V^y r^z$$

TABLA II.1 FACTORES DE CONVERSION

Para convertir:

DE	A	MULTIPLICAR	INVERSO		
AREA					
Acre	m ²	4.046856	E 3	2.471054	E-4
	pie ²	4.3560	E 4	2.295684	E-5
darcy	cm ²	9.869230	E-9	1.013250	E 8
	cm ² .cp.seg ⁻¹ .atm ⁻¹	1.00	E 0	1.00	E 0
	m ²	9.869230	E-13	1.0132503	E 12
	md (mildarcy)	1.00	E 3	1.00	E-3
hectárea	acre	2.471054	E 0	4.046856	E-1
	m ²	1.00	E 4	1.00	E-4
milla ²	acre	6.40	E 2	1.5625	E-3
	m ²	2.589988	E 6	3.861022	E-7
pie ²	cm ²	9.290304	E 2	1.076391	E-3
	m ²	9.290304	E-2	1.076391	E 1
	pg ²	1.44	E 2	6.944444	E-3
DENSIDAD					
g _m .cm ⁻³	Kg.m ⁻³	1.00	E 3	1.00	E-3
	lbm.gal ⁻¹	8.345402	E 0	1.198264	E-1
	lbm.pie ⁻³	6.242797	E 1	1.601846	E-2
lbm.pie ⁻³	Kg.m ⁻³	1.601846	E 1	6.242797	E-2
	lbm.bl ⁻¹	5.614583	E 0	1.781076	E-1
	lbm.gal ⁻¹	0.1337	E 0	7.479	E 0
FUERZA					
dina	lb _f	2.248089	E-6	4.448222	E 5
	N (Newton)	1.00	E-5	1.00	E 5
Kg _f	lb _f	2.204622	E 0	4.535924	E-1
	N	9.806650	E 0	1.013716	E-1
lb _f	Kg _f	4.535924	E 2	2.204622	E-3
	N	4.448222	E 0	2.248089	E-1

DE	A	MULTIPLICAR		INVERSO	
GASTO					
bl.dfa ⁻¹	cm ³ .seg ⁻¹	1.840131	E 0	5.434396	E-1
	cm ³ .min ⁻¹	1.104078	E 2	9.057326	E-3
	gal.min ⁻¹	2.916667	E-2	3.428571	E 1
	gal.dfa ⁻¹	4.200	E 1	2.380952	E-2
	m ³ .seg ⁻¹	1.840131	E-6	5.434396	E 5
	m ³ .hr ⁻¹	6.624472	E-3	1.509554	E 2
	m ³ .dfa ⁻¹	1.589873	E-1	6.289810	E 0
	pie ³ .min ⁻¹	3.899016	E-3	2.564750	E 2
	pie ³ .hr ⁻¹	2.33941	E-1	4.274582	E 0
	pie ³ .dfa ⁻¹	5.614583	E 0	1.781076	E-1
gal.min ⁻¹	m ³ .seg ⁻¹	2.309020	E-5	1.585032	E 4
pie ³ .seg ⁻¹	m ³ .seg ⁻¹	6.831685	E-2	3.531466	E 1
pie ³ .min ⁻¹	m ³ .seg ⁻¹	4.719474	E-4	2.118880	E 3
LONGITUD					
angstrom	m	1.00	E-10	1.00	E 10
micrón	m	1.00	E-6	1.00	E 6
milla (E.U.)	m	1.609344	E 3	6.213712	E-2
	pie	-.280	E 3	1.893939	E-2
pg.	cm	2.540	E 0	3.937008	E 1
	m	2.540	E-2	3.937008	E-1
pie	cm	3.048	E 1	3.28084	E-2
	m	3.048	E-1	3.28084	E 0
yarda	pg.	3.60	E 1	2.777778	E-2
	pie	3.00	E 0	3.3333	E-1
MASA					
lbm	Kg.	4.535923	E-1	2.204623	E 0
oz _m	g.	2.834952	E-2	3.527445	E 1
slug	Kg	1.459390	E 1	6.852178	E-2
	lbm	3.217405	E 1	3.108095	E-2
ton(corta, E.U.)	Kg.	9.071847	E 2	1.102311	E-3
	lbm	2.00	E 3	5.00	E-4
ton(larga, E.U.)	Kg.	1.016047	E 3	9.842064	E-4
	lbm	2.240	E 3	4.464286	E-4

DE	A	MULTIPLICAR		INVERSO	
ton (métrica)	Kg.	1.00	E 3	1.00	E-3
PRESION					
atm (normal;	bar	1.01325	E 0	9.86923	E-1
760 mm. de Hg)	lb.pg ⁻²	1.46960	E 1	6.80460	E-2
	mm de Hg(0°C)	7.600	E 2	1.315789	E-3
	Pa	1.01325	E 5	9.86923	E-6
	pie de agua (4°C)	3.38995	E 1	2.94990	E-2
bar	lb.pg ⁻²	1.450377	E 1	6.894757	E-2
	Pa	1.00	E 5	1.00	E-5
cm de Hg(0°C)	lb.pg ⁻²	1.93367	E-1	5.17151	E 0
	Pa	1.33322	E 3	7.50064	E-4
dina.cm ⁻²	lb.pg ⁻²	1.450377	E-5	6.894757	E 4
	Pa	1.00	E-1	1.00	E 1
Kg _f .cm ⁻²	bar	9.80665	E-1	1.019716	E 0
	lb.pg ⁻²	1.422334	E 1	7.030695	E-2
	Pa	9.80665	E 4	1.019716	E-5
pie de agua(4°C)	lb.pg ⁻²	4.33515	E-1	2.30673	E 0
	Pa	2.98898	E 3	3.34562	E-4
TIEMPO					
dfa	seg	8.64	E 4	1.157407	E-5
	min.	1.44	E 3	6.944444	E-4
	hr.	2.40	E 1	4.165667	E-2
hr.	seg	3.60	E 3	2.777778	E-4
	min.	6.00	E 1	1.666667	E-2
min.	seg.	6.00	E 1	1.666667	E-2
VISCOSIDAD					
c.p.(centipoise)	dina.seg.cm ⁻²	1.00	E-2	1.00	E 2
	lb _f .seg.pie ⁻²	2.088543	E-5	4.788026	F. 4
	lbm.pie ⁻¹ .seg ⁻¹	6.719689	E-4	1.488164	E 3
c.st.(centistoke)	c.p.(gm.cm ⁻³) ⁻¹	1.00	E 0	1.00	E 0
	m ² .seg ⁻¹	1.00	E-6	1.00	E 6
VOLUMEN					
acre.pie	bl.	7.758368	E 3	1.288931	E-4

DE	A	MULTIPLICAR	INVERSO
	m ³	1.233482	E 3
	pie ³	4.3560	E 4
bl	gal.	4.20	E 1
	lt.	1.589873	E 2
	m ³	1.589873	E-1
	pie ³	5.614583	E 0
pie ³	gal.	7.480520	E 0
	lt.	2.831685	E 1
	m ³	2.831685	E-2
	pg ³	1.728	E 3
gal.	lt.	3.785412	E 0
	m ³	3.785412	E-3
	pg ³	2.310001	E 2
lt.	m ³	1.00	E-3
			1.00
			E 3

TABLA II.2 CONVERSION DE ESCALAS DE TEMPERATURA

Para convertir:

DE	A	RESOLVER
°Celsius	°Kelvin	$T_K = T_C + 273.15$
°Fahrenheit	°Celsius	$T_C = (T_F - 32)/1.8$
°Fahrenheit	°Kelvin	$T_K = (T_F + 459.67)/1.8$
°Fahrenheit	°Rankine	$T_R = T_F + 459.67$
°Rankine	°Kelvin	$T_K = T_R / 1.8$

TABLA II.3 CANTIDADES FISICAS UTILIZADAS EN EL ANALISIS DIMENSIONAL *

		DIMENSIONES					
		M	L	T	F	L	T
A	área	L^2				L^2	
c	compresibilidad	M^{-1}	L	T^2		F^{-1}	L^2
d	diámetro	L				L	
E	módulo de elasticidad	ML^{-1}	T^{-2}			F	L^{-2}
F	fuerza	M	L	T^{-2}		F	
g	aceleración de la gravedad	L	T^{-2}			L	T^{-2}
h	altura, profundidad y carga	L				L	
l	longitud	L				L	
m	masa	M				F	$L^{-1}T^2$
P	potencia	ML^2	T^{-3}			F	L
p	presión	ML^{-1}	T^{-2}			F	L^{-2}
q	gasto	L^3	T^{-1}			L^3	T^{-1}
r	radio	L				L	
t	tiempo	T				T	
v	velocidad	L	T^{-1}			L	T^{-1}
V	volumen	L^3				L^3	
w	peso	M	L	T^{-2}		F	
w	peso específico	M	L^{-2}	T^{-2}		F	L^{-3}
μ	viscosidad dinámica o absoluta	M	L^{-1}	T^{-1}		F	$L^{-2}T$
J	viscosidad cinemática	L^2	T^{-1}			L^2	T^{-1}
ρ	densidad	ML^{-3}				F	$L^{-4}T^2$
σ	tensión superficial	MT^{-2}				F	L^{-1}

* Para las dimensiones de otras cantidades ver referencias (2), (3) y (4) Capítulo II.

REFERENCIAS

- 1) Rodríguez Nieto Rafael; "Apuntes de Principios de Mecánica de Yacimientos"; Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.; - México D.F.
- 2) León Ventura Raúl; "Apuntes de Mecánica de Fluidos"; -- Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.; México, D.F.
- 3) Giles Ronald V.; "Mecánica de Fluidos e Hidráulica"; -- Serie Schaum, Mc. Graw-Hill.
- 4) Brown Kermit E. "Gas Lift Theory and Practice", The -- Petroleum Publishing Co. , Tulsa Oklahoma, 1973.

CAPITULO III

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

El aceite y el gas se encuentran naturalmente como una mezcla de hidrocarburos bastante compleja en composición química y a una elevada temperatura y presión en el yacimiento, conjuntamente con cierta cantidad de agua congénita. Al producir y obtener los hidrocarburos en la superficie, la temperatura y la presión de la mezcla se reducen. El estado de la mezcla de hidrocarburos a las condiciones superficiales depende de la composición de los hidrocarburos producidos, así como de la presión y la temperatura a la que son manejados. Además, el fluido remanente en el yacimiento sufre cambios físicos a medida que la presión disminuye por las cantidades producidas de aceite o gas del yacimiento.

El gas natural está compuesto en gran parte de hidrocarburos de la serie parafínica. El metano y el etano frecuentemente constituyen el 80% al 90% del volumen de un gas natural. El porcentaje restante lo forman otros hidrocarburos, cuya masa molecular varía desde 44.097 lb/lb-mol (propano) hasta una superior a 142.286 lb/lb-mol (decano), junto con impurezas como el dióxido de carbono, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno, que son los más comunes. El helio y otros gases raros inertes ocasionalmente se encuentran en pequeñas concentraciones.

La composición química de un aceite crudo, es más difícil de evaluar, debido a que una gran parte del aceite está compuesto de hidrocarburos más pesados que el heptano.

Las propiedades físicas de interés ordinariamente se definen en términos de la presión y de la temperatura a las que se encuentra un hidrocarburo. En general, los fluidos son clasificados como gases, vapores o líquidos. En relación con los hidrocarburos es conveniente pensar que gas y vapor son sinónimos.

Como en otros sistemas de fluidos, un sistema de hidrocarburos puede ser homogéneo o heterogéneo. En un sistema homogéneo, todos los componentes del sistema tienen las mismas propiedades físicas y químicas,

al contrario del sistema heterogéneo en el cual son distintas. En un gas, sus moléculas se encuentran muy separadas entre sí, por tanto, es un fluido muy compresible y además, cuando la presión externa desaparece tiende a expandirse indefinidamente. Así pues, un gas está en equilibrio sólo cuando se encuentra confinado. Un líquido es relativamente incompresible y si la presión externa desaparece - excepto su presión de vapor -, la cohesión existente entre sus moléculas lo mantiene unido, de tal forma que el líquido no se expanda indefinidamente; por esta razón los líquidos pueden presentar una superficie libre, sin necesidad de que esté actuando una presión sobre ella, excepto su presión de vapor.

Un vapor es un gas cuyas condiciones de presión y temperatura son tales que se encuentra cercano a la fase líquida.

Gradiente de presión.

La Fig. 3.1 representa dos tuberías concéntricas, ambas de 10 pie de altura y completamente llenas con agua salada de 72 lb/pie^3 . La base de la tubería de mayor diámetro tiene una área de 1 pie^2 y de la tubería de menor diámetro de 1 pg^2 .

Las tuberías están divididas verticalmente en 10 secciones, cada una de 1 pie de altura.

Debido a que la tubería de mayor diámetro está constituida por 10 secciones de 1 pie^3 cada una, la columna de líquido pesa $10 \times 72 = 720 \text{ lb}$, el cual representa la fuerza ejercida sobre una área de 1 pie^2 . De la misma manera, la tubería de menor diámetro está constituida por 10 secciones de 1 pie de altura por una área de $\frac{1}{144} \text{ pie}^2$, y tiene un volumen de $10 \times \frac{1}{144} = 0.069 \text{ pie}^3$ siendo el peso de la columna de líquido de $0.069 \times 72 = 5 \text{ lb}$; el cual representa la fuerza ejercida sobre una área de 1 pg^2 .

La presión es expresada comunmente en lb/pg^2 , definiéndose como:

Presión = $\frac{\text{fuerza actuando perpendicularmente en una área}}{\text{área sobre la cual dicha fuerza está distribuida.}}$

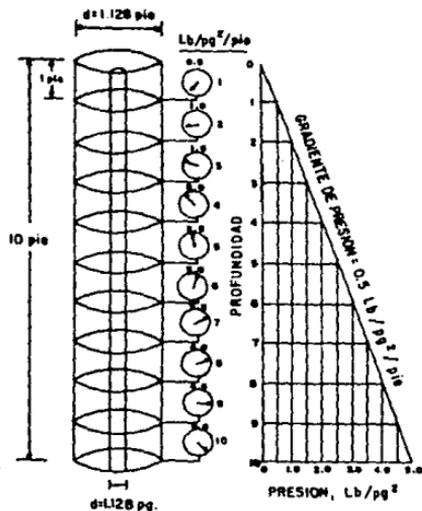


Fig. 3.1 GRADIENTE DE PRESION (3)

De este modo, la presión ejercida sobre la base de la tubería de menor diámetro es $5 \text{ lb/pg}^2 = 5 \text{ lb/pg}^2$ y sobre la de mayor diámetro es $720 \text{ lb/pg}^2 \times 1 \text{ pie}^2 / 144 \text{ pg}^2 = 5 \text{ lb/pg}^2$.

La presión ejercida por una columna de fluido (presión hidrostática) es la misma para una altura dada, sin importar el diámetro de la tubería que contiene este fluido.

PRINCIPIO DE PASCAL

"Cuando la presión en cualquier punto de un fluido confinado (líquido o gas) se incrementa, la presión sobre cualquier otro punto del fluido se incrementa en la misma cantidad".

Si se instalan manómetros de presión en la base de cada sección vertical de las tuberías, el manómetro 1, registrará una presión de 0.5 lb/pg^2 ($0.5 \text{ lb/pg}^2/\text{pie} \times 1 \text{ pie}$), y así cada manómetro aumentará 0.5 lb/pg^2 . El manómetro 5, registrará una presión de $5 \times 0.5 = 2.5 \text{ lb/pg}^2$, y el manómetro 10 registrará $10 \times 0.5 = 5 \text{ lb/pg}^2$. Esta ganancia de presión constante de $0.5 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$ es llamada "gradiente de presión". Si las tuberías fueran llenadas con aceite de 53 lb/pie^3 , los manómetros registrarían un gradiente de presión de $53 \text{ lb/pie}^3 \times \frac{1 \text{ pie}^3}{144 \text{ pg}^2} = 0.368 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$.

En este capítulo se presentan problemas relacionados con las propiedades de los fluidos como son: densidad, densidad relativa, viscosidad absoluta, compresibilidad, factor de compresibilidad para gases, peso molecular, etc.

Asimismo, se presentan problemas sobre gases ideales y reales para mezclas de composición dada en base a fracción molar y/o fracción en volumen.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

PROBLEMAS RESUELTOS

1. Calcular el factor de compresibilidad de un gas natural a partir de su composición a una presión de $1520 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$ y una temperatura de 300°F

Componentes	Mol (%)
Metano	70.0
Etano	10.0
Propano	7.0
n - Butano	3.0
Dióxido de Carbono	6.0
Nitrógeno	4.0
	100.0

Solución:

El porcentaje molar y el porcentaje en volumen son los mismos a condiciones estándar. Además el porcentaje molar permanece constante a cualquier condición de presión y temperatura. Sin embargo, si el porcentaje en volumen está dado a condiciones diferentes a la estándar, deberá realizarse una conversión al porcentaje molar. Ambos porcentajes no serán iguales debido a las desviaciones en los factores de compresibilidad, los cuales son diferentes para cada componente de la mezcla del gas.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Componente	n_i (lb-mol)	fracción molar, n_i	$T_{ci} (^{\circ}\text{R})$	P_{ci} (lb/pg ² abs.)	$nixT_{ci}$ ($^{\circ}\text{R}$)	$nixP_{ci}$ (lb/pg ² abs.)
CH_4	70.0	0.70	343.37	667.8	240.359	467.46
C_2H_6	10.0	0.10	550.09	707.8	55.009	70.78
C_3H_8	7.0	0.07	666.01	616.3	46.6207	43.141
n- C_4H_{10}	3.0	0.03	765.65	550.7	22.9695	16.521
CO_2	6.0	0.06	547.9	1071.0	32.874	64.26
N_2	4.0	0.04	227.6	493.0	9.104	19.72
	100.0	1.00			406.9362	681.882

En la solución de este tipo de problemas, debe suponerse alguna base para el volumen total, tal como: 100 lb-mol o 100 pie³ de gas.

Los valores de la temperatura crítica (T_{ci}) y presión crítica (P_{ci}) para cada componente fueron obtenidos de la Tabla 1.

El procedimiento de cálculo para determinar la presión y temperatura pseudocríticas es el siguiente:

- Tabular P_{ci} y T_{ci} para cada componente de la mezcla del gas (columnas 3 y 4).
- Multiplicar la fracción molar de cada componente por su respectiva P_{ci} y T_{ci} (columnas 5 y 6).
- Sumar los valores separadamente en las columnas 5 y 6. Estos corresponderán a la temperatura y presión pseudocríticas respectivamente.

Es decir: $p T_c =$ pseudo temperatura crítica = 406.9362 °R
y $p P_c =$ pseudo presión crítica = 681.882 lb/pg² abs.

El paso siguiente es la determinación de la presión y temperatura pseudo reducidas (pPr y pTr)

$$\text{donde: } pTr = \frac{T}{pTc} = \frac{760}{406.9362} = 1.867$$

$$pPr = \frac{P}{pPc} = \frac{1520}{681.882} = 2.229$$

Haciendo referencia a la Fig. 1, con los valores de pPr y pTr se determina el factor de compresibilidad del gas.

$$\bar{z} = 0.926$$

Nota:

Con el objeto de reducir errores en la interpretación de la gráfica para obtener la pseudo-presión y pseudo-temperatura críticas de una mezcla de gas, se utilizarán en los problemas resueltos y propuestos las siguientes ecuaciones:

$$pTc = 167 \cdot 316.57 \bar{Y}_R$$

$$pPc = 702.5 - 50 \bar{Y}_g$$

Por lo que únicamente se requiere conocer la densidad relativa del gas (\bar{Y}_g).

Para la determinación del factor de compresibilidad del gas (\bar{z}).

existen diferentes correlaciones (ver referencia 1), sin embargo, en este capítulo únicamente se hará uso del método gráfico.

2. Determinar la presión en el domo de una válvula de Bombeo Neumático (B.N.) cargada con gas natural de densidad relativa 0.65 (aire= 1.0) a 800 lb/pg^2 man., si la temperatura se incrementa de 80°F a 180°F . Suponer que los volúmenes en las posiciones de apertura y cierre de la válvula son iguales.

Considerar:

- a) Gas Ideal
- b) Gas Real

Solución:

- a) Gas Ideal

- 1) Convertir la presión y temperatura a unidades absolutas.

$$P_1 = 800 \text{ lb/pg}^2 + 14.7 = 814.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$T_1 = 80^\circ\text{F} + 460 = 540^\circ\text{R}$$

$$T_2 = 180^\circ\text{F} + 460 = 640^\circ\text{R}$$

- 2) Empleando la ecuación general de los gases ideales

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

donde: $V_1 = V_2$

Por lo que: $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

de aquí: $P_2 = \frac{P_1}{T_1} \times T_2$

$$P_2 = \frac{814.7 \times 640}{540} = 965.6 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$P_2 = P_{\text{domo}} = 965.6 - 14.7 = \underline{950.9 \text{ lb/pg}^2 \text{ man.}}$$

- b) Gas Real

La solución de este problema se realiza mediante un procedimiento de ensayo y error, utilizando la ecuación general de los gases reales:

$$\frac{P_1 V_1}{Z_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{Z_2 T_2} \quad \text{donde:} \quad P_1 = 814.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$T_1 = 540^\circ \text{R}$$

$$T_2 = 640^\circ \text{R}$$

Procedimiento:

- 1) Suponer constantes V_1 y V_2
- 2) Determinar Z_1 a P_1 y T_1
- 3) Suponer un valor de P_2 (considerar como primer valor supuesto el obtenido como gas ideal).
- 4) Determinar Z_2 a P_2 y T_2
- 5) Obtener un valor calculado de P_2 a partir de:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1 Z_2 T_2}{Z_1 T_1 V_2} = \frac{P_1 Z_2 T_2}{Z_1 T_1}$$

- 6) Comparar el valor de P_2 calculado con el valor supuesto en el paso (3). Si el error relativo se encuentra dentro de una cierta tolerancia (menor o igual a 1%), el valor de P_2 calculado será el valor correcto. En caso contrario, repetir el procedimiento a partir del paso (3) hasta obtener un valor de P_2 correcto.

Solución:

$$1) \quad V_1 = V_2$$

- 2) Los valores de Z se obtendrán utilizando la Fig. 2

Para:

$$P_1 = 814.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs. y } T_1 = 80^\circ \text{F}$$

$$Z_1 = 0.87$$

- 3) P_2 supuesta = 965.6 lb/pg² abs/ y $T_2 = 180^\circ \text{F}$

$$Z_2 = 0.92$$

- 4)
$$P_2 = \frac{P_1 Z_2 T_2}{Z_1 T_1} = \frac{814.7 \times 0.92 \times 640}{0.87 \times 540} = 1021.1 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$\text{er} = \left| \frac{1021.1 - 965.6}{1021.1} \right| \times 100 = 5.42\% \text{ (error relativo)}$$

5.42 > 1.0 por lo que:

$$P_2 \text{ supuesta} = 1021.1 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs. y } T_2 = 180^\circ\text{F}$$

$$Z_2 = 0.915$$

de donde:

$$P_2 = \frac{814.7 \times 0.915 \times 640}{0.87 \times 540} = 1015.5 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$\text{er} = \left| \frac{1015.5 - 1021.1}{1015.5} \right| \times 100 = 0.55\%$$

$0.55 < 1.0$ por lo que:

$$P_2 = 1015.5 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$P_2 = P_{\text{domo}} = 1015.5 - 14.7 = 1000.8 \text{ lb/pg}^2 \text{ man.}$$

Se puede notar que el error relativo cuando no se considera el factor de compresibilidad del gas es:

$$\text{er} = \left| \frac{1000.8 - 950.9}{1000.8} \right| \times 100 = 5.01\%$$

el cual es un error considerable.

3. El espacio anular entre la T.R. y la T.P. con una capacidad de 1500 pie³ contiene un gas con densidad relativa 0.65 (aire = 1.0) a una presión promedio de 1000 lb/pg² abs. y una temperatura promedio de 200°F. ¿Qué volumen de gas (pie³) a condiciones estándar se recuperará al disminuir la presión en la T.R. a 800 lb/pg² abs.?

Solución:

- a) Determinar las lb-mol de gas contenidas en el espacio anular a una presión de 1000 lb/pg² abs, utilizando la ecuación de estado para gases reales:

$$P_1 V_1 = Z_1 n_1 R_1 T_1$$

despejando n_1 :

$$n_1 = \frac{P_1 V_1}{Z_1 R_1 T_1}$$

donde:

$$P_1 = 1000 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs}$$

$$V_1 = 1500 \text{ pie}^3$$

$$R_1 = \frac{10.73 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs. pie}^3}{\text{lb-mol } ^\circ\text{R}}$$

$$T_1 = 200^\circ\text{F} = 660^\circ\text{R}$$

Utilizando la Fig. 2, para $P_1 = 1000 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}, T_1 = 200^\circ\text{F}$

$$z_1 = 0.925$$

Por lo que:

$$n_1 = \frac{1000 \times 1500}{0.925 \times 10.73 \times 660} = 228.98 \text{ lb-mol}$$

- b) Determinar las lb-mol de gas a una presión de $800 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$

$$P_2 V_2 = z_2 n_2 R_2 T_2$$

Utilizando la Fig. 2, para $P_2 = 800 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$ y $T_2 = 200^\circ\text{F}$

$$z_2 = 0.937$$

Por lo que: $n_2 = \frac{800 \times 1500}{0.937 \times 10.73 \times 660} = 180.84 \text{ lb-mol}$

- c) Las lb-mol de gas recuperadas al disminuir la presión son:

$$\Delta n = n_1 - n_2 = 228.98 - 180.84 = 48.14 \text{ lb-mol}$$

- d) Se tiene que una lb-mol de cualquier gas a condiciones estandar ocupa un volumen de 379.4 pie^3 , entonces el volumen de gas recuperado es de:

$$\frac{379.4 \text{ pie}^3}{1 \text{ lb-mol}} \times 48.14 \text{ lb-mol} = \underline{18264.3 \text{ pie}^3 \text{ a c.s.}}$$

4. Calcular la presión ejercida por la columna de un gas de densidad relativa 0.75 (aire=1.0), en el fondo de un pozo a 10000 pie, siendo la presión superficial de $1000 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$ y la temperatura promedio de 150°F

Solución:

Utilizando la siguiente ecuación empírica:

$$P_2 = P_1 + 2.5 \left(\frac{P_1}{100} \right) \left(\frac{L}{1000} \right)$$

$$P_1 = 1000 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$L = 10000 \text{ pie}$$

$$P_2 = 1000 + 2.5 \left(\frac{1000}{100} \right) \left(\frac{10000}{1000} \right)$$

$$P_2 = 1250 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{1000 + 1250}{2} = 1125 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$\bar{T} = 150^\circ\text{F} = 610^\circ\text{R}$$

$$pPc = 702.5 - 50 \bar{Y}_g = 702.5 - 50 \times 0.75 = 665 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$pTc = 167 + 316.67 \bar{Y}_g = 167 + 316.67 \times 0.75 = 404.5^\circ\text{R}$$

$$pPr = \frac{\bar{P}}{pPc} = \frac{1125}{665} = 1.69$$

$$pTr = \frac{\bar{T}}{pTc} = \frac{610}{404.5} = 1.50$$

donde: $\bar{z} = 0.845$ (De la Fig. 1)

$$\bar{c} = 2.7 \frac{\bar{P} \bar{Y}_g}{\bar{z} \bar{T}} = \frac{2.7 \times 1125 \times 0.75}{0.845 \times 610} = 4.42 \text{ lb/pie}^3$$

$$Gg = (4.42 \text{ lb/pie}^3) \left(\frac{1 \text{ pie}^2}{144 \text{ pg}^2} \right) = 0.0307 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\Delta P = Gg \times L = 0.0307 \times 10000 = 307 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

Presión columna de gas = Paup. + $\Delta P = 1000 + 307 = 1307 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$

$$er = \left(\frac{1307 - 1250}{1307} \right) \times 100 = 4.36 \%$$

4.36 > 1.0 por lo que:

$$P_2 \text{ supuesta} = 1307 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$\bar{P} = \frac{1000 + 1307}{2} = 1153.5 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$\bar{T} = 150^\circ\text{F} = 610^\circ\text{R}$$

$$pPr = \frac{1153.5}{665} = 1.73$$

$$pTr = 1.50$$

donde: $\bar{z} = 0.84$ (De la Fig. 1)

$$\bar{c} = \frac{2.7 \times 1153.5 \times 0.75}{0.84 \times 610} = 4.55 \text{ lb/pie}^3$$

$$Gg = 4.55 \text{ lb/pie}^3 \times \frac{1 \text{ pie}^2}{144 \text{ pg}^2} = 0.0316 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\Delta p = 0.0316 \times 10000 = 316 \text{ lb/pg}^2$$

Presión columna de gas = 1000 + 316 = 1316 $\text{lb/pg}^2 \text{ abs.}$

$$er = \left| \frac{1316 - 1307}{1316} \right| \times 100 = 0.68\%$$

0.68 < 1.0 por lo que:

$$P_2 = 1316 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs}$$

Comprobación utilizando la siguiente ecuación:

$$P_2 = P_1 e^{(0.01877)(\gamma_g)(L)/\bar{T} \bar{z}}$$

donde $P_1 = 1000 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs}$

$$L = 10000 \text{ pie}$$

$$\bar{T} = 610^\circ\text{R}$$

$$\bar{z} = 0.845$$

$$\gamma_g = 0.75$$

$$P_2 = 1000 \times e^{(0.01877 \times 0.75 \times 10000)/(610 \times 0.845)}$$

$$P_2 = 1000 \times e^{0.27311}$$

$$P_2 = 1314.04 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

5. Un pozo a una profundidad de 16000 pie con una presión de fondo estática de 4000 lb/pg² man., produce 50% de aceite (42°API) y 50% de agua salada ($\gamma_w = 1.10$) ¿A qué profundidad se encuentra el nivel estático del fluido?

- a) Presión en superficie igual a 0 lb/pg² man.
 b) Presión en superficie 300 lb/pg² man.

Solución:

$$a) \quad \gamma_o = \frac{141.5}{131.5 + \text{°API}}$$

$$\gamma_o = \frac{141.5}{131.5 + 42} = 0.8155$$

$$G_o = 0.8155 \times 0.433 = 0.3534 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_w = 1.10 \times 0.433 = 0.4766 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_m = \frac{\% \text{ Aceite}}{100} \times G_o + \frac{\% \text{ Agua}}{100} \times G_w$$

$$G_m = 0.5 \times 0.3534 + 0.5 \times 0.4766 = 0.415 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$P_{wh} = 0 \text{ lb/pg}^2 \text{ man.}$$

$$\text{Nivel Estático} = \text{Profundidad} - \frac{\text{Presión estática}}{G_m}$$

$$N.E. = 16000 - \frac{4000}{0.415} \quad \underline{N.E. = 6361.44 \text{ pie}}$$

$$b) \quad P_{wh} = 300 \text{ lb/pg}^2 \text{ man.}$$

$$N.E. = 16000 - \frac{(4000 - 300)}{0.415} \quad \underline{N.E. = 7084.33 \text{ pie}}$$

6. Calcular la densidad (lbm/pie^3) y gradiente de presión ($\text{lb}/\text{pg}^2/\text{pie}$) de una mezcla de fluidos que contiene 50% de agua salada ($\gamma_w = 1.08$), 30% de aceite (40° API) y 20% de gas ($\gamma_g = 0.65$, $\text{aire} = 1.0$) a 50 lb/pg^2 abs. Considerar un gas ideal a una temperatura de 100°F.

Solución:

Para la densidad de la mezcla (ρ_m):

$$\gamma_o = \frac{141.5}{131.5 + 40} = 0.8250$$

$$\rho_o = 0.825 \times 62.4 = 51.48 \text{ lbm}/\text{pie}^3$$

$$\rho_w = 1.08 \times 62.4 = 67.392 \text{ lbm}/\text{pie}^3$$

$$\rho_g = 2.7 \left(\frac{P \gamma_g}{z T} \right)$$

Para gas ideal $z = 1.0$

$$\text{entonces: } \rho_g = 2.7 \left(\frac{50 \times 0.65}{1 \times (100 + 460)} \right) = 0.1566 \text{ lbm}/\text{pie}^3$$

$$\rho_m = 0.5 \times 67.392 + 0.3 \times 51.48 + 0.2 \times 0.1566$$

$$\underline{\rho_m = 49.17 \text{ lbm}/\text{pie}^3}$$

Para el gradiente de presión de la mezcla, (G_m):

$$G_o = 0.825 \times 0.433 = 0.35753 \text{ lb}/\text{pg}^2/\text{pie}$$

$$G_w = 1.08 \times 0.433 = 0.468 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_g = 0.1566 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \cdot \frac{1 \text{ pie}^2}{144 \text{ pg}^2} = 0.001088 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_m = 0.5 \times 0.468 + 0.3 \times 0.35753 + 0.2 \times 0.001088$$

$$G_m = 0.34147 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

7. Determinar el factor de compresibilidad (Z) de un gas de densidad relativa 0.70 (aire = 1.0) a una presión de $1500 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$ y a una temperatura de 80°C .

Solución:

$$pT_c = 167 + 316.67 \sqrt{g} = 167 + 316.67 \times 0.7 = 388.67^\circ\text{R}$$

$$pP_c = 702.5 - 50 \sqrt{g} = 702.5 - 50 \times 0.7 = 667.5 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$T = 1.8 (T^\circ\text{C}) + 32 = 1.8 \times 80 + 32 = 176^\circ\text{F}$$

$$T = 176 + 460 = 636^\circ\text{R}$$

$$pTr = \frac{T}{pT_c} = \frac{636}{388.67} = 1.636$$

$$pPr = \frac{P}{pP_c} = \frac{1500}{667.5} = 2.247$$

$$\text{donde: } Z = 0.86 \quad (\text{De la Fig. 1})$$

8. Calcular el factor de compresibilidad (Z) de un gas natural a partir de su composición, a las siguientes condiciones:

a) $3000 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$ y 200°F

b) $1500 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$ y 200°F

Componente	Porcentaje Molar (%)
Metano	80.0
Etano	10.0
Propano	5.0
Bióxido de Carbono	2.0
Nitrógeno	3.0
	100.0

Solución:

- a) Haciendo referencia a la Tabla 1, obtener el peso molecular para cada componente.

Componente	Fracción Molar (n_i)	Peso Molecular M_i (lb/lb-mol)	$n_i \times \bar{M}_i$ (lb-mol)
CH ₄	0.80	16.043	12.8344
C ₂ H ₆	0.10	30.070	3.007
C ₃ H ₈	0.05	44.097	2.2048
CO ₂	0.02	44.010	0.8802
N ₂	<u>0.03</u>	28.013	<u>0.8404</u>
	1.00		19.7668

$$Y_g = \frac{\bar{M}_g}{\bar{M}_{\text{aire}}}, \text{ donde: } \bar{M}_{\text{aire}} = 28.97 \text{ lb/lb-mol}$$

$$\bar{M}_g = 19.7668 \text{ lb/lb-mol}$$

$$Y_g = \frac{19.7668}{28.97} = 0.6823$$

$$pTc = 167 + 316.67 Y_g = 167 + 316.67 \times 0.6823 = 383.06^\circ R$$

$$pPc = 702.5 - 50 Y_g = 702.5 - 50 \times 0.6823 = 668.38 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$pTr = \frac{200 + 460}{383.06} = 1.722$$

$$pPr = \frac{3000}{668.38} = 4.488$$

$$\text{donde: } z = 0.87 \quad (\text{De la Fig. 1})$$

b)
$$pTr = \frac{200 + 460}{383.06} = 1.722$$

$$pPr = \frac{1500}{668.38} = 2.244$$

$$\text{donde: } z = 0.888 \quad (\text{De la Fig. 1})$$

9. Se tiene un recipiente conteniendo 300 000 pie³ de Metano (CH₄) a una presión de 1500 lb/pg² abs y a una temperatura de 80°F ¿Cuántos lb-mol y lbm de metano están contenidas en este recipiente?

Solución:

Utilizando la ecuación de estado para gases reales

$$P V = z n R T$$

despejando n:

$$n = \frac{PV}{ZRT}$$

Para: $P = 1500 \text{ lb/pg}^2$ y $T = 80^\circ\text{F} = 540^\circ\text{R}$

$$Z = 0.82 \quad (\text{De la Fig. 4})$$

donde: $R = 10.73 \frac{\text{lb/pg}^2 \text{ abs pie}^3}{\text{lb-mol} \cdot ^\circ\text{R}}$

$$\text{por lo tanto: } n = \frac{1500 \times 300 \text{ 000}}{0.82 \times 10.73 \times 540}$$

$$n = 94 \text{ 712 lb-mol}$$

De la Ley de Avogadro:

$$n = \frac{m}{Mg}$$

donde: $\bar{M}_{\text{CH}_4} = 16.043 \frac{\text{lbm}}{\text{lb-mol}}$ (De la tabla 1)

Por lo tanto: $m = n \times Mg$

$$m = 94712 \text{ lb-mol} \times 16.043 \frac{\text{lbm}}{\text{lb-mol}}$$

$$m = 1519 \text{ 464.6 lbm}$$

10. Dada la composición de 100 pie³ de gas natural a 300°F y 2500 lb/pg²abs., calcular:

- El porcentaje molar
- El porcentaje en peso

Componente	Volumen (%)
CH ₄	67.0
C ₂ H ₆	30.0
C ₃ H ₈	1.0
CO ₂	<u>2.0</u>
	100.0

Solución:

- a) Empleando la Tabla 1, Fig. 1 y Fig. 5, obtener las presiones y temperaturas críticas para cada componente, así como los factores de compresibilidad del gas respectivo.

Componente	Volumen (%)	Volumen (pie ³)	T _{ci} (°R)	P _{ci} (lb/pg ² abs)	Tr _i = $\frac{T}{T_{ci}}$	Pr _i = $\frac{P}{P_{ci}}$
CH ₄	67.0	67.0	343.57	667.8	2.2120	3.7436
C ₂ H ₆	30.0	30.0	550.09	707.8	1.3816	3.5320
C ₃ H ₈	1.0	1.0	666.01	616.3	1.1411	4.0564
CO ₂	2.0	2.0	547.9	1071.0	1.3871	2.3342
	100.0					

$$T = 300^{\circ}\text{F} = 760^{\circ}\text{R}$$

$$P = 2500 \text{ lb/pg}^2\text{abs}$$

Componente	Z	$n_i = \frac{PV}{ZRT}$ (lb-mol)	Porcentaje Molar $n = \frac{n_i}{n_T} \times 100$
CH ₄	0.968	21.22	59.32
C ₂ H ₆	0.695	13.23	36.99
C ₃ H ₈	0.585	0.52	1.45
CO ₂	0.770	0.80	2.24
		$n_T = 35.37$	100.00

- b) De la Tabla 1, se obtiene el peso molecular (\bar{M}) para cada componente.

Componente	n _i (lb-mol)	\bar{M}_i (lb/lb-mol)	$W_i = n_i \times \bar{M}_i$ (lb)	Porcentaje en Peso $w = \frac{W_i}{W_T} \times 100$
CH ₄	21.22	16.043	340.43246	42.75
C ₂ H ₆	13.23	30.070	397.8261	49.45
C ₃ H ₈	0.52	44.097	22.93044	2.88
CO ₂	0.80	44.010	35.208	4.42
			$W_T = 796.397$	100.00

PROBLEMAS PROPUESTOS

SERIE I. III

- 1.1 ¿Cuántas lb-mol se tiene en un volumen de 200000 pie³ de aire a 14.7 lb/pg² abs. y 60°F?

Solución :

$$n = 526.9 \text{ lb-mol}$$

- 1.2 ¿Cuál es la masa que se tiene en el volumen de aire del problema propuesto 1.1 ?

Solución :

$$m_{\text{aire}} = 15264.3 \text{ lbm}$$

- 1.3 Calcular el peso molecular (o masa molecular) promedio de un gas natural que tiene la siguiente composición :

Componente	Fracción molar (ni)
CH ₄	0.70
C ₂ H ₆	0.10
C ₃ H ₈	0.07
n-C ₄ H ₁₀	0.03
CO ₂	0.06
N ₂	0.04

Solución :

$$\text{Peso molecular promedio} = 22.828 \text{ lbm/lb-mol}$$

- 1.4 Calcular la densidad relativa del gas natural del problema propuesto 1.3.

Solución :

$$\gamma_g = 0.7879$$

- 1.5 ¿Qué volumen (pic³) ocuparán 200 lbm de un gas de densidad relativa 0.60 (aire = 1.0) a una presión de 3000 lb/pg² abs. y una temperatura de 200 °F .

Solución :

$$V = 24.71 \text{ pic}^3$$

SERIE 2. III

- 2.1 Desarrollar una ecuación para calcular la densidad de un gas a condiciones diferentes a las atmosféricas y determinar la densidad de un gas de densidad relativa 0.65 (aire = 1.0) a una presión de 3000 lb/pg² abs. y una temperatura de 200 °F.

Solución :

$$\rho_g = 2.70 \frac{P \gamma_g}{Z T}$$

$$\rho_g = 8.973 \text{ lbm/pie}^3$$

- 2.2 Determinar la presión en el domo de una válvula de Bombeo Neumático (B.N.) cargada con nitrógeno a 800 lb/pg² man, si la temperatura se incrementa de 60 °F a 180 °F. Suponer que los volúmenes en las posiciones de apertura y cierre de la válvula son iguales.

Considerar :

- a) Gas Ideal
- b) Gas Real

Solución :

a) $P_{\text{domo}} = 988 \text{ lb/pg}^2 \text{ man}$

b) $P_{\text{domo}} = 1022.5 \text{ lb/pg}^2 \text{ man}$

2.3 Indicar las siguientes propiedades del agua dulce :

- a) Densidad relativa
- b) Densidad en lbm/pie^3
- c) Densidad en lbm/gal
- d) Densidad en lbm/bl
- e) Gradiente en $\text{lb}/\text{pg}^2/\text{pie}$
- f) Compresibilidad en $(\text{lb}/\text{pg}^2)^{-1}$
- g) Viscosidad a 68.4°F

2.4 Un barril de agua salada es producido desde una profundidad de 10000 pie sometido a una presión de $4000 \text{ lb}/\text{pg}^2$, ¿Cuáles serán los volúmenes (en bl.) a $1500 \text{ lb}/\text{pg}^2$ y $60 \text{ lb}/\text{pg}^2$?

Solución :

Para $1500 \text{ lb}/\text{pg}^2$:

$$V = 1.00825 \text{ bl.}$$

Para $60 \text{ lb}/\text{pg}^2$:

$$V = 1.013002 \text{ bl.}$$

2.5 ¿Qué gradiente de presión ($\text{lb}/\text{pg}^2/\text{pie}$) ejercerá el agua salada con densidad relativa de 1.5 ? y ¿Qué presión hidrostática se tendrá a una profundidad de 8500 pie ?

Solución :

$$G_w = 0.048833 \text{ lb}/\text{pg}^2/\text{pie}$$

$$P_h = 4235.83 \text{ lb}/\text{pg}^2$$

SERIE 3. III

- 3.1 Calcular el gradiente de presión (lb/pg²/pie) de una mezcla con 62% aceite (37 °API) y 38% agua salada ($\gamma_w = 1.15$).

Solución :

$$G_m = 0.41497 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

- 3.2 Un pozo a una profundidad de 12000 pie tiene una presión de fondo estática de 3200 lb/pg². Calcular el nivel estático (N.E.) del fluido para los siguientes casos :

- a) Produce 100% aceite (32 °API).
b) Produce 50 % aceite (32 °API) y 50% agua salada ($\gamma_w = 1.10$)

Solución :

a) $N.E. = 3467.25 \text{ pie}$

b) $N.E. = 4485.32 \text{ pie}$

- 3.3 Determinar la viscosidad (en c.p.) de un aceite con una densidad de 42 °API a 100 °F y con una relación gas disuelto-aceite de 200 pie³/bl.

Empleando la ecuación empírica desarrollada por L.N. Jhonson (Referencia 3).

Solución :

$$\mu_o = 6.78 \text{ c.p.}$$

- 3.4 ¿Qué volumen (en pie^3) ocupará una lb-mol de un gas ideal a las siguientes presiones y temperaturas ?

	<u>Presión (lb/pg²)</u>	<u>Temperatura</u>
a)	14.7	60 °F
b)	14.65	60 °F
c)	15.02	60 °F
d)	14.7	0 °C
e)	15.6	80 °F

Solución :

- a) $V = 379.4 \text{ pie}^3$
- b) $V_2 = 380.7 \text{ pie}^3/\text{lb-mol}$
- c) $V_2 = 371.2 \text{ pie}^3/\text{lb-mol}$
- d) $V_2 = 358.97 \text{ pie}^3/\text{lb-mol}$
- e) $V_2 = 371.26 \text{ pie}^3/\text{lb-mol}$

- 3.5 Determinar la constante universal de los gases (R) en las siguientes unidades :

- a) Pie^3 , lb/pg², °R, lbm-mol
- b) cm^3 , atm, °K, g_m-mol
- c) pie^3 , atm, °R, lb-mol
- d) pie^3 , lb/pie², °R, lb-mol
- e) lt, atm, °K, g_m-mol

Solución :

$$a) \quad R = 10.7253 \frac{\text{lb/pc}^2 \text{ pie}^3}{\text{lb-mol } ^\circ\text{R}}$$

$$b) \quad R = 81.9139 \frac{\text{atm cm}^3}{\text{g}_m\text{-mol } ^\circ\text{K}}$$

$$c) \quad R = 0.7296 \frac{\text{atm pie}^3}{\text{lb-mol } ^\circ\text{R}}$$

$$d) \quad R = 1544.44 \frac{\text{lb/pie}^2 \text{ pie}^3}{\text{lb-mol } ^\circ\text{R}}$$

$$e) \quad R = 0.08210 \frac{\text{atm lt}}{\text{g}_m\text{-mol } ^\circ\text{K}}$$

SERIE 4. III

- 4.1 Determinar el factor de compresibilidad (Z) de un gas de densidad relativa 0.65 (aire = 1.0) a una presión de 2500 lb/pg² abs. y a una temperatura de 220 °F

Solución :

$$Z = 0.895$$

- 4.2 Calcular la presión que ejerce un gas de densidad relativa 0.65 (aire = 1.0) en un recipiente que inicialmente se encuentra a una presión de 600 lb/pg² man y una temperatura de 80 °F, al incrementarse su temperatura a 200 °F .

Considerar :

- a) Gas Ideal
- b) Gas Real

Solución :

$$a) \quad P = 736.6 \text{ lb/pg}^2 \text{ man}$$

$$b) \quad P = 772.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ man}$$

- 4.3 El espacio anular entre la T.R. y la T.P. con una capacidad de 1000 pie³ contiene un gas de densidad relativa 0.65 (aire = 1.0) a una presión promedio de 800 lb/pg² abs. y una temperatura promedio de 150 °F. ¿Qué volumen de gas (pie³) a condiciones estándar se recuperará al disminuir la presión en la T.R. a 650 lb/pg² abs. ?

Solución :

$$V = 9750.58 \text{ pie}^3 \text{ a c.s.}$$

4.4 Dada la composición de un gas natural a condiciones estándar -- (14.7 lb/pg² abs. y 60 °F), calcular :

- a) El porcentaje molar
- b) El factor de compresibilidad del gas (Z) a 2000 lb/pg² abs. y 100 °F
- c) La densidad del gas a condiciones estándar
- d) La densidad del gas a 2500 lb/pg² abs y 200 °F

Componente	Volumen (%)
CH ₄	80.0
C ₂ H ₆	10.0
C ₃ H ₈	<u>10.0</u>
	100.0

Solución :

a) Componente	Porcentaje molar $n_i (\%) = \frac{n_i}{n_1} \times 100$
CH ₄	80.0
C ₂ H ₆	10.0
C ₃ H ₈	<u>10.0</u>
	100.0

b) $Z = 0.73$

c) $\rho_g = 0.0534 \text{ lb/pie}^3 \text{ a c.s.}$

d) $\rho_g = 8.33 \text{ lb/pie}^3$

- 4.5 Calcular la densidad de un gas (en lbm/pie^3) de densidad relativa 0.75 (aire = 1.0) a $2500 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$ y 260°F

Solución :

$$\rho_g = 7.97 \text{ lb/pie}^3$$

FIGURAS Y TABLAS

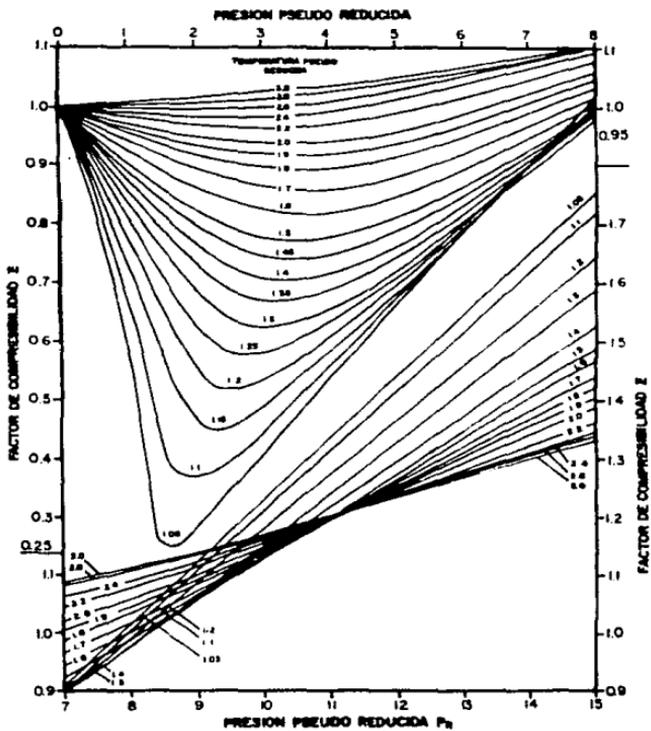


Fig. 1 Factores de compresibilidad de gases naturales, como función de la presión y temperatura reducida.

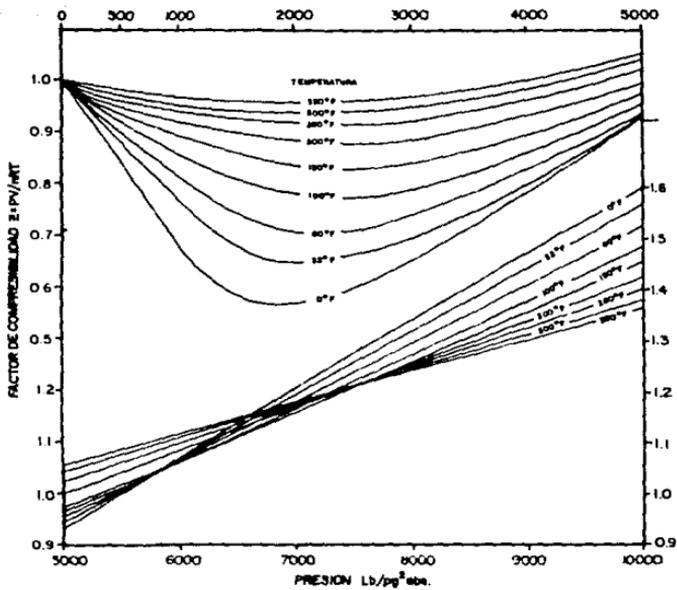


Fig. 2 Factores de compresibilidad de un gas natural⁽³⁾
de densidad relativa 0.65

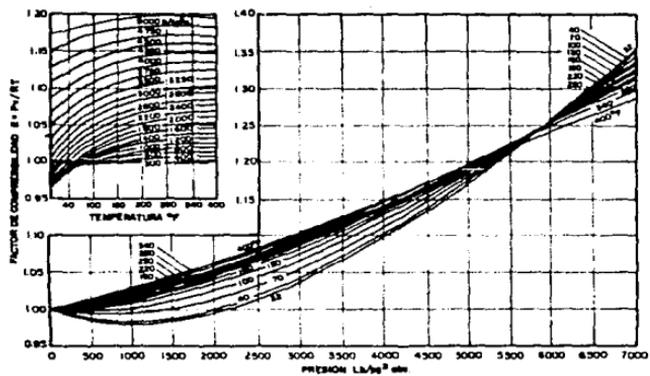


Fig. 3 Factores de compresibilidad "z" para el nitrógeno. ⁽³⁾

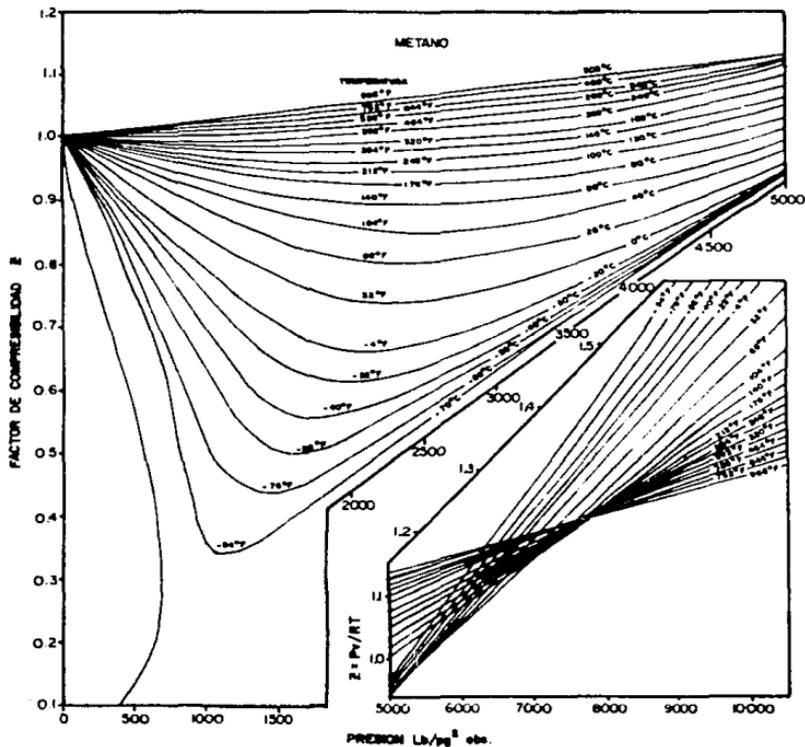
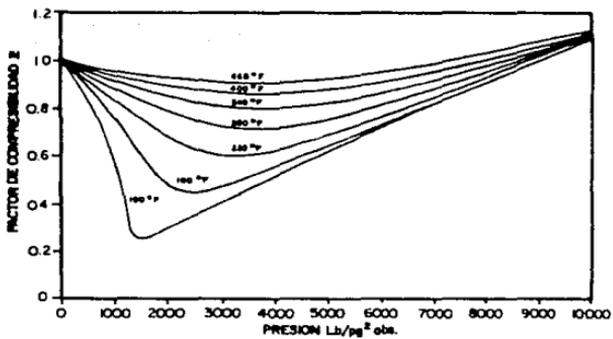


Fig. 4 Factores de compresibilidad del metano⁽³⁾



*Fig. 5 Factores de compresibilidad "z" para (3)
 bixido de carbono (CO₂)*

TABLA .1 CONSTANTES FISICAS DE LOS HIDROCARBUROS. (1)

FORMULA	COMPONENTE	MASA MOLECULAR	CONSTANTES CRITICAS	
			PRESION lb/pg ² abs.	TEMPERATURA °F
CH ₄	Metano	16.043	667.800	-116.630
C ₂ H ₆	Etano	30.070	707.800	90.090
C ₃ H ₈	Propano	44.097	616.300	206.010
C ₄ H ₁₀	n-Butano	58.124	550.700	305.650
C ₄ H ₁₀	Isobutano	58.124	529.100	274.980
C ₅ H ₁₂	n-Pentano	72.151	488.600	385.700
C ₅ H ₁₂	Isopentano	72.151	490.400	369.100
C ₆ H ₁₄	n-Hexano	86.178	436.900	453.700
C ₇ H ₁₆	n-Heptano	100.205	396.800	512.800
C ₈ H ₁₈	n-Octano	114.232	360.600	564.220
C ₈ H ₁₈	Isooctano	114.232	372.400	519.460
C ₉ H ₂₀	n-Nonano	128.259	332.000	610.680
C ₁₀ H ₂₂	n-Decano	142.286	304.000	652.100
CO	Monóxido de Carbono	28.010	507.170	-220.170
CO ₂	Dióxido de Carbono	44.010	1071.170	87.923
HCl	Acido Clorhídrico	36.461	1198.170	124.517
H ₂ O	Agua	18.015	3208.170	705.617
H ₂ S	Acido Sulfhídrico	34.076	1306.170	212.717
N ₂ O ₂	Aire	28.968	547.200	-221.320

GLOSARIO

Densidad (ρ):

Es la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que éste ocupa;

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Densidad relativa (γ):

Es un número adimensional que está dado por la relación de la masa del cuerpo a la masa de un volumen igual de una sustancia que se toma como referencia. Los sólidos y líquidos se refieren al agua a 4°C, mientras que los gases se refieren al aire;

$$\gamma_l = \frac{\rho_l}{\rho_{\text{agua}}} \quad \gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{\text{aire}}}$$

Factor de compresibilidad del gas (z):

Se define como la razón de un volumen realmente ocupado por un gas a una determinada presión y temperatura al volumen que ocuparía si fuese perfecto o ideal:

$$z = \frac{V_r}{V_i} \quad z = \frac{PV}{nRT}$$

Fracción de peso (w):

La fracción de peso, w_i , de cualquier componente i en la mezcla se define mediante la relación

$$w_i = \frac{w_i}{w_m}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

La suma de las fracciones de peso de todos los componentes en la mezcla debe ser igual a la unidad, es decir:

$$w_1 + w_2 + w_3 + \dots = 1$$

Fracción de volumen (v):

El volumen de la mezcla es igual a la suma de los volúmenes de los diferentes componentes que forman dicha mezcla:

$$V_m = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

La fracción de volumen v_i de cualquier componente i en la mezcla se define mediante la relación:

$$v_i = \frac{v_i}{v_m}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

La suma total de fracciones de volumen en la mezcla debe ser la unidad,

$$v_1 + v_2 + v_3 + \dots = 1$$

Fracción molar (n):

El número total de moles en la mezcla, se define como la suma del número de moles de los diferentes componentes individuales que forman la mezcla, es decir:

$$n_m = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$$

La fracción molar n_i de cualquier componente i en la mezcla se define mediante la relación:

$$n_i = \frac{n_i}{n_m}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

La suma de las fracciones molares de todos los componentes en la mezcla debe ser la unidad:

$$n_1 + n_2 + n_3 + \dots = 1$$

Gas ideal:

Un gas ideal o perfecto, se puede definir como un gas cuyo volumen se reduce a la mitad y su presión inicial aumenta dos veces y manteniendo su volumen constante su temperatura absoluta se duplica. Debe satisfacer la ecuación de estado:

$$PV = nRT$$

Gas real:

El gas real, es el gas cuyo volumen se reduce a la mitad de su volumen original, cuando la presión es menor a dos veces la presión inicial, es decir, es más compresible que un gas ideal. Debe satisfacer

la siguiente ecuación de estado:

$$PV = nRT$$

Gradiente de presión:

Está definido como la relación entre la presión ejercida por un fluido por unidad de longitud. Esto es:

$$G_p = \frac{dp}{dL}$$

Masa molecular (\bar{M}):

Es la suma de las masas atómicas de los elementos que forman la molécula.

Peso específico (P_e):

Se define como la relación entre el peso de una sustancia por unidad de volumen, y representa la fuerza que ejerce la aceleración de la gravedad por unidad de volumen de fluido, esto es:

$$P_e = \frac{\text{fuerza de gravedad}}{\text{volumen}} = \frac{\text{Peso}}{\text{volumen}}$$

La densidad y el peso específico se relacionan como sigue:

$$P_e = \rho g$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

Presión de vapor:

Se define como la menor presión a la cual un líquido se evapora. Depende de la temperatura, aumentando con ésta.

Viscosidad (μ):

Es la resistencia interna exhibida cuando una porción o capa de un líquido es desplazada en relación a otra capa. En términos simples, es la resistencia de un líquido a fluir.

REFERENCIAS

- 1) De la Garza Carrasco Nahúm; "Apuntes de Fisicoquímica y Termodinámica de los Hidrocarburos", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F.
- 2) León Ventura Raúl; "Apuntes de Mecánica de Fluidos", -- Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F.
- 3) Brown Kermit E.; "Gas Lift Theory and Practice", The - Petroleum Publishing Co. , Tulsa Oklahoma, 1973.
- 4) Garaicochea Petrírena Francisco; "Apuntes de Transporte de Hidrocarburo.", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F.

CAPITULO IV POZOS FLUYENTES

Pozo fluyente puede definirse desde el punto de vista de producción como aquel que es capaz de vencer las caídas de presión a través del medio poroso, tuberías vertical y descarga, estrangulador y el separador, con la energía propia del yacimiento.

Se debe tener conocimiento de los tipos de yacimiento del cual el pozo está produciendo. Para poder predecir correctamente la vida fluyente de un pozo, deben conocerse factores tales como: porcentaje de agua, relación gas-aceite, declinación de las presiones de fondo, índice de productividad, terminación del pozo, tipos y propiedades de los fluidos producidos entre otros. La energía para mantener fluyendo un pozo, (sin sistema artificial de producción) es la presión propia del yacimiento. Algunos pozos produciendo 98 por ciento de agua salada son aún capaces de fluir. Estos pozos producen de yacimiento con un empuje hidráulico muy activo debido a una alta presión de fondo fluyendo.

Existen pozos que producen de profundidades mayores a 7000-8000 pie con muy baja presión de fondo ($250-500^{1b}/p_i$). Estos son pozos con altas relaciones gas-líquido (por lo menos $250-400 \text{ pie}^3/\text{bl}/1000 \text{ pie}$). Generalmente estos son pozos con bajo volumen de aceite que fluyen intermitentemente.

Ya que el gas sirve para aligerar el gradiente fluyente del fluido producido y la relación gas-líquido disminuye al incrementarse el porcentaje de agua, resulta evidentemente el porqué un pozo deja de fluir por tales circunstancias.

El diámetro de tubería de producción afecta la presión de fondo fluyendo requerida para un conjunto particular de condiciones de un pozo. En general, la presión de fondo fluyendo requerida disminuirá al reducirse el gasto de flujo para un diámetro de tubería de producción constante.

Sin embargo, la velocidad de flujo deberá ser lo suficientemente grande para que los líquidos no resbalen hacia el fondo de la sarta de producción.

Para predecir el gasto máximo posible de un pozo fluyente es necesario utilizar tanto curvas de gradiente de presión en tubería vertical como horizontal (o correlaciones de flujo multifásico).

En la mayoría de los casos se debe suponer una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba). Sin embargo, en la práctica, la longitud y diámetro de la línea de descarga y la presión de separación controlan dicha presión.

Para el estudio del comportamiento de un pozo fluyente es necesario analizarlo como un sistema integral constituido por:

- Comportamiento del flujo de entrada, es decir, el flujo de aceite, agua y gas de la formación hacia el fondo del pozo, se tipifica en cuanto a la producción de líquidos se refiere, por el índice de productividad (IP) del pozo o en términos generales por el IPR.
- Comportamiento del flujo a través de la tubería vertical, implica pérdidas de presión en ésta debidas al flujo multifásico.
- Comportamiento del flujo a través del estrangulador superficial.
- Comportamiento del flujo a través de la línea de descarga hasta el separador.

Después de los separadores, desde que las fases se han separado, se presentan únicamente problemas de flujo en una sola fase. Por lo que para pozos fluyentes es necesario considerar el flujo hasta el separador porque es la última restricción posible al flujo que afecta el comportamiento del pozo.

CURVAS DE GRADIENTE DE PRESION PARA FLUJO MULTIFASICO EN TUBERIAS VERTICALES.

El análisis del comportamiento del flujo vertical se puede hacer con el auxilio de las gráficas de gradientes de presión desarrolladas por Gilbert y por Kermit Brown.

Gilbert da una solución empírica al problema del flujo bifásico vertical. Efectuó mediciones de la caída de presión en tuberías de producción bajo distintas condiciones y obtuvo una familia de curvas, Fig. 4.1. Los parámetros que midió en un número grande de pozos fluyentes fueron:

Profundidad de la tubería,	pie
Diámetro de la tubería,	pg
Producción bruta de líquidos,	bl/día
Relación gas-líquido,	pie ³ /bl
Presión en la cabeza del pozo,	lb/pg ²
Presión de fondo fluyendo,	lb/pg ²

Se considera que la presión de fondo fluyendo depende únicamente de las otras cinco variables.

En la Fig. 4.1 las curvas a, b, c y d corresponden a diferentes presiones en la cabeza del pozo (A, B, C y D). Cada una de estas curvas representa la distribución de presión a lo largo de la tubería de producción para un pozo con: un gasto, una relación gas-líquido y un diámetro de tubería determinados.

Del punto B de la curva b, Gilbert trazó una vertical hasta intersectar la curva a y sobreponiendo éstas obtuvo que la curva b coincidía con una sección de la curva a. Hizo lo mismo con las otras curvas y concluyó que las curvas a, b, c y d son realmente partes de una misma curva, Fig. 4.2, con presiones en el cabezal A, B, C y D correspondientes a las marcadas en la Fig. 4.1. La curva c, por ejemplo, Fig. 4.1, es la curva de la Fig. 4.2 con el punto x tomando la profundidad como cero.

Al usar la curva de la Fig. 4.2 para determinar la Pwf a partir de la Pwh dado el número de pie de T.P. dentro de un pozo, se obtiene la profundidad que corresponde a la Pwh conocida. La longitud equivalente de la T.P. se determina entonces sumando la longitud real de la tubería a esta "profundidad de Pwh" y se lee en la curva la Pwf que corresponde a esta longitud equivalente de tubería de producción. Para el caso contrario, conociendo Pwf, se restará la longitud real de T.P. y se obtendrá la Pwh correspondiente.

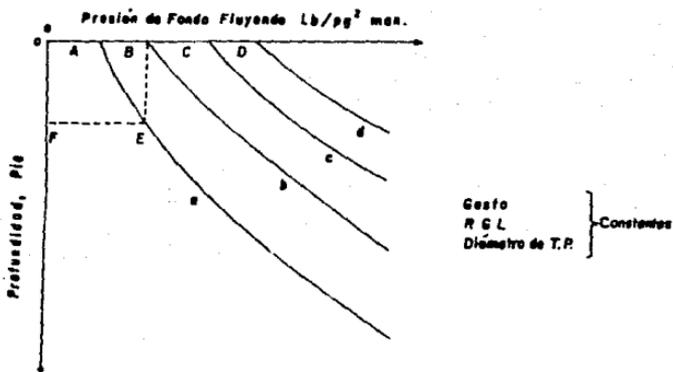


Fig. 4.1 Presión de fondo fluyendo como función de la presión en cabeza del pozo y profundidad de la tubería de producción. ⁽²⁾

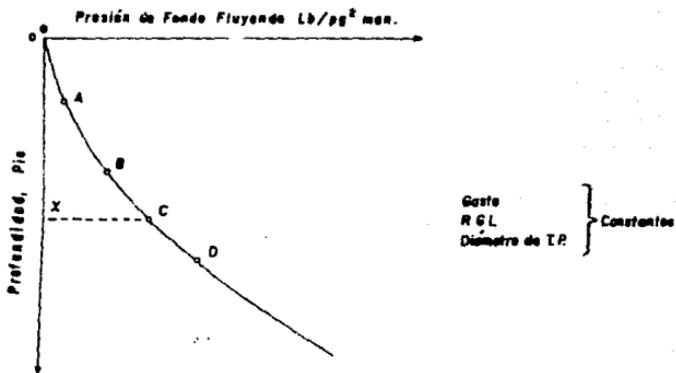


Fig. 4.2 Curva de distribución de la presión para flujo vertical en dos fases. ⁽²⁾

POZOS FLUYENTES

PROBLEMAS RESUELTOS

1. Un pozo de 8000 pie de profundidad con T.P. de 2³/₈ pg. (d.e.) produce 100% aceite con una presión en la cabeza del pozo constante (corriente arriba) de 100 lb/pg². De registros de producción realizados en el pozo para varios años de producción, se obtuvieron los resultados siguientes:

Producción Acumulativa (bl)	Presión de fondo estática (lb/pg ²)	Índice de Productividad (bl/dfa/lb/pg ²)	Relación gas-aceite (pie ³ /bl)
0	4000	30	500
10 000	3500	20	750
20 000	3100	15	1100
30 000	2800	9	1800
40 000	2500	6	2600

Determinar la producción acumulativa, N_p, a la cual este pozo podría dejar de fluir y graficar la declinación del gasto vs. producción acumulativa.

Solución:

Para el trazo del comportamiento de afluencia al pozo, IP, a partir de la ecuación:

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

Si $P_{wf} = 0$; $q_o = q_{omáx} = \text{Potencial del Pozo} = IP \times P_{ws}$

$$q_o \text{ máx (1)} = 30 \times 4000 = 120\,000 \text{ bl}$$

$$q_o \text{ máx (2)} = 20 \times 3500 = 70\,000 \text{ bl}$$

$$q_o \text{ máx (3)} = 15 \times 3100 = 46\,500 \text{ bl}$$

$$q_o \text{ máx (4)} = 9 \times 2800 = 25\,200 \text{ bl}$$

$$q_o \text{ máx (5)} = 6 \times 2500 = 15\,000 \text{ bl}$$

Ver Fig. 1A.IV R.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

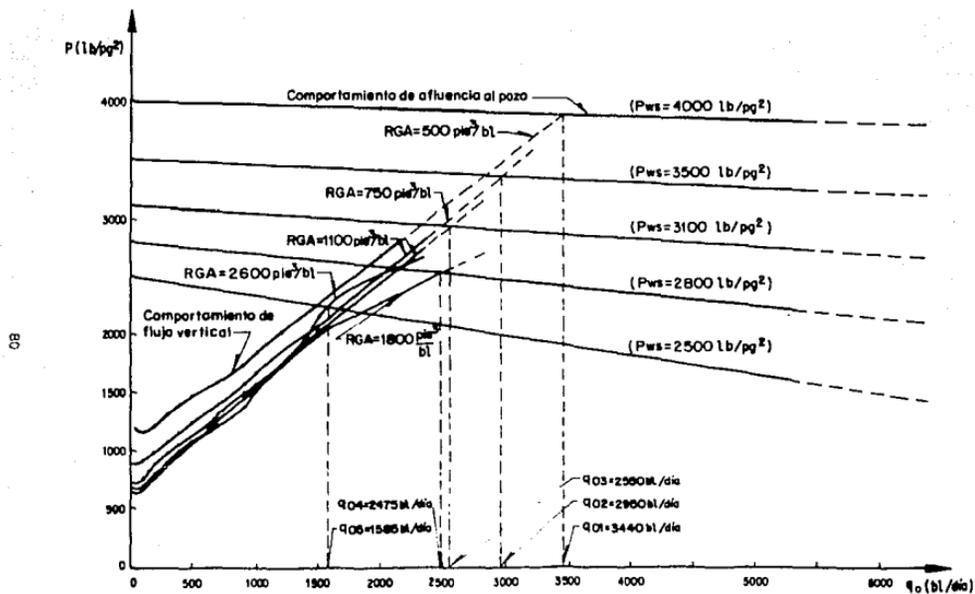


Fig. 1A. IVR. Determinación del gasto de producción para P_{ws} y RGA variables.

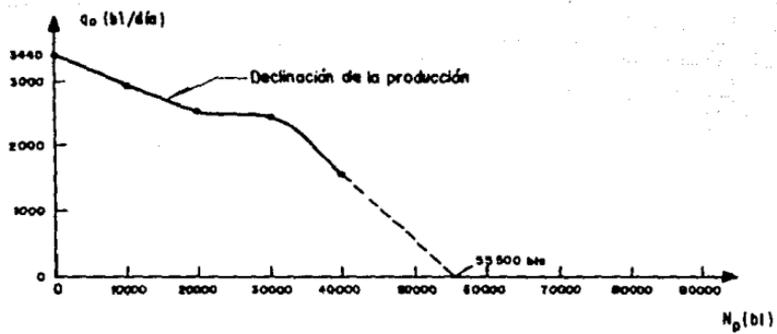


Fig 1B. IX.R. Declinación del gasto vs. producción acumulativa

Para trazar la curva del comportamiento de la presión de fondo fluyendo en T.P., se emplean curvas de gradiente de presión en tubería vertical, Figs. A-180, A-183, A-186, A-189, A-192, A-204, A-207, A-210, A-213, A-216; se suponen gastos de producción y para cada relación gas-aceite dada se obtienen las correspondientes P_{wf} 's.

q_0 (bl/día) RCA (pie ³ /bl)	100	200	300	400	500	700	900	1000	1200	1500	2000
	PRESIONES DE FONDO FLUYENDO, P_{wf} , lb/pg ² .										
500	1160	1200	1320	1410	1480	1590	1740	1835	2020	2260	2660
750	900	980	1080	1160	1220	1400	1560	1660	1840	2060	2500
1100	740	880	960	1060	1120	1300	1480	1560	1750	2020	2440
1800	680	790	900	1000	1070	1260	1440	1540	1740	2000	2260
2600	660	760	880	980	1060	1200	1360	1530	1720	2160	2500

La producción acumulativa estimada a la cual el pozo podría dejar de fluir es de 55500 bl ver Fig. 1B.IV R.

2. Un pozo de 6000 pie de profundidad con T.P. de 2 pg (d.i.) tiene una presión de fondo estática de 3000 lb/pg² y produce 100% aceite con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) constante para cualquier gasto, de 200 lb/pg². El índice de productividad del pozo es de 0.2 bl/día/lb/pg² constante. ¿Cuál será la relación gas-líquido requerida para que el pozo produzca 400 bl/día?

Solución:

Para trazar el comportamiento de afluencia al pozo, IP, se determina el potencial del pozo, $q_{cmáx}$. Debido a que el IP constante representa una línea recta, se tiene:

$$IP = \frac{q_0}{P_{ws} - P_{wf}}$$

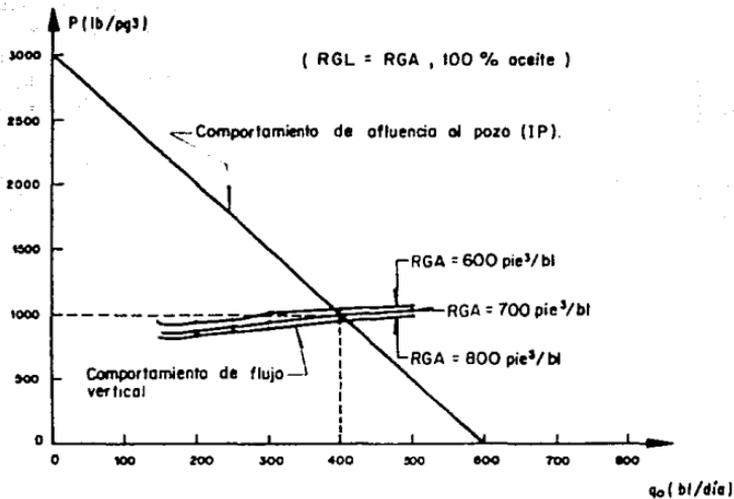


Fig2 IV R. Determinación de la RGL requerida.

Si $q_o = 0$; $Pwf = Pws = 3000 \text{ lb/pg}^2$

Si $Pwf = 0$, $q_o = q_{om\acute{a}x} = IP \times Pws = 0.2 \times 3000 = 600 \text{ bl/d\acute{a}a}$

con estos dos puntos de la gráfica se puede trazar el comportamiento de afluencia al pozo, ver Fig. 2.IV R.

Para trazar el comportamiento de la presi3n de fondo fluyendo en la T.P. se emplean curvas de gradiente de presi3n en tubería vertical, Figs. A-183, A-186, A-189, A-192; se suponen gastos de producci3n para diferentes relaciones gas-líquido y se obtienen las correspondientes Pwf's.

q_o (bl/dfa) RGA (pie ³ /bl)	200	250	300	400	500
	PRESION DE FONDO FLUYENDO, lb/pg ²				
600	940	960	1020	1060	1080
700	880	920	940	1000	1040
800	840	880	910	960	1010

Para $q_o = 400 \text{ bl/d\acute{a}a}$

$$Pwf = Pws - \frac{q_o}{IP} = 3000 - \frac{400}{0.2} = 1000 \text{ lb/pg}^2$$

La relaci3n gas-líquido que proporciona una Pwf menor o igual a 1000 lb/pg² será de:

$$RGL = 700 \text{ pie}^3/\text{bl}, \text{ ver Fig. 2.IV R.}$$

- Un pozo de 10000 pie de profundidad con T.P. de 2 1/2 pg (d.i.) produce 90% de agua salada y 10% aceite. La presi3n de fondo estática es de 3900 lb/pg² y el índice de productividad de 50 bl/día/lb/pg² constante. El pozo produce hacia un separador. Presi3n de separaci3n de 100 lb/pg², por una tubería de descarga de 2500 pie de longitud.
 - Realizar una gráfica del gasto de producci3n vs. diámetros de tubería de descarga de 2, 2 1/2, 3, 3 1/2 y 4 pg. para una relaci3n gas-líquido de 200 pie³/bl.

- b) Realizar una gráfica del gasto de producción vs. diámetros de tuberías de descarga de 2 y 4 pg. para relaciones gas-líquidos de 200, 600 y 1500 pie³/bl.
- c) Si el separador se colocara a 300 pie del pozo y la presión de separación disminuyera a 30 lb/pg², ¿Qué producción podría esperarse de este pozo para tubería de descarga de 2 1/2 pg., considerando una relación gas-líquido de 200 pie³/bl ?

Solución:

a) Paso 1):

Suponer gastos de producción y obtener las presiones de fondo fluyendo a partir del IP.

q (bl/día)	Pwf (lb/pg ²)	J = IP = $\frac{q}{Pws - Pwf}$
100	3898	
500	3890	
1000	3880	
1500	3870	
2000	3860	
3000	3840	

$$Pwf = Pws - \frac{q}{IP}$$

Paso 2):

Utilizando curvas de gradiente en tubería vertical, obtener las presiones en la cabeza del pozo para cada gasto supuesto (corriente arriba).

q (bl/día)	Pwh (lb/pg ²)	Curvas de gradiente empleadas:
100	110	Figs. A-226, A-238, A-253, A-259,
500	320	A-262, A-268
1000	300	
1500	260	
2000	240	
3000	120	

Paso 3):

Utilizando curvas de gradiente en tubería horizontal para diámetros de 2, 2 1/2, 3, 3 1/2 y 4 pg., suponiendo los mismos gastos, obtener la Pwh correspondiente a cada gasto, manteniendo la presión de separación constante.

q (bl/dfa)	Pwh (lb/pg ²)					Curvas de gradiente empleadas:
	Ø I.D. = 2"	2 ½"	3"	3 ½"	4"	
100	-	-	-	-	-	Figs. B-2, B-10, B-20, B-24, B-26, B-30, B-32, B-40, B-50, B-54, B-56, B-60, B-74, B-76, B-78, B-100, B-102, B-104, B-106, B-130, B-132, B-134.
500	120	120	-	-	-	
1000	230	150	120	110	-	
1500	330	200	140	120	110	
2000	460	250	170	130	120	
3000	710	370	230	160	130	

Paso 4):

Graficar en un diagrama Pwh vs. gasto, los valores de Pwh de los pasos 2 y 3 para cada gasto. Considerar los diferentes diámetros de tubería de descarga, ver Fig. 3A.IV R.

Paso 5):

De la intersección de las curvas se obtiene el gasto de producción posible para cada diámetro de tubería de descarga.

Ø I.D. (pg)	q (bl/dfa)
2	1250
2 ½	1930
3	2370
3 ½	2710
4	2920

Paso 6):

Graficar gasto de producción vs. diámetros de tubería de descarga, ver Fig. 3B.IV R.

b)

Paso 1):

Suponer los mismos gastos que para el inciso anterior. Con el empleo de curvas de gradiente en tubería horizontal, con los diámetros de tubería de descarga y las RGL's de 200, 600 y 1500 pie³/bl. Considerar la presión de separación constante.

q (bl/día)	Ø T.D. = 2 pg.			Ø T.D. = 4 pg		
	Pwh D (lb/pg ²)			Pwh D (lb/pg ²)		
	RGL = 200 pie ³ /bl	600 pie ³ /bl	1500 pie ³ /bl	RGL = 200 pie ³ /bl	600 pie ³ /bl	1500 pie ³ /bl
100	-	-	110	-	-	-
500	120	200	300	-	-	110
1000	230	360	580	-	120	140
1500	330	540	860	110	130	160
2000	460	740	1160	120	150	200
3000	710	1140	1760	130	180	290

Curvas de gradiente empleadas: Figs. B-2, B-10, B-20, B-24, B-26, B-30, B-124, B-128, B-130, B-132, B-134

Pwh - presión en la cabeza del pozo, corriente arriba

Pwhp - presión en la cabeza del pozo, corriente abajo.

Paso 2):

Graficar las Pwh's obtenidas en el paso 2 (inciso a), así como también las Pwhp's para cada Ø T.D. y RGL, ver Fig. 3 C.IV R.

Paso 3):

De la intersección de las curvas se obtiene el gasto de producción para cada Ø T.D. y RGL respectiva.

q (bl/día)	Ø T.D. = 2 pg	q (bl/día)	Ø T.D. = 4 pg
1250	RGL = 200 $\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}}$	2920	RGL = 200 $\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}}$
870	RGL = 600 $\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}}$	2570	RGL = 600 $\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}}$
550	RGL = 1500 $\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}}$	2170	RGL = 1500 $\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}}$

Paso 4):

Graficar gasto de producción vs. diámetros de tubería de descarga (2 y 4 pg) para RGL's de 200, 600 y 1500 pie³/bl, ver Fig. 3D.IV R.

- c) Utilizando curvas de gradiente en tubería horizontal con Peep = 30 lb/pg². y Ø T.D. = 2 1/2", RGL = 200 pie³/bl, Long. T.D. = 300 pie. suponer gastos y obtener las respectivas Pwhp's para cada gasto.

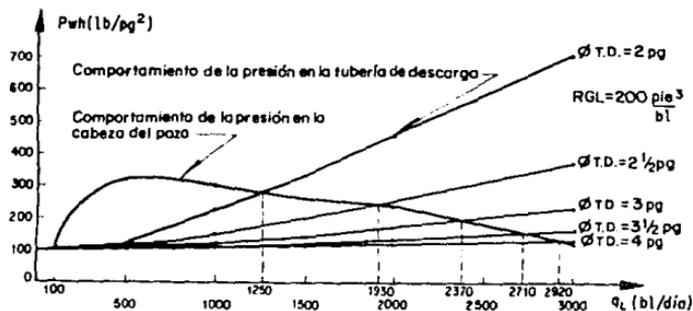


Fig. 3A. IVR. Determinación de gastos de producción para diferentes diámetros de tubería de descarga.

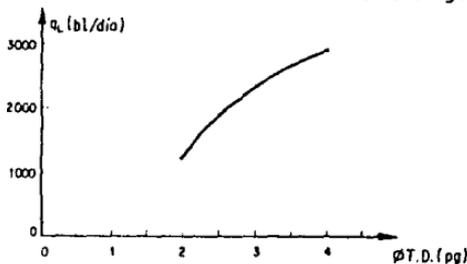


Fig. 3B. IVR. Gasto de producción vs. diámetro de tubería de descarga.

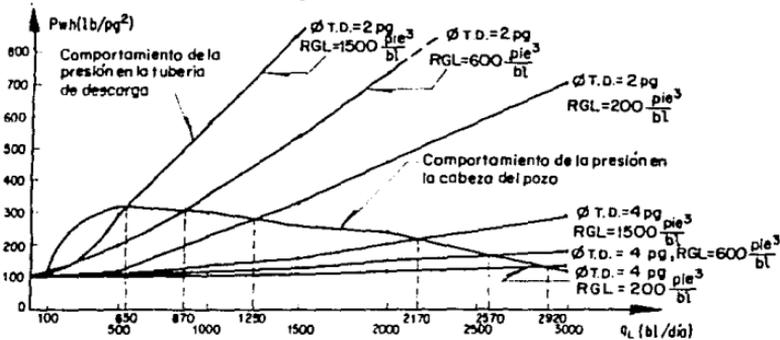


Fig. 3C. IVR. Determinación del gasto de producción para RGL y diámetro de tubería de descarga variables.

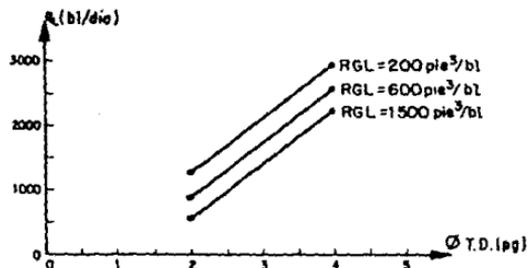


Fig. 3D. IVR. Gasto de producción vs. diámetro de tubería de descarga.



Fig. 3E. IVR. Determinación del gasto de producción.

q (bl/día)	P_{whp} (lb/pg ²)	Curvas de Gradiente empleadas:
100	-	Figs. B-32, B-40, B-50, B-54,
500	40	B-56, B-60
1000	50	
1500	60	
2000	70	
3000	90	

Graficar las P_{whp} 's obtenidas para cada gasto en el paso 2) del inciso a), así como las P_{whp} 's del paso anterior para cada gasto supuesto, ver Fig. 3E. IV R.

De la intersección de ambas curvas se obtiene el gasto de producción posible para las condiciones dadas, siendo éste de:

$$q_o = 3230 \text{ bl/día}$$

4. Un pozo de 10000 pie de profundidad con T.P. de 2 pg. (d.i.) produce 100% aceite con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) de 130 lb/pg². La presión de fondo estática es de 3800 lb/pg², el índice de productividad de 50 bl/día/lb/pg² constante y la relación gas-aceite de 3000 pie³/bl. Graficar presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) vs. gasto de producción y determinar el gasto máximo posible real de este pozo.

Solución:

A partir de la ecuación del índice de productividad:

$$IP = \frac{q_o}{P_{ws} - P_{wf}} = 50 \text{ bl/día/lb/pg}^2 \quad (1)$$

$$P_{wf} = P_{ws} - \frac{q_o}{IP} = 3800 - \frac{q_o}{50} \quad (2)$$

Se suponen gastos de producción y se obtienen las respectivas P_{wf} 's a partir de la ec. 2.

q_o (bl/día)	100	500	1000	1500	2000	2500	3000
P_{wf} (lb/pg ²)	3798	3790	3780	3770	3760	3750	3740

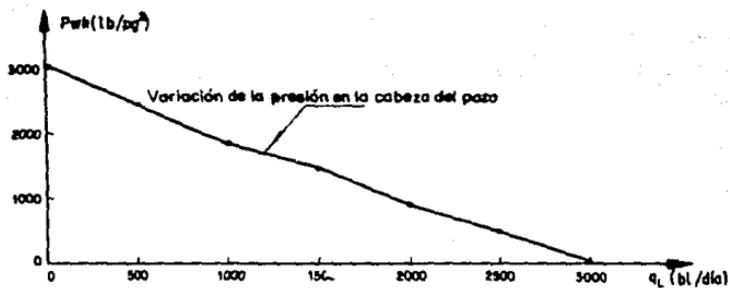


Fig. 4 A . I.V.R. Presión en la cabeza del pozo vs.gasto de producción.

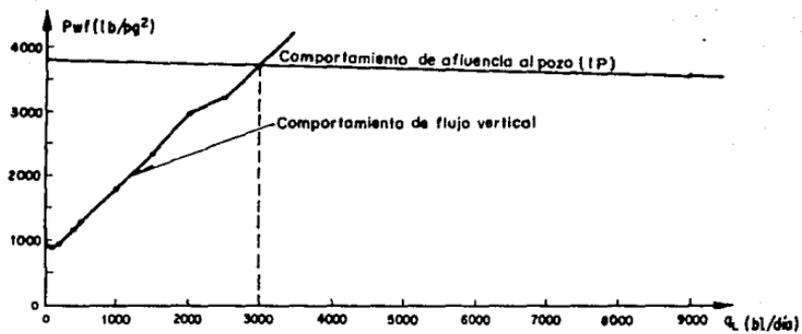


Fig. 4B.IV.R. Determinación del gasto de producción máximo posible.

Utilizando curvas de gradiente de presión en tubería vertical, Figs. A-180, A-192, A-207, A-213, A-216, A-219 y A-222, para los mismos gastos supuestos anteriormente y con las Pwf's correspondientes, se obtienen las presiones en la cabeza del pozo (corriente arriba) para cada gasto.

q_o (bl/día)	100	500	1000	1500	2000	2500	3000
Pwhu(lb/pg ²)	-	2480	1880	1480	880	480	-

Graficar Pwhu vs. q_o , ver Fig. 4A.IV R.

Para una presión en la cabeza del pozo real (corriente arriba) de 130 lb/pg², utilizar curvas de gradiente de presión en tubería vertical, Figs. A-180, A-183, A-192, A-207, A-213, A-216, A-219 y A-222, suponiendo gastos de producción y boteniendo las Pwf's correspondientes para cada gasto.

q_o (bl/día)	100	200	400	500	1000	1500	2000	2500	3000
Pwf(lb/pg ²)	880	960	1200	1280	1800	2360	3000	3220	3760

Se grafican las Pwf's obtenidas a partir del IP y de las curvas de gradiente, ver Fig. 4B. IV R.

La intersección de ambas curvas será el gasto máximo posible de producción de este pozo.

$$q_{om\acute{a}x.real} = 3000 \text{ bl/día}$$

5. Se tiene un pozo de 7000 pie de profundidad con T.P. de 2pg. (d.i.), produciendo 100% aceite, con una relación gas-aceite de 500 pie³/bl. A partir de los datos obtenidos en dos pruebas de flujo realizadas en el pozo, determinar la presión promedio del yacimiento (Yacimiento saturado y pozo sin daño) y graficar la curva del comportamiento de afluencia (IPR).

PRUEBA 1

PRUEBA 2

$$q_o = 600 \text{ bl/día}$$

$$q_o = 1000 \text{ bl/día}$$

$$P_{wh} = 360 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{wh} = 160 \text{ lb/pg}^2$$

Solución :

Empleando curvas de gradiente de presión en tubería vertical se tiene:

$$P_{wf1} = 1840 \text{ lb/pg}^2$$

Fig. A-195

$$P_{wf2} = 1600 \text{ lb/pg}^2$$

Fig. A-207

De la Ecuación de Vogel:

$$\frac{q_o}{q_{om\acute{a}x}} = 1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2 \quad (1)$$

De la Prueba 1:

$$\frac{600}{q_{om\acute{a}x}} = 1 - 0.2 \left(\frac{1840}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left(\frac{1840}{P_{ws}} \right)^2 \quad (2)$$

De la Prueba 2:

$$\frac{1000}{q_{om\acute{a}x}} = 1 - 0.2 \left(\frac{1600}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left(\frac{1600}{P_{ws}} \right)^2 \quad (3)$$

Resolviendo las Ecs. (2) y (3) para P_{ws} y $q_{om\acute{a}x}$:

$$\frac{600}{q_{om\acute{a}x}} = 1 - \frac{368}{P_{ws}} - \frac{2708480}{P_{ws}^2} \quad (4)$$

$$\frac{1000}{q_{om\acute{a}x}} = 1 - \frac{320}{P_{ws}} - \frac{2048000}{P_{ws}^2} \quad (5)$$

De las Ecs. (4) y (5) despejar $q_{om\acute{a}x}$:

$$q_{om\acute{a}x} = 600 P_{ws}^2 / (P_{ws}^2 - 368 P_{ws} - 2708480) \quad (6)$$

$$q_{om\acute{a}x} = 1000 P_{ws}^2 / (P_{ws}^2 - 320 P_{ws} - 2048000) \quad (7)$$

Igualando (6) y (7):

$$600 P_{ws}^2 / (P_{ws}^2 - 368 P_{ws} - 2708480) = 1000 P_{ws}^2 / (P_{ws}^2 - 320 P_{ws} - 2048000) \quad (8)$$

Agrupando términos en la Ec. (8):

$$400 P_{ws}^2 - 176000 P_{ws} - 1.47968 \times 10^9 = 0 \quad (9)$$

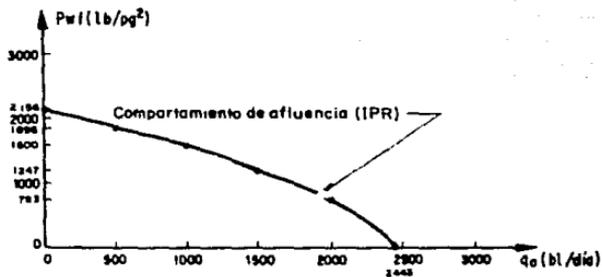


Fig.5.IV.R. Comportamiento de flujo en el yacimiento.

Resolviendo la ecuación cuadrática:

$$P_{ws} = \frac{-(-176000) \pm \sqrt{(-176000)^2 - 4(400)(-1.47968 \times 10^9)}}{2(400)}$$

$$P_{ws} = \frac{176000 + 1.5486975 \times 10^6}{800}$$

$$P_{ws} = 2156 \text{ lb/pg}^2$$

Sustituyendo el valor de P_{ws} en la Ec. (6), se tiene:

$$q_{om\acute{a}x} = 600 \times 2156^2 / (2156^2 - 368 \times 2156 - 2708480)$$

$$q_{om\acute{a}x} = 2433 \text{ bl/dfa.}$$

Para graficar la curva de IPR, a partir de la ecuación de Vogel suponen gastos de producción y obtener sus respectivas P_{wf} 's.

donde:

$$P_{wf} = 0.125 P_{ws} \left[-1 + \sqrt{81 - 80 \left(\frac{q_o}{q_{om\acute{a}x}} \right)} \right]$$

q_o (bl/dfa)	P_{wf} (lb/pg ²)
0	2156
500	1896
1000	1400
1500	1247
2000	783
2433	0

Realizar una gráfica de q_o vs. P_{wf} , ver Fig. 5.IV R.

6. Un pozo de 8000 pie de profundidad con un índice de productividad de 3 bl/dfa/lb/pg^2 produce 3000 bl/día (100% aceite). Si la presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) es de 120 lb/pg^2 , la presión promedio del yacimiento de 2500 lb/pg^2 y la relación gas-aceite es de $350 \text{ pie}^3/\text{bl}$. Determinar el diámetro mínimo de tubería de producción para manejar dicho gasto.

Solución:

- (1) Obtener la P_{wf} necesaria para producir los 3000 $b^{10}/día$:

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

donde: $P_{ws} - P_{wf} = \frac{q_o}{IP}$

$$P_{wf} = P_{ws} - \frac{q_o}{IP} ; P_{wf} = 2500 - \frac{3000}{3} = 1500 \text{ lb/pg}^2.$$

- (2) Por ensayo y error determinar el diámetro de T.P. mínimo para obtener una presión de fondo fluyente igual o menor que 1500 lb/pg^2 .
- (3) Suponer diámetros de T.P. y determinar la P_{wf} para 3000 $b^{10}/día$, empleando curvas de gradiente en tubería vertical.

diám. T.P. (pg)	P_{wf} (lb/pg^2)	Curvas de Gradiente Figs.
2	3200	A-222
2 $\frac{1}{2}$	2600	A-270
3	2080	A-321
3 $\frac{1}{2}$	1840	A-381
4	1760	A-447
4 $\frac{1}{2}$	1680	A-480
5	1500	A-516

Por lo que el diámetro mínimo de T.P. es de 5 pg.

7. Un pozo de 8200 pie de profundidad con tubería de producción de 2 pg. produce 10 por ciento aceite con una relación gas-aceite constante de 3000 pie^3/bl . El índice de productividad es de 1.0 $b^{10}/día/lb/pg^2$ (constante), la presión de fondo estática es de 3900 lb/pg^2 . Además el pozo produce por una tubería de descarga de 2 pg. de diámetro y 4000 pie de longitud hacia un separador, Presión de separación = 80 lb/pg^2 . Determinar el gasto máximo de producción posible para este pozo. Suponer Yacimiento Bajosaturado.

Solución:

- (1) Para graficar el comportamiento de afluencia, a partir de la ecuación del índice de productividad constante:

$$J = IP = \frac{q}{P_{ws} - P_{wf}} , \text{ donde } P_{wf} = P_{ws} - \frac{q}{IP}$$

Se suponen gastos de producción y se obtienen sus respectivas presiones de fondo fluyendo.

q (bl/día)	Pwf (lb/pg ²)
0	3900
500	3400
1000	2900
1500	2400
2000	1900
3000	900
3900	0

- (2) Para graficar la curva de variación de la presión en la cabeza del pozo (corriente arriba), suponiendo gastos de producción (10% aceite) con su respectiva Pwf (obtenida del IP), determinar la Pwh empleando curvas de gradiente en tubería vertical.

q (bl/día)	Pwf (lb/pg ²)	Pwh _v (lb/pg ²)	Curvas de Gradiente Figs.
500	3400	1720	A-190
700	3200	1860	A-196
900	3000	1140	A-202
1000	2900	960	A-205
1500	2400	200	A-211

- (3) Para graficar la variación de la presión en la línea de descarga, suponiendo gastos de producción con Pseparación = 80 lb/pg² constante, emplear curvas de gradiente en tubería horizontal, obtener la presión en la cabeza del pozo (corriente abajo), Pwh_h, para cada gasto.

q (bl/día)	Pwh _h (lb/pg ²)	Curvas de Gradiente * empleadas:
500	540	Figs. B-10
1000	1060	B-20
2000	2120	B-26

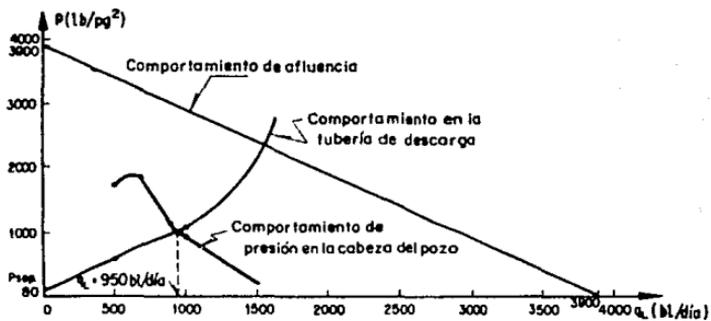


Fig. 7. ΔR . Determinación del gasto de producción posible.

* Se utilizaron curvas de gradiente en tubería horizontal para 100% agua como una aproximación.

De la intersección de la curva del paso (2) con la del paso (3), el gasto máximo posible es:

$$q = 950 \text{ bl/día} \quad \left(\text{ver Fig. 7. IV R.} \right)$$

8. Un pozo de 6000 pie de profundidad con tubería de producción de $2 \frac{7}{8}$ pg. produce 400 bl/día (100% aceite). Se tiene una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) de 500 lb/pg^2 . La relación gas-líquido es de $400 \text{ pie}^3/\text{bl}$. La presión de fondo estática es de 3200 lb/pg^2 y la presión de burbujeo de 3500 lb/pg^2 .

- a) ¿Qué gasto daría el pozo con un estrangulador de $1 \frac{1}{2}$ pg, con una presión de separación de 100 lb/pg^2 y una tubería de descarga de 3 pg. de diámetro y 2000 pie de longitud? Comprobar si cumple para flujo crítico.
- b) ¿Qué gasto, P_{wh} y P_{wf} daría para un estrangulador de $1 \frac{1}{2}$ pg? Comprobar si cumple para flujo crítico.

Solución: a)

- 1) Utilizando curvas de gradiente en tubería vertical Fig. A-237 con la presión en la cabeza del pozo (corriente arriba), determinar la P_{wf} correspondiente:

$$P_{wf} = 1960 \text{ lb/pg}^2$$

como $P_{wf} < P_b$ entonces se trata de un yacimiento saturado.

- 2) Empleando la ecuación de Vogel

$$\frac{q_o}{q_{om\acute{a}x}} = 1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2$$

$$\text{donde: } q_{om\acute{a}x} = \frac{q_o}{1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2}$$

$$q_{om\acute{a}x} = \frac{400}{1 - 0.2 \left(\frac{1960}{3200} \right) - 0.8 \left(\frac{1960}{3200} \right)^2} = 523 \text{ bl/día}$$

suponiendo P_{wf} , determinar gastos correspondientes con la ecuación de Vogel.

Pwf (lb/pg ²)	q _o (bl/día)
0	523.0
500	506.4
1000	449.45
1500	382.0
2000	294.18
2500	186.0
3200	0.0

Con estos valores graficar la curva del comportamiento de afluencia (IPR).

- 3) Graficar la curva de comportamiento de presión en la cabeza del pozo. Suponer gastos de producción, determinar las Pwf correspondientes con la ecuación de Vogel. Empleando curvas de gradiente en tubería vertical obtener la Pwh para cada gasto.

q _o (bl/día)	Pwf (lb/pg ²)	Pwh (lb/pg ²)	Curvas de Gradiente Figs.
100	2842	880	A-228
200	2440	640	A-231
400	1381	260	A-237
500	450	-	A-240

donde: $Pwf = 0.125 Pws \left[-1 + \sqrt{81 - 80 \left(\frac{q_o}{q_{o\text{máx}}} \right)} \right]$

- 4) Para trazar la curva del comportamiento en el estrangulador, a partir de la ecuación de Gilbert.

$$Pwh = \frac{435 R^{0.546} q_o}{S^{1.89}}$$

Esta ecuación representa una línea recta que pasa por el origen por lo que, únicamente se requiere determinar un punto para el trazo de ésta.

$$\begin{aligned} \text{Si } q_o &= 300 \text{ bl/día} \\ Pwh &= \frac{435 \times 0.4^{0.546} \times 300}{12^{1.89}} \end{aligned}$$

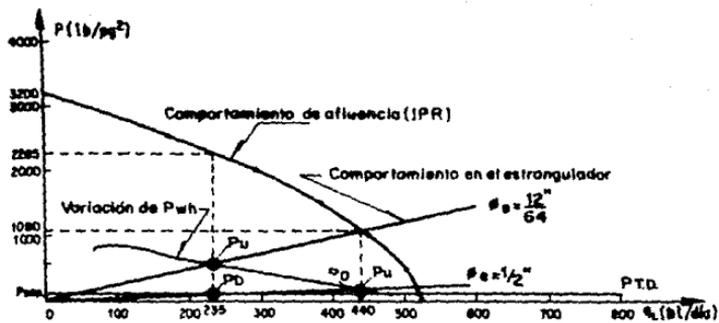


Fig. B. IV R. Determinación del gasto de producción para diferentes diámetros de estrangulador.

$$P_{wh} = 722.2 \text{ lb/pg}^2$$

- 5) Graficar la variación de la presión en la tubería de descarga, utilizando curvas de gradiente en tubería horizontal, su poner gastos de producción y obtener sus respectivas P.T.D.

q_o (bl/día)	P.T.D. (lb/pg ²)	Curvas de gradiente Figs.
200	-	B-65
400	110	B-67
600	120	B-69
800	130	B-71

Resultados: (Ver Fig. 8.IV R.)

- a) Estrangulador de $12/64''$: $q_o = 235 \text{ bl/día.}$

$$P_u = 560 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Presión en la cabeza del pozo corriente arriba).}$$

$$P_{wf} = 2285 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_D = 105 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Presión en la cabeza del pozo corriente abajo)}$$

$$\text{Para flujo crítico: } \frac{P_D}{P_u} < 0.5$$

$$\frac{105}{560} = 0.1875$$

0.1875 < 0.5 por lo tanto:

cumple para flujo crítico

- b) Para un estrangulador de $\frac{32}{64} \text{ pg.}$

$$\text{Si } q_o = 500 \text{ bl/día}$$

$$P_{wh} = \frac{435 \times 0.4^{0.546} \times 500}{32^{1.89}} = 188.5 \text{ lb/pg}^2$$

Graficar el comportamiento de presión en el estrangulador (línea recta)

Resultados: (Ver Fig. 8.IV R)

$$q_o = 440 \text{ bl/día}$$

$$P_{wf} = 1080 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_u = 175 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_D = 115 \text{ lb/pg}^2$$

$$\frac{P_D}{P_u} = \frac{115}{175} = 0.657 > 0.5 \text{ por lo que:}$$

no cumple para flujo crítico

9. De una prueba de producción en un pozo se obtuvieron los datos siguientes:

$$P_{ws} = 2600 \text{ lb/pg}^2 \quad ; \quad q_o = 500 \text{ bl/día (Eficiencia de Flujo = 0.7)}$$

$$P_{wf} = 2200 \text{ lb/pg}^2$$

Determinar:

a) Gasto de aceite máximo para FE = 0.7

b) Gasto de aceite si la P_{wf} es de 1500 lb/pg² y F.E. = 0.7

Solución:

$$a) \quad \frac{P_{wf}}{P_{ws}} = \frac{2200}{2600} = 0.846$$

con este valor, en la Fig. 1.21 (Referencia 1) obtener el valor de $q_o/q_{omáx}$ en la curva de FE = 0.7

$$\frac{q_o \text{ FE} = 0.7}{q_{omáx} \text{ FE} = 1.0} = 0.185$$

$$\text{donde: } q_{omáx} \text{ FE} = 1.0 = \frac{q_o}{0.185} = \frac{500}{0.185} = 2702.7 \text{ bl/día}$$

$$\text{Si } P_{wf} = 0 \quad ; \quad \frac{q_{omáx} \text{ FE} = 0.7}{q_{omáx} \text{ FE} = 1.0} = 0.87$$

$$q_{omáx} \text{ FE} = 0.7 = 0.87 \times 2702.7 = 2351.35 \text{ bl/día}$$

$$\underline{q_{omáx} \text{ FE} = 0.7 = 2351.35 \text{ bl/día}}$$

$$b) \quad \frac{P_{wf}}{P_{ws}} = \frac{1500}{2600} = 0.5769$$

$$\text{De la Fig. 1.21, referencia 1} \quad ; \quad \frac{q_o \text{ FE} = 0.7}{q_{omáx} \text{ FE} = 1.0} = 0.47$$

$$q_o \text{ FE} = 0.7 = 0.47 \times 2702.7 = 1270.27 \text{ bl/dfa}$$

$$\underline{q_o \text{ FE} = 0.7 = 1270.27 \text{ bl/dfa}}$$

10. Se perforaron pozos en un yacimiento de 40 acres cuyo horizonte productivo es de 15 pie de espesor con una permeabilidad promedio de 10 md. El aceite tiene una viscosidad a condiciones del yacimiento de 6 c.p. y el factor de volumen del aceite de la formación es 1.17. Si los pozos se terminaron con una T.R. de 5 pg., estimar el IP promedio. ¿Cuál es el potencial del pozo promedio si la presión estática del yacimiento es de 1250 lb/pg² ?

Solución:

A partir de la ecuación de Darcy, para un yacimiento homogéneo, horizontal :

$$J = IP = \frac{7.08 \times 10^{-3} h}{\ln(r_e/r_w)} \left(\frac{k_o}{B_o \mu_o} \right)$$

donde: $h = 15 \text{ pie}$

$k_o = 10 \text{ md}$

$B_o = 1.17$

$\mu_o = 6 \text{ c.p.}$

$r_w = 2.5 \text{ pg}$

Adrene = 40 acres

1 acre = $4.3560 \times 10^4 \text{ pie}^2$

40 acres = $1.7424 \times 10^6 \text{ pie}^2$

Adrene = πr_e^2

$r_e = \left(\frac{\text{Adrene}}{\pi} \right)^{1/2} = \left(\frac{1.7424 \times 10^6}{\pi} \right)^{1/2} = 7.4473025 \times 10^2 \text{ pie}$

$r_e = 8.936763 \times 10^3 \text{ pg.}$

$$IP = \frac{7.08 \times 10^{-3} \times 15}{\ln \left(\frac{8.936763 \times 10^3}{2.5} \right)} \left(\frac{10}{1.17 \times 6} \right)$$

$$\underline{IP = 0.01849 \text{ bl/dfa/}^{1/2} \text{pg}^2}$$

Si $P_{ws} = 1250 \text{ lb/pg}^2$

$$\begin{aligned} \text{Potencial del pozo} &= P_{ws} \times IP = q_{om\acute{a}x} \\ &= 1250 \times 0.01849 \end{aligned}$$

$$\underline{q_{om\acute{a}x} = 23.11 \text{ bl/dfa}}$$

PROBLEMAS PROPUESTOS

SERIE I. IV

- 1.1 Un pozo de 8 000 pie de profundidad con T.P. de 2 3/8 pg. (d.e.) produce un gasto de 200 bl/día con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) de 200 lb/pg² y una relación gas-líquido de 600 pie³/bl. ¿Qué presión de fondo fluyendo se tendría si el gasto se incrementara a 1 000 bl/día, manteniendo la presión en la cabeza del pozo constante? Comparar las presiones de fondo fluyendo para ambos gastos bajo las siguientes condiciones:
- a) 100% aceite
 - b) 50% aceite y 50% agua
 - c) 10% aceite y 90% agua

- 1.2 Un pozo de 8 000 pie de profundidad con T.P. de 2 3/8 pg. (d.e.) produce con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) constante de 100 lb/pg² y una presión de fondo estática de 3 750 lb/pg². De una prueba de producción en el pozo, se obtuvieron los resultados siguientes:

$$\text{Gasto de producción} = 750 \text{ blw/día} + 50 \text{ blo/día}$$

$$\text{Relación gas-aceite} = 1\,500 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

Determinar el índice de productividad de este pozo para un yacimiento bajosaturado.

Solución:

$$\text{IP} = 1.311 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

- 1.3 Un pozo de 10 000 pie de profundidad con T.P. de 2½ pg. (d.i.) registró las siguientes presiones de fondo estática e índices de productividad durante 3 años de producción:

Año	Pws (lb/pg ²)	IP (bl/día/lb/pg ²)
0	5 000	22.0
1	4 500	8.7
2	4 200	3.1
3	4 000	1.2

Determinar el tiempo al cual este pozo dejará de fluir y graficar la declinación del gasto contra tiempo. Considerar una presión en la ca

beza del pozo (corriente arriba) constante de 200 lb/pg^2 y una relación gas-aceite de $500 \text{ pie}^3/\text{bl}$ para un gasto de 100% aceite.

Solución:

4.45 años

- 1.4 Comparar las presiones de fondo fluyendo necesarias para que un pozo de 6 000 pie de profundidad con T.P. de 2 pg. (d.i.) produzca 600 bl/día de líquido con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) constante de 150 lb/pg^2 y una relación gas-líquido de $500 \text{ pie}^3/\text{bl}$ para los siguientes casos:
- a) 100% aceite
 - b) 50% aceite y 50% agua
 - c) 10% aceite y 90% agua
- 1.5 Un pozo de 9 500 pie de profundidad con T.P. de $2 \frac{7}{8}$ pg. (d.e.) produce 90% de agua y 10% de aceite con un gasto de líquido de 800 bl/día. Considerando el gasto constante, calcular las presiones de fondo fluyendo para relaciones gas-líquido de: 0, 50, 100, 200, 400, 600, 1000, 2000 y $3000 \text{ pie}^3/\text{bl}$, con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) constante.

SERIE 2. IV

- 2.1 Un pozo con T.P. de 2 3/8 pg. (d.e.) produciendo 50% aceite y 50% agua salada, fluye desde una profundidad de 8 000 pie con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) de 150 lb/pg². El gasto de aceite es de 200 bl/día. Considerando que este gasto de producción es constante para cualquier abatimiento de presión, calcular las presiones de fondo fluyendo necesarias para que este pozo produzca con las siguientes relaciones gas-líquido: 0, 25, 50, 100, 200, 400, 600, 1000, 2000 y 3000 pie³/bl.

Solución:

RGL (pie ³ /bl)	0	25	50	100	200	400	600	1000	2000	3000
Pwf (lb/pg ²)	3440	3400	3310	3070	2560	1760	1440	1230	1120	960

- 2.2 Un pozo de 8 000 pie de profundidad produce 200 blo/día y 200 blw/día con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) de 150 lb/pg² constante. Calcular las presiones de fondo fluyendo requeridas para una relación gas-líquido de 400 pie³/bl, considerando que se produce por T.P. de 1½, 2, 2½ y 3 pg. de diámetro.

Solución:

T.P. (pg.)	1½	2	2½	3
Pwf (lb/pg ²)	2400	1760	1690	1600

- 2.3 Un pozo de 10 000 pie de profundidad con T.P. de 2½ pg (d.i.) tiene una presión de fondo estática de 4 000 lb/pg². De una prueba superficial se obtuvo la siguiente información:

Gasto de producción = 900 blw/día + 100 blo/dfa

Relación gas-aceite = 6 000 pie³/bl

Presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) = 200 lb/pg²

Calcular el índice de productividad del pozo para un yacimiento bajo-saturado.

Solución:

$$IP = 0.61 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

- 2.4 Un pozo fluye a un separador con una contrapresión de 100 lb/pg^2 por una tubería de descarga de 2 pg de diámetro y 3 000 pie de longitud, ¿cuál es la presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) si el pozo produce 100 blo/día con una relación agua-aceite de 5 blw/blo y una relación gas-líquido de $1000 \text{ pie}^3/\text{bl}$?

Solución:

$$P_{wh} = 620 \text{ lb/pg}^2$$

- 2.5 Un pozo de 8 500 pie de profundidad con una T.P. de 2½ pg (d.i.) produce un gasto de 800 blo/día con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) de 100 lb/pg^2 . La presión de fondo estática es de $2\ 000 \text{ lb/pg}^2$, la presión de burbujeo de $2\ 400 \text{ lb/pg}^2$ y la relación gas-aceite de $600 \text{ pie}^3/\text{bl}$. Determinar el índice de productividad promedio y graficar la curva del comportamiento de afluencia al pozo.

Solución:

$$\text{IPR} = 1.19 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

SERIE 3. IV

- 3.1 Se tiene un pozo de 7 000 pie de profundidad con T.P. de 2 pg. (d.i.), produciendo 100% aceite, con una relación gas-aceite de 500 pie³/bl. A partir de los datos obtenidos en dos pruebas de flujo realizadas en el pozo, determinar el índice de productividad promedio (yacimientos bajosaturado) y la presión promedio del yacimiento.

PRUEBA 1	PRUEBA 2
$q_o = 600 \text{ bl/día}$ $P_{wh} = 360 \text{ lb/pg}^2$	$q_o = 1000 \text{ bl/día}$ $P_{wh} = 160 \text{ lb/pg}^2$

Solución:

$$\overline{IP} = 1.67 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

- 3.2 Un pozo de 8 000 pie de profundidad con un índice de productividad de 10 bl/día/lb/pg² (constante) produce 1800 blw/día y 200 blo/día. La presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) es de 100 lb/pg² y la presión promedio del yacimiento es de 2400 lb/pg². La relación gas-líquido es de 300 pie³/bl. Determinar el diámetro mínimo de tubería de producción para manejar dicho gasto.

Solución:

$$3 \text{ pg.}$$

- 3.3 Un pozo de 8 000 pie de profundidad con tubería de producción de 2 pg. (d.i.) produce 600 bl/día (100% aceite). La presión promedio del yacimiento es de 2 400 lb/pg², el índice de productividad del pozo es 2 bl/día/lb/pg² (constante) y la relación gas-aceite es 400 pie³/bl. Determinar la presión máxima en la cabeza del pozo (corriente arriba) para lo cual este pozo producirá dicho gasto.

Solución:

$$P_{whu} = 240 \text{ lb/pg}^2$$

- 3.4 Un pozo de 8 000 pie de profundidad con tubería de producción de 2 pg. (d.i.) produce 1000 blo/día. La presión promedio del yacimiento es de 2 800 lb/pg², el índice de productividad del pozo es 2.2 bl/día/lb/pg² (constante) y la presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) es de 100 lb/pg². Determinar la relación gas-líquido necesaria para que este pozo fluya.

Solución :

$$\underline{RGL = 250 \text{ pie}^3/\text{bl.}}$$

- 3.5 Un pozo de 5000 pie de profundidad con tubería de producción de 2.5 pg. (d.i.) produce 100% aceite de 35^oAPI con una relación gas-aceite de 3000 pie³/bl. Hacia un separador (Pseparación = 80 lb/pg²) por una tubería de descarga de 2.5 pg. de diámetro y 2000 pie de longitud. La presión de fondo estática es de 2500 lb/pg² y el índice de productividad de 1.0 bl/día/lb/pg² (constante). Determinar : Los gastos de aceite para estranguladores de 10/64, 12/64, 19/64, 24/64 y 1/2 pg. Asimismo los gastos de aceite sin estrangulador y descargando el pozo a la atmósfera.

Solución :

$$\underline{\phi_e = 10/64'' \quad ; \quad q_o = 185 \text{ bl/día}}$$

$$\underline{\phi_e = 12/64'' \quad ; \quad q_o = 250 \text{ bl/día}}$$

$$\underline{\phi_e = 19/64'' \quad ; \quad q_o = 475 \text{ bl/día}}$$

$$\underline{\phi_e = 24/64'' \quad ; \quad q_o = 625 \text{ bl/día}}$$

$$\underline{\phi_e = 32/64'' \quad ; \quad q_o = 835 \text{ bl/día}}$$

$$\underline{\text{Gasto sin estrangulador : 1285 bl/día}}$$

$$\underline{\text{Gasto descargando a la atmósfera : 1775 bl/día}}$$

SERIE 4 IV

- 4.1 En un pozo se realizó una prueba de producción y se obtuvieron los siguientes datos:

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

$$P_{wf} = 1\,800 \text{ lb/pg}^2$$

$$q_o = 70 \text{ bl/día (Eficiencia de flujo: 0.7)}$$

Determinar:

a) q_o máx. para FE = 1.3

b) q_o para $P_{wf} = 1\,200 \text{ lb/pg}^2$ y FE = 1.3

c) Si el pozo fue estimulado, cuánto se incrementó el gasto máximo

Solución:

$$a) \quad q_o \text{ máx. FE} = 1.3 = 256 \text{ bl/día}$$

$$b) \quad q_o \text{ FE} = 1.3 = 200.4 \text{ bl/día}$$

$$c) \quad \Delta q_o = 46 \text{ bl/día}$$

- 4.2 Un pozo de 8 000 pie de profundidad produce 100% aceite de 35 °API. El índice de productividad es de 1.0 bl/día/lb/pg² (constante) y la presión de fondo estática de 3 100 lb/pg². Considerar una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) de 150 lb/pg² y la relación gas-líquido de 200 pie³/bl. Determinar el diámetro más pequeño de tubería de producción para mantener fluyendo este pozo. ¿Cuál será el gasto para este diámetro de T.P. ?

Solución:

$$\frac{1.049 \text{ pg. (d.i.)}}{q_o = 260 \text{ bl/día}}$$

- 4.3 Un pozo terminado en el intervalo de 2994 a 3032 pie tiene una T.P. de 2 3/8 pg. suspendida a 3 000 pie. El pozo fluye a 320 bl/día, el porcentaje de agua es cero a una relación gas-aceite de 400 pie³/bl con una presión en la cabeza del pozo (corriente arriba) de 500 lb/pg². La presión estática es de 1 850 lb/pg² a 3000 pie. ¿Cuál sería el gasto y la P_{wh} si se colocara un estrangulador superficial de 1/2 pg. de diámetro. Considerar un índice de productividad constante.

Solución:

$$q_o = 570 \text{ bl/día}$$

$$P_{wh} = 220 \text{ lb/pg}^2$$

- 4.4 Un pozo fuyente está terminado con 7332 pie de T.P. de 2 3/8 pg. La presión estática es de 3000 lb/pg², el índice de productividad de 0.42 bl/día/lb/pg² (constante) y la relación gas-aceite de 200 pie³/bl. Si el pozo produce 100% aceite y se tiene un estrangulador superficial de 1/4 pg. ¿Cual será el gasto del pozo con este estrangulador?

Solución :

$$q_o = 238 \text{ bl/día}$$

- 4.5 Un yacimiento de 1000 acres cuyo horizonte productivo es de 50 -- pie de espesor tiene una permeabilidad promedio de 5 md. y un factor de daño de 1. El aceite producido tiene una viscosidad de -- 5 c.p. a condiciones de yacimiento y el factor de volumen es de -- 1.2. Determinar el índice de productividad promedio del pozo. Considerar yacimiento bajoaturado y pozos terminados con T.R.'s de 5 pg.

Solución :

$$IP = 0.023 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

GLOSARIO

- Estrangulador:** Sirve para controlar el gasto de producción y asegurar la estabilidad de un pozo.
- Factor de eficiencia de flujo (FE):** Se define como:
$$FE = \frac{\text{Abatimiento de presión ideal}}{\text{Abatimiento de presión real}}$$

$$FE = \frac{P_{ws} - P_{wf}'}{P_{ws} - P_{wf}}$$

donde: $P_{wf}' = P_{wf} + \Delta P_g$
- Flujo crítico:** Se define como el flujo de fluido a una velocidad equivalente a la velocidad de propagación de una onda de presión en el medio donde se encuentra el fluido. En el trabajo de los campos petroleros este requisito se satisface si la P_{wh} es por lo menos el doble de la presión promedio en la línea de descarga.
- Potencial del Pozo:** Es el gasto máximo, al cual la formación puede aportar hacia el pozo, cuando la P_{wf} es cero lb/pg^2 man.
- Presión de burbujeo o de saturación (P_b):** Es la presión en la cual se forma la primera pequeña cantidad de moléculas de líquido envolviendo una burbuja de gas.
- Relación gas-aceite instantánea (RGA):** Es el gasto total de gas (gas libre más gas disuelto) a condiciones estándar entre el gasto de aceite "muerto" a condiciones estándar, para un instante dado.
- Yacimiento de aceite bajosaturado:** Su presión inicial es mayor que la presión de saturación. Arriba de esta presión todo el gas presente está disuelto en el aceite.

Yacimiento de aceite saturado:

Su presión inicial es igual o menor que la presión de saturación. El gas presente puede estar libre (en forma dispersa o acumulada en el casquete) y disuelto.

REFERENCIAS

- 1) Gómez Cabrera J. Angel; "Apuntes de Producción de Pozos I ",
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. México, D.F.
- 2) Nind T.E.W.; "Principles Of Oil Well Production", Mc Graw Hill,
Inc. 1964.
- 3) Brown, Kermit E.; "Gas Lift Theory and Practice",
The Petroleum Publishing Co.; Tulsa, Oklahoma, 1973.
- 4) Garatcoches Petirena Francisco; "Apuntes de Transporte de Hidrocar-
buros" Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F.

CAPITULO V

BOMBEO NEUMATICO

El bombeo neumático es un sistema artificial de producción utilizado en los pozos petroleros para poder levantar los fluidos a la superficie. En este sistema se utiliza gas a una presión relativamente alta (250 lb/pg^2 como mínima) para poder aligerar la columna de fluido y de este modo permitir al pozo fluir hacia la superficie.

El gas inyectado origina que la presión que ejerce la carga del fluido sobre la formación disminuya debido a la disminución de la densidad de dicho fluido y por otro lado la expansión del gas inyectado con el consecuente desplazamiento del fluido.

Existen dos tipos de bombeo neumático :

Bombeo Neumático Continuo

Bombeo Neumático Intermitente.

Bombeo Neumático Continuo.

En este método un volumen continuo de gas a alta presión es inyectado dentro de la tubería de producción para aligerar la columna de fluidos hasta obtener una diferencial de presión suficiente a través de la cara de la formación y de este modo permitir fluir al pozo a un gasto deseado. Lo anterior se logra mediante una válvula de flujo, la cual permite un posible punto de inyección profundo de presión disponible y una válvula para regular el gas inyectado desde la superficie. El sistema de B.N. continuo es factible de aplicarse en pozos de alto índice de productividad ($> 0.5 \text{ bl/día/lb/pg}^2$) y presión de fondo relativamente alta (columna hidrostática $> 50\%$ de la profundidad del pozo) así como utilizando diversos diámetros de T.P. , dependiendo del gasto de producción deseado. De este modo se pueden tener gastos entre 200 - 20000 bl/día a través de sartas de T.P. de diámetro común y hasta 80000 bl/día produciendo por T.R.; aún más se

pueden tener gastos tan bajos como 25 bl/día a través de tubería de diámetro reducido (del tipo macarrón).

Bombeo Neumático Intermitente.

En este método consiste en inyectar un volumen de gas a alta presión por el espacio anular hacia la T.P. en forma cíclica, es decir, periódicamente inyectar un determinado volumen de gas por medio de un regulador, un interruptor o ambos. De igual manera, en este sistema se emplea una válvula insertada en la T.P. a través de la cual, el gas de inyección pasará del espacio anular a la T.P. para levantar los fluidos a la superficie y un controlador superficial cíclico de tiempo en la superficie. Cuando la válvula superficial de B.N.I. abre, expulsa hacia la superficie al fluido de la formación que se acumuló dentro de la T.P., en forma de bache.

Después de que la válvula cierra, la formación continua aportando fluido al pozo, hasta alcanzar un determinado volumen de aceite con el que se inicie otro ciclo; dicho ciclo es regulado para que coincida con el gasto de llenado del fluido de formación al pozo. En el B.N.I. pueden utilizarse puntos múltiples de inyección del gas a través de más de una válvula subsuperficial.

Este sistema se recomienda para pozos con las características siguientes :

- a) Alto índice de productividad (> 0.5 bl/día/lb/pg²) y bajas presiones de fondo (columna hidrostática $\leq 30\%$ profundidad del pozo)
- b) Bajo índice de productividad (< 0.5 bl/día/lb/pg²) con bajas presiones de fondo.

BOMBEO NEUMATICO PROBLEMAS RESUELTOS

1. Se tiene una válvula desbalanceada de Bombeo Neumático (B. N.) operada por presión del gas de inyección que cuenta con la información siguiente :

Domo cargado con Nitrógeno (N_2) a $60^\circ F$

Profundidad de colocación de la válvula = 9000 pie

Presión superficial de apertura = 850 lb/pg^2

Presión en T.P. = 550 lb/pg^2

Temperatura superficial = $100^\circ C$

Temperatura a la profundidad de la válvula = $180^\circ F$

Determinar la presión de apertura en el taller para los siguientes casos :

- a) Válvula de $1 \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} \text{ pg.}$, $A_b = 0.765 \text{ pg}^2$
 b) Válvula de $1 \times \frac{1}{16} \text{ pg.}$, $A_b = 0.3104 \text{ pg}^2$

Solución :

a) De la ec. 2.14 :

$$P_{vo} = 850 \left(1 + \frac{(9)1.5}{100} \right) = 1079.5 \text{ lb/pg}^2$$

$$A_p = \frac{\pi (1/4)^2}{4} = 0.0491 \text{ pg}^2$$

Si $R = \frac{A_p}{A_b}$ entonces :

$$R = \frac{0.0491}{0.765} = 0.0641$$

De la ec. 2.22 se tiene :

$$P_{daT.V.} = P_{vo} (1 - R) + P_t R$$

$$Pd \text{ a } 180^{\circ}\text{F} = 1079.5 (1 - 0.0641) + 550 \times 0.0641 = 1045.5 \text{ lb/pg}^2$$

De la Tabla 2.1 para $T = 180^{\circ}\text{F}$ se obtiene $C_t = 0.795$

$$Pd \text{ a } 60^{\circ}\text{F} = 0.795 \times 1045.5 = 831.2 \text{ lb/pg}^2$$

Entonces de la ec. 2.33 :

$$P_{tro} = \frac{831.2}{1 - 0.0641}$$

$$P_{tro} = 888.1 \text{ lb/pg}^2$$

$$b) \quad A_p = \frac{\pi (1/16)^2}{4} = 0.0031 \text{ pg}^2$$

$$R = \frac{0.0031}{0.3104} = 0.0099$$

$$Pd \text{ a } 180^{\circ}\text{F} = 1079.5 (1 - 0.0099) + 550 \times 0.0099 = 1074.25 \text{ lb/pg}^2$$

$$Pd \text{ a } 60^{\circ}\text{F} = 0.795 \times 1074.25 = 854.03 \text{ lb/pg}^2$$

Entonces :

$$P_{tro} = \frac{854.03}{1 - 0.0099}$$

$$P_{tro} = 862.5 \text{ lb/pg}^2$$

2. En un pozo a una profundidad de 8000 pie se localiza una válvula desbalanceada de B.N. cargada únicamente con resorte y operada por presión del gas de inyección y cuenta con la siguiente información :

Válvula de $1 \frac{1}{2} \times 1 \frac{1}{2}$ pg.

Área de fuelles = 0.765 pg^2

Presión superficial de apertura = 800 lb/pg^2

Presión en la T.P. = 655 lb/pg^2

Densidad relativa del gas de inyección = 0.7 (aire = 1.0)

Temperatura superficial = 100°F

Temperatura a la profundidad de la válvula = 180°F

Calcular :

- Presión de apertura a la profundidad de la válvula, lb/pg^2
- Presión de cierre a la profundidad de la válvula, lb/pg^2
- Amplitud de fondo de la válvula, lb/pg^2

- d) Presión superficial de cierre, lb/pg^2
 e) Amplitud superficial de la válvula, lb/pg^2
 f) Presión de apertura en el taller, lb/pg^2

Solución :

- a) De la Fig. 2.3 con $P_{so} = 800 \text{ lb/pg}^2$ y $\gamma_g = 0.7$ se obtiene :

$$\Delta P_{\text{graf.}} = 21 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$$

$$\bar{T}_{\text{graf.}} = \frac{170 + (1.6 \times 8000/100)}{2} = 149 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\bar{T}_{\text{graf.}} = 149 + 460 = 609 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\bar{T}_{\text{real}} = \frac{100 + 180}{2} + 460 = 600 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\Delta P \text{ corregida} = \frac{21}{1000} \times 8000 \times \frac{609}{600} = 17.52 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{vo} = P_{so} + \Delta P \text{ corregida}$$

$$P_{vo} = 800 + 170.52$$

$$P_{vo} = 970.52 \text{ lb/pg}^2$$

b) $A_p = \frac{\pi(0.5)^2}{4} = 0.1963 \text{ pg}^2$

$$R = \frac{0.1963}{0.765} = 0.2566$$

De la ec. 2.38 se obtiene :

$$S_t = P_{vo} + \frac{P_t R}{1-R}$$

$$S_t = 970.52 + \frac{655 \times 0.2566}{1 - 0.2566} = 1196.61 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 2.40 si $P_d = 0 \text{ lb/pg}^2$:

$$P_{vc} = 1196.61 (1 - 0.2566)$$

$$P_{vc} = 890 \text{ lb/pg}^2$$

$$c) \quad \Delta P_{\text{fondo}} = P_{\text{vo}} - P_{\text{vc}}$$

$$\Delta P_{\text{fondo}} = 970.52 - 890$$

$$\Delta P_{\text{fondo}} = 80.52 \text{ lb/pg}^2$$

d) De la ec. 2.15 se obtiene :

$$P_{\text{sc}} = \frac{P_{\text{vc}}}{1 + \frac{0.25 \times D}{10000}}$$

$$P_{\text{sc}} = \frac{890}{1 + \frac{0.25 \times 8000}{10000}}$$

$$P_{\text{sc}} = 741.67 \text{ lb/pg}^2$$

$$e) \quad P_{\text{so}} = \frac{970.52}{1 + \frac{0.25 \times 8000}{10000}} = 808.76 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_{\text{sup.}} = P_{\text{sc}} - P_{\text{so}}$$

$$\Delta P_{\text{sup.}} = 808.76 - 741.67$$

$$\Delta P_{\text{sup.}} = 67.1 \text{ lb/pg}^2$$

f) De la ec. 2.53 si $P_d = 0$ se obtiene :

$$P_{\text{tro}} = S_t$$

$$\text{Del inciso b) } S_t = 1196.61 \text{ lb/pg}^2$$

entonces :

$$P_{\text{tro}} = 1196.61 \text{ lb/pg}^2$$

3. Se instalará una válvula desbalanceada de B.N. en un pozo a una profundidad de 7000 pie operada por presión del gas de inyección y se conocen los datos siguientes :

Válvula de 1 1/2 x 1/4 pg.

Area de fuelles = 0.765 pg²

Presión superficial de apertura = 900 lb/pg²

Presión en la T.P. = 600 lb/pg²

Temperatura superficial = 60 °F

Temperatura a la profundidad de 7000 pie = 160 °F

Determinar la presión de apertura en el taller, en lb/pg² para los siguientes casos :

- a) Domo de la válvula con N₂ a 60 °F
- b) Válvula cargada unicamente con resorte.

Solución :

$$a) \quad A_p = \frac{\pi (1/4)^2}{4} = 0.0491 \text{ pg}^2$$

$$R = \frac{0.0491}{0.765} = 0.0641$$

De la ec. 2.14 :

$$P_{vo} = 900 \left(1 + \frac{(7)^{1.5}}{100} \right) = 1066.68 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 2.22 :

$$P_d \text{ a } 160^\circ\text{F} = 1066.68 (1 - 0.0641) + 600 \times 0.0641 = 1036.76 \text{ lb/pg}^2$$

De la Tabla 2.1 para T = 160 °F se obtiene C_t = 0.823
entonces :

$$P_d \text{ a } 60^\circ\text{F} = 0.823 \times 1036.76 = 853.25 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 2.33 :

$$P_{tro} = \frac{853.25}{1 - 0.0641}$$

$$P_{tro} = 911.6 \text{ lb/pg}^2$$

- b) De la ec. 2.37 para P_d = 0 se obtiene :

$$P_{vo} = S_t - \frac{P_t R}{1 - R}$$

Para la presión de apertura en el taller se tiene P_t = 0
entonces :

$$P_{vo} = S_t, \text{ por lo tanto } P_{tro} = P_{vo} :$$

$$P_{tro} = 1066.68 \text{ lb/pg}^2$$

4. Para los datos del problema 2.4 y considerando válvula de doble elemento de carga, $S_t = 600 \text{ lb/pg}^2$ y domo con N_2 a 60°F , calcular la amplitud de la válvula a la profundidad correspondiente y el efecto de tubería de producción para los siguientes casos :

- a) $P_t = 200 \text{ lb/pg}^2$
 b) $P_t = 400 \text{ lb/pg}^2$
 c) $P_t = 600 \text{ lb/pg}^2$

Solución :

$$a) \quad A_p = \frac{\pi (7/16)^2}{4} = 0.1503 \text{ pg}^2$$

$$R = \frac{0.1503}{0.765} = 0.1964$$

De la ec. 2.33

$$P_d \text{ a } 60^\circ\text{F} = 850 (1 - 0.1964) = 683 \text{ lb/pg}^2$$

De la Tabla 2.1 para $T = 180^\circ\text{F}$ se obtiene $C_t = 0.795$ entonces :

$$P_d \text{ a } 180^\circ\text{F} = \frac{683}{0.795} = 859.12 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 2.37 :

$$P_{vo} = \frac{859.12}{1 - 0.1964} + 600 - \frac{200 \times 0.1964}{1 - 0.1964} = 1620.2 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 2.40 :

$$P_{vc} = 859.12 + 600 (1 - 0.1964) = 1341.28 \text{ lb/pg}^2$$

Entonces :

$$\Delta P_{\text{fondo}} = P_{vo} - P_{vc}$$

$$\Delta P_{\text{fondo}} = 1620.2 - 1341.28$$

$$\Delta P_{\text{fondo}} = 278.92 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 2.24 :

$$T.E. = 200 \left(\frac{0.1964}{1 - 0.1964} \right)$$

$$\underline{T.E. = 48.88 \text{ lb/pg}^2}$$

$$b) \text{ Pvo} = \frac{859.12}{1-0.1964} + 600 - \frac{400 \times 0.1964}{1-0.1964} = 1571.33 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_{\text{fondo}} = 1571.33 - 1341.28$$

$$\underline{\Delta P_{\text{fondo}} = 230.05 \text{ lb/pg}^2}$$

$$T.E. = 400 \left(\frac{0.1964}{1 - 0.1964} \right)$$

$$\underline{T.E. = 97.76 \text{ lb/pg}^2}$$

$$c) \text{ Pvo} = \frac{859.12}{1-0.1964} + 600 - \frac{600 \times 0.1964}{1-0.1964} = 1522.45 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_{\text{fondo}} = 1522.45 - 1341.28$$

$$\underline{\Delta P_{\text{fondo}} = 181.17 \text{ lb/pg}^2}$$

$$T.E. = 600 \left(\frac{0.1964}{1 - 0.1964} \right)$$

$$\underline{T.E. = 146.64 \text{ lb/pg}^2}$$

5. Se tiene una válvula balanceada operada por presión del gas de inyección de $1 \frac{1}{2} \times 7/16$ pg., como cargado con gas de densidad relativa 0.70 (aire = 1.0) a 60°F y 800 lb/pg^2 . Se instalará en un pozo a una profundidad de 8000 pie y se conocen los datos siguientes :

$$\text{Area de fuelles} = 0.765 \text{ pg}^2$$

$$\text{Temperatura superficial} = 100^\circ\text{F}$$

$$\text{Temperatura a la profundidad de 8000 pie} = 228^\circ\text{F}$$

$$\text{Densidad relativa del gas de inyección} = 0.7 \text{ (aire} = 1.0)$$

Calcular :

- La presión de apertura a la profundidad de la válvula, - - lb/pg^2
- La presión superficial de apertura, lb/pg^2

Solución :

- Del Apéndice 2A Fig. 2A(1) con Pd a $60^\circ\text{F} = 800 \text{ lb/pg}^2$ y

$\bar{T} = 228^{\circ}\text{F}$ se obtiene : Pd a $228^{\circ}\text{F} = 1150 \text{ lb/pg}^2$

Para válvula balanceada :

Pvo = Pd a T.V., por lo tanto : $P_{vo} = 1150 \text{ lb/pg}^2$

b) De la ec. 2.15 :

$$P_{so} = \frac{P_{vo}}{1 + \frac{0.25 \times D}{10000}}$$

$$P_{so} = \frac{1150}{1 + \frac{0.25 \times 8000}{10000}}$$

$$P_{so} = 958.33 \text{ lb/pg}^2$$

6. En un pozo a una profundidad de 6000 pie se localiza una válvula de B. N., operada por fluidos con domo cargado con N_2 a 60°C . Calcular la presión de apertura, lb/pg^2 , si se conocen los datos siguientes :

Válvula de $1 \frac{1}{2} \times 1/4 \text{ pg}$.

Área de fuelles = 0.765 pg^2

Presión del domo a $60^{\circ}\text{F} = 400 \text{ lb/pg}^2$

Presión en la T.R. = 750 lb/pg^2

Temperatura a la profundidad de la válvula = 180°F

Solución:

De la Tabla 2.1 para $T = 180^{\circ}\text{F}$ se obtiene $C_t = 0.795$

entonces :

$$P_d \text{ a } 180^{\circ}\text{F} = \frac{400}{0.795} = 503.14 \text{ lb/pg}^2$$

$$A_p = \frac{\pi (1/4)^2}{4} = 0.04908 \text{ pg}^2$$

$$R = \frac{0.04908}{0.765} = 0.0641$$

De la ec. 2.45 para $S_t = 0$ se obtiene :

$$P_t = \frac{P_d \text{ a T.V.} - P_c R}{1 - R}$$

$$P_t = \frac{503.14 - 750 \times 0.0641}{1 - 0.0641}$$

$$P_t = 452 \text{ lb/pg}^2$$

7. Determinar el punto de inyección del gas, volumen de gas necesario y el diámetro del orificio de la válvula operante de un pozo con E.N. continuo bajo las características siguientes :
- Profundidad del intervalo productor = 8000 pie
 Gasto de aceite = 1000 bl/día
 Presión en la cabeza del pozo = 100 lb/pg²
 Relación gas - aceite = 200 pie³/bl
 Índice de productividad = 2 bl/día/lb/pg² (constante)
 Temperatura a 8000 pie = 170 °F
 Temperatura superficial = 100 °F
 Diámetro de tubería de producción = 2 3/8" d.e.
 Densidad relativa del gas = 0.7 (aire = 1.0)
 Presión superficial de operación = 900 lb/pg²
 Presión de fondo estática = 2650 lb/pg²
 Densidad del aceite producido = 35 °API

Solución :

Punto de inyección del gas.

- (1) Realizar en una hoja de papel transparente una gráfica - de profundidad vs. presión, a la misma escala de las curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical a utilizar, (Fig. A-207) para T.P. de 2 pg. d.i., $q_o = 1000$ bl/día, 100% aceite; de (0-8000 pie) vs. (0 - 2800 lb/pg²), ver Fig. 7.VR
- (2) Sobre la gráfica anterior, localizar en la superficie :
 $P_{wh} = 100$ lb/pg² , $P_{so} = 900$ lb/pg² y
 P disponible = $P_{so} - 100$ lb/pg² = 800 lb/pg²
- (3) A partir del índice de productividad constante, ec. 1.19 :

$$P_{wf} = 2650 - \frac{1000}{2} = 2150 \text{ lb/pg}^2$$
 Localizar el punto (2150 lb/pg², 8000 pie)
- (4) Determinar la presión de la columna del gas de inyección a 8000 pie.

De la Fig. 2.3, el gradiente de presión del gas de inyección para $P_{so} = 900 \text{ lb/pg}^2$ y $\gamma_g = 0.7$ es de $23.5 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie}$.

$$\bar{T}_{\text{graf.}} = \frac{170 + [1.6 \times \text{Prof. (pie)} / 100 \text{ pie}]}{2}$$

$$= \frac{170 + [1.6 \times 8000 / 100]}{2} = 140 \text{ } ^\circ\text{F} = 609 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\Delta P_{\text{corr}} = \Delta P_{\text{graf.}} \cdot \frac{\bar{T}_{\text{graf.}} \text{ } ^\circ\text{R}}{\bar{T} \text{ real } ^\circ\text{R}} ;$$

$$\bar{T} \text{ real} = \frac{170 + 100}{2} + 460 = 595 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\Delta P_{\text{corr}} = 23.5 \times \frac{609}{595} = 24.052 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$$

$$\Delta P_{\text{corr}} = 24.052 \times 8 = 192.42 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{so} + \Delta P_{\text{corr}} = 900 + 192.42 = 1092.42 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{\text{diseño}} \text{ a } 8000 \text{ pie} = 1092.42 - 100 = 992.42 \text{ lb/pg}^2$$

- (5) Localizar a 8000 pie : P_{vo} y $P_{\text{diseño}}$ del inciso anterior.
- (6) Unir con una línea recta los puntos de presión de diseño en la superficie y a 8000 pie (gradiente de presión del gas de inyección de diseño).
- (7) Determinar el nivel dinámico :

$$N.D. = \text{Prof.} - \frac{P_{wf}}{0.433 \gamma_o}$$

$$\gamma_o = \frac{141.5}{131.5 + \text{ } ^\circ\text{API}} ; \text{ para un aceite de } 35 \text{ } ^\circ\text{API} :$$

$$\gamma_o = \frac{141.5}{131.5 + 35} = 0.8498$$

$$N.D. = 8000 - \frac{2150}{0.433 (0.8498)} = 2157 \text{ pie}$$

- (8) Unir el punto del Nivel Dinámico con la P_{wf} a 8000 pie mediante una línea recta, la cual al intersectar el gradiente de presión del gas de inyección de diseño se determina el punto de inyección (4650 pie, ver Fig. 7.VR) y el gradiente de presión fluente abajo del punto de inyección.
- (9) Para determinar el gradiente de presión fluente arriba -

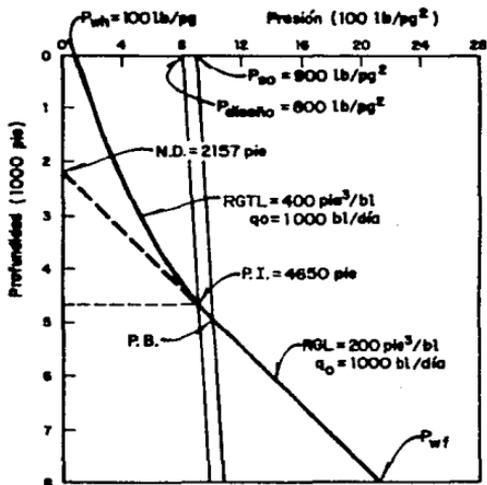


Fig. 7. *SR* Determinación gráfica del punto de inyección de gas en una instalación de bombeo neumático continuo.

del punto de inyección y la relación gas - líquido correspondiente se emplea el método siguiente :

- (9.1) Localizar en la Fig. 7.VR la Pwh = 100 lb/pg².
- (9.2) Deslizar la hoja transparente sobre la curva de -- gradiente de presión seleccionada de tal manera que la Pwh quede en el punto (0,0) de la curva de gradiente de P seleccionada. Previamente se determinó el punto de inyección.
- (9.3) La curva de gradiente de presión correspondiente a una RGL que se encuentre lo más cercano posible al punto de inyección determinado (la de mayor RGL o que intersecte exactamente al punto de inyección) será tomada para trazar el gradiente de presión -- fluyente arriba del punto de inyección, determinando :

$$RGL = 400 \text{ pie}^3/\text{bl} ;$$

$$\text{Profundidad del Punto de Inyección} = 4650 \text{ pie}$$

$$Pwf \text{ a P.I.} = 920 \text{ lb/pg}^2$$

Volumen de gas de inyección necesario :

$$V_{gi} = (RGL - R_s) q_o = (400 - 200) 1000$$

$$V_{gi} = 200000 \text{ pie}^3/\text{día}$$

Diámetro del orificio de la válvula operante :

La temperatura al Punto de Inyección de 4650 pie - es :

$$T_{P.I.} = T_{sup.} + \left(\frac{8000 - T_{sup.}}{\text{Prof.}} \right) \times \text{Prof. P.I.} =$$

$$= 100 + \frac{170 - 100}{8000} (4650) = 140.69 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Corregir V_{gi} por temperatura y por γ_g .

$$F_c = 0.0544 \sqrt{\gamma_{gT}} = 0.0544 \sqrt{0.7 \times (140.69 + 460)} =$$

$$= 1.116$$

$$\text{V}_{gic} = 1.116 \times 200000 = 223200 \text{ pie}^3/\text{día}$$

De la Fig. 7.VR se obtiene :

$$P_1 = \text{presión corriente arriba} = \\ \text{presión del punto de balance} = 1030 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_2 = \text{presión corriente abajo} = \\ \text{presión del punto de inyección} = 930 \text{ lb/pg}^2$$

De la Fig. 2.26 con $g = 0.7$, $T = 140.69$ °F se -
obtiene :

$$K = 1.25$$

Empleando la ec. 2.53A :

$$CA = \frac{223200}{155500(1030) \left\{ \frac{64.34 \times 1.25}{0.7(140.69+460)(1.25-1)} \left[\left(\frac{930}{1030} \right)^{2/1.25} - \left(\frac{930}{1030} \right)^{2.25/1.25} \right] \right\}^{0.5}}$$

$$CA = 0.0121586$$

El diámetro del orificio se obtiene con la ec. -
2.53 B :

$$dc = 1.75105 + 932.334 \times 0.01215 - 29372.7(0.01215)^2 + \\ 397972 (0.01215)^3 - 1510615 (0.01215)^4$$

$$dc = 9.427$$

por lo tanto :

$$dc = \frac{10}{64} \text{ pg}$$

8. Determinar el gasto de aceite que es posible obtener de un pozo con B.N. continuo para un volumen de gas de inyección ilimitado bajo las características siguientes :

Profundidad del intervalo medio productor = 9000 pie
 Diámetro de la tubería de producción = 2 7/8 pg.
 Diámetro de la tubería de revestimiento = 7 pg.
 Índice de productividad = 4 bl/día/lb/pg² (constante)
 Densidad relativa del gas = 0.7 (aire = 1.0)
 Presión en la cabeza del pozo = 120 lb/pg²
 Presión de fondo estática = 2500 lb/pg²
 Presión superficial de operación = 950 lb/pg²
 Relación gas - aceite de formación = 200 pie³/bl
 Producción = 100% aceite
 Temperatura superficial = 120 °F
 Temperatura de fondo = 220 °F

Solución :

- 1.- Realizar una gráfica de profundidad vs. presión en una hoja de papel transparente a la misma escala de las curvas -- de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería -- vertical, de 0 - 9000 pie y de 0 - 4000 lb/pg².
(Fig. 8A.VR)
- 2.- Localizar en la superficie : Pso = 950 lb/pg² y Pwh = 120 lb/pg².
- 3.- Calcular y graficar el gradiente del gas de inyección, De la Fig. 2.3 con Pso = 950 lb/pg² y Yg = 0.7 se obtiene :

$$\Delta P_{\text{gráf.}} = 25 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$$

$$\bar{T}_{\text{gráf.}} = \frac{170 + (1.6 \times 9000/100)}{2} = 157 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\Delta P_{\text{corr.}} = 25 \times \frac{(157 + 460)}{\left[\left(\frac{120 + 220}{2} \right) + 460 \right]} = 24.48 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$$

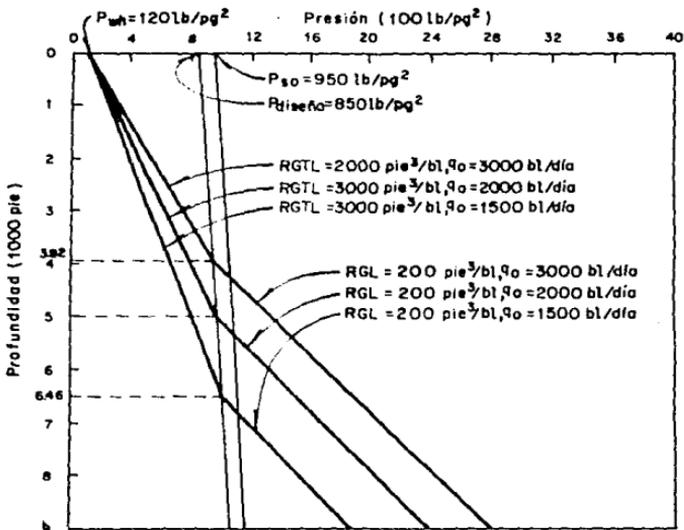


Fig 8 A.VR Determinación del punto de inyección de gas para – un pozo con bombeo neumático continuo considerando un volumen de gas ilimitado (gasto variable).

$$\Delta P_{\text{corr.}} = 24.48 \times 9 = 220.32 \text{ lb/pg}^2$$

Entonces la presión del gas de inyección a 9000 pie es :

$$P_{\text{so}} + \Delta P_{\text{corr.}} = 950 + 220.32 = 1170.32 \text{ lb/pg}^2$$

Con la P_{so} y la presión del gas de inyección a 9000 pie se traza el gradiente del gas de inyección, mediante una línea recta (Fig. 8A.VR)

Determinar el punto de inyección del gas para diferente gastos supuestos.

- 4.- Tanto a la P_{so} como a la presión del gas de inyección a -- 9000 pie se le restan 100 lb/pg^2 y se traza con una línea -- recta el gradiente de diseño correspondiente. (Fig. 8A.VR)
- 5.- Suponer gastos de aceite (1500, 2000 y 3000 bl/día) para de finir el gradiente de presión fluente arriba del punto de inyección, considerando con la relación gas total - líquido la curva de gradiente de presión mínimo para cada gasto. Colocar la hoja transparente sobre la curva de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical para cada gasto supuesto, de tal forma que la P_{wh} quede sobre el cero de la curva de gradiente y trazar el gradiente fluente -- arriba del punto de inyección (para el gradiente de presión mínimo) hasta intersectar el gradiente del gas de diseño, - de esta forma se obtienen los puntos de inyección para cada gasto supuesto.

q_o supuesto, bl/día	RGTL, pie ³ /bl	Prof. del punto de inyección pie.	P_{wf}^* , lb/pg ²	Curva de gra- diente. Fig.
1500	3000	6460	1010	A - 261
2000	3000	5000	975	A - 264
3000	2000	3920	945	A - 270

* en el punto de inyección.

- 6.- Definir el gradiente de presión fluente abajo del punto de inyección.

Suponiendo los mismos gastos, se coloca la hoja transparente (Fig. 8A.VR) sobre la curva de gradiente de presión correspondiente a cada gasto con Pwh sobre el cero, deslizar la hoja hacia arriba hasta hacer coincidir el punto de inyección para ese gasto con la curva de RGA = RGL = 200--- pie³/bl (relación gas - líquido de formación y trazar de este modo el gradiente fluente abajo del punto de inyección.

q_o supuesto, bl/día	Pwf**, lb/pg ²
1500	1860
2000	2370
3000	2780

** a la profundidad del pozo.

- 7.- Elaborar una gráfica de presión vs. gasto, trazando el - comportamiento de afluencia al pozo, así como los datos de la tabla anterior (Fig. 8B.VR)

Para el comportamiento de afluencia al pozo :

$$\text{Si } q_o = 0 \text{ bl/día , } Pwf = Pws = 2500 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Si } q_o = 3000 \text{ bl/día , de la ec. 1.19 :}$$

$$Pwf = 2500 - \frac{3000}{4} = 1750 \text{ lb/pg}^2.$$

Con estos dos puntos :

$$(2500 \text{ lb/pg}^2 , 0 \text{ bl/día) , (1750 lb/pg}^2 , 3000 \text{ bl/día)}$$

trazar el comportamiento de afluencia al pozo, mediante - una línea recta (yacimientos bajosaturados).

De la intersección de éste, con la curva del comportamiento de flujo multifásico vertical, se obtiene el gasto máximo posible para un volumen de gas ilimitado.

$$q_o = 1660 \text{ bl/día}$$

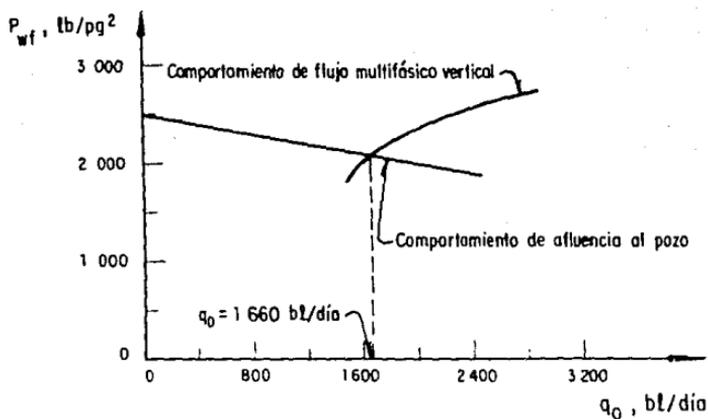


Fig 8 B.5R Determinación del gasto posible de un pozo con bombeo neumático continuo para un volumen de gas ilimitado.

9. Con los datos del problema resuelto 8, determinar el gasto de aceite que es posible obtener de un pozo con B.N. continuo para un volumen de gas de inyección de 500000 pie³/día.

Solución :

- Realizar una gráfica de profundidad vs. presión en una hoja de papel transparente a la misma escala de las curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería -- vertical, de 0 - 9000 pie y 0 - 4000 lb/pg². (Fig. 9A.VR)
- Localizar en la superficie del pozo sobre la grafica, -- P_{so} = 950 lb/pg² y P_{wh} = 120 lb/pg².
- Calcular y graficar el gradiente de presión del gas de inyección.

De la Fig. 2.3 con P_{so} = 950 lb/pg² y $\gamma_g = 0.7$ se obtiene :

$$\Delta P_{\text{gráf.}} = 25 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie} ;$$

$$\bar{T}_{\text{gráf.}} = \frac{170 + (1.6 \times D/100)}{2}$$

$$\bar{T}_{\text{gráf.}} = \frac{170 + (1.6 \times 9000/100)}{2} = 157 \text{ } ^\circ\text{F} ;$$

$$\Delta P_{\text{corr.}} = \Delta P_{\text{gráf.}} \times \frac{\bar{T}_{\text{gráf.}}}{T_{\text{real}}}$$

$$\Delta P_{\text{corr.}} = 25 \times \frac{(157 + 460)}{\left(\frac{120 + 220}{2} \right) + 460} = 24.48 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$$

$$\Delta P_{\text{corr.}} = 24.48 \times 9 = 220.32 \text{ lb/pg}^2.$$

Entonces la presión del gas de inyección a 9000 pie es :

$$P_{\text{so}} + \Delta P_{\text{corr.}} = 950 + 220.32 = 1170.32 \text{ lb/pg}^2$$

Con la P_{so} y la presión del gas de inyección a 9000 pie, -- trazar el gradiente de presión del gas de inyección, median_{te} una línea recta; (Fig. 9A.VR)

- Determinar el punto de inyección del gas para diferentes -- gastos supuestos.

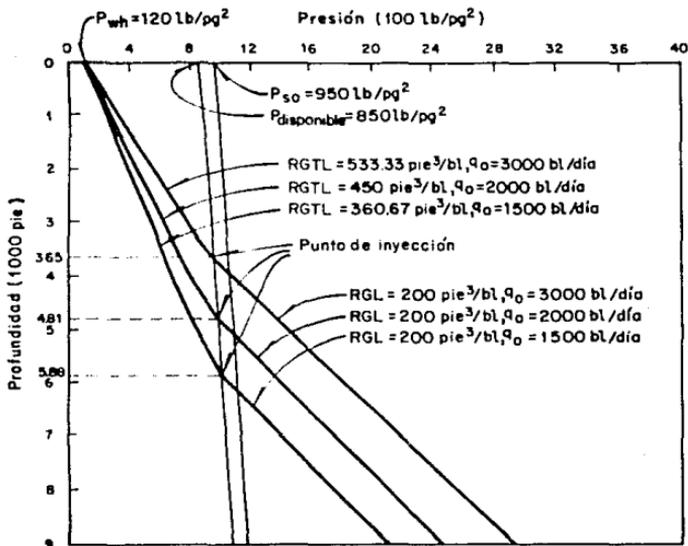


Fig 9 A.VR. Determinación gráfica del punto de inyección de gas para diferentes gastos en un pozo con bombeo neumático continuo para un volumen de gas ilimitado.

Restar 100 lb/pg^2 tanto a P_{50} como a la presión del gas de inyección a 9000 pie; con estos puntos trazar el gradiente de presión de diseño del gas de inyección mediante una línea recta paralela al gradiente del gas de inyección del - paso 3.

- 5.- Suponer gastos de aceite (1500, 2000 y 3000 bl/día) para - definir el gradiente de presión fluyente arriba del punto de inyección, considerando para cada gasto las relaciones gas total - líquido siguientes :

Para $q_o = 1500 \text{ bl/día}$

$$\text{RGIL} = \frac{q_{gi}}{q_o} = \frac{500000}{1500} = 333.33 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

$$\text{RGTL} = R_s + \text{RGIL} = 200 + 333.33 = 533.33 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

Para $q_o = 2000 \text{ bl/día}$

$$\text{RGIL} = \frac{500000}{2000} = 250 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

$$\text{RGTL} = 200 + 250 = 450 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

Para $q_o = 3000 \text{ bl/día}$

$$\text{RGIL} = \frac{500000}{3000} = 166.67 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

$$\text{RGTL} = 200 + 166.67 = 366.67 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

Colocar la hoja transparente (Fig. 9A.VR) sobre la curva - de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería -- vertical para cada gasto supuesto, de tal forma que P_{wh} -- quede sobre el cero de la curva de gradiente y trazar el - gradiente de presión fluyente arriba del punto de inyección para cada RGTL correspondiente (obteniéndose de esta manera los diferentes puntos de inyección para cada gasto supues-- to).

q_o supuesto, bl/día	RGL, pic ³ /bl	Prof. del punto de inyección pie.	Pwf^* , lb/pg ²	Curva de gradiente. Fig.
1500	533.33	5880	1005	A - 261
2000	450.00	4810	975	A - 264
3000	366.67	3650	945	A - 270

* a la profundidad del punto de inyección.

- 6.- Definir el gradiente de presión fluyente abajo del punto de inyección.

Suponiendo los mismos gastos, se coloca la hoja transparente (Fig. 9A.VR) sobre la curva de gradiente de presión correspondiente a cada gasto, con Pwh sobre el cero, deslizar la hoja hacia arriba hasta hacer coincidir el punto de inyección para ese gasto con la curva de $RGA = RGL = 200pic^3/bl$ y para trazar de este modo el gradiente fluyente abajo del punto de inyección.

q_o supuesto, bl/día	Pwf^{**} , lb/pg ²
1500	2070
2000	2440
3000	2905

** a la profundidad del pozo.

- 7.- Elaborar una gráfica de presión vs. gasto, trazando el comportamiento de afluencia al pozo, así como los datos de la tabla anterior (comportamiento de flujo multifásico vertical).

Para trazar el comportamiento de afluencia al pozo :

$$\text{Si } q_o = 0 \text{ bl/día, } Pwf = Pws = 2500 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Si } q_o = 3000 \text{ bl/día, de la ec. 1.19 :}$$

$$Pwf = 2500 - \frac{3000}{4} = 1750 \text{ lb/pg}^2$$

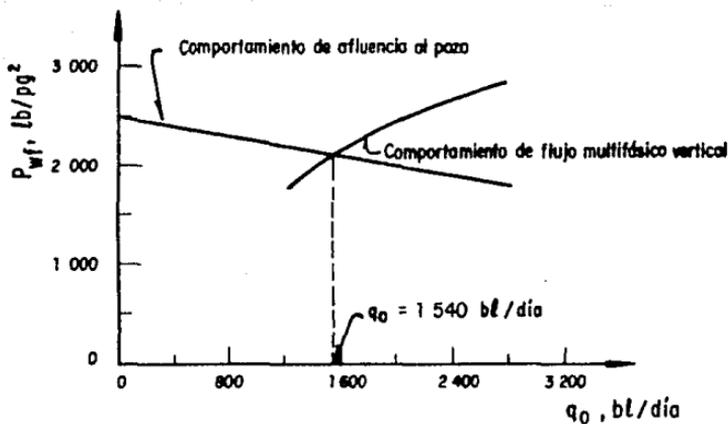


Fig 9B.VR Determinación del gasto posible en un pozo con bombeo neumático continuo considerando un volumen de gas de inyección ilimitado.

Con estos dos puntos : (2500 lb/pg² , 0 bl/día) ,
 (1750 lb/pg² , 3000 bl/día) trazar el comportamiento de --
 afluencia al pozo, mediante una línea recta (yacimiento ba-
 josaturado), ver Fig. 9B.VR.

De la intersección de éste, con la curva del comportamiento
 de flujo multifásico vertical, se obtiene el gasto máximo --
 posible para un volumen de gas de inyección de 500000 --
 pie³/día.

$$q_o = 1540 \text{ bl/día}$$

10. Determinar el espaciamiento de las válvulas balanceadas opera--
 das por presión del gas de inyección de un pozo con B.N. conti-
 nuo, bajo las características siguientes :
- Profundidad media del intervalo productor = 8000 pie
 Presión de fondo estática = 2900 lb/pg²
 Gasto de líquido = 700 bl/día (95% agua)
 Diámetro de tubería de producción = 2 3/8pg. (1.995 pg.d.i)
 Presión en la cabeza del pozo = 100 lb/pg²
 Temperatura superficial fluyente = 150°F
 Temperatura en el fondo del pozo = 210°F
 Presión superficial de operación disponible = 900 lb/pg²
 Presión de arranque = 950 lb/pg²
 Gradiente del fluido de control = 0.50 lb/pg²/pie
 Índice de productividad = 7 bl/día/lb/pg² (constante)
 Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0)
 Densidad del aceite = 40 °API
 El pozo está totalmente lleno de fluido de control y descarga -
 a la presa.

Solución :

- a) Para el cálculo de Pwf :
 de la ec. 1.19 : $Pwf = 2900 - \frac{700}{7} = 2800 \text{ lb/pg}^2$
- b) Para calcular el gradiente estático.
 Empleando la Fig. 2.27 del gradiente estático, con el por--
 centaje de agua salada y densidad del aceite :
 % de agua = 95 , gradiente = 0.46 lb/pg²/pie

$$\frac{P_{ws}}{\text{gradiente}} = \frac{2900}{0.46} = 6304.35 \text{ pie}$$

$$\text{Nivel estático} = 8000 - 6304.35 = 1695.65 \text{ pie.}$$

- c) Para calcular los gradientes de presión del gas de operación y disponible.

Utilizando la Fig. 2.3 para el cálculo del gradiente de la columna del gas, con $g = 0.7$ (aire = 1.0) y $P_{so} = - - -$
 $P_{disp.} - 100 = 800 \text{ lb/pg}^2$:

$$\bar{T} \text{ gráf.} = \frac{170 + (1.6 \times 8000/100)}{2} = 149 \text{ } ^\circ\text{F} = 609 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\bar{T} \text{ real} = \frac{150 + 210}{2} = 180 \text{ } ^\circ\text{F} = 640 \text{ } ^\circ\text{R} ,$$

$$\Delta P \text{ gráf.} = 20.8 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$$

$$\Delta P \text{ corr.} = 20.8 \times \frac{609}{640} = 19.79 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$$

Para trazar la curva del gradiente del gas de inyección de operación y de diseño.

$$P_{vo} = P_{so} + \Delta P_{corr.} = 800 + 19.79 \times 8 = 958.32 \text{ lb/pg}^2$$

Unir los puntos de :

$$P_{so} = 800 \text{ lb/pg}^2 \text{ con } P_{vo} = 958.32 \text{ lb/pg}^2 \text{ y}$$

$$P_{disp.} = 900 \text{ lb/pg}^2 \text{ con } P_{disp.} \text{ a } 8000 \text{ pie} = 958.32 + 100 =$$

$$P_{disp.} = 1058.32 \text{ lb/pg}^2$$

- d) Para trazar la curva del gradiente del fluido del control.

Unir los puntos de :

$$0 \text{ lb/pg}^2 \text{ (por descargar el pozo a la presa) y a } 2000 \text{ pie :}$$

$$\text{presión}_{F.C.} = \text{Grad.}_{F.C.} \times \text{Prof.} = 0.50 \times 2000 = 1000 \text{ lb/pg}^2$$

- e) Determinación del punto de inyección del gas.

Determinando el nivel dinámico :

$$N.D. = \text{Prof.} - \frac{P_{wf}}{\text{gradiente}} = 8000 - \frac{2800}{0.46} = 1913.04 \text{ pie}$$

Unir el punto de N.D. con la $P_{wf} = 2800 \text{ lb/pg}^2$ a 8000 pie.

De la intersección del gradiente de operación del gas de inyección con el gradiente fluyente abajo del punto de inyección, se obtiene el punto de balance a 3825 pie.

f) Restándole 100 lb/pg² al punto de balance se obtiene el punto de inyección a : 3600 pie.

g) Para trazar el gradiente fluyente arriba del punto de inyección se localiza sobre la hoja transparente el punto de la Pwh y el de inyección. Sobre la curva de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical para 10% - aceite, T.P. de 1.995 pg. y q_o = 700 bl/día, Fig. A - 196, deslizando la hoja de tal forma que la Pwh quede en el cero de la curva de gradiente se traza el gradiente correspondiente determinándose una RGTL = 300 pie³/bl. (la curva más - aproximada a P.I.)

h) Volumen de gas de inyección requerido.

$$V_{gi} = (RGTL - R_s) \times q_L$$

donde :

R_s = 130 pie³/bl (sobreponiendo la gráfica en la curva de gradiente empleada con Pwh sobre el cero y observando el valor correspondiente de la RGL abajo del punto de inyección)

$$V_{gi} = (300 - 130) 700 = 119000 \text{ pie}^3/\text{día}$$

i) Diámetro del orificio de la válvula.

P₁ = Presión en el punto de balance = 865 lb/pg²
 P₂ = Presión en el punto de inyección = 765 lb/pg² } de la gráf.

$$T_{P.I.} = 150 + \frac{210 - 150}{8000} \times 3600 = 177^\circ F = 637^\circ R$$

$$\text{Factor de corrección} = 0.0544 \sqrt{\gamma_{gT}} = 0.0544 \sqrt{0.65 \times 637} = 1.1069$$

$$q_{gc} = 119000 \times 1.1069 = 131721 \text{ pie}^3/\text{día}$$

De la Fig. 2.26 con T = 177°F y γ_g = 0.65 : K = 1.257

De la ec. 2.53A :

$$CA = \frac{131721}{155500 \times 865 \left\{ \frac{64.34 \times 1.257}{0.65(177+460)(0.257)} \left[\left(\frac{765}{865} \right)^{2/1.257} - \left(\frac{765}{865} \right)^{2.257/1.257} \right] \right\} 0.5}$$

$$CA = 0.0078644$$

De la ec. 2.53B

$$dc = 1.75105 + 932.334 \times 0.0078644 - 29372.7(0.0078644)^2 + 397972 (0.0078644)^3 - 1510615 (0.0078644)^4$$

$$dc = 7.45$$

$$dc = 8/64 \text{ pg.}$$

En la Fig. 10.VR.se muestra el diseño gráfico para la instalación de B.N. continuo con válvulas balanceadas.

(1) Válvula No.	(2) Profundidad pie	(3) Temperatura °F	(4) Pso lb/pg ²	(5) Pvo = Pvc lb/pg ²	(6) Pd a 60°F lb/pg ²
1	1885	164.15	875	910.93	744.27
2	2925	171.95	850	903.55	728.26
3	3600	177.00	825	886.95	708.68

Nota :

Por seguridad se recomienda colocar 1 ó 2 válvulas abajo de P.I., espaciadas 250 pies. (distancia mínima).

La columna 4 se obtiene disminuyendo en 25 lb/pg² la presión entre válvula y válvula, iniciando para la primera con un valor igual a 25 lb/pg² abajo de la presión disponible del gas de inyección.

La columna 5 se obtiene :

De la Fig. 2.3 con Pso = 875 lb/pg² (primera válvula) y $\gamma_g = 0.65$ se obtiene una $\Delta P_{\text{gráf.}} = 21 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$

$$\bar{P}_{\text{gráf.}} = \frac{170 + 1.6 \times (1885/100)}{2} = 100.08 \text{ } ^\circ\text{F} = 560.08 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\bar{P}_{\text{real}} = \frac{150 + 164.15}{2} = 157.075 \text{ } ^\circ\text{F} = 617.075 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\Delta P_{\text{corr.}} = \frac{21}{1000} \times \frac{560.08}{617.075} \times 1885 = 35.93 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{\text{vo}} = P_{\text{so}} + \Delta P_{\text{corr.}} = 875 + 35.93 = 910.93 \text{ lb/pg}^2$$

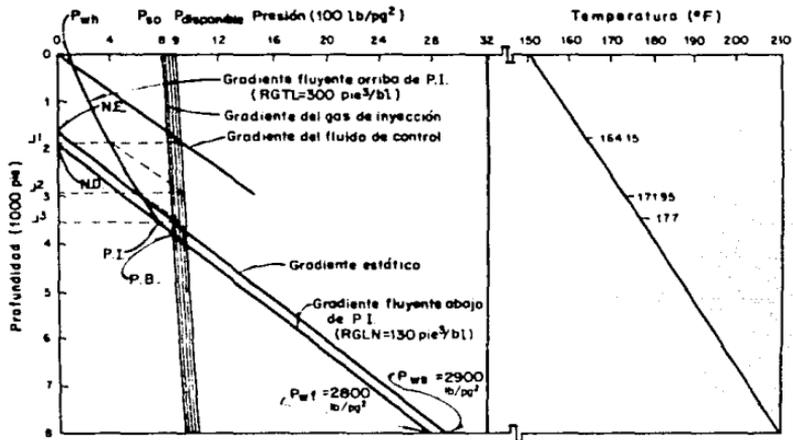


Fig 10.VR. Diseño gráfico de B.N. continuo con valvulas balanceadas.

Porcentaje de agua = 50%

Índice de productividad = 4 bl/día/lb/pg² (constante)

Relación gas-líquido de formación = 200 pie³/bl

Presión superficial de operación = 850 lb/pg²

Presión de fondo estática = 1900 lb/pg²

Presión en la cabeza del pozo = 100 lb/pg²

Temperatura de fondo del pozo = 170 °F

Temperatura superficial = 80 °F

Densidad del aceite = 35 °API

Densidad relativa del gas de inyección = 0.80 (aire = 1.0)

El pozo está cargado con agua salada cuyo gradiente es de 0.468 lb/pg²/pie y descarga al separador.

Solución :

- (1) Calcular presión de fondo fluyendo, Pwf.

De la ec. 1.19 (Yacimiento Bajosaturado)

$$P_{wf} = 1900 - \frac{600}{4} = 1750 \text{ lb/pg}^2$$

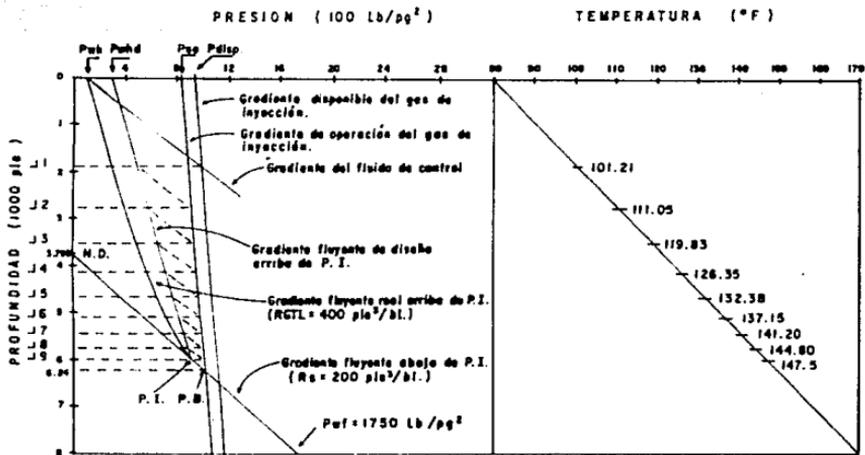
- (2) Calcular el nivel dinámico, N.D.

$$N.D. = \text{Profundidad} - \frac{P_{wf}}{\text{Grad. fluido}}$$

De la Fig. 2.27, con 50% agua y 35 °API, el gradiente del fluido producido es de 0.416 lb/pg²/pie; por lo tanto :

$$N.D. = 8000 - \frac{1750}{0.416} = 3793 \text{ pie}$$

- (3) Elaborar una gráfica de profundidad vs. presión, de 0 a 8000 pie y 0 a 2800 lb/pg² (coordenadas rectangulares) Fig. 11.VR.
- (4) Sobre la gráfica anterior, localizar el N.D. y la Pwf. Uniendo estos dos puntos mediante una línea recta se obtiene el gradiente natural (RGLN)
- (5) Calcular los gradientes de la presión de operación y disponible del gas de inyección, utilizando la Fig. 2.3 para el cálculo del gradiente de la columna de gas .



$$\bar{T}_{\text{gráf.}} = \frac{170 + \left[\frac{1.6 \times 8000}{100} \right]}{2} = 149 \text{ }^{\circ}\text{F} = 609 \text{ }^{\circ}\text{R}$$

Con $P_{so} = 850 \text{ lb/pg}^2$ y $\gamma_g = 0.80$ se tiene :

$$\Delta P_{\text{gráf.}} = 25 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$$

$$\bar{T}_{\text{real}} = \frac{80 + 170}{2} = 125 \text{ }^{\circ}\text{F} = 585 \text{ }^{\circ}\text{R}$$

$$\Delta P_{\text{corr.}} = 25 \times \frac{609}{585} = 26.025 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{vo} = P_{so} + \Delta P_{\text{corr.}} \times \text{Prof.} = 850 + 26.025 \times 8 = 1058.2 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{\text{disp. a Prof. pozo}} = 1058.2 + 100 = 1158.2 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Unir los puntos } P_{so} \text{ y } P_{\text{disp.}} = 850 + 100 = 950 \text{ lb/pg}^2$$

$P_{\text{disp. a Prof. pozo}}$ respectivamente mediante líneas rectas, obteniendo de esta forma los gradientes de la presión de operación y disponible.

- (6) De la intersección del gradiente de presión de operación - con el gradiente de presión natural, se obtiene el punto de balance a 6240 pie.
- (7) Restar 100 lb/pg^2 a partir del punto de balance, determinando el punto de inyección a 6000 pie.
- (8) Para trazar el gradiente fluyente arriba del punto de inyección; localizar la $P_{wh} = 100 \text{ lb/pg}^2$ sobre la gráfica y emplear el procedimiento de la hoja transparente, situando la P_{wh} en el cero de la curva de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical, Fig. A-242 - - - ($\phi_{T.P.} = 2.441 \text{ pg. d.i.}$, $q_L = 600 \text{ bl/día}$, 50% aceite). De aquí se obtiene una RGTL de $400 \text{ pie}^3/\text{bl}$ y se traza el gradiente fluyente arriba de P.I.
- (9) Al valor de $P_{wh} = 100 \text{ lb/pg}^2$ se le adicionan 200 lb/pg^2 y - este punto se une al P.I., obteniendo la curva de presión - en T.P. de diseño.
- (10) Con el dato del gradiente de presión del fluido de control $0.468 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$ a diferentes profundidades, se obtiene el gradiente del fluido de control hasta intersectar a la presión disponible, donde se localiza la 1a. válvula, ver Fig. 11.VR.

Unir los puntos :

0 pie , Pwh = 100 lb/pg² y 2000 pie,

P_{F.C.} = 100 + 0.468 x 2000 = 1036 lb/pg²

Ver diseño gráfico para el espaciamento de las válvulas -
subsecuentes.

- (11) Con la temperatura en la boca del pozo y la de fondo se --
traza el gradiente de temperatura fluyente obteniendo la
temperatura de cada válvula. (Columna 3, Tabla 11.1).
- (12) Donde se interseca la horizontal de cada válvula con los
gradientes de T.P. de diseño y fluyendo real se obtienen -
las presiones correspondientes (columnas 4 y 5).
- (13) La presión superficial de apertura (Pso) de la 1a. válvula
se obtiene restando 50 lb/pg² a la presión disponible, las
válvulas subsecuentes se dejan a una diferencia de - - -
10 lb/pg² entre una y otra. (Columna 6).
- (14) Para determinar la presión de apertura (Pvo) de cada válvula
a la profundidad correspondiente.

Pvo = Pso + Pcolumna de gas de inyección)

donde :

Pcolumna de gas de inyección se obtiene de la Fig. 2.3.

Válvula	Pso + Pcolumna gas	Pvo, lb/pg ²
1	900 + 27.6	927.6
2	890 + 27.3	917.3
3	880 + 27.0	907.0
4	870 + 26.7	896.7
5	860 + 26.4	886.4
6	850 + 26.0	876.0
7	840 + 25.8	865.8
8	830 + 25.5	855.5
9	820 + 25.2	845.2

Estos valores se anotan en la columna 7.

- (15) Calcular el volumen de gas inyectado.

$$V_{gi} = (RGTL - R_s) q_L = (400-200)600 = 120000 \text{ pie}^3/\text{día}$$

Calcular el factor de corrección.

$$F_c = 0.0544 \sqrt{\gamma_{gT}} = 0.0544 \sqrt{0.8 \times (147.5 + 460)} =$$

$$F_c = 1.19927$$

Calcular el volumen de gas inyectado corregido.

$$V_{gic} = F_c \times V_{gi} = 1.19927 \times 120000 = 143912 \text{ pie}^3/\text{día}$$

Calcular la relación de calores específicos, K.

A partir de la Fig. 2.26, con $T = 147.5^\circ\text{F}$ y $\gamma_g = 0.8$

se obtiene : $K = 1.2405$

De la Fig. 11.V.R :

$$P_1, \text{ presión corriente arriba} = 991.62 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_2, \text{ presión corriente abajo} = 891.62 \text{ lb/pg}^2$$

Calcular el diámetro del asiento de la válvula operante.

De la ec. 2.53A :

$$CA = \frac{143912}{155500 \times 991.62 \left\{ \frac{64.34 \times 1.2405}{0.8(147.5+460)(0.2405)} - \left[\frac{(891.62)}{(991.62)} \right]^{2/1.2405} \right\} - \left[\frac{(891.62)}{(991.62)} \right]^{2.2405/1.2405} \right\}^{0.5} = 0.0086155$$

De la ec. 2.53B :

$$dc = 1.75105 + 932.334 (0.0086155) - 29372.7 (0.0086155)^2 + 397972 (0.0086155)^3 - 1510615 (0.0086155)^4 = 8/64$$

Con este diámetro se deberá consultar los catálogos del fabricante.

Se selecciona una válvula CAMCO AK con $A_b = 0.3109 \text{ pg}^2$ y $A_p = 0.0511 \text{ pg}^2$ para un orificio de 1/4 pg (más cercano).

- (16) Para calcular la presión del domo a la temperatura de la válvula que es igual a la presión de cierre (Pvc) frente a la válvula, se utiliza la siguiente ecuación :

$$P_d = P_{vc} \left(1 - \frac{A_p}{A_b} \right) + P_t \left(\frac{A_p}{A_b} \right)$$

$$\frac{A_p}{A_b} = \frac{0.0511}{0.3109} = 0.164, \quad 1 - \frac{A_p}{A_b} = 1 - 0.164 = 0.836$$

De la sustitución de Pvo de diseño (columna 7) y Pt diseño (columna 4) se obtiene Pd a T.V. (columna 8)

- (17) Para obtener la presión superficial de cierre, Psc, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{sc} = P_{vc} - P \text{ columna de gas}$$

$$P_{sc} = P_d \text{ a T.V.} - P \text{ columna de gas}$$

Para P columna de gas (ver inciso 14)

Los valores de Psc se anotan en la columna 9.

- (18) Utilizando el factor de corrección por temperatura a 60 °F obtener la presión en el domo a 60 °F

$$C_t = \frac{1}{1 + 0.00215 (T.V. - 60)}$$

Pd a 60 °F = Ct x Pd a T.V., columna 10.

- (19) Para calcular la presión de apertura en el taller, Ptro:

$$P_{tro} = \frac{P_d \text{ a } 60 \text{ } ^\circ\text{F}}{1 - R}, \text{ columna 11}$$

- (20) Para determinar la presión de apertura de cada válvula a la profundidad correspondiente, utilizando la presión en T.P. fluyendo real:

$$P_{vo} \text{ real} = \frac{P_d \text{ a T.V.} - P_t \text{ real} \times R}{1 - R}, \text{ columna 12}$$

- (21) Para determinar la presión superficial de apertura de cada válvula bajo condiciones reales de operación:

$$P_{so} \text{ real} = P_{vo} \text{ real} - P \text{ columna gas, columna 13.}$$

TABLA 11. R

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
VALVULA	PROP.	TEMP.	Pt	Pt	Pso	Pvo	Pd	Psc	Pd	Pteo	Pvo	Pso
	pie	OF	dise.	real	DISEÑO	DISEÑO	a T.V.		n 60°F	REAL	REAL	Real
1	1885	101.21	494.30	297.20	900	927.6	856.54	828.94	786.82	941.17	966.27	938.67
2	2760	111.05	578.77	391.06	890	917.3	861.78	834.48	776.55	928.88	954.12	926.82
3	3540	119.83	650.72	484.91	880	907.0	864.97	837.97	766.39	916.73	939.53	912.53
4	4120	126.35	713.29	563.12	870	896.7	866.62	839.92	758.43	907.21	926.16	899.46
5	4656	132.38	766.48	641.34	860	886.4	866.73	840.33	750.02	897.15	910.95	884.55
6	5080	137.15	813.40	719.55	850	876.0	865.73	839.73	742.56	888.23	894.41	868.41
7	5440	141.20	844.69	782.12	840	865.8	862.33	836.54	734.17	878.19	878.07	852.27
8	5760	144.8	875.97	844.69	830	855.5	858.85	833.36	726.42	868.92	861.64	836.14
9	6000	147.5	891.62	891.62	820	845.2	852.81	827.61	717.78	858.59	845.2	820.0

• presiones en lb/pg²

12. Determinar el gasto máximo de producción de un pozo con B.N. con tino para un volumen de gas ilimitado, considerando la presión en la cabeza variable; con la información siguiente :
- Profundidad del pozo = 7000 pie
 Longitud de la tubería de descarga = 3000 pie
 Diámetro de la tubería de producción = 2 7/8 pg.
 Diámetro de la tubería de descarga = 3 pg.
 Presión de fondo estática = 2600 lb/pg²
 Presión superficial de operación = 900 lb/pg²
 Presión de separación = 80 lb/pg²
 Índice de productividad = 5 bl/día/lb/pg² (constante)
 Relación gas-aceite de formación = 400 pie³/bl
 Relación gas-líquido de formación = 200 pie³/bl
 Producción de agua = 0%
 Densidad del aceite = 35 °API
 Densidad relativa del gas = 0.70 (aire = 1.0)
 Relación gas-líquido total = variable
 Presión en la cabeza del pozo = variable
 Temperatura superficial = 90 °F
 Temperatura de fondo del pozo = 185 °F

Solución :

- 1.- Elaborar una gráfica en coordenadas rectangulares de profundidad vs. presión, a la misma escala de las curvas de gradiente de presión en tubería vertical.
- 2.- Localizar la presión superficial de operación, P_{so} = 900 lb/pg²
- 3.- Calcular la presión del gas de inyección a la profundidad - del pozo.

Con P_{so} = 900 lb/pg² y Y_g = 0.70 , de la Fig. 2.3. se obtiene :

$$\Delta P \text{ gráf.} = 23.75 \text{ lb/pg}^2 / 1000 \text{ pie}$$

$$\bar{T} \text{ gráf.} = \frac{170 + 1.6 \times 7000/100}{2} = 141 \text{ } ^\circ\text{F} = 601 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\bar{T} \text{ real} = \frac{90 + 185}{2} = 137.5 \text{ } ^\circ\text{F} = 597.5 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\Delta P \text{ corr.} = 23.75 \times \frac{601}{597.5} = 23.89 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie}$$

$$P_{vo} = P_{so} + P \text{ columna gas}$$

$$P_{vo} = 900 + 23.89 \times 7 = 1067.23 \text{ lb/pg}^2$$

Trazar una línea recta que una la $P_{so} = 900 \text{ lb/pg}^2$ en la su superficie y la $P_{vo} = 1067.23 \text{ lb/pg}^2$ a 7000 pie.

- 4.- Restar 100 lb/pg^2 a la P_{so} y trazar una línea paralela al - gradiente de presión de operación del gas.
- 5.- Suponer gastos de producción de : 1000 , 1500 y 2000 bl/día.
- 6.- Seleccionar las curvas de gradiente adecuadas para cada gag to de producción.
- 7.- Suponer relaciones gas-líquido para cada gasto de : 400 , 600 , 800 , 1000 y 1500 pie³/bl
- 8.- Para cada gasto supuesto, determinar la presión de fondo -- fluyendo requerida a partir del índice de productividad del pozo, ec. 1.19 (yacimientos bajosaturados).

q_o bl/día	P_{wf} lb/pg ²
1000	2400
1500	2300
2000	2200

- 9.- Determinar el nivel dinámico, N.D., para cada gasto :

$$N.D. = \text{Profundidad} - \frac{P_{wf}}{0.433 \gamma_o}$$

$$\gamma_o = \frac{141.5}{131.5 + 35} = 0.8498$$

q_o bl/día	P_{wf} lb/pg ²	N.D. pie
1000	2400	477.6
1500	2300	749.4
2000	2200	1021.1

- 10.- A partir de las curvas de gradiente de presión de flujo - multifásico en tubería vertical, determinar la presión en la cabeza del pozo permisible, para cada gasto considerando las relaciones gas-líquido establecidas.

Procedimiento :

- a) Trazar mediante una línea recta el gradiente de presión de flujo natural del nivel dinámico a la presión de fondo fluyendo.
- b) Trazar el gradiente de presión del gas de diseño y de operación. De la intersección del gradiente de presión de operación del gas con el gradiente de presión de flujo natural, se obtiene el punto de balance. Restando 100 lb/pg^2 a dicho punto, se obtiene el punto de inyección del gas, sobre el gradiente de presión de flujo natural.

q_o , bl/día	1000	1500	2000
P.I., pie	2865	3170	3385

- c) Empleando la curva de gradiente de presión de flujo - multifásico en tubería vertical para cada gasto supuesto y bajo las condiciones dadas (relaciones gas-líquido supuestas). Trazar los gradientes de presión - arriba del punto de inyección, determinando de esta manera las presiones en la cabeza del pozo permisible para cada relación gas-líquido supuesta. El procedimiento anterior se sigue para los demás gastos supuestos, debiendo realizar una gráfica por cada uno, ver Figs. 12A.VR, 12B.VR y 12C.VR. (1000 , 1500 y 2000 bl/día respectivamente).
- 11.- A partir de curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería horizontal, determinar la presión en la cabeza del pozo (corriente abajo) requerida para cada gasto considerado y las relaciones gas-líquido establecidas.
- Procedimiento :

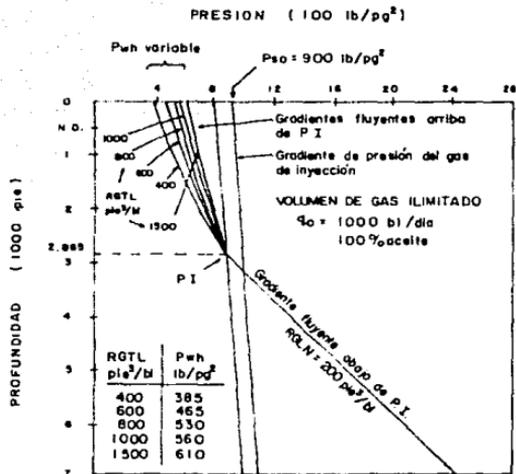


Fig. 12A, VR. Diagrama de presión vs. profundidad para determinar el gasto máximo de producción, P_{wh} variable, en un pozo con B.N. continuo.

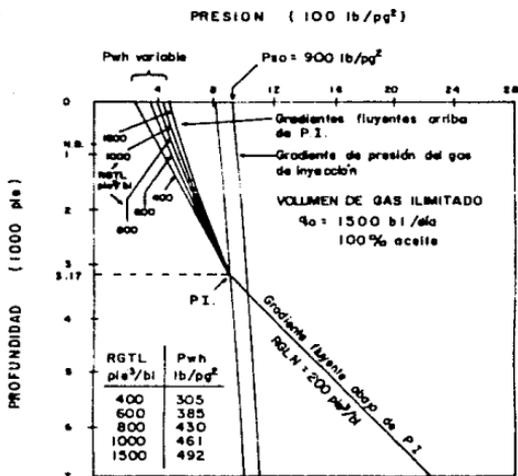


Fig. 12 B, V.R. Diagrama de presión vs. profundidad para determinar el gasto máximo de producción, P_{wh} variable, en un pozo con B. N. continuo.

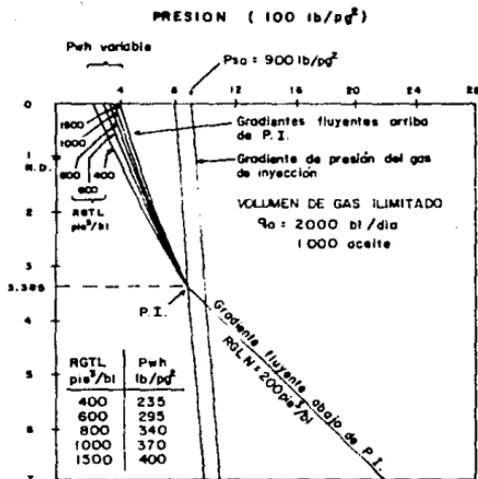


Fig. 12C, V.R. Diagrama de presión vs. profundidad para determinar el gasto máximo de producción, Pwh variable, en un pozo con B. N. continuo.

- a) Elaborar una gráfica en coordenadas rectangulares de - profundidad vs. presión, a la misma escala de las curvas de gradiente de presión seleccionadas.
- b) Para las diferentes relaciones gas-líquido, por cada - gasto considerado, trazar el comportamiento de presión en la tubería de descarga y determinar las presiones - en la cabeza del pozo requeridas, empleando las curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería horizontal para cada gasto y bajo las condiciones dadas.
- Utilizar el procedimiento anterior para los demás gastos supuestos, realizando una gráfica por cada uno, -- ver Figs. 12D.VR, 12E.VR y 12F.VR.
- 12.- Elaborar una tabla de las presiones en la cabeza del pozo, permisible y requerida, obtenidas en los pasos 10 y 11 -- respectivamente ver Tabla 12.VR.

TABLA 12.VR

q_o bl/día	RGL pic ³ /bl	Pwh permisible lb/pg ²	Pwh requerida lb/pg ²
1000	400	385	160
	600	465	190
	800	530	200
	1000	560	225
	1500	610	270
1500	400	305	210
	600	385	240
	800	430	265
	1000	461	290
	1500	492	360
2000	400	235	255
	600	295	305
	800	340	345
	1000	370	375
	1500	400	455

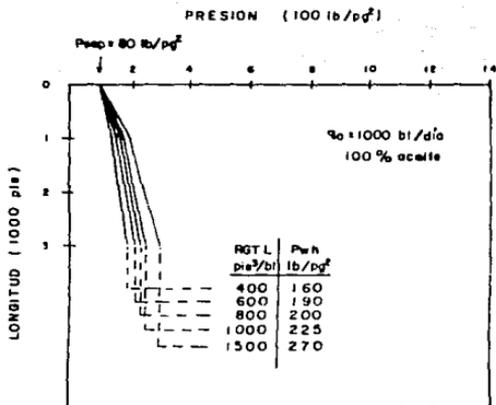


Fig. 12D, V.R. Diagrama presión vs. longitud de tubería de descarga para determinar el gasto máximo de producción, P_{wh} variable, en un pozo con B.N. continuo.

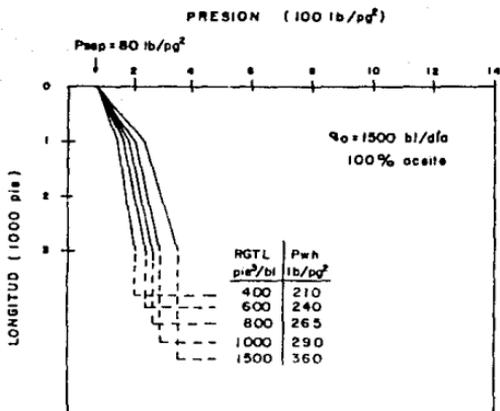


Fig. 12E, I.R. Diagrama presión vs. longitud de tubería de descarga para determinar el gasto máximo de producción, P_{wh} variable, en un pozo con B.N. continuo.

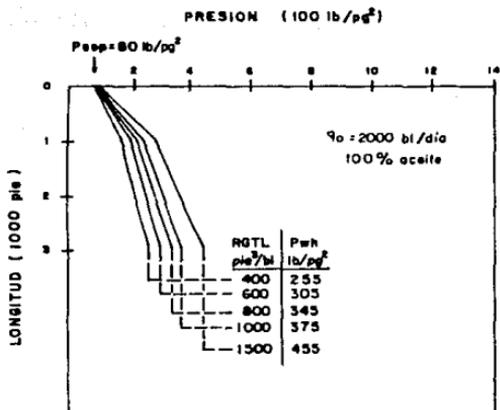


Fig. 12F, IRR Diagrama presión vs. longitud de tubería de descarga para determinar el gasto máximo de producción, P_{wh} variable, en un pozo con B.N. continuo.

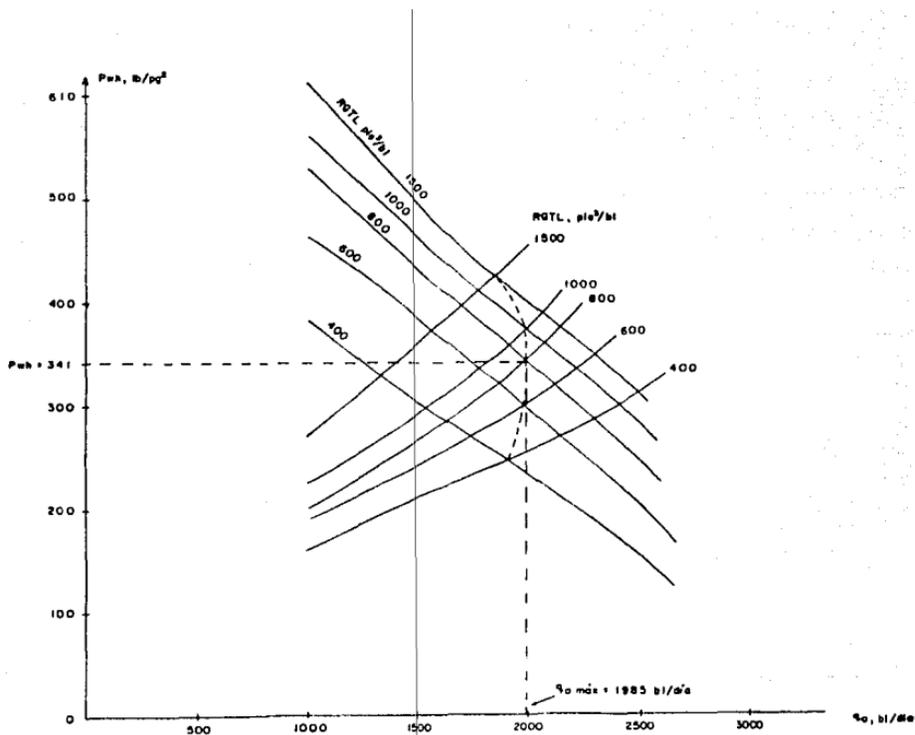


Fig. 12.6. ∇ R PREDICION DEL MAXIMO GASTO DE PRODUCCION CON P_{wh} VARIABLE, PARA UN POZO CON B.N. CONTINUO.

13.- Con los valores mostrados en la Tabla 12.VR, realizar un diagrama de presión en la cabeza del pozo vs. gasto, ver Fig. 12G.VR. El gasto máximo posible se obtiene uniendo todos los puntos de igual relación gas total - líquido y determinando el punto más lejano a la derecha de la curva que une dichos puntos. Este punto corresponde al gasto -- máximo posible, obteniendo directamente de la gráfica, -- los valores de presión en la cabeza del pozo y la relación gas total - líquido correspondientes a dicho gasto.

Q_o máx. posible = 1985 bl/día

$P_{wh} = 341 \text{ lb/pg}^2$

$RGL = 800 \text{ pie}^3/\text{bl}$

13. Determinar el espaciamiento y presiones requeridas de diseño de válvulas desbalanceadas cargadas con nitrógeno a 60°F , operadas por presión del gas de inyección para una instalación de B.N.I. con control cíclico de tiempo en superficie, en un pozo con las características siguientes :

Diámetro exterior de T.P. = $2 \frac{3}{8}$ pg.

Diámetro exterior de T.R. = $5 \frac{1}{2}$ pg.

Profundidad del empacador = 7000 pie.

Presión en la cabeza del pozo = 60 lb/pg^2

Presión de fondo estática = 1200 lb/pg^2

Presión superficie de operación = 800 lb/pg^2

Gasto de producción requerido = 80 bl/día (100% aceite)

Presión de fondo fluyendo = 500 lb/pg^2

Temperatura superficial = 80°F

Temperatura a 7000 pie de profundidad = 160°F

Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0)

Gradiente de presión del fluido de control = $0.45 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$

Utilizar el procedimiento gráfico.

Solución :

- (1) Preparar en una gráfica con escalas de presión vs. profundidad como se muestra en la Fig. 13.V.R.

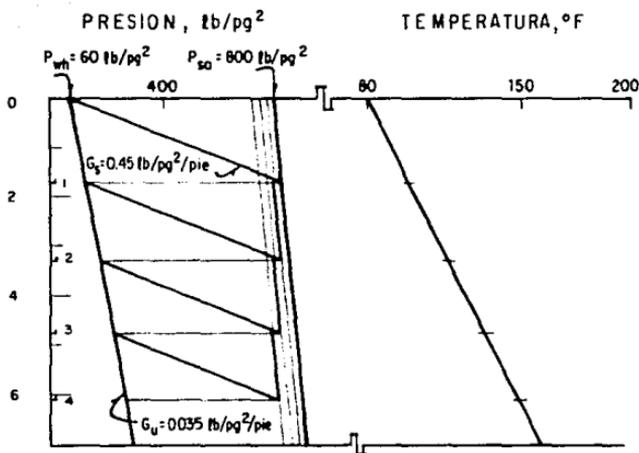


Fig 13. V R Diseño gráfico para válvulas desbalanceadas operadas por presión, considerando una diferencia de 25 lb/pg² en las presiones de operación en superficie de cada válvula.

- (2) Marcar $P_{so} = 800 \text{ lb/pg}^2$ en la superficie. A partir de este punto y con el gradiente de presión del gas de inyección -- trazar una línea hasta la profundidad de 7000 pie. De la Fig. 2.3 con P_{so} y $\gamma_g = 0.65$ se obtiene un gradiente de -- presión de $18.5 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie}$, sin corrección por temperatura. Por lo tanto :

$$\frac{18.5}{1000} \times 7000 + 800 = 929.5 \text{ lb/pg}^2$$

- (3) Marcar $P_{wh} = 60 \text{ lb/pg}^2$ en la superficie.
 (4) Estimar el gasto máximo para este pozo utilizando el método de Vogel.

De la Fig. 1.17 con $\frac{P_{wf}}{P_{ws}} = \frac{500}{1200} = 0.416$ se obtiene :

$$\frac{q_o}{q_{o \text{ máx.}}} = 0.78 \text{ entonces } q_{o \text{ máx.}} = \frac{80}{0.78} = 102.5 \text{ bl/día}$$

- (5) De la Fig. 2.31 B con $q_{o \text{ máx.}} = 102.5 \text{ bl/día}$ y T.P. de 2 pg. d.i. se obtiene un gradiente de presión de descarga de $0.035 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$. A partir de $P_{wh} = 60 \text{ lb/pg}^2$ trazar una línea para el gradiente de presión de descarga hasta la profundidad de 7000 pie :

$$0.035 \times 7000 + 60 = 305 \text{ lb/pg}^2$$

- (6) A partir de $P_{wh} = 60 \text{ lb/pg}^2$ trazar la línea del gradiente de presión del fluido de control hasta intersectar la línea de la presión de operación en superficie, $P_{so} = 800 \text{ lb/pg}^2$:

$$0.45 \times 1000 + 60 = 510 \text{ lb/pg}^2$$

Este punto de intersección determina la profundidad de colocación de la primera válvula, 1715 pie con una presión de -- apertura de fondo:

$$P_{vo} = 832 \text{ lb/pg}^2$$

- (7) Partiendo de la $P_{so} = 800 \text{ lb/pg}^2$ tomar diferencias de -- 25 lb/pg^2 para la presión de operación en superficie, obteniéndose valores de 775, 750 y 725 lb/pg^2 . Con estos valores y $\gamma_g = 0.65$ y con la Fig. 2.3 se obtienen los gradientes de presión del gas de : 18.2, 17.5 y $17 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie}$

respectivamente sin considerar corrección por temperatura; -
por lo tanto para trazar las líneas correspondientes hasta -
7000 pie de profundidad :

$$18.2 \times 7 + 775 = 902.4 \text{ lb/pg}^2$$

$$17.5 \times 7 + 750 = 872.5 \text{ lb/pg}^2$$

$$17.0 \times 7 + 725 = 844.0 \text{ lb/pg}^2$$

- (8) Partiendo del punto de intersección generado en el paso (6) trazar una línea horizontal hacia la izquierda hasta intersectar la línea del gradiente de presión de descarga de - - 0.035 lb/pg².
- (9) A partir del punto obtenido en el paso (8) trazar una línea hacia abajo, paralela a la línea del gradiente de presión del fluido de control, hasta que intersecte la línea de - - Pso = 775 lb/pg². El punto de intersección determina la profundidad de colocación de la segunda válvula a 3300 pie.
- (10) Repitiendo el procedimiento se obtiene una profundidad de colocación para la válvula 3 a 4765 pie., y la válvula 4 a - 6105 pie.
- (11) Determinar el volumen de gas necesario para un ciclo de bombeo. De la ec. 2.15 para Pso = 725 lb/pg² la presión de apertura de la válvula a 6105 pie será :

$$Pvo = 725 \left(1 + \frac{0.25 \times 6105}{10000} \right) = 836 \text{ lb/pg}^2$$

Por lo tanto de la Fig. 2.34 con Pvo = 836 lb/pg² y

D = 6105 pie; el volumen de gas requerido es 4625 pie³/ciclo

- (12) Determinar la caída de presión necesaria en la T.R. para suministrar 4625 pie³ de gas. Por lo tanto de la Fig. 2.36 con :

$$\frac{4625}{6.105} = 757.6 \text{ pie}^3/1000 \text{ pie} \text{ y T.P. de 2 pg. d.i. se obtiene :}$$

$$60 \text{ lb/pg}^2$$

- (13) Determinar la carga en la T.P. que será bombeada por ciclo, utilizando la expresión $P_t = \frac{1}{2} P_{ws}$:

$$P_t = \frac{1}{2} \times 1200 = 600 \text{ lb/pg}^2$$

- (14) Seleccionar el diámetro del asiento de la válvula operante para un control de tiempo en la superficie. Como una aproximación considerar la mitad de la diferencia de presión - de 60 lb/pg^2 para la válvula operante; es decir, la válvula tendrá una amplitud de $60/2 = 30 \text{ lb/pg}^2$ asegurando que el control del gas será desde la superficie. Para un control por estrangulador en superficie ΔP será 60 lb/pg^2 . Entonces la presión de cierre a la profundidad de la válvula será :

$$P_{vc} = 836 - 30 = 806 \text{ lb/pg}^2, \text{ por lo tanto :}$$

$$R = \frac{P_{vo} - P_{vc}}{P_{vo} - P_t}$$

$$R = \frac{836 - 806}{836 - 600} = 0.12711$$

De la Tabla 2.8 (o Fig. 2.37) con $R = 0.12711$ corresponde a una válvula de $1 \frac{1}{2} \text{ pg.}$ y $A_D = 0.77 \text{ pg}^2$ con diámetro de asiento entre $5/16$ y $3/8 \text{ pg.}$ Entonces se selecciona el asiento de control de $5/16 \text{ pg.}$ Seleccionar un diámetro mayor para el asiento principal ($1/2, 5/8$ o $3/4 \text{ pg.}$), para este caso se usa $5/8 \text{ pg.}$

El asiento de $5/16 \text{ pg.}$ tiene un valor de $R = 0.0996$, por lo cual la presión de cierre correcta a la profundidad de la válvula será :

$$P_d = P_{vc} = P_{vo} (1 - R) + P_t R = 836(1 - 0.0996) + 600 \times 0.0996$$

$$P_{vc} = 812.5 \text{ lb/pg}^2$$

y la amplitud correcta será : $836 - 812.5 = 23.5 \text{ lb/pg}^2$

- (15) Seleccionar los asientos del resto de las válvulas.

Debido a que las dos válvulas superiores se usarán solo para la descarga del pozo, usar asientos de $5/16 \text{ pg.}$ Para la válvula 3 aplicar los mismos valores determinados a la válvula operante.

- (16) Construir el gradiente de temperatura y determinar la temperatura de cada válvula a la profundidad de colocación. Resumiendo, se obtiene la Tabla 13.R, explicando cada columna como sigue :

- (1) Número de válvula.
- (2) Profundidad de colocación de cada válvula (Fig. 13.VR)
- (3) Temperatura a la profundidad de cada válvula - - - (Fig. 13.V.R)
- (4) Presión superficial de apertura, Pso (dato).
- (5) Presión de apertura a la profundidad de la válvula, Pvo (Fig. 13.V.R).
- (6) Presión en T.P. frente a cada válvula, de la Fig.V.1 con la línea de gradiente de presión de descarga para las válvulas 1, 2 y 3.
Para la válvula 4 $P_t = 600 \text{ lb/pg}^2$ (paso 13).
- (7) Diámetro del asiento de control o piloto (pasos 14 y 15)
- (8) Diámetro del asiento principal (pasos 14 y 15).
- (9) Presión de cierre a la profundidad de la válvula, - Pvc :
 $P_d \text{ a T.V.} = P_{vc} = P_{vo} (1 - R) + P_t R$
- (10) Presión superficial de cierre, Psc :
 $P_{sc} = P_{vc} - \text{peso de la columna de gas (de los pasos 2 y 7).}$
- (11) Factor de corrección por temperatura, C_t (Tabla 2.1)
- (12) Presión del domo de la válvula a 60°F :
 $P_d \text{ a } 60^\circ \text{F} = P_d \text{ a T.V.} \times C_t$
- (13) Presión de apertura en el taller :
 $P_{tro} = \frac{P_d \text{ a } 60^\circ \text{F}}{1 - R}$

TABLA 13.R

(1) No. de vál.	(2) Prof. de vál., pie	(3) Temp. de vál., °F	(4) Pso lb/pg ²	(5) Pvo lb/pg ²	(6) Pt lb/pg ²	(7) Asiento piloto, pg.	(8) Asiento princi- pal, -- pg.	(9) Pd = Pvc lb/pg ²	(10) Psc lb/pg ²	(11) Ct adim.	(12) Pd a 60°F lb/pg ²	(13) Ptro a 60°F lb/pg ²
1	1715	99	800	832	121	5/16	5/16	761.2	729.4	0.923	702.5	780
2	3300	118	775	833	178	5/16	5/16	767.7	707.6	0.889	682.4	758
3	4765	134	750	834	228	5/16	5/8	773.6	690.2	0.863	667.6	742
4	6105	149	725	836	600	5/16	5/8	812.5	703.3	0.839	681.6	757

NOTA :

Válvulas de 1 1/2 pg. d.e.

Ab = 0.77 pg²

R = 0.0996

1 - R = 0.9004

14. Utilizando el procedimiento analítico resolver el problema resuelto 13.

Solución :

- (1) Estimar el gasto máximo para este pozo utilizando el método de Vogel.

De la Fig. 1.17 $\frac{P_{wf}}{P_{ws}} = \frac{1500}{1200} = 0.416$ se obtiene :

$$\frac{q_o}{q_{o\text{máx.}}} = 0.78, \text{ entonces } q_{o\text{máx.}} = \frac{80}{0.78} = 102.5 \text{ bl/día}$$

- (2) De la Fig. 2.31B con $q_{o\text{máx.}} = 102.5 \text{ bl/día}$ y T.P. de 2 pg. d.i. se obtiene un gradiente de presión de descarga de $0.035 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$.
- (3) Establecer una diferencia de 25 lb/pg^2 entre las presiones de operación en superficie para cada válvula.
- (4) Ajustar las válvulas para una presión de apertura en superficie de 800, 775, 750, 725 y 700 lb/pg^2 , estas presiones son también las de apertura de fondo para determinar las profundidades de colocación de las válvulas, despreciando el peso de la columna de gas.
- (5) Determinar la profundidad de colocación de la válvula 1, suponiendo que el pozo está cargado hasta la superficie con fluido de control :

$$Dv_1 = \frac{P_{so} - P_{wh}}{G_s} = \frac{800 - 60}{0.45} = 1644 \text{ pie}$$

- (6) Para la válvula 2 se tiene :

$$Dv_2 = Dv_1 + \frac{P_{vo_1} - P_{wh} - G_u \times Dv_1}{G_s}$$

$$Dv_2 = 1644 + \frac{800 - 60 - 0.035 \times 1644}{0.45} = 3161 \text{ pie}$$

- (7) Para la válvula 3 se tiene :

$$Dv_3 = Dv_2 + \frac{P_{vo_2} - P_{wh} - G_u \times Dv_2}{G_s}$$

$$Dv_3 = 3161 + \frac{775 - 60 - 0.035 \times 3161}{0.45} = 4504 \text{ pie}$$

- (8) Para la válvula 4 se tiene :

$$Dv_4 = 4504 + \frac{750 - 60 - 0.035 \times 4504}{0.45} = 5687 \text{ pie}$$

- (9) Para la válvula 5 se tiene :

$$Dv_5 = 5687 + \frac{725 - 60 - 0.035 \times 5687}{0.45} = 6722 \text{ pie}$$

- (10) Determinar la temperatura a la profundidad de colocación - de cada válvula :

$$\text{Temperatura superficial} = 80 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\text{Temperatura a 7000 pie de profundidad} = 160 \text{ } ^\circ\text{F}$$

entonces :

$$\text{Gradiente de temperatura} = \frac{160 - 80}{7000} = 0.011428 \text{ } ^\circ\text{F/pie}$$

por lo tanto :

$$Tv_1 = 0.011428 \times 1644 + 80 = 99 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Tv_2 = 0.011428 \times 3161 + 80 = 116 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Tv_3 = 0.011428 \times 4504 + 80 = 131 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Tv_4 = 0.011428 \times 5687 + 80 = 145 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Tv_5 = 0.011428 \times 6722 + 80 = 157 \text{ } ^\circ\text{F}$$

- (11) Determinar el volumen de gas necesario para un ciclo de - bombeo.

Para una $P_{so} = 700 \text{ lb/pg}^2$ la P_{vo} a 6722 pie es :

$$P_{vo} = 700 \left(1 + \frac{0.25 \times 6722}{10000} \right) = 818 \text{ lb/pg}^2$$

Por lo tanto de la Fig. 2.34 con $P_{vo} = 818 \text{ lb/pg}^2$ y $d = 6722 \text{ pie}$ el volumen de gas requerido es $5065 \text{ pie}^3/\text{ciclo}$

- (12) Determinar la caída de presión necesaria en la T.R. para - suministrar $5065 \text{ pie}^3/\text{ciclo}$ de gas. De la Fig. 2.36 con :

$$\frac{5065}{6.722} = 753.5 \text{ pie}^3/1000 \text{ pie y T.P. de 2 pg. d.l. se obtiene } 58 \text{ lb/pg}^2.$$

- (13) Determinar la carga en la T.P. que será bombeada por ciclo

$$P_t = \frac{1}{2} \times 1200 = 600 \text{ lb/pg}^2$$

- (14) Seleccionar el diámetro del asiento de la válvula operante para un control de tiempo en la superficie. Como una aproximación considerar la mitad de la diferencia de presión de 58 lb/pg² para la válvula operante, es decir, la válvula tendrá una amplitud de $58/2 = 29 \text{ lb/pg}^2$ asegurando que el control del gas será desde la superficie.

Entonces la presión de cierre a la profundidad de la válvula será :

$$P_{vc} = 818 - 29 = 789 \text{ lb/pg}^2$$

por lo tanto :

$$R = \frac{P_{vo} - P_{vc}}{P_{vo} - P_t}$$

$$R = \frac{818 - 789}{818 - 600} = 0.13302$$

De la Tabla 2.8 (o Fig. 2.37) con $R = 0.13302$ corresponde a una válvula de 1 1/2 pg. d.e. y $A_b = 0.77 \text{ pg}^2$ con diámetro de asiento entre 5/16 y 3/8 pg. Entonces se selecciona el asiento de control de 5/16 pg. Seleccionar un diámetro mayor para el asiento principal (1/2, 5/8 ó 3/4 pg.), para este caso se usa 5/8 pg.

El asiento de 5/16 pg. tiene un valor de $R = 0.0996$, por lo cual la presión de cierre correcta a la profundidad de la válvula será :

$$P_d = P_{vc} = P_{vo} (1 - R) + P_t R$$

$$= 818 (1 - 0.0996) + 600 \times 0.0996$$

$$P_{vc} = 796.3 \text{ lb/pg}^2$$

y la amplitud correcta será : $818 - 796.3 = 21.7 \text{ lb/pg}^2$.

- (15) Seleccionar los asientos del resto de las válvulas.

De las cinco válvulas determinadas, las tres superiores se usarán para la descarga del pozo con un asiento de 5/16 pg. Para la válvula 4 aplicar los mismos valores determinados a la válvula operante.

Resumiendo, se obtiene la Tabla 14.R, explicando cada columna a continuación :

- (1) Número de válvula.
- (2) Profundidad de colocación de cada válvula, (pasos 5 al 9).
- (3) Temperatura a la profundidad de cada válvula, (paso 10).
- (4) Presión superficial de apertura, Pso (dato)
- (5) Presión de apertura a la profundidad de la válvula - Pvo, considerando el peso de la columna de gas :
De la Fig. 2.3 con la Pso de cada válvula y $\gamma_g = 0.65$ se obtienen los gradientes de presión del gas de inyección en lb/pg²/1000 pie :
$$\begin{aligned} Pso_1 = 800 \text{ lb/pg}^2 & : Pvo_1 = 800 + 18.5 \times 1.644 = \\ & = 830 \text{ lb/pg}^2 \\ Pso_2 = 775 \text{ lb/pg}^2 & : Pvo_2 = 775 + 18.2 \times 3.161 = \\ & = 833 \text{ lb/pg}^2 \\ Pso_3 = 750 \text{ lb/pg}^2 & : Pvo_3 = 750 + 17.6 \times 4.504 = \\ & = 829 \text{ lb/pg}^2 \\ Pso_4 = 725 \text{ lb/pg}^2 & : Pvo_4 = 725 + 17.0 \times 5.687 = \\ & = 822 \text{ lb/pg}^2 \\ Pso_5 = 700 \text{ lb/pg}^2 & : Pvo_5 = 700 + 16.5 \times 6.722 = \\ & = 811 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$
- (6) Presión en T.P. frente a cada válvula, calculada con el gradiente de presión de descarga elegido :
$$Pt_i = 0.035 \times D_i + Pwh, \quad i = 1 \text{ a } 4$$
- (7) Diámetro del asiento de control o piloto, (pasos 14 y 15).
- (8) Diámetro del asiento principal, (pasos 14 y 15).
- (9) Presión de cierre a la profundidad de la válvula, Pvc:

$$Pd \text{ a T.V.} = Pvc = Pvo (1 - R) + Pt R$$

- (10) Presión superficial de cierre, Psc :

$$Psc = Pvc - \text{peso de la columna de gas (Fig. 2.3 o - columna 5)}$$

- (11) Factor de corrección por temperatura, C_t (Tabla 2.1)

- (12) Presión del domo de la válvula a 60 °F :

$$Pd \text{ a } 60 \text{ } ^\circ\text{F} = Pd \text{ a T.V.} \times C_t$$

- (13) Presión de apertura en el taller :

$$Ptro = \frac{Pd \text{ a } 60 \text{ } ^\circ\text{F}}{1 - R}$$

15. Determinar el espaciamiento y presiones requeridas de diseño de válvulas desbalanceadas cargadas con nitrógeno a 60 °F, operadas por presión del gas de inyección para una instalación de B.N.I. con control por estrangulador en la superficie, en un pozo con las características siguientes :

Diámetro exterior de T.P. = 2 3/8 pg.

Diámetro exterior de T.R. = 7 pg.

Profundidad del empacador = 8000 pie.

Presión en la cabeza del pozo = 50 lb/pg².

Presión de fondo estática = 1360 lb/pg².

Presión superficial de operación = 900 lb/pg².

Gasto máximo estimado = 150 blo/día.

Temperatura superficial = 100 °F

Temperatura a 8000pie de profundidad = 180 °F

Densidad relativa del gas de inyección = 0.7 (aire = 1.0)

Gradiente de presión de fluido de control = 0.4 lb/pg²/pie.

Solución :

- (1) Preparar en una gráfica las escalas de presión vs. profundidad como se muestra en la Fig. 15. V. R.
- (2) Marcar Pso = 900 lb/pg² en la superficie. A partir de este punto y con el gradiente de presión del gas de inyección --

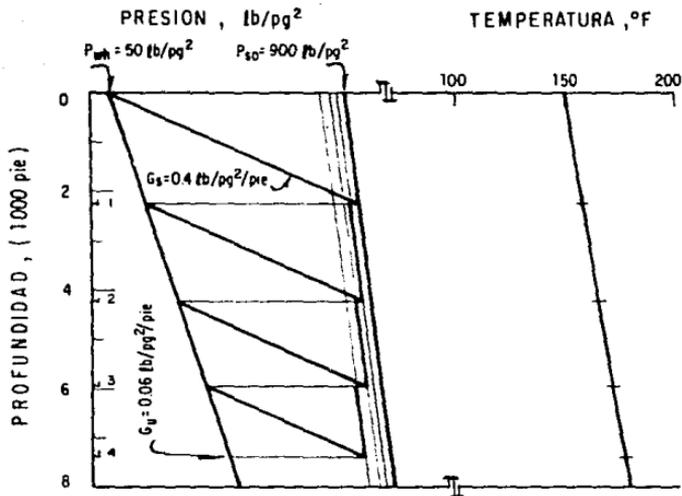


Fig 15. *VR* Diseño gráfico para válvulas desbalanceadas operadas por presión, considerando una diferencia de 25 lb/pg^2 en las presiones de operación de cada válvula.

TABLA 14.R

(1) No. de vál.	(2) Prof. de vál., pie	(3) Temp. de vál., °F	(4) Pso lb/pg ²	(5) Pvo lb/pg ²	(6) Pt lb/pg ²	(7) Asiento piloto, pg.	(8) Asiento princi- pal, -- pg.	(9) Pd = Pvc lb/pg ²	(10) Psc lb/pg ²	(11) Ct adim.	(12) Pd a 60°F lb/pg ²	(13) Ptro a 60°F lb/pg ²
1	1644	99	800	830	118	5/16	5/16	759.1	728.7	0.923	700.6	778
2	3161	116	775	833	171	5/16	5/16	767.1	709.5	0.893	685.0	761
3	4504	131	750	829	218	5/16	5/16	768.1	688.8	0.868	666.7	741
4	5687	145	725	822	259	5/16	5/8	765.9	669.2	0.845	647.1	719
5	6722	157	700	811	750	5/16	5/8	804.9	693.9	0.827	665.6	739

NOTA :

R = 0.0996

1 - R = 0.9004

trazar una línea hasta la profundidad de 8000 pie. De la -
Fig. 2.3 con P_{so} y $\gamma_g = 0.7$ se obtiene un gradiente de pre
sión de $23.5 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie}$.

Por lo tanto :

$$\frac{23.5}{1000} \times 8000 + 900 = 1088 \text{ lb/pg}^2$$

- (3) Marcar $P_{wh} = 50 \text{ lb/pg}^2$ en la superficie.
- (4) De la Fig. 2.31 B con $q_o = 150 \text{ bl/día}$ y T.P. de 2 pg. d.i. se obtiene un gradiente de presión de descarga de $0.06 - - \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$. A partir de $P_{wh} = 50 \text{ lb/pg}^2$ trazar una línea - para el gradiente de presión de descarga hasta la profundi- dad de 8000 pie :
- $$0.06 \times 8000 + 50 = 530 \text{ lb/pg}^2$$
- (5) A partir de $P_{wh} = 50 \text{ lb/pg}^2$ trazar la línea del gradiente de presión del fluido de control hasta intersectar la línea de la presión de operación en superficie, $P_{so} = 900 \text{ lb/pg}^2$:
- $$0.4 \times 1000 + 50 = 450 \text{ lb/pg}^2$$
- Este punto de intersección determina la profundidad de colo- cación de la primera válvula, 2260 pie con una presión de -- apertura de fondo de 952 lb/pg^2 .
- (6) Partiendo de la $P_{so} = 900 \text{ lb/pg}^2$ tomar diferencias de - - 25 lb/pg^2 para la presión de operación en superficie, obte- niéndose valores de 875, 850, 825 y 800 lb/pg^2 . Con estos - valores y $\gamma_g = .7$ y con la Fig. 2.3 se obtienen los gradien- tes de presión del gas de inyección respectivos : 23.2, 23, 21.6 y $21 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie}$, sin considerar correcciones per - temperatura; por lo tanto para trazar las líneas correspon- dientes hasta 8000 pie de profundidad :

$$23.2 \times 8 + 875 = 1060.6 \text{ lb/pg}^2$$

$$23.0 \times 8 + 850 = 1034.0 \text{ lb/pg}^2$$

$$21.6 \times 8 + 825 = 997.8 \text{ lb/pg}^2$$

$$21.0 \times 8 + 800 = 968.0 \text{ lb/pg}^2$$

- (7) Partiendo del punto de intersección generado en el paso - (5) trazar una línea horizontal hacia la izquierda hasta intersectar la línea del gradiente de presión de descarga de $0.06 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$.
- (8) A partir del punto obtenido en el paso (8) trazar una línea hacia abajo, paralela a la línea del gradiente de presión del fluido de control, hasta que intersecte la línea de $P_{50} = 875 \text{ lb/pg}^2$. El punto de intersección determina la profundidad de colocación de la segunda válvula a - - 4250 pie.
- (9) Repitiendo el procedimiento se obtiene una profundidad de colocación para la válvula 3 a 5970 pie y la válvula 4 a 7400 pie.
- (10) Determinar el volumen de gas necesario para un ciclo de bombeo. De la ec. 2.15 para $P_{50} = 825 \text{ lb/pg}^2$ la presión de apertura de la válvula a 7400 pie será :

$$P_{v0} = 825 \left(1 + \frac{0.25 \times 7400}{10000} \right) = 978 \text{ lb/pg}^2$$

Por lo tanto de la Fig. 2.34 con $P_{v0} = 978 \text{ lb/pg}^2$ y $d = 7400 \text{ pie}$ el volumen de gas requerido es $6265 \text{ pie}^3/\text{ciclo}$

- (11) Determinar la caída de presión necesaria en la T.R. para suministrar 6265 pie^3 de gas. Por lo tanto de la Fig. - 2.36 con :

$$\frac{6265}{7.400} = 846.6 \text{ pie}^3/1000 \text{ pie y T.P. de 2 pg. d.i. se obtiene : } 66 \text{ lb/pg}^2.$$

- (12) Determinar la carga en la T.P. que será bombeada por ciclo utilizando la expresión $P_t = \frac{1}{2} P_{v0}$

$$P_t = \frac{1}{2} \times 1360 = 680 \text{ lb/pg}^2$$

- (13) Un control por estrangulador requiere una válvula que tenga una amplitud igual a 66 lb/pg^2 correspondientes al cambio de presión en la T.R. necesaria para suministrar ---

6265 pie³ de gas. Por lo tanto :
 La presión de cierre respectiva es :
 $Pvc = 978 - 66 = 912 \text{ lb/pg}^2$

- (14) Seleccionar el diámetro del asiento de la válvula operante
 Utilizando la ecuación :

$$R = \frac{Pvo - Pvc}{Pvo - Pt}$$

$$R = \frac{978 - 912}{978 - 680} = 0.2214$$

De la tabla 2.8 con $R = 0.2214$ corresponde una válvula de 1 pg. d.e. y $Ab = 0.29 \text{ pg}^2$ con diámetro de asiento de control o piloto entre 9/32 y 5/16 pg. Entonces se selecciona el asiento de 9/32 pg. y el asiento principal de 5/8 pg.

El asiento de 9/32 pg. tiene un valor de $R = 0.1942$ por lo cual la presión de cierre correcta a la profundidad de la válvula será :

$$\begin{aligned} Pd = Pvc &= Pvo (1 - R) + PtR \\ &= 978 (1 - 0.1942) + 680 \times 0.1942 \\ Pvc &= 920 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$

y la amplitud correcta será : $978 - 920 = 58 \text{ lb/pg}^2$

- (15) Seleccionar los asientos del resto de las válvulas.

De las cuatro válvulas determinadas, las válvulas 1 y 2 - se usarán para la descarga del pozo, entonces los asientos serán de 9/32 pg. Para la válvula 3 aplicar los mismos valores determinados a la válvula operante.

- (16) Construir la línea del gradiente de temperatura y determinar la temperatura de cada válvula.

Resumiendo se obtiene la Tabla 15.R, explicando cada columna como sigue :

(1) Número de válvula.

(2) Profundidad de colocación de cada válvula (Fig. 15.-V.R.).

- (3) Temperatura a la profundidad de cada válvula (Fig. - 15.V.R).
- (4) Presión superficial de apertura, Pso (dato).
- (5) Presión de apertura a la profundidad de la válvula, Pvo (Fig. 15.V.R).
- (6) Presión en T.P. frente a cada válvula, de la Fig. - - 15.V.R con la línea del gradiente de presión de descarga para la válvula 1, 2, y 3.
Para la válvula 4 $P_t = 680 \text{ lb/pg}^2$ (paso 12).
- (7) Diámetro del asiento de control o piloto (pasos 14 y 15).
- (8) Diámetro del asiento principal (pasos 14 y 15)
- (9) Presión de cierre a la profundidad de la válvula, - Pvc :
- $P_d \text{ a T.V.} = P_{vc} = P_{vo} (1 - R) + P_t R$
- (10) Presión superficial de cierre, Psc :
- $P_{sc} = P_{vc} - \text{peso de la columna de gas (de los pasos 2 y 6).}$
- (11) Factor de corrección por temperatura, C_t (Tabla 2.1)
- (12) Presión del domo de la válvula a 60°F :
- $P_d \text{ a } 60^\circ \text{F} = P_d \text{ a T.V.} \times C_t$
- (13) Presión de apertura en el taller :

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

TABLA 15.R

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
No. de vál.	Prof. de vál., pie	Temp. de vál., °F	Pso lb/pg ²	Pvo lb/pg ²	Pt lb/pg ²	Asiento piloto, pg.	Asiento principal, -- pg.	Pd = Pvc lb/pg ²	Psc lb/pg ²	C _t adim.	Pd a 60°F lb/pg ²	Ptro a 60°F lb/pg ²
1	2260	158	900	952	88	9/32	9/32	784.2	731.1	0.826	647.7	804
2	4250	167	875	973	156	9/32	9/32	814.3	715.7	0.813	662.0	822
3	5970	173	850	988	209	9/32	5/8	836.7	699.4	0.805	673.5	836
4	7400	178	825	984	680	9/32	5/8	925.0	765.1	0.798	738.1	916

NOTA :

Válvulas de 1 pg. d.e.

Ab = 0.29 pg²

R = 0.1942

1 - R = 0.8058

TABLA 15.R

(1) No. de vál.	(2) Prof. de vál., pie	(3) Temp. de vál., °F	(4) Pso lb/pg ²	(5) Pvo lb/pg ²	(6) Pt lb/pg ²	(7) Asiento piloto, pg.	(8) Asiento princi- pal, -- pg.	(9) Pd = Pvc lb/pg ²	(10) Psc lb/pg ²	(11) C _t adim.	(12) Pd a 60°F lb/pg ²	(13) Ptro a 60°F lb/pg ²
1	2260	158	900	952	88	9/32	9/32	784.2	731.1	0.826	647.7	804
2	4250	167	875	973	156	9/32	9/32	814.3	715.7	0.813	662.0	822
3	5970	173	850	988	209	9/32	5/8	836.7	699.4	0.805	673.5	836
4	7400	178	825	984	680	9/32	5/8	925.0	765.1	0.798	738.1	916

NOTA :

Válvulas de 1 pg. d.e.

Ab = 0.29 pg²

R = 0.1942

1 - R = 0.8058

16. Determinar el diámetro del asiento de control para una válvula piloto del control superficial por estrangulador y cíclico de tiempo de una instalación de B.N.I. en un pozo con la información siguiente :

Diámetro exterior de T.P. = 2 7/8 pg.

Diámetro exterior de T.R. = 7 pg.

Profundidad de colocación de la válvula = 8000 pie.

Presión de operación superficial = 800 lb/pg².

Presión de diseño en T.P. = 600 lb/pg²

Temperatura a la profundidad de la válvula = 170 °F.

Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0).

Válvula de 1 1/2 pg. d.e.

Area de fuelles = 0.77 pg².

Diámetro del asiento principal = 9/16 pg.

Solución :

- (1) Calcular la presión de apertura de la válvula a la profundidad de 8000 pie :

De la Fig. 2.3 con Pso = 800 lb/pg² y $\gamma_g = 0.65$ se obtiene 18.4 lb/pg²/1000 pie, entonces :

$$P_{vo} = 800 + 18.4 \times 8.000 = 947 \text{ lb/pg}^2$$

- (2) Determinar el volumen de gas requerido por ciclo de bombeo :

De la Fig. 2.34 con Pvo = 947 lb/pg² y D = 8000 pie se obtiene 6400 pie³/ciclo.

- (3) Determinar la caída de presión necesaria en la T.R. para suministrar 6400 pie³ de gas por ciclo :

De la Fig. 2.36 con $\frac{6400}{8.000} = 800 \text{ pie}^3/1000 \text{ pie}$ y T.P. de 2 pg. d.i. se obtiene 60 lb/pg²

- (4) Para control por estrangulador en superficie :

La válvula operante tendrá una amplitud de fondo - - -

$$\Delta P = 60 \text{ lb/pg}^2, \text{ por lo tanto :}$$

$$P_d \text{ a T.V.} = 947 - 60 = 887 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 2.31 :

$$TEF = \frac{\Delta P}{Pd \text{ a T.V.} - P_t}$$

$$TEF = \frac{60}{887 - 600} = 0.20905$$

además :

$$TEF = \frac{R}{1 - R}, \text{ entonces :}$$

$$R = \frac{TEF}{1 + TEF} = \frac{0.20905}{1 + 0.20905}$$

$$R = 0.1729$$

sabiendo que $R = \frac{A_p}{A_b}$, entonces :

$$A_p = 0.1729 \times 0.77 = 0.1331 \text{ pg}^2$$

Suponiendo un asiento de diámetro 3/8 pg. :

$$A_p = 0.11044 \text{ pg}^2$$

y para un asiento de 1/2 pg. : $A_p = 0.19635 \text{ pg}^2$

Comparando los valores de A_p anteriores, se selecciona el -
asiento de control de diámetro 3/8 pg.

Por lo tanto :

$$R = \frac{0.11044}{0.77} = 0.1434$$

$$TEF = \frac{0.1434}{1 - 0.1434} = 0.1674$$

y la amplitud :

$$\Delta P = 0.1674 (887 - 600) = 48 \text{ lb/pg}^2$$

(5) Para un control ciclico de tiempo en superficie :

Suponer un asiento de diámetro 1/4 pg., entonces

$$A_p = 0.04908 \text{ pg}^2$$

$$R = \frac{0.04908}{0.77} = 0.06374$$

$$TEF = \frac{0.06374}{1 - 0.06374} = 0.06808$$

De la ec. 2.22 :

$$Pd \text{ a } 170^\circ F = 947 (1 - 0.06374) + 600 \times 0.06374$$

$$P_d \text{ a } 170^{\circ}\text{F} = 925 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 2.31 :

$$\Delta P = 0.06808 (925 - 600) = 22 \text{ lb/pg}^2$$

Para un control cíclico de tiempo la ΔP debe ser menor o igual a la mitad de la caída de presión necesaria en la -- T.R. para suministrar un volumen de gas determinado; por lo tanto para este caso el diámetro del asiento de control de 1/4 pg. es correcto.

17. Determinar el espaciamiento de las válvulas balanceadas operadas por presión del gas de inyección de un pozo con B.N. continuo, - bajo las características siguientes :

Diámetro de tubería de producción = 2 3/8 pg. (1.995 pg. d.i.)

Diámetro de tubería de revestimiento = 7 pg.

Profundidad del pozo = 8000 pie

Profundidad del empacador = 7950 pie

Presión en la cabeza del pozo = 150 lb/pg²

Presión de arranque = 850 lb/pg²

Presión superficial de operación = 700 lb/pg²

Presión de fondo estática = 2600 lb/pg²

Índice de productividad = 5 bl/día/lb/pg² (constante)

Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0)

Temperatura superficial fluyente = 130 °F

Temperatura de fondo del pozo = 200 °F

Gasto deseado = 1000 bl/día (100% aceite)

Relación gas-aceite de formación = 500 pie³/bl

El pozo se encuentra lleno de fluido de control (gradiente = - 0.55 lb/pg²/pie) y descarga al separador.

Solución :

- a) Para el cálculo de Pwf; de la ec. 1.19 :

$$Pwf = 2600 - \frac{1000}{5} = 2400 \text{ lb/pg}^2$$

- b) Para calcular el gradiente estático.

Empleando la Fig. 2.27 del gradiente estático, con el porcentaje de agua salada (0% agua) y la densidad del aceite - (35 °API), se tiene :

$$\text{gradiente} = 0.368 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\text{N.E.} = 8000 - \frac{2600}{0.368} = 934.78 \text{ pie}$$

$$\text{N.D.} = 8000 - \frac{2400}{0.368} = 1478.26 \text{ pie}$$

- c) Para calcular los gradientes de presión del gas de operación y disponible.

Utilizando la Fig. 2.3 para el cálculo del gradiente de la columna del gas, con $\gamma_g = 0.65$ y $P_{so} = 700 \text{ lb/pg}^2$:

$$\bar{T} \text{ gráf.} = \frac{170 + 1.6 \times 8000/100}{2} = 149 \text{ }^\circ\text{F} = 609 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$\bar{T} \text{ real} = \frac{130 + 200}{2} = 165 \text{ }^\circ\text{F} = 625 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$\Delta P_{\text{gráf.}} = 16.5 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie.}$$

$$\Delta P \text{ corr.} = 16.5 \times \frac{609}{625} = 16.07 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie.}$$

Para trazar la curva del gradiente del gas de inyección de operación y de diseño.

$$P_{vo} = P_{so} + \Delta P \text{ corr.} = 700 + 16.07 \times 8 = 828.56 \text{ lb/pg}^2$$

$$P \text{ disp.} = P_{so} + 100 = 800 \text{ lb/pg}^2.$$

Unir los puntos de P_{so} con P_{vo}

$$\text{y } P \text{ disp. con } P \text{ disp. a } 8000 \text{ pie} = 828.56 + 100 = 928.56 \text{ lb/pg}^2$$

- d) Para trazar la curva del gradiente del fluido de control. Unir los puntos de :

$$P_{wh} = 150 \text{ lb/pg}^2 \text{ (por descargar el pozo al separador) y a } 2000 \text{ pie :}$$

$$\text{presión}_{F.C.} = P_{wh} + \text{grad.}_{F.C.} \times \text{Prof.} = 150 + 0.55 \times 2000 = 1250 \text{ lb/pg}^2$$

- e) Para determinar el punto de inyección del gas de inyección.

Trazar el gradiente de flujo natural, uniendo el N.D. con - la Pwf calculada en el inciso a), mediante una línea recta. De la intersección de éste con el gradiente del gas de inyección de operación se obtiene el punto de balance a - - 3500 pie.

- f) Restándole 100 lb/pg² al punto de balance se obtiene el punto de inyección a 3230 pie.
- g) Para trazar el gradiente fluyente arriba del punto de inyección, se localiza sobre la hoja transparente el punto de la Pwh y P.I. Sobre la curva de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical para T.P. de 1.995 pg., - q_o = 1000 bl/día (100% aceite), Fig. A - 207, deslizar la hoja de tal forma que la Pwh quede en el cero de la curva de gradiente, trazando la curva que interseque o se aproxime a P.I., obteniendo una RGTL = 1000 pie³/bl.
- h) Volumen del gas de inyección requerido.

$$V_{gi} = (RGTL - R_s) \times q_L$$

$$V_{gi} = (1000 - 500) \times 1000 = 500000 \text{ pie}^3/\text{día.}$$

- i) Diámetro del orificio de la válvula

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = \text{presión en P.B.} = 750 \text{ lb/pg}^2 \\ P_2 = \text{presión en P.I.} = 650 \text{ lb/pg}^2 \end{array} \right\} \text{ de la gráfica.}$$

$$T_{P.I.} = 130 + \frac{200 - 130}{8000} \times 3230 = 158 \text{ } ^\circ\text{F} = 618 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\text{Factor de corrección} = 0.0544 \sqrt{0.65 \times 618} = 1.0903$$

$$q_{gc} = 500000 \times 1.0903 = 545150 \text{ pie}^3/\text{día}$$

De la Fig. 2.26 con T = 158 °F y Y_g = 0.65 : K = 1.259

De la ec. 2.53 A :

$$CA = \frac{545150}{155500 \times 750 \left\{ \frac{64.34 \times 1.259}{0.65 (618)(0.259)} \left[\left(\frac{650}{750} \right)^{2/1.259} - \left(\frac{650}{750} \right)^{2.259/1.259} \right] \right\}^{0.5}}$$

$$CA = 0.034847$$

De la ec. 2.53 B :

$$dc = 1.75105 + 932.334 \times 0.034847 - 29372.7 (0.034847)^2 + \\ + 397972 (0.034847)^3 - 1510615 (0.034847)^4 = 13.185 \\ dc = 14/64 \text{ pg.}$$

En la Fig. 17.VR. se muestra el diseño gráfico para la instalación de B.N. continuo con válvulas balanceadas.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Válvula No.	Profundidad pie	Temperatura °F	Pso lb/pg ²	Pvo = Pvc lb/pg ²	Pd a 60°F lb/pg ²
1	1385	142.12	775	798.00	678.25
2	2280	149.95	750	787.03	659.49
3	2880	155.20	725	768.44	637.88
* 4	3230	158.26	700	749.14	618.48

- Por seguridad se recomienda instalar 1 ó 2 válvulas -- (espaciadas 250 pie).

La columna 4 se obtiene disminuyendo en 25 lb/pg² la presión entre válvula y válvula, iniciando para la primera - con un valor igual a 25 lb/pg² abajo de la presión disponible del gas de inyección.

La columna 5 se obtiene :

De la Fig. 2.3 con Pso = 775 lb/pg² (primera válvula), - y Yg = 0.65 se obtiene una ΔP gráf. = 17.8 lb/pg²/- - 1000 pie.

$$\bar{T} \text{ gráf.} = \frac{170 + 1.6 \times (1385/100)}{2} = 96.08^{\circ}\text{F} = 556.08^{\circ}\text{R}$$

$$\bar{T} \text{ real} = \frac{130 + 142.12}{2} = 136.06^{\circ}\text{F} = 596.06^{\circ}\text{R}$$

$$\Delta P \text{ corr.} = \frac{17.8}{1000} \times \frac{556.08}{596.06} \times 1385 = 23.0 \text{ lb/pg}^2$$

$$Pvo = Pso + \Delta P \text{ corr.} = 775 + 23.0 = 798.0 \text{ lb/pg}^2$$

Para la segunda válvula :

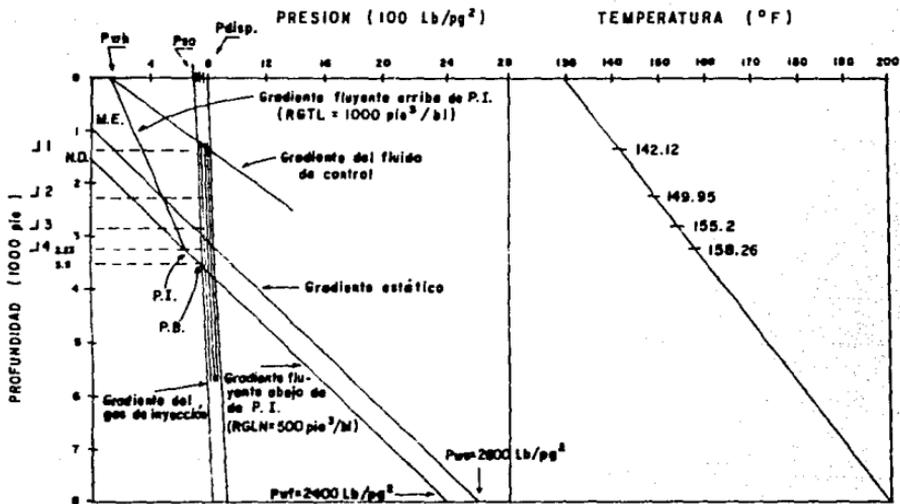


Fig. 17. SR. Diseño gráfico de B.N. confase con válvulas balanceadas.

$$\Delta P \text{ gráf.} = 17.3 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie}$$

$$T \text{ gráf.} = 103.24 \text{ }^\circ\text{F} = 563.24 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$T \text{ real} = 139.98 \text{ }^\circ\text{F} = 599.98 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$\Delta P \text{ corr.} = 37.03 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{vo} = 787.03 \text{ lb/pg}^2$$

Para la tercera válvula :

$$\Delta P \text{ gráf.} = 16.7 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie}$$

$$T \text{ gráf.} = 108.04 \text{ }^\circ\text{F} = 568.04 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$T \text{ real} = 142.6 \text{ }^\circ\text{F} = 602.6 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$\Delta P \text{ corr.} = 45.34 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{vo} = 770.34 \text{ lb/pg}^2$$

Para la cuarta válvula :

$$\Delta P \text{ gráf.} = 16.1 \text{ lb/pg}^2$$

$$T \text{ gráf.} = 110.84 \text{ }^\circ\text{F} = 570.84 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$T \text{ real} = 144.13 \text{ }^\circ\text{F} = 604.13 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$\Delta P \text{ corr.} = 49.14$$

$$P_{vo} = 749.14 \text{ lb/pg}^2$$

La columna 6 se obtiene :

De la ec. de C_t para domo cargado con Nitrógeno a $60 \text{ }^\circ\text{F}$ y

a $T = 142.12 \text{ }^\circ\text{F}$ (primera válvula) :

$$C_t = 0.8499368$$

$$C_t = \frac{Pd \text{ a } 60 \text{ }^\circ\text{F}}{P_{vo} \text{ a } T.V.} \quad (\text{Válvulas balanceadas})$$

$$Pd \text{ a } 60 \text{ }^\circ\text{F} = P_{vo} \text{ a } T.V. \times C_t = 798 \times 0.8499368 = 678.251 \text{ lb/pg}^2$$

Para la segunda válvula :

$$C_t = 0.8379473$$

$$Pd \text{ a } 60 \text{ }^\circ\text{F} = 659.49 \text{ lb/pg}^2$$

Para la tercer válvula :

$$C_t = 0.830096$$

$$P_d \text{ a } 60^\circ\text{F} = 637.88 \text{ lb/pg}^2$$

Para la cuarta válvula :

$$C_t = 0.8255873$$

$$P_d \text{ a } 60^\circ\text{F} = 618.48 \text{ lb/pg}^2$$

18. Determinar el espaciamiento de válvulas desbalanceadas operadas por presión del gas de inyección para un pozo con B.N. continuo con la información siguiente :

Diámetro de tubería de producción = 2 3/8 pg. d.e. (2 pg. d.i.)

Densidad relativa del gas de inyección = 0.75 (aire = 1.0)

Gradiente del fluido de control = 0.44 lb/pg²/pie

Relación gas-aceite de formación = 650 pic³/bl

Gasto de producción deseado = 1000 bl/día (100% aceite de - - 35 °API)

Profundidad media del intervalo productor = 8000 pie

Presión de fondo estática = 2250 lb/pg²

Índice de productividad = 3.5 bl/día/lb/pg² (constante)

Presión en cabeza del pozo = 150 lb/pg²

Presión superficial de operación = 900 lb/pg²

Temperatura superficial = 100 °F

Temperatura a 8000 pie de profundidad = 210 °F

El pozo esta completamente lleno de fluido de control y descarga al separador.

Solución :

- (1) Calcular la presión de fondo fluyendo, Pwf :

De la ec. 1.19 (yacimientos bajosaturados) :

$$P_{wf} = 2250 - \frac{1000}{3.5} = 1964 \text{ lb/pg}^2$$

- (2) Calcular la profundidad del nivel dinámico, N.D. :

De la Tabla 3.1 la densidad relativa del aceite de 35 °API es 0.8498, entonces :

$$N.D. = 8000 - \frac{1964}{0.8498 \times 0.433} = 2663 \text{ pie}$$

- (3) Elaborar una gráfica de presión 0 a 2350 lb/pg² contra profundidad 0 a 8000 pie en coordenadas rectangulares, ver -- Fig. 18.VR.
- (4) Localizar el N.D. y Pwf ; uniendo estos dos puntos con una línea recta se obtiene el gradiente natural del pozo.
- (5) Calcular los gradientes de la presión de operación y disponible del gas de inyección, utilizando la Fig. 2.3 para el cálculo del gradiente de la columna de gas :

$$\bar{T} \text{ gráf.} = \frac{170 + \left[\frac{1.6 \times 8000/100}{2} \right]}{2} = 149 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Con Pso = 900 lb/pg² y $\gamma_g = 0.65$ se obtiene :

$$\Delta P \text{ gráf.} = 21.2 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie, por lo tanto :}$$

$$\bar{T} \text{ real} = \frac{100 + 210}{2} = 155 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\Delta P \text{ corr.} = 21.2 \times \frac{149 + 460}{155 + 460} = 21 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pie}$$

$$P_{vo} = P_{so} + \Delta P \text{ corr.} \times \text{Prof.}$$

$$P_{vo} = 900 + \frac{21}{1000} \times 8000 = 1068 \text{ lb/pg}^2$$

P disp. a la prof. de 8000 pie es 1068 lb/pg²

Unir los puntos Pso y P disp. en la superficie :

900 + 100 = 1000 lb/pg² con Pvo y P disp. a 8000 pie, respectivamente, mediante líneas rectas obteniendo así los -- gradientes de presión de operación y disponible respectivos.

- (6) De la intersección del gradiente de presión de operación -- con el gradiente de presión natural se obtiene el punto de balance a una profundidad de 5308 pie.
- (7) Restar 100 lb/pg² a partir del punto de balance y se obtiene el punto de inyección a una profundidad de 5115 pie.
- (8) Trazar el gradiente fluyente arriba del punto de inyección G_{fb} : localizar Pwh = 150 lb/pg² y emplear el procedimiento de la hoja transparente, situando Pwh en el cero de la

curva de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical, Fig. A - 207 (ϕ T.P. = 2 pg., q_L = 1000 bl/día y 100% aceite) entonces se obtiene una RGLT - de 3000 pie³/bl y se traza el G_{fb} arriba del P.I.

- (9) A $P_{wh} = 150 \text{ lb/pg}^2$ se adicionan 200 lb/pg^2 , y este punto se une con el P.I., obteniéndose la curva de gradiente de presión de diseño en T.P.
- (10) Trazar el gradiente de presión del fluido de control a -- partir de $P_{wh} = 150 \text{ lb/pg}^2$ hasta intersectar el gradiente de $P \text{ disp.} = 1000 \text{ lb/pg}^2$:
 $0.447 \times 2000 + 150 = 1044 \text{ lb/pg}^2$
Este punto de intersección determina la profundidad de colocación de la primera válvula a 2000 pie.
- (11) Del punto determinado en el paso (10) trazar una recta -- horizontal hacia la izquierda hasta intersectar la curva de gradiente de P_{wh} de diseño y a partir de esta intersección trazar una recta paralela a la curva del gradiente de presión del fluido de control, pero hasta intersectar la curva del gradiente de $P_{so} = 900 \text{ lb/pg}^2$, resultando -- una profundidad de 2808 pie para la segunda válvula. Siguiendo este procedimiento se determina la profundidad de colocación de las demás válvulas hasta que la última de -- estas coincida con la profundidad del punto de inyección, P.I.
- (12) Con la temperatura superficial y de fondo, trazar el gradiente de temperatura fluyente para obtener la temperatura a la profundidad de colocación de cada válvula.
- (13) La P_{so} correspondiente a la primera válvula, se obtiene -- restando 50 lb/pg^2 a la presión disponible; para las demás válvulas se deja una diferencia de 10 lb/pg^2 entre -- cada una.
- (14) De la Fig. 2.3 con $\gamma_g = 0.75$ y la P_{so} de cada válvula se obtiene el gradiente de presión de la columna del gas de

inyección, corrigiendo por temperatura, respectivamente.
Entonces Pvo = Pso + P de la columna de gas y se obtiene :

Válvula	Pso, lb/pg ²	ΔP corr. del gas, lb/pg ² /1000 pie	Pvo, lb/pg ²
1	950	25.34	1000.7
2	940	24.78	1009.6
3	930	24.47	1014.7
4	920	24.03	1015.2
5	910	23.70	1014.8
6	900	23.24	1011.5
7	890	22.72	1003.6
8	880	22.26	993.8

- (15) Calcular el volumen de gas de inyección, Vgi a condiciones superficiales y el diámetro del asiento de la válvula operante :

$V_{gi} = (RGLT - R_s) q_L = (3000 - 650) 1000 = 2350000 \text{ pie}^3/\text{día}$
Corregir el volumen de gas por temperatura y densidad relativa :

$$P_c = 0.0544 \sqrt{0.75 (171.7 + 460)} = 1.18409$$

$V_{gic} = 2350000 \times 1.18409 = 2782612 \text{ pie}^3/\text{día}$ a condiciones superficiales.

De la Fig. 2.26 con $T = 171.7^\circ \text{F}$ y $\gamma_g = 0.75$ se obtiene la relación de calores específicos $K = 1.2276$

De la Fig. 18.VP :

Presión corriente arriba $P_1 = 1060 \text{ lb/pg}^2$

Presión corriente abajo $P_2 = 960 \text{ lb/pg}^2$

De la ec. 2.53 A :

$$CA = \frac{2782612}{155500 \times 1060 \left\{ \frac{64.34 \times 1.2276}{0.75 (171.7 + 460) (0.2276)} \left[\left(\frac{960}{1060} \right)^{2/1.2276} - \left(\frac{960}{1060} \right)^{2.2276/1.2276} \right] \right\}^{0.5}} = 0.1584866$$

De la ec. 2.53 B :

$$d_c = 1.75105 + 932.334 \times 0.1584866 - 29372.7(0.1584866)^2 + 397972 (0.1584866)^3 - 1510615 (0.1584866)^4 = 43/64 \text{ pg.}$$

Entonces el diámetro del asiento de la válvula más cercano corresponde a 11/16 pg. con $Ab = 0.77 \text{ pg}^2$ y

$$Ap = 0.3712 \text{ pg}^2$$

Desarrollar la Tabla 18.R como sigue :

- (16) Para calcular la presión del domo a la temperatura de la válvula, que es igual a la presión de cierre (Pvc) frente a cada válvula, se utiliza la siguiente ecuación :

$$Pd \text{ a T.V.} = Pvc (1 - R) + PtR, \text{ columna B}$$

donde :

$$R = \frac{0.3712}{0.77} = 0.482078, \quad 1 - R = 0.517922$$

Pvc, de la columna 7

Pt, de la columna 4

- (17) Obtener la presión superficial de cierre Psc, utilizando - la siguiente ecuación :

$$Psc = Pvc - P \text{ de la columna de gas, columna 9}$$

donde :

$$Pvc = Pd \text{ a T.V.}$$

y P columna de gas, ver paso 14.

- (18) Utilizando el factor de corrección por temperatura a 60°F , obtener la presión en el domo de cada válvula a 60°F :

$$C_t = \frac{1}{1 + 0.00215 (T.V. - 60)}$$

$$Pd \text{ a } 60^{\circ}F = C_t \times Pd \text{ a T.V.} , \text{ columna 10.}$$

- (19) Calcular la presión de apertura en el taller, Ptro :

$$Ptro = \frac{Pd \text{ a } 60^{\circ}F}{1 - R} , \text{ columna 11}$$

- (20) Determinar la presión de apertura de cada válvula a la --
profundidad correspondiente, utilizando la presión en --
T.P. fluyendo real :

$$Pvo_{\text{ real }} = \frac{Pd \text{ a T.V.} - Pt_{\text{ real }} \times R}{1 - R} , \text{ columna 12}$$

- (21) Determinar la presión superficial de apertura de cada vál
vula a condiciones reales de operación :

$$Pso_{\text{ real }} = Pvo_{\text{ real }} - P \text{ columna de gas, columna 13.}$$

TABLE 18.F.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Válvula	Prof. pie	Temp. F	Pt diseño	Pt real	Pso diseño	Pvo diseño	Pd a T.V.	Psc	Pd a 60°F	Ptro	Pvo real	Pso real
1	2000	126.7	569.23	400.00	950	1000.7	792.7	742.0	693.2	1338.5	1158.2	1107.5
2	2808	140.0	676.92	523.07	940	1009.6	849.2	779.6	724.6	1399.0	1152.8	1083.2
3	3462	148.3	738.46	606.15	930	1014.7	881.5	796.8	740.8	1430.5	1137.9	1053.1
4	3962	156.7	800.00	676.92	920	1015.2	911.4	816.2	754.5	1456.9	1129.8	1034.5
5	4420	161.7	830.70	756.92	910	1014.8	926.0	821.2	760.0	1467.1	1083.5	978.7
6	4800	166.7	876.92	830.70	900	1011.5	946.6	835.1	770.0	1486.7	1054.5	943.0
7	5000	170.0	907.69	886.15	890	1003.6	957.3	843.7	774.2	1494.9	1023.6	910.0
8	5115	171.7	923.07	923.07	880	993.8	959.7	845.8	773.8	1494.2	993.8	880.0

* Presión en lb/pg²

PROBLEMAS PROPUESTOS

SERIE I.V

- 1.1 Una válvula desbalanceada de B.N., domo cargado con N_2 a $60^\circ F$ y operada por presión del gas de inyección se localiza en un pozo a una profundidad de 3000 pie y además cuenta con los datos siguientes :

Válvula de $1\ 1/2 \times 5/16$ pg.

Área de fuelles = 0.765 pg^2

Presión superficial de apertura = 350 lb/pg^2

Presión en la T.P. = 50 lb/pg^2

Temperatura en cabeza del pozo = $100^\circ F$

Temperatura a la profundidad de la válvula = $140^\circ F$

Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0)

Considerando el gradiente de presión del gas de inyección, calcular :

- Presión de apertura a la profundidad de la válvula, lb/pg^2
- Presión de cierre a la profundidad de la válvula, lb/pg^2
- Presión de apertura en el taller, lb/pg^2

Solución :

a). $P_{vo} = 372.76\text{ lb/pg}^2$

b). $P_{vc} = 340.42\text{ lb/pg}^2$

c). $P_{to} = 322.78\text{ lb/pg}^2$

- 1.2 En un pozo con una profundidad de 4000 pie ($\bar{T} = 140^\circ F$) se instalará una válvula desbalanceada de B.N., domo cargado con N_2 a $60^\circ F$, diámetro del asiento de $5/16$ pg. y operada por presión

del gas de inyección. La válvula es calibrada en el taller a una presión de apertura de 600 lb/pg^2 con una relación - - - $Ap/Ab = 0.104$, calcular :

- a). Presión del domo a 60°F y 140°F , lb/pg^2
- b). Presión de apertura a la profundidad de la válvula, si la presión en la T.P. frente a ésta es de 500 lb/pg^2
- c). Presión superficial de cierre, lb/pg^2

Solución :

$$a). \quad \underline{Pd \text{ a } 60^\circ\text{F} = 537.6 \text{ lb/pg}^2}$$

$$\underline{Pd \text{ a } 140^\circ\text{F} = 630.1 \text{ lb/pg}^2}$$

$$b). \quad \underline{Pvo = 645.2 \text{ lb/pg}^2}$$

$$c). \quad \underline{Psc = 572.82 \text{ lb/pg}^2}$$

- 1.3 Calcular la presión de apertura (Pvo y Pvo máxima) para cada una de las siguientes válvulas desbalanceadas, domo con N_2 y operadas por presión del gas de inyección, con densidad relativa del 0.65 (aire = 1.0)

Considerar $R = 0.1965$ con la siguiente información :

Válvula No.	Pd a 80°F lb/pg^2	Pt lb/pg^2	Temp. a la prof. de válvula $^\circ\text{F}$	Pvo lb/pg^2	Pvo máx. lb/pg^2
1	700	200	140	---	---
2	675	350	145	---	---
3	650	450	150	---	---
4	600	500	155	---	---

Solución :

Válvula	1	2	3	4
Pvo, lb/pg ²	934.71	871.87	820.64	744.90

Válvula	1	2	3	4
Pvo máx. lb/pg ²	983.62	957.46	930.69	867.18

- 1.4 Se tiene una válvula desbalanceada de B.N., domo con N₂ y operada por presión del gas de inyección que será colocada en un pozo a una profundidad de 6000 pie donde la temperatura es de 160 °F. La relación Ap/Ab es 0.112 y se necesita que la presión superficial de cierre sea de 600 lb/pg². Calcular :
- Presión de cierre a la profundidad de la válvula, lb/pg²
 - Presión del domo de la válvula a 60 °F, lb/pg²
 - Presión de apertura en el taller a 60 °F, lb/pg²

Solución :

- $P_{vc} = 688.18 \text{ lb/pg}^2$
- $P_d \text{ a } 60 \text{ } ^\circ\text{F} = 566.4 \text{ lb/pg}^2$
- $P_{tro} = 637.84 \text{ lb/pg}^2$

- 1.5 Una válvula desbalanceada de B.N., domo cargado a presión con N₂ a 60 °F y operada por presión del gas de inyección, de - - - 1 1/2 x 3/8 pg., cuenta con la siguiente información :
- Area de fuelles = 0.765 pg²
 Profundidad de colocación de la válvula = 8000 pie
 Presión superficial de apertura = 800 lb/pg²

Presión en la T.P. = $P_{vo} = 300 \text{ lb/pg}^2$

Temperatura superficial = $100 \text{ }^\circ\text{F}$

Temperatura a 8000 pie de profundidad = $180 \text{ }^\circ\text{F}$

Densidad relativa del gas de inyección = 0.7 (aire = 1.0)

Determinar :

- Presión de apertura en el taller con N_2 a $60 \text{ }^\circ\text{F}$, lb/pg^2
- Presión de apertura en el taller con N_2 a $80 \text{ }^\circ\text{F}$, lb/pg^2
- La P_{tro} , considerando en los calculos la presión de la columna del gas de inyección, con el domo de la válvula cargado con N_2 a $60 \text{ }^\circ\text{F}$
- La P_{tro} , considerando que el domo de la válvula se carga con gas de densidad relativa 0.6 (aire = 1.0) a $60 \text{ }^\circ\text{F}$.

Solución :

a). $\underline{P_{tro} \text{ a } 60 \text{ }^\circ\text{F} = 851.7 \text{ lb/pg}^2}$

b). $\underline{P_{tro} \text{ a } 80 \text{ }^\circ\text{F} = 881.74 \text{ lb/pg}^2}$

c). $\underline{P_{tro} \text{ a } 60 \text{ }^\circ\text{F} = 851.62 \text{ lb/pg}^2}$

d). $\underline{P_{tro} \text{ a } 60 \text{ }^\circ\text{F} = 818.13 \text{ lb/pg}^2}$
 $\underline{\text{con gas}}$

SERIE 2.V

2.1 Una válvula desbalanceada de B.N. cargada con resorte - - - ($S_t = 75 \text{ lb/pg}^2$) y domo con N_2 a 60°F , tiene una presión de apertura en el taller de 600 lb/pg^2 y será operada por presión del gas de inyección, en un pozo a una profundidad de 6000 pie, donde la temperatura es de 160°F . Considerando la relación -- $A_p/A_b = 0.112$, calcular :

- a). Presión del domo de la válvula a 60°F , lb/pg^2
- b). Presión del domo de la válvula a 160°F , lb/pg^2
- c). Presión de cierre a la profundidad de la válvula, lb/pg^2
- d). Presión de cierre superficial, lb/pg^2

Solución :

a). $P_d \text{ a } 60^\circ\text{F} = 456.2 \text{ lb/pg}^2$

b). $P_d \text{ a } 160^\circ\text{F} = 566.46 \text{ lb/pg}^2$

c). $P_{vc} = 633 \text{ lb/pg}^2$

d). $P_{sc} = 550.43 \text{ lb/pg}^2$

2.2 Calcular las presiones superficiales de apertura y cierre para - una válvula desbalanceada de B.N., de doble elemento de carga -- (domo con N_2 a 60°F y $S_t = 600 \text{ lb/pg}^2$), operada por presión del gas de inyección y cuenta con los datos siguientes :

Válvula de $1 \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} \text{ pg}$.

Area de fuelles = 0.765 pg .

Profundidad de colocación de la válvula = 7000 pie

Presión de apertura en el taller = 850 lb/pg^2

Presión en la T.P. = 600 lb/pg^2

Temperatura superficial = 100°F

Temperatura a la profundidad de la válvula = 180°F

Densidad relativa del gas de inyección = 0.7 (aire = 1.0)

Solución :

$$P_{so} = 743.31 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{sc} = 728.4 \text{ lb/pg}^2$$

- 2.3 Una válvula desbalanceada de 1 1/2 x 3/8 pg., operada por presión del gas de inyección cuenta con la información siguiente :

Area de fuelles = 0.765 pg²

Profundidad de colocación de la válvula = 6000 pie

Presión superficial de apertura = 700 lb/pg²

Presión en la T.P. = 500 lb/pg²

Temperatura superficial = 80 °F

Temperatura a la profundidad de la válvula = 160 °F

Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0)

Calcular la presión de apertura en el taller, en lb/pg² para -- los siguientes casos :

a). Válvula cargada cc. resorte .

b). Válvula de domo cargado con N₂ a 60 °F

c). Válvula de domo cargado con N₂ a 60 °F y resorte,

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

Solución :

a). $P_{tro} = 887.2 \text{ lb/pg}^2$

b). $P_{tro} = 730.16 \text{ lb/pg}^2$

c). $P_{tro} = 801 \text{ lb/pg}^2$

- 2.4 En un pozo a una profundidad de 7000 pie se instalará una válvula

válvula desbalanceada de B.N. operada por presión del gas de inyección y se conoce la información siguiente :

Válvula de $1 \frac{1}{2} \times 7/16$ pg.

Área de fuelles = 0.77 pg^2

Presión de apertura en el taller = 850 lb/pg^2

Presión en la T.P. = 650 lb/pg^2

Temperatura superficial = $100 \text{ }^\circ\text{F}$

Temperatura a la profundidad de la válvula = $180 \text{ }^\circ\text{F}$

Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0)

Calcular las presiones superficiales de apertura y cierre en lb/pg^2 para los siguientes casos :

- Válvula cargada en el domo con N_2 a $60 \text{ }^\circ\text{F}$.
- Válvula cargada únicamente con resorte .
- Válvula cargada en el domo con N_2 a $60 \text{ }^\circ\text{F}$ y resorte,
 $S_t = 600 \text{ lb/pg}^2$

Solución :

a). $\underline{P_{so} = 769 \text{ lb/pg}^2}$

$\underline{P_{sc} = 726 \text{ lb/pg}^2}$

b). $\underline{P_{so} = 584.15 \text{ lb/pg}^2}$

$\underline{P_{sc} = 577.18 \text{ lb/pg}^2}$

c). $\underline{P_{so} = 638.55 \text{ lb/pg}^2}$

$\underline{P_{sc} = 620.96 \text{ lb/pg}^2}$

- 2.5 Una válvula de B.N., operada por presión del gas de inyección - que cuenta con los datos siguientes :

Válvula de $1 \frac{1}{2} \times 7/16$ pg.

Area de fuelles = 0.765 pg^2
 Profundidad de colocación de la válvula = 7000 pie
 Presión de apertura en el taller = 850 lb/pg^2
 Presión en la T.P. = 650 lb/pg^2
 Temperatura superficial = 100°F
 Temperatura a la profundidad de la válvula = 180°F
 Densidad relativa del gas de inyección = 0.7 (aire = 1.0)

Calcular :

- a). Las presiones superficiales de apertura, P_{so} y de cierre, P_{sc} para la válvula de domo cargado con N_2 a 60°F
- b). S_t , P_{so} y P_{sc} para la válvula cargada unicamente con resorte .
- c). P_{so} y P_{sc} para la válvula cargada con resorte, $S_t = 600 \text{ lb/pg}^2$ y domo con N_2 a 60°F
- d). El efecto de la T.P.
- e). La amplitud de la válvula para presiones en la T.P. de -- 200, 400 y 600 lb/pg^2 considerando :
 - e.1). domo cargado con N_2 a 60°F
 - e.2). válvula unicamente con resorte.

Solución :

- a). $P_{so} = 774.7 \text{ lb/pg}^2$
 $P_{sc} = 731.16 \text{ lb/pg}^2$
- b). $S_t = 850 \text{ lb/pg}^2$
 $P_{so} = 588.12 \text{ lb/pg}^2$
 $P_{sc} = 581.26 \text{ lb/pg}^2$

c). $P_{so} = 643 \text{ lb/pg}^2$

$P_{sc} = 625.34 \text{ lb/pg}^2$

d). $T.E. = 159 \text{ lb/pg}^2$

e). e.1)

$P_t, \text{ lb/pg}^2$	$P, \text{ lb/pg}^2$
200	161.15
400	112.25
600	63.35

e.2)

$P_t, \text{ lb/pg}^2$	$P, \text{ lb/pg}^2$
200	118.09
400	69.19
600	20.29

SERIE 3.I'

- 3.1 Una válvula balanceada de B.N. y operada por presión del gas - de inyección cargada en el domo con gas de densidad relativa - 0.60 (aire = 1.0) a 700 lb/pg² y 80 °F y además cuenta con la siguiente información :

Válvula de 1 1/2 x 3/16 pg.

Area de fuelles = 0.7096 pg²

Profundidad de colocación de la válvula = 8000 pie

Temperatura a la profundidad de la válvula = 200 °F

Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0)

Calcular :

- La presión de apertura a la profundidad de la válvula, lb/pg²
- La presión superficial de apertura, lb/pg²

Solución :

a). $P_{vo} = 900 \text{ lb/pg}^2$

b). $P_{so} = 750 \text{ lb/pg}^2$

- 3.2 Una sarta de T.P. con válvulas de B.N. balanceadas y operadas - por presión del gas de inyección, será corrida en un pozo a una profundidad de 7000 pie. El domo de las válvulas es cargado a presión con gas de densidad relativa 0.60 (aire = 1.0) a una temperatura de 80 °F. Considerando la relación $A_p/A_b = 0.112$ y con el siguiente espaciamiento, calcular la presión de apertura superficial de cada válvula :

Válvula	Pd a 80°F	Profundidad de	Temperatura	Pso
---------	-----------	----------------	-------------	-----

Válvula	Pd a 80°F lb/pg ²	Profundidad de válvula, pie	Temperatura °F	Pso lb/pg ²
1	800	2000	120	
2	750	3500	150	
3	700	4700	174	
4	650	5700	194	
5	600	6500	210	
6	550	7000	220	

Solución :

Válvula	1	2	3	4	5	6
Pso, lb/pg ²	836	804	770	722	673	614

- 3.3 En un pozo a una profundidad de 7000 pie se instalará una válvula de B.N. desbalanceada operada por fluidos y se desea que la presión de apertura en el taller sea de 500 lb/pg² a 60 °F. Además se tienen los siguientes datos :

Válvula de 1 1/2 x 3/8 pg.

Area de fuelles = 0.765 pg²

Temperatura a la profundidad de la válvula = 170 °F

Presión disponible en superficie = 1000 lb/pg²

Densidad relativa del gas de inyección = 0.7 (aire = 1.0)

Calcular la presión de apertura, lb/pg², a la profundidad de la válvula para los casos siguientes :

- a). Válvula cargada en el domo con N₂ a 60 °F

- b). Válvula cargada únicamente con resorte
- c). Válvula cargada con resorte ($S_t = 300 \text{ lb/pg}^2$) y domo con N_2 a 60°F

Solución :

a). $P_t = 440 \text{ lb/pg}^2$

b). $P_t = 321.5 \text{ lb/pg}^2$

c). $P_t = 369 \text{ lb/pg}^2$

- 3.4 Una válvula de B.N. cargada con resorte ($S_t = 450 \text{ lb/pg}^2$), domo con N_2 a 60°F y operada por fluidos, se localiza en un pozo a una profundidad de 4700 pie y se conoce la siguiente información :

Válvula de $1 \frac{1}{2} \times 5/16 \text{ pg}$.

Area de fuelles = 0.765 pg^2

Presión de apertura a la profundidad de la válvula = 920 lb/pg^2

Presión superficial de apertura = 900 lb/pg^2

Temperatura a la profundidad de la válvula = 145°F

Calcular :

- a). Presión del domo de la válvula a 145°F , lb/pg^2
- b). Presión del domo de la válvula a 60°F , lb/pg^2
- c). Presión de cierre a la profundidad de la válvula, lb/pg^2

Solución :

a). $P_d \text{ a } 145^\circ\text{F} = 522.3 \text{ lb/pg}^2$

b). $P_d \text{ a } 60^\circ\text{F} = 441.3 \text{ lb/pg}^2$

c). $\underline{Pvc = 927.2 \text{ lb/pg}^2}$

- 3.5 En un pozo a una profundidad de 4000 pie se instalará una válvula de B.N. operada por fluidos y se tiene los siguientes datos :

Válvula de 1 1/2 x 1/4 pg.

Area de fuelles = 0.765 pg^2

Presión superficial de apertura = 800 lb/pg^2

Presión de apertura a la profundidad de la válvula = 500 lb/pg^2

Temperatura a la profundidad de la válvula = $130 \text{ }^\circ\text{F}$

Calcular la presión de apertura en el taller, lb/pg^2 , para los siguientes casos :

a). Válvula cargada en el domo con N_2 a $60 \text{ }^\circ\text{F}$

b). Válvula cargada unicamente con resorte

c). Válvula cargada con resorte ($S_t = 300 \text{ lb/pg}^2$) y domo con N_2 a $60 \text{ }^\circ\text{F}$:

Solución :

a). $\underline{Ptro = 486 \text{ lb/pg}^2}$

b). $\underline{Ptro = 559.2 \text{ lb/pg}^2}$

c). $\underline{Ptro = 525.1 \text{ lb/pg}^2}$

SERIE 4.V

- 4.1 Resolver el problema resuelto 7 considerando una presión superficial de operación del gas de inyección de 1200 lb/pg^2 .

Solución :

$$\underline{\text{Punto de inyección del gas} = 5650 \text{ pie}}$$

$$\underline{V_{gic} = 112360.2 \text{ pie}^3/\text{día}}$$

$$\underline{dc = 6/64 \text{ pg.}}$$

- 4.2 Dados los siguientes datos de un pozo :

Diámetro de tubería de producción = $2 \frac{7}{8}$ pg.

Presión de fondo estática = 3000 lb/pg^2

Índice de productividad = 6 bl/día/lb/pg^2 (constante)

Relación gas-aceite = $100 \text{ pie}^3/\text{bl}$

Densidad relativa del gas = 0.8 (aire = 1.0)

Temperatura de fondo = $180 \text{ }^\circ\text{F}$

Temperatura superficial = $120 \text{ }^\circ\text{F}$

Profundidad media del intervalo productor = 9500 pie

Producción del pozo = 100% aceite

Presión en la cabeza del pozo = 160 lb/pg^2 (constante)

Presión superficial de operación = 1100 lb/pg^2

Determinar el gasto de aceite considerando :

a). Flujo natural

b). Bombeo neumático continuo con :

b.1) Volumen de gas de inyección ilimitado

b.2) Volumen de gas de inyección = $2000000 \text{ pie}^3/\text{día}$

Solución :

a). $q = 1380 \text{ bl/día}$

b). b.1) $q = 2440 \text{ bl/día}$

b.2) $q = 2360 \text{ bl/día}$

- 4.3 Con los datos del problema propuesto 4.2, determinar el gasto de aceite máximo posible, considerando un volumen de gas de inyección de 5000000 pie³/día para el bombeo neumático continuo.

Solución :

$$q_o = 2400 \text{ bl/día}$$

- 4.4 Determinar el gasto máximo posible de un pozo con B.N. continuo para un volumen ilimitado del gas de inyección bajo las características siguientes :

Profundidad del intervalo medio productor = 8500 pie

Diámetro de la tubería de producción = 2 7/8 pg

Presión de fondo estática = 3200 lb/pg²

Índice de productividad = 6.0 bl/día/lb/pg² (constante)

Presión en la cabeza del pozo = 120 lb/pg² (constante)

Producción del pozo = 100% aceite

Densidad relativa del gas de inyección = 0.7 (aire = 1.0)

Presión superficial de operación = 1000 lb/pg²

Relación gas-aceite de formación = 300 pie³/bl

Solución :

$$q_o = 3220 \text{ bl/día}$$

4.5 Determinar el punto de inyección del gas, el volumen de gas necesario y el diámetro de la válvula operante para un pozo con B.N. continuo bajo las características siguientes :

Diámetro interior de la tubería de producción = 3 pg.

Gasto de producción = 3000 bl/día (100% aceite)

Presión de fondo estática = 2800 lb/pg²

Presión en la cabeza del pozo = 100 lb/pg²

Relación gas-aceite de formación = 300 pie³/bl

Densidad del aceite = 35 °API

Temperatura superficial = 120 °F

Temperatura de fondo = 220 °F

Densidad relativa del gas = 0.65 (aire = 1.0)

Índice de productividad = 7.5 bl/día/lb/pg²

Presión superficial de operación = 1100 lb/pg²

Profundidad media del intervalo productor = 9000 pie

Solución :

P.I = 5540 pie

Volumen del gas de inyección requerido = 150000 pie³/día

dc = 8/64 pg.

SERIE 5.Y

- 5.1 Determinar el espaciamento por el método gráfico y las presiones requeridas de diseño para válvulas desbalanceadas, operadas por presión del gas de inyección con control de tiempo en la superficie para una instalación de B.N.I. de un pozo con la siguiente información :

Diámetro exterior de T.P. = 2 7/8 pg.

Diámetro exterior de T.R. = 5 1/2 pg.

Profundidad del empacador = 7500 pie

Presión en la cabeza del pozo = 70 lb/pg²

Presión de fondo estática = 1320 lb/pg²

Presión superficial de operación = 850 lb/pg²

Indice de productividad = 0.3 bl/día/lb/pg² (constante)

Temperatura superficial = 95 °F

Temperatura a 7500 pie de profundidad = 190 °F

Densidad relativa del gas de inyección = 0.7 (aire = 1.0)

Gradiente de presión del fluido de control = 0.44 lb/pg²/pie

Solución :

TABLA 5.1P

(1) No. de vál.	(2) Prof. de vál., pie	(3) Temp. de vál., °F	(4) Pso lb/pg ²	(5) Pvo lb/pg ²	(6) Pt lb/pg ²	(7) Asiento piloto, pg.	(8) Asiento prin cipal, pg.	(9) Pd = Pvc lb/pg ²	(10) Psc lb/pg ²	(11) C _t adim.	(12) Pd a 60° lb/pg ²	(13) Ptro lb/pg ²
1	1870	119	850	892	189	3/8	3/8	791.1	749.0	0.887	701.7	820.0
2	3500	139	825	900	292	3/8	3/8	812.8	735.8	0.855	695.0	812.0
3	4900	157	800	902	377	3/8	3/8	827.0	724.1	0.827	684.0	799.0
4	6090	172	775	900	455	3/8	3/4	836.1	711.2	0.806	674.0	787.0
5	7100	185	750	890	660	3/8	3/4	857.0	718.5	0.788	675.3	789.0

NOTA :

Válvulas de 1 1/2 pg. d.e.

Ab = 0.77 pg²

R = 0.1434

1 - R = 0.8566

5.2 Utilizando el procedimiento analítico, resolver el problema propuesto 5.1

Solución :

TABLA 5.2P

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
No. de vál.	Prof. de vál., pie	Temp. de vál., °F	Psc lb/pg ²	Pvo lb/pg ²	Pt lb/pg ²	Asiento piloto, pg.	Asiento cipal, pg.	Pd = Pvc lb/pg ²	Psc lb/pg ²	C _t adim.	Pd a 60°F lb/pg ²	Ptro a 60°F lb/pg ²
1	1773	117	850	890	182	1/4	1/4	781.4	741.5	0.891	696.2	823
2	3292	137	825	896	277	1/4	1/4	801.0	729.6	0.858	687.2	812
3	4537	152	800	895	356	1/4	1/4	812.3	717.0	0.835	678.2	801
4	5546	165	775	888	419	1/4	1/4	816.1	703.0	0.816	666.0	787
5	6354	175	750	874	470	1/4	1/2	812.0	688.1	0.802	651.2	769
6	6990	184	725	858	660	1/4	1/2	827.6	694.8	0.790	653.8	773

NOTA :

Válvulas de 1 pg. d.e.

Ab = 0.29 pg²

R = 0.1534

1 - R = 0.8466

- 5.3 . Determinar mediante el método gráfico, el espaciamiento de las válvulas desbalanceadas con domo cargado con nitrógeno a 60 °F operadas por presión del gas de inyección para un pozo con --- B.N.I., considerando presión de cierre constante en superficie dada la información siguiente :

Diámetro exterior de T.P. = 2 7/8 pg.

Diámetro exterior de T.R. = 7 pg.

Profundidad del empacador = 8500 pie

Presión en cabeza del pozo = 80 lb/pg²

Presión de fondo estática = 1600 lb/pg²

Presión superficial de operación = 900 lb/pg²

Gasto máximo estimado = 160 bbl/día

Temperatura superficial = 100 °F

Temperatura a 8500 pie de profundidad = 175 °F

Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0)

Gradiente de presión del fluido de control = 0.43 lb/pg²/pie

Considerar : Psc = Pso - 100 , lb/pg²

Solución :

TABLA 5.3.P

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Válv. No.	Prof. de vál., pie	Temp. de vál., °F	Psc lb/pg ²	Pd = Pvc lb/pg ²	Pt lb/pg ²	Asiento piloto, pg.	Asiento cipal, pg.	Pvo lb/pg ²	Pso lb/pg ²	C _t adim.	Pd a 60°F lb/pg ²	Ptro lb/pg ²
1	2000	118	800	837.0	149	1/4	1/4	961.6	924.6	0.889	744.1	879 &
2	3650	132	800	867.5	208	1/4	1/4	987.0	919.4	0.866	751.2	888 &
3	5255	147	800	897.2	261	1/4	1/4	1012.4	915.1	0.842	755.4	892 &
4	6800	160	800	925.8	315	1/4	1/4	1036.4	910.6	0.823	761.9	890 &
5	8250	173	800	952.6	800	11/32	3/4	1015.0	862.3	0.805	766.8	1080 #
+ 5	8250	173	800	952.6	800	1/4	1/2	980.2	827.5	0.805	766.8	906 +

222

NOTAS :

Válvulas de 1 pg. d.e.

Ab = 0.29 pg²

Asiento de 11/32 pg. : R = 0.29, 1 - R = 0.71

Asiento de 1/4 pg. : R = 0.1534, 1 - R = 0.8466

+ Para control de tiempo en superficie.

Para control por estrangulador en superficie.

& Para control de tiempo o bien estrangulador en superficie.

- 5.4. Determinar el diámetro del asiento de control de una válvula - piloto para control por estrangulador y control cíclico de tiempo en superficie, en un pozo con una instalación de B.N.I. - dada la siguiente información :

Diámetro exterior de T.P. = 2 7/8 pg.

Diámetro exterior de T.R. = 5 1/2 pg.

Profundidad de colocación de la válvula = 7100 pie

Presión de operación superficial = 750 lb/pg²

Presión de diseño en T.P. = 660 lb/pg²

Temperatura a la profundidad de la válvula = 185 °F

Densidad relativa del gas de inyección = 0.7 (aire = 1.0)

Válvula de 1 pg. d.e.

Area de fuelles = 0.29 pg²

Diámetro del asiento principal = 5/8 pg.

Solución :

Control por estrangulador en superficie : Válvula con asiento de control 5/16 pg.]

Control cíclico de tiempo en superficie : Válvula con asiento de control 13/64 pg.]

- 5.5. Determinar el diámetro del asiento de control de una válvula - piloto para el control por estrangulador y control cíclico de tiempo en la superficie dada la información siguiente :

Diámetro exterior de T.P. = 2 3/8 pg.

Diámetro exterior de T.R. = 5 1/2 pg.

Profundidad de colocación de la válvula = 6000 pie

Presión de operación superficial = 725 lb/pg²

Presión de diseño en T.P. = 600 lb/pg²

Temperatura a la profundidad de la válvula = 150 °F

Densidad relativa del gas de inyección = 0.65 (aire = 1.0)

Válvula de 1 1/2 pg. d.e.

Area de fuelles = 0.77 pg²

Diámetro del asiento principal = 5/8 pg.

Solución :

Control por estrangulador en superficie : Válvula con asiento
de control de 7/16 pg.

Control cíclico de tiempo en superficie : Válvula con asiento
de control de 5/16 pg.

ESPECIFICACIONES PARA VALVULAS CAMCO DE B.N. OPERADAS POR PRESION

Tipo de Válvula	A_b Área Efectiva de Fuelles (pg ²)	Diámetro del Orificio (pg.)	A_p * Área del Orificio (pg ²)	A_p/A_b Relación del Área del orificio al Área Efectiva de Fuelles	$(1-A_p/A_b)$	T.E.F. $= \frac{A_p/A_b}{(1-A_p/A_b)}$ Factor del Efecto de T.P.	P_{s1} ** Presión Efectiva del Resorte (lb/pg ²)
AK	0.3109	3/16	0.0291	0.094	0.906	0.104	Sin Resorte
		1/4	0.0511	0.164	0.836	0.196	
B	0.3109	3/16	0.0291	0.094	0.906	0.104	150
		1/4	0.0511	0.164	0.836	0.196	
		5/16	0.0792	0.255	0.745	0.342	
BK, BK-1, BP-1, J-40, PK-1	0.3109	3/16	0.0291	0.094	0.906	0.104	Sin Resorte
		1/4	0.0511	0.164	0.836	0.196	
		5/16	0.0792	0.255	0.745	0.342	
C, RC, RCF	0.7096	1/4	0.0511	0.072	0.928	0.078	75
		5/16	0.0792	0.112	0.888	0.126	
		3/8	0.1134	0.160	0.840	0.190	
CK, CKF, CP-1, RPB RP-1	0.7096	3/16	0.0291	0.041	0.959	0.043	Sin Resorte
		1/4	0.0511	0.072	0.928	0.078	
		5/16	0.0792	0.112	0.888	0.126	
		3/8	0.1134	0.160	0.840	0.190	
		7/16	0.1538	0.217	0.783	0.277	
CP-2, J-20, R-20, R-25, RBP-2 RP-2	0.7630	3/16	0.0291	0.038	0.962	0.040	Sin Resorte
		1/4	0.0511	0.067	0.933	0.072	
		5/16	0.0792	0.104	0.896	0.116	
		3/8	0.1134	0.148	0.852	0.174	
		7/16	0.1538	0.201	0.799	0.252	
H	0.7096	1/2	0.2002	0.100***	0.900	0.111	150
		RH	1/2	0.2002	0.100***	0.900	

* Las áreas están calculadas basadas en un incremento en el diámetro del orificio de 0.005 pg.

** Efecto de la presión del resorte (P_{s1}) para válvulas con presiones de apertura (P_{v0}) a 60° menor a 100 lb/pg².

*** Las válvulas están balanceadas parcialmente para reducir la relación A_p/A_b .

REFERENCIAS

- 1) Gómez Cabrera J. Angel; "Apuntes de Producción de Pozos I", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, 1968.
- 2) Brow, K. E. et al.; "The Technology of Artificial Lift -- Methods", Penn Well Books, 1977. Volúmenes 2a, 2b, 3a y 3b.
- 3) Craft, Holden and Graves ; Well Desing; Drilling and Production. Prentice-Hall, Inc. 1962 .
- 4) Garaicochea Petrirena Fco.; "Apuntes de Transporte de -- Hidrocarburos" ; Fac. Ingeniería, U.N.A.M., 1983.
- 5) Brown Kermit E. "Gas Lift Theory and Practice" , The Petroleum Publishing Co., Tulsa Oklahoma, 1973.

CAPITULO VI

BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON

El bombeo hidráulico, como cualquier otro sistema artificial de producción es introducido al pozo cuando la energía natural de éste no es suficiente para que pueda fluir de manera económicamente óptima o rentable a un gasto de producción deseado, por lo que es necesario restaurar una presión adecuada proporcionando energía adicional por medio de este sistema para poder elevar los fluidos hasta la superficie manteniéndoles una determinada presión.

El bombeo hidráulico tipo pistón consiste de un sistema integrado de equipo superficial (motor y bomba reciprocante) acoplado a una tubería conectada al pozo; este equipo transmite potencia a una unidad instalada a una determinada profundidad (pudiendo ser ésta el fondo del pozo) mediante acción hidráulica. El flujo de fluido motriz inyectado acciona este equipo subsuperficial, consistente de una bomba y un motor como elementos principales que impulsan el fluido de la formación a la superficie, manteniéndoles una presión adecuada.

Las características más importantes de este sistema artificial de producción son :

- 1.- Puede alcanzar mayores profundidades que otros sistemas. Debido a la flexibilidad de este sistema ha permitido la explotación de pozos a profundidades hasta de 18000 pie.
- 2.- La bomba subsuperficial se puede recuperar fácilmente. Una de las ventajas del bombeo hidráulico es la facilidad con que se instalan y recuperan las bombas subsuperficiales (Bomba tipo libre). Para recuperar una bomba, la circulación se invierte en la sarta de producción, a fin de desanclarla de su asiento. A continuación se circula por la sarta del retorno del fluido motriz (o por el espacio anular) para llevarla a la superficie, donde cae en un receptáculo para su correspondiente cambio. Para introducir una bomba la operación se efectúa a la inversa.

- 3.- Buena flexibilidad de gastos de producción. La instalación de este tipo de bombeo es ideal cuando se tienen a gran profundidad, a baja presión y bajas relaciones gas-aceite, grandes volúmenes de fluido por producir (hasta 5000 ^{bl}/día).
- 4.- Puede operar en pozos direccionales. Es el sistema artificial de producción más indicado para operar en pozos direccionales, a diferencia del bombeo mecánico convencional, bombeo neumático o electrocentrífugo, los cuales presentan ciertas desventajas.
- 5.- Control del sistema de varios pozos desde un punto único. Desde ese punto, el operador puede:
 - a) Cerrar o abrir uno, cualquiera o todos los pozos, o la combinación deseada de pozos.
 - b) Graduar la velocidad de la bomba en cada pozo.
 - c) Medir la velocidad de la bomba en cualquier pozo.
- 6.- Fácil adición de inhibidores. Debido al estricto control del fluido motriz, pueden agregársele a éste, toda clase de inhibidores que sea necesarios en la superficie.
- 7.- Manejo de crudos pesados. Esto estará en función de la capacidad de la bomba subsuperficial y de su eficiencia. Pero dado el amplio rango de bombas subsuperficiales existentes, el manejo de fluidos de alto peso específico puede ser factible sin disminuir los ritmos de producción preestablecidos.

Uno de los principales elementos del Bombeo Hidráulico en general es el fluido motriz (aceite o agua). Dicho fluido tiene como función la de proporcionar la energía necesaria para accionar el motor de la unidad de producción y además lubricar todas las partes del sistema.

Las características más importantes que deberá poseer el fluido motriz son:

- a) Fluido limpio. Debido a que el fluido motriz estará en contacto con las partes del equipo superficial y subsuperficial, es recomendable que este no contenga impurezas que puedan

provocar problemas subsecuentes, tales como: corrosión y/o abrasión de la tubería de inyección, obstrucción de las tuberías o mal funcionamiento del motor.

- b) Contenido de sólidos mínimo. Es necesario que el tipo de fluido que se elija o seleccione como fluido motriz, no contenga más de 20 p.p.m. de sólidos, el tamaño de las partículas sólidas no deberá exceder a 15 micrones y el contenido de sal no ser mayor de $12^{lb}/1000$ bi. de aceite.
- c) Baja Viscosidad. Esta característica será uno de los factores para poder elegir el tipo de bomba superficial, ya que si el fluido motriz es sumamente viscoso, la presión de descarga requerida por la bomba deberá ser sumamente alta para moverlo, por lo que se necesita que la viscosidad sea la más baja posible.
- d) Alto poder de lubricación. Esta característica es debida a que el fluido motriz estará en contacto directo con todas las partes mecánicas del motor subsuperficial y por lo tanto tendrá como función la de lubricar cada una de las partes que constituyen dicho motor.

Existen dos tipos básicos de circuito de fluido motriz

- i) Sistema abierto de fluido motriz. Aquí el fluido motriz bajo presión es dirigido a la bomba subsuperficial por una tubería, éste acciona la bomba, entra en la corriente del fluido producido y retorna a la superficie mezclado con éste. En este sistema sólo son necesarios dos conductos dentro del pozo; uno para conducir el fluido motriz a la unidad subsuperficial y otro para conducir la mezcla de fluido motriz con fluido producido a la superficie (dos sartas de tubería de producción o una sola sarta de tubería y el espacio anular T.R.-F.P.)
- ii) Sistema cerrado de fluido motriz. En este caso el fluido motriz es circulado al fondo del pozo para accionar la unidad subsuperficial, pero no se mezcla con el fluido producido, sino que es retornado a

la superficie por una sarta de tubería por separado, por lo que es necesario un conducto extra a diferencia del sistema abierto.

Las principales causas que provocan mal funcionamiento en el sistema son:

- i) Falta de Fluido Motriz
- ii) Obstrucciones del flujo
- iii) Fugas
- iv) Cambios de condiciones del pozo
- v) Desgaste del motor
- vi) Contaminación del fluido motriz
- vii) Alta producción de gas
- viii) Corrosión
- ix) Abrasividad
- x) Taponamientos, etc.

En este capítulo se consideran problemas prácticos sobre parámetros de diseño del bombeo hidráulico tipo pistón, considerando instalaciones en sistema cerrado y abierto de inyección del fluido motriz, tanto para bombas subsuperficiales fijas y libres; así como también considerando que el gas pasa por la bomba o se ventea por el espacio anular.

Para la solución de los problemas con bombas subsuperficiales tipo libre se considera una tolerancia de 0.5 pg. en cuanto al diámetro exterior de ésta con respecto al diámetro interior de la tubería en la cual se aloja.

Las Tablas, Figuras y Apéndices que se refieren en estos problemas se localizan en la referencia (1).

BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON

PROBLEMAS RESUELTOS

1. En un pozo con una profundidad de 13000 pie se instalará el Bombeo Hidráulico (B.H.) tipo pistón y se conoce la siguiente información :
- Presión de fondo estática = 2000 lb/pg^2
Presión de fondo fluyendo = 1000 lb/pg^2
Presión de saturación = 2000 lb/pg^2
Gasto de aceite = 100 bl/día a condiciones superficiales.
Gasto de agua = 50 bl/día a condiciones superficiales.
Relación gas-aceite = $500 \text{ pie}^3/\text{bl}$
Densidad del aceite = 40 *API
Calcular la capacidad requerida de la bomba para producir en la superficie :
- a) 150 bl/día de aceite y agua
b) 180 bl/día de aceite y agua
Considerar que el gas pasa por la bomba en ambos casos.

Solución :

- a) Con la Fig. 3.26 para $P_{wf} = 1000 \text{ lb/pg}^2$, $R = 500 \text{ pie}^3/\text{bl}$ y $q = 50/150 \times 100 = 33.3$, se obtiene una eficiencia teórica de 65%, entonces :

$$\text{Capacidad requerida de la bomba} = \frac{Q_4}{(Q_4/Q'_4)} = 150/0.65$$

$$Q'_4 = 231 \text{ bl/día a cond. de bomba}$$

- b) $\frac{P_{wf}}{P_{ws}} = \frac{1000}{2000} = 0.5$ y de la Fig. 1.17, se obtiene :

$$\frac{q_o}{q_{\text{omáx}}} = 0.7$$

$$q_{\text{omáx}} = \frac{150}{0.7} = 214 \text{ bl/día}$$

Con $\frac{q_o}{q_o \text{ max}} = \frac{180}{214} = 0.841$ y de la Fig. 1.17 se obtiene:

$$\frac{P_{wf}}{P_{ws}} = 0.33$$

$$P_{wf} = 0.33 \times 2000 = 660 \text{ lb/pg}^2$$

Con $P_{wf} = 660 \text{ lb/pg}^2$, $R = 500 \text{ pie}^3/\text{bl}$ y % de agua = $50/180 \times 100 = 27.7$, de la Fig. 3.26 se obtiene una eficiencia teórica de la bomba de 50%, entonces:

Capacidad requerida

$$\text{de la bomba} = \frac{180}{0.5}$$

$$Q_4' = 360 \text{ bl/día a condiciones de bomba}$$

2. Seleccionar el diámetro adecuado de una bomba libre para T.R. con capacidad de 400 bl/día en sistema cerrado (Fig. 3.12) con tubería de inyección de 3 pg. de diámetro interior, que será instalada a una profundidad de 7000 pie, empleando las Figs. 1, 2, 3 y 8 del Apéndice 3B.

Solución:

De la ec. 3.1

$$\frac{P}{E} \text{ max} = \frac{10\ 000}{7\ 000} = 1.43$$

- a) Analizando la Fig. 3B(1) para bombas de diámetro nominal de 2½ pg., se observa que las bombas de 2½ x 1½ pg. y 2½ x 1½ pg. no pueden manejar 400 bl/día. Las bombas de 2½ x 1¾ pg. y 2½ x 2 pg. pueden manejar gastos mayores de 400 bl/día con relaciones P/E de 1.13 y 1.47 respectivamente; seleccionándose la bomba de 2½ x 1¾ pg. por tener una capacidad de 502 bl/día al 100% de eficiencia y una relación P/E de 1.13
- b) De la Fig. 3B(2), bombas de diámetro nominal de 2½ pg. con capacidad de 400 bl/día y una relación P/E máxima de 1.43 se pueden seleccionar cualquiera de las bombas siguientes:

Bomba, pg.	Relación P/E	Desplazamiento bl/día
2½ x 2 x 1½	0.68	467
2½ x 2 x 1 5/8	0.80	547
2½ x 2 x 1 3/4	0.93	637
2½ x 2 x 2	1.21	831

- c) Con la Fig. 3B(3), las bombas que cumplen las condiciones --
deseadas son las siguientes:

Bomba, pg.	Relación P/E	Desplazamiento bl/día
VFR 252015	0.74	630
VFR 252017	1.00	858
VFR 252020	1.32	1119

- d) Las bombas de la Fig. 3B(8) que cumplen las condiciones deseadas
son las siguientes:

Bomba, pg.	Relación P/E	Desplazamiento bl/día
2½ x 1½ x 1½	1.00	492
2½ x 1 7/16 x 1½	0.70	492
2½ x 1 7/16 x 1 7/16	1.00	703

NOTA: Los valores de la tercera columna estan al 100% de eficiencia volumétrica.

3. Calcular en gasto de fluido motriz a condiciones superficiales para -
un pozo con B.H. tipo pistón, con los datos siguientes:
Gasto de producción real = 500 bl/día a condiciones superficiales.
Desplazamiento del motor $q_1 = 16.5$ bl/día x SPM
Desplazamiento de la bomba $q_4 = 13.4$ bl/día x SPM

Considerar:

$$\frac{Q_1'}{Q_1} = 90\%$$

$$\frac{Q_4}{Q_4'} = 85\%$$

Solución Núm. 1:

De la ec. 3.2:

$$SPM = \frac{Q_4}{q_4 (Q_4'/Q_4')}$$

$$SPM = \frac{500}{13.4 \times 0.85} = 43.9$$

Sustituyendo en la ec. 3.3:

$$Q_1 = \frac{16.5 \times 43.9}{0.90} = 805 \text{ bl/día a condiciones superficiales.}$$

Solución Núm. 2:

De la ec. 3.4:

$$Q_1 = \frac{Q_4}{Nu} \times \frac{q_1}{q_4} = \frac{Q_4}{\frac{Q_4}{Q_1} \times \frac{Q_1}{Q_1}} \times \frac{q_1}{q_4}$$

$$Q_1 = \frac{500}{0.85 \times 0.90} \times \frac{16.5}{13.4}$$

$$Q_1 = 805 \text{ bl/día a condiciones superficiales.}$$

4. Determinar la bomba adecuada, el gasto de inyección de fluido motriz, la presión superficial de inyección del fluido motriz y la potencia superficial y subsuperficial para un pozo con B.H. tipo pistón, empleando un sistema abierto con bomba fija insertada y tubería de inyección del fluido motriz concéntrica a la tubería de producción, similar a la Fig. 3.4, bajo las características siguientes:

Profundidad del pozo = 9000 pie

Profundidad de colocación de la bomba = 7 000 pie

Diámetro de tubería de inyección = 1.9 pg. d.e. (1.5 pg. d.i.)

Diámetro de tubería de producción = 2 7/8 pg. d.e.

Presión media del yacimiento = 2 200 lb/pg²

Presión en la cabeza del pozo = 140 lb/pg²

Índice de productividad = 2 bl/día/lb/pg² (constante)

Temperatura a la profundidad de la bomba = 210 °F

Temperatura superficial = 130 °F

Relación gas-aceite = 300 pie³/bl

Gasto de producción deseado = 650 bl/día (50% aceite)

Densidad del aceite = 35 °API

Densidad relativa del agua = 1.07

Fluido motriz = aceite de 35 °API

Considerar: Eficiencia de la bomba = 80%

Eficiencia del motor = 85%

Solución:

- 1) Determinar la Pwf para el gasto deseado.

$$Pwf = Pws - \frac{q}{IP}$$

$$Pwf = 2200 - \frac{650}{2} = 1875 \text{ lb/pg}^2$$

- 2) Tipo de instalación a utilizar: sistema abierto con bomba fija insertada.

De la Fig. 3.26 para $Pwf = 1875 \text{ lb/pg}^2$, $R = 300 \text{ pie}^3/\text{bl}$ y 50% agua se obtiene la eficiencia teórica de la bomba de 100% , - por lo que el gas puede pasar a través de la bomba.

- 3) Capacidad de la bomba.

De la ec. 3.2:

$$Q_4 = \frac{650}{0.8 \times 1.0} = 812.5 \text{ bl/día a condiciones de bomba.}$$

- 4) Seleccionar la bomba subsuperficial.

De la ec. 3.1:

$$\frac{P}{E} \text{ real} = \frac{10\,000}{7\,000} = 1.4285$$

De la Fig. 3B(13), Apéndice 3B, se selecciona una bomba de --
2 x 1 3/16 x 1 3/8 - 1 3/8 x 1 3/16 pg. con:

$$P/E = 0.976$$

$$q_1 = 7.79 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

$$q_4 = 7.55 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

$$\text{Velocidad máxima} = 121 \text{ SPM}$$

$$\text{Capacidad de la bomba al 100\% de eficiencia} = 913 \text{ bl/día}$$

Por lo tanto de la ec. 3.2:

$$\text{SPM} = \frac{650}{7.55 \times 0.8} = 108$$

% de la velocidad

$$\begin{aligned} \text{de bombeo} &= \frac{\text{SPM} \times 100}{\text{Velocidad máxima, SPM}} \\ &= \frac{108 \times 100}{121} = 89 \end{aligned}$$

Como el % de la velocidad de bombeo es mayor de 85% , seleccionar otra bomba.

De la Fig. 3B(13) considerar una bomba de 2 x 1 3/16 x 1 3/8 - 1 3/8 x 1 3/8 pg. con:

$$P/E = 1.15$$

$$q_1 = 7.79 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

$$q_4 = 8.90 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

$$\text{Velocidad máxima} = 121 \text{ SPM}$$

$$\text{Capacidad de la bomba al 100\% de eficiencia} = 1076 \text{ bl/día}$$

Capacidad máxima del pistón de la bomba = 8.90 bl/día x SPM

$$\text{SPM} = \frac{650}{8.9 \times 0.8} = 92$$

$$\% \text{ de la velocidad de bombeo} = \frac{92 \times 100}{121} = 76$$

Como 76% es menor que 85% , se cumple con el requisito de diseño; por lo tanto se selecciona la segunda bomba.

- 5) Calcular el gasto de fluido motriz.

De la ec. 3.3:

$$Q_1 = \frac{7.79 \times 92}{0.85} = 843 \text{ bl/día a condiciones superficiales.}$$

De la tabla 3.1 para el aceite de 35 °API, se obtiene una densidad relativa de 0.8498 ; por lo tanto la presión ejercida por la columna de aceite será:

$$G_1 = 0.433 \times 0.8498 = 0.3679 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$h_1 G_1 = 7000 \times 0.3679 = 2575 \text{ lb/pg}^2$$

- 6) Para el fluido de retorno (fluido motriz + fluido producido):

$$Q_3 = Q_1 + Q_4$$

$$Q_3 = 843 + 650 = 1493 \text{ bl/día}$$

Gasto de aceite = gasto de agua :

$$Q_5 = Q_6 = 650 \times 0.5 = 325 \text{ bl/día}$$

$$G_5 = G_1 = 0.3679 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_6 = 0.433 \times 1.07 = 0.4633 \text{ lb/pg}^2$$

Sustituyendo valores en la ec. 3.18:

$$G_3 = \frac{843 \times 0.3679 + 325 \times 0.3679 + 325 \times 0.4633}{843 + 650} = 0.3887 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

La presión de la columna de fluido de retorno, despreciando el gas es:

$$h_1 G_3 = 7000 \times 0.3887 = 2721 \text{ lb/pg}^2$$

Si el gas está incluido en la columna:

$$\text{RGL} = \frac{\zeta_g \times \text{fracción de aceite} \times \text{RGA}}{Q_1 + Q_4}$$

$$\text{RGL} = \frac{650 \times 0.5 \times 300}{1493} = 65 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

Para tener un cierto factor de seguridad en el diseño, se recomienda tomar el valor de $h_1 G_3$ obtenido despreciando el gas, ya que la RGL determinada no es muy grande.

7)

Calcular las pérdidas de presión por fricción:

Para el fluido motriz.

Con la temperatura promedio, $\bar{T} = 170$ °F y de la Fig. 3.28, la viscosidad para el aceite de 35 °API es de 2.2 cs.

Utilizando la ecuación del Apéndice JA para secciones circulares y flujo turbulento con:

$$Q_1 = 843 \text{ bl/día}$$

$$\gamma_o = 0.8498$$

$$j_o = 2.2 \text{ cs.}$$

$$d = 1.25 \text{ pg.}$$

$$L = 7 \text{ 000 pie}$$

$$F_1 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 0.8498 \times 2.2^{0.21} \times 843^{1.79} \times 7000}{1.54.79}$$

$$F_1 = 182 \text{ lb/pg}^2$$

Para el fluido de retorno.

$$\gamma_3 = \frac{G_3}{0.433} = \frac{0.3887}{0.433} = 0.8977$$

De la Fig. 3.29, con una temperatura promedio de 170 °F, la viscosidad del agua es de 0.38 cs.

Sustituyendo valores en la ec. 3.19:

$$j_3 = \frac{843 \times 2.2 + 325 \times 2.2 + 325 \times 0.38}{1493} = 1.8 \text{ cs.}$$

$$C_3 = 0.8977 \times 1.0 \text{ g/cm}^3 = 0.8977 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_3 = j_3 \times C_3 = 1.8 \times 0.8977 = 1.62 \text{ cp.}$$

Produciendo por el espacio anular de 2.5 x 1.9 pg. y utilizando la ecuación del Apéndice JA para secciones anulares y flujo turbulento, se tiene:

$$F_3 = \left(\frac{202 \times 10^{-8} \times 7000 \{ (2.5^2 - 1.9^2) / (2.5 - 1.9) \}^{0.21}}{(2.5 - 1.9) (2.5^2 - 1.9^2)^2 [2.5 / (2.5 - 1.9)]^{0.1}} \right) \times$$

$$\times \{ (1.62 / 0.3887)^{0.21} \times 0.3887 \} \times 1493^{1.79}$$

$$F_3 = 1 \text{ 009 lb/pg}^2$$

8)

Calcular la presión de inyección del fluido motriz, P_s :

$$P_1 = h_1 G_1 - F_1 + P_s$$

$$P_1 = 2575 - 182 + P_s = 2 \text{ 393} + P_s$$

De la ec. 3.13 :

$$P_1 - P_3 - (P_3 - P_4) P/E - F_p = 0$$
$$2393 + P_s - 3870 - (3870 - 1875)1.15 - P_p = 0$$
$$P_s = 3772 + F_p$$

De la Fig. 3.28, la viscosidad cinemática del aceite de 35 °API a la temperatura de colocación de la bomba de 210 °F, es de -- 1.75 cs.

De la Fig. 3.27, con la línea de la Fig. 3B(13), 76% de la velocidad de bombeo y $\mu_o = 1.75$ cs., se obtiene:

$$\Delta P = 680 \times Y_o$$
$$\Delta P = 680 \times 0.8498 = 578 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 3.6:

$$F_{PE} = \frac{0.25 \times 578 \times 8.9 \times 0.8}{8.9} = 116 \text{ lb/pg}^2$$

Como F_{PE} mayor que 50 lb/pg², entonces:

$$F_p = F_{EE} + F_{PE}$$
$$F_p = 0.75 \times \Delta P + F_{PE} = 0.75 \times 578 + 116 = 550 \text{ lb/pg}^2$$
$$P_s = 3772 + 550$$
$$P_s = 4322 \text{ lb/pg}^2$$

9) Calcular la potencia en la bomba superficial y subsuperficial, HP:

$$HP_{sup.} = P_s \times Q_1 \times 1.7 \times 10^{-5}$$
$$HP_{sup.} = 4322 \times 8.4 \times 1.7 \times 10^{-5}$$
$$HP_{sup.} = 62$$
$$HP_{subsup.} = (P_3 - P_4) \times Q_4 \times 1.7 \times 10^{-5}$$
$$HP_{subsup.} = (3870 - 1875) \times 650 \times 1.7 \times 10^{-5}$$
$$HP_{subsup.} = 23$$

5. Se desea diseñar una instalación de B.H. tipo pistón para un pozo con sistema cerrado, tubería de inyección concéntrica a la tubería de retorno, tubería de producción paralela y bomba fija insertada (Fig. 3.5) Se cuenta con los siguientes datos:

Profundidad del pozo = 12 000 pie

Profundidad de colocación de la bomba = 10 500 pie

Diámetro de tubería de revestimiento = 7 pg. (6.456 pg. d.i.)

Diámetro de tubería de inyección = 1 7/8 pg. (1.5 pg. d.i.)

Diámetro de tubería de retorno = 3 1/2 pg. (3 pg. d.i.)

Diámetro de tubería de producción = 2 3/8 pg. (2 pg. d.i.)

Presión de fondo estática = 2 050 lb/pg²
 Presión en la cabeza del pozo = 115 lb/pg²
 Presión en tubería de retorno = 35 lb/pg²
 Índice de productividad = 1.5 bl/dfa/lb/pg² (constante)
 Gasto de líquido = 650 bl/dfa a condiciones superficiales
 Producción de agua = 30% ($\gamma_w^* = 1.05$)
 Densidad relativa del aceite producido = 40 °API
 Relación gas-aceite = 400 pie³/bl
 Fluido motriz = agua ($\gamma_w = 1.03$)
 Temperatura superficial = 110 °F
 Temperatura a la profundidad de la bomba = 200 °F
 Considerar: Eficiencia de la bomba = 80%
 Eficiencia del motor = 90%

Calcular:

- Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales.
- Presión superficial de inyección del fluido motriz.
- Potencia de la bomba superficial.
- Potencia de la bomba subsuperficial.

Solución:

- Calcular la presión de fondo fluyendo, Pwf:

De la ec. 1.19:

$$Pwf = 2050 - \frac{950}{1.5} = 1\ 417\ \text{lb/pg}^2$$

- De la Fig. 3.26 con Pwf = 1 417 lb/pg², R = 400 pie³/bl y 30% agua, se obtiene un desplazamiento teórico de la bomba de 90%; además según consideraciones de diseño si R \geq 500 pie³/bl el gas debe ser venteado. Entonces para este caso el gas puede pasar - por la bomba subsuperficial.

- Calcular el desplazamiento real de la bomba.

Desplazamiento

$$\text{de la bomba} = \frac{q_L}{\text{efic. de bomba} \times \text{efic. teórica}}$$

$$= \frac{650}{0.8 \times 0.9} = 903\ \text{bl/dfa}$$

- Seleccionar una posible bomba que pueda manejar la producción - de este pozo, (ver Apéndice 3B).

De la ec. 3.1:

$$\frac{P}{E} = \frac{10\ 000}{10\ 500} = 0.9524$$

Considerando el diámetro nominal de la bomba de 2½ pg., de la -
Fig. 3B(4) se selecciona la bomba VFR 25202020 y se obtiene:

$$P/E = 0.73$$

$$Q_1 = 15.16 \text{ bl/dfa} \times \text{SPM}$$

$$Q_4 = 9.33 \text{ bl/dfa} \times \text{SPM}$$

Capacidad máxima del pistón de la bomba = 9.33 bl/dfa x SPM

Capacidad de la bomba al 100% de eficiencia = 1 119 bl/dfa

Velocidad máxima = 120 SPM

5) Velocidad de
bombeo requerido = $\frac{903}{9.33} = 96.78 \text{ SPM}$

% de velocidad
de bombeo = $\frac{96.78}{120} \times 100 = 80.65$

6) Requerimientos del fluido motriz.

Gasto, de la ec. 3.3:

a) $Q_1 = \frac{15.16 \times 96.78}{0.9}$

$Q_1 = 1\ 630 \text{ bl/dfa}$ a condiciones superficiales.

Gradiente de presión:

$$G_1 = 0.433 \times 1.03 = 0.446 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

7) Calcular la caída de presión por fricción en la tubería de inyección F_1 y tubería de retorno F_2 :

De la Fig. 3.29 la viscosidad del agua como fluido motriz a - -

$$\bar{T} = 155 \text{ } ^\circ\text{F es } 0.42 \text{ cs.}$$

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento, se obtiene:

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{(1.03)(0.42)^{0.21} (1630)^{1.79} (10500)}{(1.5)^{4.79}}$$

$$F_1 = 759.21 \text{ lb/pg}^2$$

$$\rho_2 = 1.03 \times 1 \text{ g/cm}^3 = 1.03 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_2 = 0.42 \times 1.03 = 0.4326 \text{ cp.}$$

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones anulares y flujo turbulento, se tiene:

$$F_2 = \left[\frac{202 \times 10^{-8} \times 10500 \times \{(3^2 - 1.875^2)/(3 - 1.875)\}^{0.21}}{(3 - 1.875)(3^2 - 1.875^2)^2 [3/(3 - 1.875)]^{0.1}} \right] \times$$

$$\times (0.4326/0.446)^{0.21} \times 0.446 \times 1630^{1.79}$$

$$F_2 = 197.42 \text{ lb/pg}^2$$

- 8) Calcular el gradiente de presión del fluido producido, G_4 :
De la Tabla 3.1, la densidad relativa del aceite de 40 °API es 0.8251

$$G_5 = 0.433 \times 0.8251 = 0.3573 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_6 = 0.433 \times 1.05 = 0.4546 = \text{lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$Q_5 = 650 \times 0.7 = 455 \text{ bl/dfa}$$

$$Q_6 = 650 \times 0.3 = 195 \text{ bl/dfa}$$

$$G_4 = \frac{455 \times 0.3573 + 195 \times 0.4546}{650} = 0.3865 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

- 9) La densidad relativa del fluido producido es:

$$\gamma_4 = G_4 / 0.433$$

$$\gamma_4 = 0.3865/0.433 = 0.8926$$

- 10) Calcular la caída de presión por fricción en la tubería de producción, F_3 :

De la Fig. 3.28 la viscosidad del aceite de 40 °API a $\bar{T} = 155$ °F es 2 cs., entonces:

$$\nu_4 = \frac{Q_5 \cdot 5 + Q_6 \cdot 6}{Q_4}$$

$$\nu_4 = \frac{455 \times 2 + 195 \times 0.42}{650} = 1.526 \text{ cs.}$$

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento se tiene:

$$F_3 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{0.8926 \times 1.526^{0.21} \times 650^{1.79} \times 10500}{2^{4.79}}$$

$$F_3 = 41.95 \text{ lb/pg}^2$$

- 11) Calcular la presión superficial de inyección del fluido motriz, P_s :
De la Fig. 3.29 la viscosidad del agua como fluido motriz a 200 °F es 0.32 cs., entonces de la Fig. 3.27 con la línea correspondiente a la Fig. 3B(4), 80.65% de velocidad de bombeo y 0.32 cs., se obtiene:

$$\Delta P = 700 \times \gamma_w$$

$$\Delta P = 700 \times 1.03 = 721 \text{ lb/pg}^2$$

Sustituyendo datos en la ec. 3.6 :

$$F_{PE} = 0.25 \times 721 \times (9.33/9.33) \times 0.8 \times 0.9 = 129.78 \text{ lb/pg}^2$$

Como F_{PE} es mayor de 50 lb/pg^2 , entonces :

$$F_{EE} = 0.75 \times \Delta P$$

$$F_{EE} = 0.75 \times 721 = 540.75 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_P = F_{PE} + F_{EE}$$

$$F_P = 129.78 + 540.75 = 670.53 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_1 = h_1 G_1 + F_1 + P_s$$

$$P_1 = 10500 \times 0.446 - 759.21 + P_s$$

$$P_1 = 3923.79 + P_s$$

$$P_2 = h_1 G_1 + F_2 + P_{PR}$$

$$P_2 = 10500 \times 0.446 + 197.42 + 35 = 4915.42$$

$$P_3 = h_1 G_4 + F_3 + P_{wh}$$

$$P_3 = 10500 \times 0.3865 + 41.95 + 115 = 4215.2 \text{ lb/pg}^2$$

- b) Sustituyendo datos en la ec. 3.10 y despejando P_s :

$$(3923.79 + P_s) - 4915.42 - (4215.2 - 1417) \times 0.73 - 670.53 = 0$$

$$P_s = 3705 \text{ lb/pg}^2$$

- c) Calcular la potencia requerida en la bomba superficial, HP_{sup} :

$$HP_{sup} = P_s \times Q_1 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$HP_{sup} = 3705 \times 1630 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$HP_{sup} = 103$$

- d) Calcular la potencia requerida en la bomba subsuperficial, HP_{subsup} :

$$HP_{subsup} = (P_3 - P_{wf}) \times Q_4 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$HP_{subsup} = (4215.2 - 1417) \times 650 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$HP_{subsup} = 31$$

6. En un campo petrolero se localizan dos pozos, los cuales se requiere instalar el sistema de B.H. tipo pistón. Para cada pozo seleccionar una bomba subsuperficial y calcular el gasto de --- fluido motriz a condiciones superficiales, Ps, HP sup. y HP sub superficial y empleando una planta central para la inyección -- del fluido motriz, determinar la HP sup. requerida. Considerar bomba fija para T.R. en sistema abierto (Fig. 3.6) y bombeando gas. Se tiene la información siguiente :

	POZO 1	POZO 2
Profundidad de colocación de la bomba, pie	8000	7600
Diámetro de T.R., pg.	7	5 1/2
Diámetro de T.P., pg.	2 7/8	2 3/8
Presión en la cabeza del pozo, lb/pg ²	120	80
Presión de fondo estática, lb/pg ²	1920	1500
Índice de productividad bl/día/lb/pg ² , (constante)	5	0.4
Temperatura superficial, °F	110	110
Temperatura a la profundidad de la bomba, °F	170	167
Gasto de aceite, bl/día	1200	400
Densidad del aceite, °API	35	40
Densidad relativa del aceite, (agua = 1.0)	0.85	0.83
Densidad relativa del gas, (aire = 1.0)	0.70	0.65
Producción de agua, %	50	0
Densidad relativa del agua (agua = 1.0)	1.074	-
Relación gas-aceite, pie ³ /bl	400	200

Considerar también :

Eficiencia de la bomba = 85%

Eficiencia del motor = 90%

Fluido motriz : aceite, $\gamma_o = 0.85$

Solución :

- (1) Calcular las presiones de fondo fluyendo P_{wf} , de la ec. 1.19 :

$$\text{Pozo 1 : } P_{wf} = 1920 - \frac{1200}{5} = 1680 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Pozo 2 : } P_{wf} = 1500 - \frac{400}{0.4} = 500 \text{ lb/pg}^2$$

- (2) De la Fig. 3.26, con P_{wf} , % de agua y RGA de cada pozo se obtiene la eficiencia teórica de la bomba subsuperficial :

Pozo 1 : Eficiencia teórica = 95% , entonces :

$$\frac{Q_A}{Q_A'} = 0.85 \times 0.95 = 0.8075$$

Pozo 2 : Eficiencia teórica = 65% , entonces :

$$\frac{Q_A}{Q_A'} = 0.85 \times 0.65 = 0.5525$$

Capacidad de la bomba, Q_A'

Pozo 1 :

$$Q_A' = \frac{Q_A}{\frac{Q_A}{Q_A'}} = \frac{1200}{0.8075} = 1486 \text{ bl/día a condiciones de bomba}$$

Pozo 2 :

$$Q_A' = \frac{400}{0.5525} = 724 \text{ bl/día a condiciones de bomba}$$

Pozo 1 :

$$\frac{P}{E} \Big|_{\text{real}} = \frac{10000}{\text{Prof. col. bomba, pie}} = \frac{10000}{8000} = 1.25$$

Pozo 2 :

$$\frac{P}{E} \Big|_{\text{real}} = \frac{10000}{7600} = 1.315$$

- (3) Seleccionar una bomba subsuperficial para cada pozo que --
cumpla con las condiciones dadas, (ver Apéndice 3B)

Pozo 1 :

Bomba de 3 x 2 1/8 - 2 1/8 pg., Fig. 3B (10), con :

$$P/E = 1.00$$

$$q_1 = 21.75 \text{ bl/día x SPM}$$

$$q_4 = 21.55 \text{ bl/día x SPM}$$

Velocidad máxima = 87 SPM

Capacidad máxima del pistón de la bomba = 21.55 bl/día x SPM

Capacidad de la bomba al 100% de eficiencia = 1874 bl/día

$$\text{SPM} = \frac{q_4}{q_4 \times \frac{q_4}{q_4}} = \frac{1200}{21.55 \times 0.8075} = 69$$

$$\% \text{ velocidad de bombeo} = \frac{69 \times 100}{87} = 79.3\% < 85\% \therefore \text{ cumple}$$

Pozo 2 :

Bomba VFR252017, Fig. 3B (3), con :

$$P/E = 1.00$$

$$q_1 = 8.89 \text{ bl/día x SPM}$$

$$q_4 = 7.15 \text{ bl/día x SPM}$$

Velocidad máxima = 120 SPM

Capacidad máxima del pistón de la bomba = 9.33 bl/día x SPM

Capacidad de la bomba al 100% de eficiencia = 858 bl/día

$$\text{SPM} = \frac{400}{7.15 \times 0.5525} = 101$$

$$\% \text{ velocidad de bombeo} = \frac{101 \times 100}{120} = 84\% < 85\% \therefore \text{cumple}$$

- (4) Requerimientos del fluido motriz.

Gasto de fluido motriz. De la ec. 3.3 :

$$Q_1 = \frac{q_1 \times \text{SPM}}{(Q_1' / Q_1)}$$

Pozo 1 :

$$Q_1 = \frac{21.75 \times 69}{0.9} = \underline{1668 \text{ bl/día a condiciones superficiales}}$$

Pozo 2 :

$$Q_1 = \frac{8.89 \times 101}{0.9} = \underline{998 \text{ bl/día a condiciones superficiales}}$$

- (5) De la Fig. 3.28, la viscosidad del aceite de 35 °API a - - 170 °F es de 2.2 cs. y del aceite de 40 °API a 167 °F es de 1.75 cs.

Con estos valores y el porcentaje de la velocidad de bombeo, determinar la caída de presión por fricción en la bomba, de la Fig. 3.27 :

Pozo 1 :

$$\Delta P = 520 \times \gamma_f = 520 \times 0.85$$

$$\Delta P = 442 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 3.5 :

$$F_{PE} = \frac{0.25 \times 442 \times 21.55 \times 0.8075}{21.55} = 89 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_p = 0.75 \times \Delta P + F_{PE} = 0.75 \times 442 + 89 = 421 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 2 :

$$\Delta P = 440 \times \gamma f = 440 \times 0.83$$

$$\Delta P = 365 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_{PE} = \frac{0.25 \times 365 \times 7.15 \times 0.5525}{9.33} = 39 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{como } F_{PE} < 50 \text{ lb/pg}^2 \quad \therefore$$

$$F_p = \Delta P = 365 \text{ lb/pg}^2$$

- (6) Calcular las pérdidas de presión por fricción en la tubería de inyección, F_1 :

De la Fig. 3.29, la viscosidad del aceite de 35 °API a una $\bar{T} = \frac{110 + 170}{2} = 140$ °F es de 3 cs. y del aceite de 40 °API

a una $\bar{T} = \frac{110 + 167}{2} = 138.5$ °F es de 2.1 cs.

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento :

Pozo 1 :

$$F_1 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 0.85 \times 3.0^{0.21} \times 1668^{1.79} \times 8000}{2.5^{4.79}}$$

$$F_1 = 65 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 2 :

$$F_1 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 0.83 \times 2.1^{0.21} \times 998^{1.79} \times 7600}{2^{4.79}}$$

$$F_1 = 65 \text{ lb/pg}^2$$

- (7) Calcular las caídas de presión por fricción en la tubería de retorno F_3 , (espacio anular) :

Pozo 1 :

$$G_1 = G_5 = 0.433 \times 0.85 = 0.3680 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_6 = 0.433 \times 1.074 = 0.4650 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

De la ec. 3.18 :

$$G_3 = \frac{0.3680 \times 1668 + 600 \times 0.3680 + 600 \times 0.4650}{1668 + 1200}$$

$$G_3 = 0.3883 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$Y_3 = \frac{G_3}{0.433} = \frac{0.3883}{0.433} = 0.8967$$

Pozo 2 :

$$G_1 = 0.3680 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_5 = 0.433 \times 0.83 = 0.3594 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_3 = \frac{0.3680 \times 998 + 400 \times 0.3594}{998 + 400} = 0.3655 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$Y_3 = \frac{0.3655}{0.433} = 0.8441$$

Viscosidad del Fluido de Retorno.

De la Fig. 3.29, la viscosidad del agua a 170°F es de --
0.475 cs. y a 167°F es de 0.48 cs.

De la ec. 3.19 :

Pozo 1 :

$$J_3 = \frac{3.0 \times 1668 + 3.0 \times 600 + 0.475 \times 600}{1668 + 1200} = 2.47$$

$$\rho_3 = \gamma_3 \times 1.0 \text{ g/cm}^3 = 0.8967 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_3 = \nu_3 \times \rho_3 = 2.47 \times 0.8967 = 2.21 \text{ cp.}$$

Pozo 2 :

$$\nu_3 = \frac{3.0 \times 998 + 2.1 \times 400}{998 + 400} = 2.74 \text{ cs.}$$

$$\rho_3 = \gamma_3 \times 1.0 \text{ g/cm}^3 = 0.8441 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_3 = 2.74 \times 0.8441 = 2.31 \text{ cp.}$$

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones anulares y flujo turbulento :

Pozo 1 :

T.R. de 7 pg. x 6.456 pg. y T.P. de 2 7/8 pg.

$$F_3 = \left(\frac{202 \times 10^{-8} \times 8000 [(6.456^2 - 2.875^2) / (6.456 - 2.875)]^{0.21}}{(6.456 - 2.875)(6.456^2 - 2.875^2)^2 \cdot 6.456 / (6.456 - 2.875)^{0.1}} \right) \cdot \left[\left(\frac{2.21}{0.3883} \right)^{0.21} \times 0.3883 \right] \cdot 2868^{1.79}$$

$$F_3 = \frac{2.58301 \times 10^{-2}}{4240.9706} \times 864631.97 = 6 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 2 :

T.R. de 5 1/2 pg. x 4.778 pg y T.P. de 2 3/8 pg.

$$F_3 = \left(\frac{202 \times 10^{-8} \times 7600 [(4.778^2 - 2.375^2) / (4.778 - 2.375)]^{0.21}}{(4.778 - 2.375)(4.778^2 - 2.375^2)^2 \cdot 4.778 / (4.778 - 2.375)^{0.1}} \right) \cdot \left[\left(\frac{2.21}{0.3883} \right)^{0.21} \times 0.3883 \right] \cdot 2868^{1.79}$$

$$F_3 = \frac{\left(\frac{2.31}{0.3655} \right)^{0.21} \times 0.3655}{760.4786} \times 229877.99 = 7 \text{ lb/pg}^2$$

- (8) Calcular la presión superficial de inyección del fluido -- motriz, Ps.

Pozo 1 :

$$P_1 = h_1 G_1 - F_1 + P_s$$

$$P_1 = 8000 \times 0.3680 - 61 + P_s = 2883 + P_s$$

$$P_3 = h_1 G_3 + F_3 + P_{wh}$$

$$P_3 = 8000 \times 0.3883 + 5 + 120 = 3231 \text{ lb/pg}^2$$

Sustituyendo datos en la ec. 3.17 :

$$P_s = 3231 (1 + 1) - 1680 (1.0) + 421 - 2883$$

$$P_s = 2320 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 2 :

$$P_1 = 7600 \times 0.3680 - 63 + P_s = 2734 + P_s$$

$$P_3 = 7600 \times 0.3655 + 7.0 + 80 = 2865 \text{ lb/pg}^2$$

Sustituyendo en la ec. 3.17 :

$$P_s = 2865 (1+1) - 500 (1.0) + 365 - 2734$$

$$P_s = 2861 \text{ lb/pg}^2$$

- (9) Calcular la potencia de las bombas superficial y subsuperficial.

$$\text{HP sup.} = P_s \times Q_1 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{HP subsup.} = (P_3 - P_4) \times Q_4 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

Pozo 1 :

$$\text{HP sup.} = 2320 \times 1668 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{HP sup.} = 66$$

$$\text{HP subsup.} = (3231 - 1680) \times 1200 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{HP subsup.} = 32$$

Pozo 2 :

$$\text{HP sup.} = 2861 \times 998 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{HP sup.} = 49$$

$$\text{HP subsup.} = (2865 - 500) \times 400 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{HP subsup.} = 17$$

Utilizando una planta central de inyección del fluido motriz y considerando un incremento de 200 lb/pg² en la presión de inyección para un adecuado funcionamiento de las válvulas de control superficial :

Pozo 1 : $P_s = 2520 \text{ lb/pg}^2$

$$\text{HP sup.} = 2520 \times 1669 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{HP sup.} = 72$$

Pozo 2 : $P_s = 3061 \text{ lb/pg}^2$

$$\text{HP sup.} = 3061 \times 998 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{HP sup.} = 52$$

REQUERIMIENTOS SUPERFICIALES TOTALES.

$$P_s = 3061 \text{ lb/pg}^2$$

$$Q_1 = 2666 \text{ bl/día}$$

$$\text{HP sup.} = 139$$

7. Determinar el gasto de inyección del fluido motriz, la presión superficial de inyección del fluido motriz y las potencias superficial y subsuperficial de una instalación de B.H. tipo pig tón para un pozo bajo las características siguientes :

Profundidad de colocación de la bomba = 9500 pie

Diámetro de la tubería de revestimiento = 7 pg. (6.456 pg. d.i.)

Diámetro de la tubería de inyección = 1.9 pg. d.e. (1.5 pg.d.i.)

Diámetro de la tubería de retorno del fluido motriz = 1.9 pg.d. e. (1.5 pg. d.i.)

Presión de fondo estática = 3200 lb/pg^2

Índice de productividad = $3.0 \text{ bl/día/lb/pg}^2$ (constante)

Presión en la cabeza del pozo = 130 lb/pg^2

Presión superficial en la tubería de retorno del fluido motriz = 50 lb/pg^2

Gasto de producción deseado = 1420 bl/día

Producción de agua = 35%

Densidad relativa del agua = 1.04

Densidad del aceite producido = 38 °API

Relación gas-aceite = $420 \text{ pie}^3/\text{bl}$

Fluido motriz = aceite de 40 °API

Temperatura superficial = 115 °F

Temperatura a profundidad de la bomba = 210 °F

Considerar :

Eficiencia de la bomba = 85%

Eficiencia del motor = 90%

Sistema cerrado con bomba fija para T.R. con tuberías paralelas similar a la Fig. 3.7.

Solución :

- (1) Determinar la presión de fondo fluyendo .

$$P_{wf} = P_{ws} - \frac{q}{IP} = 2500 - \frac{1420}{3} = 2027 \text{ lb/pg}^2$$

(2) Tipo de instalación :

Sistema cerrado con bomba fija para T.R. con tuberías para
lelas .

(3) Capacidad de la bomba.

De la Fig. 3.26 para $Pwf = 2027 \text{ lb/pg}^2$, $R = 420 \text{ pie}^3/\text{bl}$ y
35% agua, la eficiencia teórica de la bomba es de 93% por
lo que el gas puede pasar a través de la bomba.

De la ec. 3.2 :

$$Q_4' = \frac{Q_4}{\left(\frac{Q_4}{Q_4'}\right)} = \frac{1420}{0.85 \times 0.93} = \frac{1420}{0.7905} = 1797 \text{ bl/día}$$

(4) Seleccionar la bomba subsuperficial.

De la ec. 3.1 :

$$\frac{P}{E} \Big|_{\text{real}} = \frac{10000}{9500} = 1.052$$

De la Fig. 3B (B), Apéndice 3B se selecciona una bomba de
4 x 2 3/8 - 2 3/8 pg. con :

$$P/E = 1.00$$

$$q_1 = 32.94 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

$$q_4 = 32.50 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

Velocidad máxima = 77 SPM

Capacidad de la bomba al 100% de eficiencia = 2502 bl/día

Capacidad máxima del pistón de la bomba = 32.50 bl/día x SPM

De la ec. 3.2 :

$$\text{SPM} = \frac{Q_4}{q_4 \times \left(\frac{Q_4}{Q_4'}\right)} = \frac{1420}{32.50 \times 0.7905} = 56$$

$$\begin{aligned} \% \text{ de la velocidad de bombeo} &= \frac{\text{SPM} \times 100}{\text{Velocidad máxima, SPM}} \\ &= \frac{56 \times 100}{77} = 73 \end{aligned}$$

como 73% < 85%, por lo tanto cumple.

- (5) De la Fig. 3.28, la viscosidad del aceite de 40 °API a una temperatura de 210 °F es de 1.25 cs.

De la Fig. 3.27, con la línea correspondiente a la Fig. 3B (8), $\mu_o = 1.25$ cs. y 73% de velocidad de bombeo.

$$\Delta P = 340 \times \gamma_o$$

De la Tabla 1 la densidad relativa del aceite de 40 °API es :

$$\gamma_o = 0.8251 \quad \text{y} \quad G_1 = 0.3574 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\Delta P = 340 \times 0.8251 = 281 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 3.6 :

$$F_{PE} = \frac{0.25 \times 281 \times 32.50 \times 0.7905}{32.50} = 56 \text{ lb/pg}^2$$

como $F_{PE} > 50 \text{ lb/pg}^2$, entonces :

$$F_P = 0.75 \Delta P + F_{PE} = 0.75 \times 281 + 56 = 267 \text{ lb/pg}^2$$

Gasto de fluido motriz, Q_1

De la ec. 3.3 :

$$Q_1 = \frac{32.94 \times 56}{0.90}$$

$$Q_1 = 2050 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$$

- (6) Calcular las pérdidas de presión por fricción en la tubería de inyección, tubería de retorno y espacio anular.

De la Fig. 3.28, a una temperatura media, $\bar{T} = \frac{210 + 115}{2}$ -

162.5 °F, la viscosidad del aceite de 40 °API es de 1.75 cs.

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento, con :

$d = 1.5 \text{ pg.}$
 $L = 9500 \text{ pie}$
 $J = 1.75 \text{ cs.}$
 $\gamma = 0.8251$
 $q = 2050 \text{ bl/día}$

$$F_1 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 0.8251 \times 1.75^{0.21} \times 2050^{1.79} \times 9500}{(1.5)^{4.79}}$$

$$F_1 = 1119 \text{ lb/pg}^2$$

Para la tubería de retorno del fluido motriz, con $d = 1.5 \text{ pg}$

$$F_2 = 1119 \text{ lb/pg}^2$$

De la Fig. 3.28, la viscosidad del aceite producido de 38 ° API a una temperatura de 162.5 °F es de 2.15 cs.

De la Fig. 3.29, la viscosidad del agua producida a una temperatura media de 162.5 °F es de 0.42 cs.

$$G_4 = \frac{Q_5 G_5 + Q_6 G_6}{Q_4}$$

De la Tabla 1, para el aceite de 38 ° API, $\gamma_o = 0.8348$ y

$$G_5 = 0.3616 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_6 = 0.433 \times \gamma_w = 0.433 \times 1.04 = 0.4503 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_4 = \frac{1420 \times 0.65 \times 0.3616 + 1420 \times 0.35 \times 0.4503}{1420}$$

$$G_4 = 0.3926 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\gamma_4 = \frac{G_4}{0.433} = \frac{0.3926}{0.433} = 0.9068$$

$$J_4 = \frac{Q_5 J_5 + Q_6 J_6}{Q_4}$$

$$J_4 = \frac{1420 \times 0.65 \times 2.15 + 1420 \times 0.35 \times 0.42}{1420} = 155 \text{ cs.}$$

$$\rho_4 = 0.9068 \times 1.0 \text{ g/cm}^3 = 0.9068 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_4 = \rho_4 \times \nu_4 = 0.9068 \times 1.55 = 1.41 \text{ cp.}$$

Produciendo por el espacio anular, obteniendo un diámetro equivalente entre las tuberías de inyección y descarga del fluido motriz de :

$$d \text{ equiv.} = \left(\frac{4 \times \text{Area equiv.}}{\pi} \right)^{1/2}$$

$$\text{Area equiv.} = A_1 + A_2 = \left(\frac{\pi \times 1.9^2}{4} \right) \times 2 = 5.6705 \text{ pg}^2$$

$$d \text{ equiv.} = \left(\frac{4 \times 5.6705}{\pi} \right)^{1/2} = (7.22)^{1/2} = 2.687 \text{ pg.} = D2$$

$$D1 = 6.456 \text{ pg.}$$

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones anulares y flujo turbulento, se tiene :

$$F_3 = \frac{202 \times 10^{-8} \times 9500 \left[\frac{(6.456^2 - 2.687^2)}{(6.456 - 2.687)} \right]^{0.21}}{(6.456 - 2.687)(6.456^2 - 2.687^2)^2 \left[\frac{6.456}{(6.456 - 2.687)} \right]^{0.1}} \times \left[\frac{1.41}{0.3926} \right]^{0.21} \times 0.3926 \left] 1420^{1.79}$$

$$F_3 = \frac{3.0542431 \times 10^{-2}}{4723.1266} \times 225503.29 = 2.0 \text{ lb/pg}^2$$

(7) Calcular la presión superficial de inyección del fluido motriz, P_s :

$$P_1 = h_1 G_1 - F_1 + P_s = 9500 \times 0.3574 - 1119 + P_s = 2277 + P_s$$

$$P_2 = h_1 G_1 + F_2 + P_{PR} = 9500 \times 0.3574 + 1119 + 50 = 4565 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_3 = h_1 G_4 + F_3 + P_{wh} = 9500 \times 0.3926 + 2 + 130 = 3862 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 3.10 :

$$2277 + P_s - 4565 - (3862 - 2027) 1.0 - 267 = 0$$

$$P_s = 4390 \text{ lb/pg}^2$$

(8) Calcular la Potencia Superficial .

$$\text{HP sup.} = P_s \times Q_1 \times 1.7 \times 10^{-5} = 4390 \times 2050 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{HP sup.} = 153$$

(9) Calcular la Potencia Subsuperficial.

$$\begin{aligned} \text{HP subsup.} &= (P_3 - P_4) Q_4 \times 1.7 \times 10^{-5} = (3862 - 2027) \times \\ &\times 1420 \times 1.7 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

$$\text{HP subsup.} = 45$$

8. En un pozo se desea instalar el B.H. tipo pistón con bomba libre en sistema abierto con tuberías paralelas (Fig. 3.9), tubería de inyección de 3 1/2 pg. (3 pg. d.i.) y tubería de retorno de - - 1.5 pg. d.i., con gas venteadado a la superficie por el espacio anular y además se conoce la siguiente información :

Profundidad de colocación de la bomba = 10000 pie

Gasto de aceite = 300 bl/día (de 40 °API) a condiciones superficiales.

Gasto de agua = 100 bl/día ($\gamma_w = 1.03$) a condiciones superficiales.

Presión de fondo fluyendo = 620 lb/pg²

Presión en la cabeza del pozo = 100 lb/pg²

Fluido motriz : agua ($\gamma_w = 1.03$)

Temperatura a la profundidad de la bomba = 180 °F

Temperatura superficial = 100 °F

Considerar :

Eficiencia del motor = 90%

Eficiencia de la bomba = 85%

Seleccionar una bomba de la Fig. 3B (3) Apéndice 3B y calcular la presión superficial de inyección del fluido motriz.

Solución :

$$(1) Q_4 = Q_5 + Q_6$$

$$Q_4 = 300 + 100 = 400 \text{ bl/día}$$

De la ec. 3.1 :

$$\frac{P}{E} = \frac{10000}{10000} = 1$$

$$\text{Desplazamiento de la bomba} = \frac{400}{0.85} = 470.58 \text{ bl/día}$$

Entonces de la Fig. 3.B (3) se selecciona la bomba VFR252015 y se obtiene :

$$P/E = 0.74$$

$$q_1 = 8.89 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

$$q_4 = 5.25 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

Capacidad máxima del pistón de la bomba = 9.33 bl/día x SPM

Velocidad máxima = 120 SPM

Capacidad de la bomba al 100% de eficiencia = 630

(2) De la ec. 3.2 :

$$\text{SPM} = \frac{Q_4}{q_4 (Q_4/Q_4^2)}$$

$$\text{SPM} = \frac{400}{8.89 \times 0.85} = 52.93$$

(3) Calcular la caída de presión por fricción en la bomba, F_p ,

De la Fig. 3.29, la viscosidad para el agua a 180 °F es 0.36 cs.

$$\% \text{ de velocidad de bombeo} = \frac{52.93}{120} \times 100 = 44.11$$

entonces de la Fig. 3.27, con la línea de la Fig. 3B (3), 44.11 % de velocidad de bombeo y $J_w = 0.36$ cs., se obtiene :

$$\Delta P = 140 \times Y_w$$

$$\Delta P = 140 \times 1.03 = 144.2 \text{ lb/pg}^2$$

Sustituyendo datos en la ec. 3.6 :

$$F_{PE} = 0.25 (144.2) \left(\frac{5.25}{9.33} \right) (0.85) = 17.24 \text{ lb/pg}^2$$

Como $F_{PE} < 50 \text{ lb/pg}^2$, se desprecia, entonces :

$$F_p = \Delta P = 144.2 \text{ lb/pg}^2$$

- (4) Calcular el gasto de fluido motriz a condiciones superficiales, de la ec. 3.3 :

$$Q_1 = \frac{8.89 \times 52.93}{0.9}$$

$$Q_1 = 522.83 \text{ bi/día a condiciones superficiales}$$

- (5) Calcular la caída de presión por fricción en la tubería de inyección, F_1 :

De la Fig. 3.29, la viscosidad del agua a $\bar{T} = 140^\circ \text{F}$ es 0.46 cs.

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento :

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{(1.03)(0.46)^{0.21} (522.83)^{1.79} (10000)}{(3)^{4.79}}$$

$$F_1 = 3.5 \text{ lb/pg}^2$$

- (6) Calcular el gradiente del fluido de retorno, G_3 :

De la Tabla 3.1 para el aceite de 40 °API, se obtiene

$$G_5 = 0.3574 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_6 = 0.433 \times \gamma_f$$

$$G_6 = 0.433 \times 1.03 = 0.446 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}, \text{ para este caso } G_1 = G_6$$

Sustituyendo datos en la ec. 3.18 :

$$G_3 = \frac{(0.446)(522.83) + (0.3574)(300) + (0.446)(100)}{522.83 + 400}$$

$$G_3 = 0.4172 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

- (7) La densidad relativa de la mezcla es :

$$\gamma_m = \frac{G_3}{0.433}$$

$$\gamma_m = \frac{0.4172}{0.433} = 0.9635$$

- (8) Calcular la caída de presión por fricción en la tubería de retorno, F_3 :

De la Fig. 3.29, la viscosidad del agua $\mu_1 = \mu_6$, a --

$\bar{T} = 140$ °F es 0.46 cs., y de la Fig. 3.28 la viscosidad del aceite, μ_5 , es 2.4 cs.

Sustituyendo datos en la ec. 3.19 :

$$\mu_3 = \frac{(522.83)(0.46) + (300)(2.4) + (100)(0.46)}{522.83 + 400} = 1.091 \text{ cs.}$$

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento :

$$F_3 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{(0.9635) (1.091)^{0.21} (922.83)^{1.79} (10000)}{(1.5)^{4.79}}$$

$$F_3 = 298.5 \text{ lb/pg}^2$$

(9) Calcular la presión superficial de inyección del fluido --
motriz, Ps :

$$P_1 = h_1 G_1 - F_1 + Ps$$

$$P_1 = 10000 \times 0.446 - 3.5 + Ps$$

$$P_1 = 4456.5 + Ps$$

$$P_2 = P_3$$

$$P_3 = h_1 G_3 + F_3 + P_{wh}$$

$$P_3 = 10000 \times 0.4172 + 298.5 + 100$$

$$P_3 = 4570.5 \text{ lb/pg}^2$$

Entonces de la ec. 3.13 y despejando Ps :

$$(4456.5 + Ps) - 4570.5 - (4570.5 - 620) 0.74 - 144.2 = 0$$

$$\underline{Ps = 3182 \text{ lb/pg}^2}$$

9. En un campo se tienen 4 pozos y serán acondicionados con B.H. -
tipo pistón .

Para cada pozo seleccionar una bomba subsuperficial, marca Kobe,
y calcular el gasto de fluido motriz, Ps, HP sup. y HP subsuper-
ficial, considerando un sistema abierto con bomba libre para - -
T.R. (Fig. 3.11). Se cuenta con la información siguiente :

Profundidad de cada pozo = 10000 pie

Presión en la cabeza de cada pozo = 75 lb/pg²

Densidad del aceite producido = 40 °API = densidad del fluido
motriz

Densidad relativa del agua producida = 1.05

Temperatura superficial = 100 °F

Temperatura de fondo = 180 °F

	Pozo # 1	Pozo # 2	Pozo # 3	Pozo # 4
Ø T.R., pg.	5 1/2	5 1/2	7	7
Ø T.I., pg.	2 3/8	2 3/8	2 7/8	2 3/8
q _o , bl/día	80	400	100	600
q _w , bl/día	120	600	500	0
RGA, pie ³ /bl	500	500	500	1000
Pwf, lb/pg ²	500	1000	500	500
Fracción de agua	0.6	0.6	0.83	0.0

Considerar para cada unidad subsuperficial :

Eficiencia de la bomba = 85%

Eficiencia del motor = 90%

Solución :

- (1) Decidir si el gas será venteado o bombeado.

De la Fig. 3.26, con la Pwf, RGA y porcentaje de agua para cada pozo, se obtiene la eficiencia teórica de cada bomba; multiplicando estos valores por 0.85 se obtiene la eficiencia real Q_4/Q_4' y el desplazamiento respectivos :

Pozo	Q ₄ bl/día	Eficiencia debido al resbalamiento	Eficiencia debido al gas	$\frac{Q_4}{Q_4'}$	Q ₄ ' bl/día
1	200	0.85	0.55	0.47	426 i
2	1000	0.85	0.75	0.64	1563 i
3	600	0.85	0.73	0.62	968 i
4	600	0.85	0.17	0.14	4286 i
4	600	0.85		0.85	703 ii

i = Bombeando gas

ii = Venteando gas

Las eficiencias de las bombas, Q_4/Q_4' , son aceptables para los pozos 1, 2 y 3 ; pero el pozo 4 presenta una baja eficiencia, lo cual indica que se debe ventear el gas .

(2) Estimar el nivel dinámico, N.D., de cada pozo :

$$N.D. = \text{Profundidad} - \frac{P_{wf}}{0.433 \times \gamma_f}$$

$$\gamma_f = \frac{Q_5 \gamma_o + Q_6 \gamma_w}{Q_4}$$

De la Tabla 3.1, la densidad relativa del aceite de 40°API es de 0.825

Pozo 1 :

$$\gamma_f = \frac{80 \times 0.825 + 120 \times 1.05}{200} = 0.96$$

$$N.D. = 10000 - \frac{500}{0.433 \times 0.96} = 8797 \text{ pie}$$

Pozo 2 :

$$Y_f = \frac{400 \times 0.825 + 600 \times 1.05}{1000} = 0.96$$

$$N.D. = 10000 - \frac{1000}{0.433 \times 0.96} = 7594 \text{ pie}$$

Pozo 3 :

$$Y_f = \frac{100 \times 0.825 + 500 \times 1.05}{600} = 1.0125$$

$$N.D. = 10000 - \frac{500}{0.433 \times 1.0125} = 8860 \text{ pie}$$

Pozo 4 :

$$Y_f = 0.825$$

$$N.D. = 10000 - \frac{500}{0.433 \times 0.825} = 8600 \text{ pie}$$

(3) Considerando el N.D. como profundidad de colocación de la bomba para cada pozo.

De la ec. 3.1, la relación BOMBA/MOTOR, P/E máx. es :

$$\text{Pozo 1 : } P/E \text{ máx.} = \frac{10000}{8797} = 1.136$$

$$\text{Pozo 2 : } P/E \text{ máx.} = \frac{10000}{7594} = 1.317$$

$$\text{Pozo 3 : } P/E \text{ máx.} = \frac{10000}{8860} = 1.129$$

$$\text{Pozo 4 : } P/E \text{ máx.} = \frac{10000}{8600} = 1.163$$

Con Q_4 (desplazamiento requerido de la bomba) y P/E máx.; del Apéndice 3B, seleccionar los diámetros de bombas para cada pozo, teniendo la restricción de que únicamente se utilizarán bombas marca Kobe.

Para el pozo 1 con T.P. de 2 3/8 pg., se seleccionó una -- bomba de 2 x 1 3/8 - 1 3/8 pg. ver Fig. 3B (10).

Para el pozo 2 con T.P. de 2 3/8 pg., no existen bombas de 2 pg. que manejen los 1563 bl/día requeridos, así que se -- deben considerar las siguientes alternativas :

- (1) Cambiar la T.P. a 2 7/8 pg ó 3 1/2 pg.
- (2) Ventear el gas
- (3) Usar una bomba de mayor diámetro que el diámetro interior de la T.P. y correrla como una bomba fija.

Cambiar la T.P. es más costoso que una bomba fija. Ventear el gas es también costoso y el diámetro de tubería que podría usarse con una T.R. de 5 1/2 pg. será de 1 pg., el cual sería muy pequeño para ventear el gas. Basado en estas consideraciones, se seleccionó correr una instalación tipo fija para T.R., la bomba seleccionada para manejar -- los 1563 bl/día y P/E máx. = 1.317 es de 4 x 2 3/8 - 2 3/8 pg., ver Fig. 3B (8).

Para el pozo 3 con T.P. de 2 7/8 pg., se seleccionó una -- bomba de 2 1/2 x 1 3/4 - 1 3/4 pg., ver Fig. 3B (10) .

Para el pozo 4 con T.P. de 2 3/8 pg., se seleccionó una -- bomba de 2 x 1 3/16 x 1 3/8 - 1 3/8 x 1 3/8 pg., ver - - - Fig. 3B (13)

Pozo	Diám. bomba (pg)	P/E	q ₁ (bl/díaxSPM)	q ₄ (bl/díaxSPM)	Velocidad Máxima, SPM
1	2" x 1 3/8" - 1 3/8"	1.0	4.54	4.50	121
2	4" x 2 3/8" - 2 3/8"	1.0	32.94	32.50	77
3	2 1/2"x1 3/4"-1 3/4"	1.0	10.96	10.86	100
4	2"x1 3/16"x1 3/8" - 1 3/8" x 1 3/16"	0.976	7.79	7.55	121

Para el pozo # 4, el gas deberá ventearse; ya que el pozo tiene T.P. de 2 3/8 pg. concéntrica la T.R. de 7 pg., existe espacio suficiente para instalar una segunda sarta de T.P. de 2 3/8 pg., con lo que se tendrá una instalación libre en paralelo con dos sarts de T.P. de 2 3/8 pg. Esto minimizará las pérdidas de presión por fricción en el fluido de retorno y permitirá ventear el gas por el espacio anular.

$$(4) \text{ Pozo 1, } \text{SPM} = \frac{Q_4'}{q_4} = \frac{426}{4.50} = 95$$

$$\text{Pozo 2, } \text{SPM} = \frac{1563}{32.50} = 48$$

$$\text{Pozo 3, } \text{SPM} = \frac{968}{10.86} = 89$$

$$\text{Pozo 4, } \text{SPM} = \frac{706}{7.55} = 94$$

De la Fig. 3.28, la viscosidad del aceite de 40°API a 180°F es de 1.5 cs.

$$\% \text{ velocidad de bombeo} = \frac{\text{SPM} \times 100}{\text{Velocidad máxima, SPM}}$$

Por diseño :

$$\% \text{ velocidad de bombeo} < 85\%$$

Con este valor y la viscosidad del fluido matriz (aceite) a 180°F y con la Fig. 3.27 se obtiene la caída de presión por fricción en la bomba, F_p :

Pozo 1 :

$$\% \text{ velocidad de bombeo} = \frac{95 \times 100}{121} = 78.5 < 85\% \therefore \text{cumple.}$$

$$\Delta P = 450 \times \gamma_f$$

$$\Delta P = 450 \times 0.8250 = 371 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 3.6 :

$$F_{PE} = \frac{0.25 \times 371 \times 4.50 \times 0.47}{4.50} = 44 \text{ lb/pg}^2$$

como $F_{PE} < 50 \text{ lb/pg}^2$ puede despreciarse, por lo tanto :

$$F_P = \Delta P = 371 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 2 :

$$\% \text{ velocidad de bombeo} = \frac{48 \times 100}{77} = 62.3 < 85\% \therefore \text{ cumple.}$$

$$\Delta P = 280 \times \gamma_f = 280 \times 0.8250 = 231 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_{PE} = \frac{0.25 \times 231 \times 32.50 \times 0.64}{32.50} = 37 \text{ lb/pg}^2 < 50 \text{ lb/pg}^2$$

por lo tanto :

$$F_P = \Delta P = 231 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 3 :

$$\% \text{ velocidad de bombeo} = \frac{89 \times 100}{100} = 89 > 85\% \therefore \text{ no cumple,}$$

pero al tratar con otras bombas, algunas cumplen con los requerimientos dados, pero son más costosas; por lo que se -- mantendrá la bomba inicialmente seleccionada.

$$\Delta P = 560 \text{ lb/pg}^2 \times \gamma_f = 560 \times 0.8250 = 462 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_{PE} = \frac{0.25 \times 462 \times 10.86 \times 0.62}{10.86} = 72 \text{ lb/pg}^2$$

como $F_{PE} > 50 \text{ lb/pg}^2$:

$$F_P = F_{EE} + F_{PE} = 0.75 \Delta P + F_{PE} = 0.75 \times 462 + 72 = \\ = 419 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 4 :

$$\% \text{ velocidad de bombeo} = \frac{94 \times 100}{121} = 77.7 < 85\% \therefore \text{cumple.}$$

$$\Delta P = 650 \times \gamma_f = 650 \times 0.8250 = 536 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_{PE} = \frac{0.25 \times 536 \times 7.55 \times 0.85}{8.90} = 97 \text{ lb/pg}^2$$

como $F_{PE} > 50 \text{ lb/pg}^2$:

$$F_P = 0.75 \times 536 + 97 = 499 \text{ lb/pg}^2.$$

(5) Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales :

Sustituyendo datos en la ec. 3.3, se tiene :

$$\text{Pozo 1 : } Q_1 = \frac{4.54 \times 95}{0.9} = 479 \text{ bl/día}$$

$$\text{Pozo 2 : } Q_1 = \frac{32.94 \times 48}{0.9} = 1757 \text{ bl/día}$$

$$\text{Pozo 3 : } Q_1 = \frac{10.96 \times 89}{0.9} = 1084 \text{ bl/día}$$

$$\text{Pozo 4 : } Q_1 = \frac{7.79 \times 94}{0.9} = 814 \text{ bl/día}$$

(6) Calcular la caída de presión por fricción en la tubería de inyección para cada pozo, F_1 :

De la Fig. 3.28 con $\bar{T} = \frac{100 + 180}{2} = 140$ °F, la viscosidad del aceite de 40 °API como fluido motriz es de 2.1 cs. Y utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento se tiene :

Pozo 1 :

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{0.825 (2.1)^{0.21} (479)^{1.79} \times 10000}{(2)^{4.79}}$$

$$F_1 = 23 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 2 :

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{0.825 (2.1)^{0.21} (1757)^{1.79} \times 10000}{(2)^{4.79}}$$

$$F_1 = 234 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 3 :

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{0.825 (2.1)^{0.21} (1084)^{1.79} \times 10000}{(2.5)^{4.79}}$$

$$F_1 = 34 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 4 :

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{0.825 (2.1)^{0.21} (814)^{1.79} \times 10000}{(2)^{4.79}}$$

$$F_1 = 59 \text{ lb/pg}^2$$

Calcular el gradiente de presión del fluido de retorno de cada pozo :

$$G_1 = G_5 = 0.433 \times 0.825 = 0.3572 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_6 = 0.433 \times 1.05 = 0.4546 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_4 = Q_1 + Q_5 + Q_6$$

Pozo 1 : De la ec. 3.18 :

$$G_3 = \frac{0.3572 (479 + 80) + 0.4546 \times 120}{479 + 200}$$

$$G_3 = 0.3744 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}, \quad \gamma_3 = \frac{0.3744}{0.433} = 0.8647$$

Pozo 2 :

$$G_3 = \frac{0.3572 (1757 + 400) + 0.4546 \times 600}{1757 + 1000}$$

$$G_3 = 0.3784 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}, \quad \gamma_3 = \frac{0.3784}{0.433} = 0.8739$$

Pozo 3 :

$$G_3 = \frac{0.3572 (1084 + 100) + 0.4546 \times 500}{1084 + 600}$$

$$G_3 = 0.3861 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}, \quad \gamma_3 = \frac{0.3861}{0.433} = 0.8917$$

Pozo 4 :

$$G_3 = \frac{0.3572 (814 + 600) + 0.4546 \times 0}{814 + 600}$$

$$G_3 = 0.3572 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}, \quad \gamma_3 = \frac{0.3572}{0.433} = 0.825$$

Calcular la viscosidad en cp. del fluido de retorno :

De la Fig. 3.29, la viscosidad del agua a $T = 140^\circ\text{F}$ es de 0.46 cs.

$$\mu (\text{cp.}) = \nu (\text{cs.}) \times \rho (\text{g/cm}^3)$$

Densidad del agua dulce : 1 g/cm³

Pozo 1 : De la ec. 3.19 :

$$\nu_3 = \frac{2.1 (479 + 80) + 0.46 \times 120}{479 + 200} = 1.81 \text{ cs.}$$

$$\mu_3 = 1.81 \times 0.8647 = 1.56 \text{ cp.}$$

Pozo 2 :

$$\nu_3 = \frac{2.1 (1757 + 400) + 0.46 \times 600}{1757 + 1000} = 1.74 \text{ cs.}$$

$$\mu_3 = 1.74 \times 0.8739 = 1.52 \text{ cp.}$$

Pozo 3 :

$$\nu_3 = \frac{2.1 (1084 + 100) + 0.46 \times 500}{1084 + 600} = 1.61 \text{ cs.}$$

$$\mu_3 = 1.61 \times 0.8917 = 1.43 \text{ cp.}$$

Pozo 4 :

$$\nu_3 = \frac{2.1 (814 + 600) + 0.46 \times 0}{814 + 600} = 2.1 \text{ cs.}$$

- (7) Calcular las caídas de presión por fricción en la tubería de producción (espacio anular) F_3 , utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones anulares y flujo turbulento para los pozos 1, 2 y 3 :

Pozo 1 :

$$F_3 = \left[\frac{202 \times 10^{-8} \times 10000 [(4.778^2 - 2.375^2) / (4.778 - 2.375)]^{0.21}}{(4.778 - 2.375)(4.778^2 - 2.375^2)^2 [4.778 / (4.778 - 2.375)]^{0.1}} \right] \times$$

$$\times \left[\left(\frac{1.56}{0.3744} \right)^{0.21} \times 0.3744 \right] 679^{1.79}$$

$$F_3 = \frac{3.05347 \times 10^{-2}}{760.4786} \times 59229.542 = 2.5 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 2 : Espacio anular entre la T.R. de 5 1/2 x 4.778 pg.
y T.P. de 2 3/8

$$F_3 = \frac{3.05347 \times 10^{-2}}{760.4786} \times \left[\left(\frac{1.52}{0.3784} \right)^{0.21} \times 0.3784 \right] 2757^{1.79}$$

$$F_3 = 30 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 3 : Espacio anular entre la T.R. de 7 x 6.456 pg. y
T.P. de 2 7/8 pg.

$$F_3 = \left[\frac{202 \times 10^{-8} \times 10000 [(6.456^2 - 2.875^2) / (6.456 - 2.875)]^{0.21}}{(6.456 - 2.875)(6.456^2 - 2.875^2)^2 [6.456 / (6.456 - 2.875)]^{0.1}} \right] \times$$

$$\left[\left(\frac{1.43}{0.3861} \right)^{0.21} \times 0.3861 \right] 1684^{1.79}$$

$$F_3 = \frac{3.22876 \times 10^{-2}}{4240.9706} \times 302876.62 = 2.4 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 4 : T.P. de 2 3/8 pg. Utilizando la ecuación del Apén
dice 3A para secciones circulares y flujo turbu-
lento, se tiene :

$$F_3 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 0.8250 \times 2.1^{0.21} \times 1414^{1.79} \times 10000}{2^{4.79}}$$

$$F_3 = 159 \text{ lb/pg}^2$$

(8) Calcular la presión superficial, P_s .

$$P_1 = h_1 G_1 - F_1 + P_s$$

$$P_3 = h_1 G_3 + F_3 + P_{wh}$$

$$P_1 - P_3 - (P_3 - P_4) P/E - F_p = 0$$

$$P_s = -(h_1 G_1 - F_1) + P_3 (1 + P/E) - P_4 (P/E) + F_p$$

Pozo 1 :

$$P_1 = 10000 \times 0.3572 - 23 + P_s = 3549 + P_s$$

$$P_3 = 10000 \times 0.3744 + 2.5 + 75 = 3822 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_s = -3549 + 3822 (1 + 1.0) - 500 (1.0) + 371$$

$$P_s = 3966 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 2 :

$$P_1 = 10000 \times 0.3572 - 234 + P_s = 3338 + P_s$$

$$P_3 = 10000 \times 0.3784 + 30 + 75 = 3889 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_s = -3338 + 3889 (1 + 1.0) - 1000 (1.0) + 231$$

$$P_s = 3671 \text{ lb/pg}^2$$

Pozo 3 :

$$P_1 = 10000 \times 0.3572 - 34 + P_s = 3538 + P_s$$

$$P_3 = 10000 \times 0.3861 + 2.4 + 75 = 3939 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_s = -3538 + 3939 (1 + 1.0) - 500 (1.0) + 419$$

$$\underline{P_s = 4259 \text{ lb/pg}^2}$$

Pozo 4 :

$$P_1 = 10000 \times 0.3572 - 59 + P_s = 3513 + P_s$$

$$P_3 = 10000 \times 0.3572 + 159 + 75 = 3806 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_s = -3513 + 3806 (1 + 0.976) - 500 (0.976) + 499$$

$$\underline{P_s = 4019 \text{ lb/pg}^2}$$

(9) Potencias requeridas por las bombas :

Bomba superficial

$$\text{HP sup.} = P_s \times Q_1 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\underline{\text{Pozo 1 : HP sup.} = 3966 \times 479 \times 1.7 \times 10^{-5} = 33}$$

$$\underline{\text{Pozo 2 : HP sup.} = 3671 \times 1757 \times 1.7 \times 10^{-5} = 110}$$

$$\underline{\text{Pozo 3 : HP sup.} = 4259 \times 1084 \times 1.7 \times 10^{-5} = 79}$$

$$\underline{\text{Pozo 4 : HP sup.} = 4019 \times 814 \times 1.7 \times 10^{-5} = 56}$$

FLUIDO MOTRIZ.

$$Q_1 \text{ TOTAL} = 479 + 1757 + 1084 + 814 = 4134 \text{ bl/día}$$

$$P_s \text{ TOTAL} = 4259 \text{ lb/pg}^2 \text{ (La máxima presión en superficie -- calculada)}$$

$$\text{HP TOTAL} = 4134 \times 4259 \times 1.7 \times 10^{-5} = 300 \text{ HP} *$$

En la práctica real, las bombas superficiales podrían ser diseñadas con 200 lb/pg² arriba de la presión requerida. Esto provee las caídas de presión a través de las válvulas de control superficial. Entonces se tiene :

Pozo	Q ₁ (bl/día)	P _s + 200 (lb/pg ²)	Potencia Sup. real (HP)	Potencia Sub- superficial (HP)
1	479	4166	34	12
2	1757	3871	116	50
3	1084	4459	83	35
4	814	4219	59	34
TOTAL	4134	4459	314	

Bombas Subsuperficiales.

$$\text{HP subsup.} = (P_3 - P_4) \times Q_4 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{Pozo 1 : } \underline{\text{HP subsup.}} = (3822 - 500) \times 200 \times 1.7 \times 10^{-5} = \underline{12}$$

$$\text{Pozo 2 : } \underline{\text{HP subsup.}} = (3889 - 1000) \times 1000 \times 1.7 \times 10^{-5} = \underline{50}$$

$$\text{Pozo 3 : } \underline{\text{HP subsup.}} = (3939 - 500) \times 600 \times 1.7 \times 10^{-5} = \underline{35}$$

$$\text{Pozo 4 : } \underline{\text{HP subsup.}} = (3806 - 500) \times 600 \times 1.7 \times 10^{-5} = \underline{34}$$

* Si se emplea una planta central para la inyección del --- fluido motriz a los 4 pozos.

10. Determinar el gasto de inyección del fluido motriz, la presión superficial de inyección y las potencias superficial y subsuperficial de una instalación de B. H. tipo pistón, para un pozo con las características siguientes :

Profundidad de colocación de la bomba = 12000 pie

Diámetro de la tubería de revestimiento = 7 pg. d. e.
(6.456 pg. d. i.)

Diámetro de la tubería de inyección = 2 7/8 pg. d.e.

Diámetro de la tubería de retorno del fluido motriz =
1.9 pg. (1.5 pg. d. i.)

Produciendo por espacio anular .

Presión de fondo estática = 2400 lb/pg²

Índice de productividad = 1.0 bl/día/lb/pg² (constante)

Presión en la cabeza del pozo = 135 lb/pg²

Presión superficial en la tubería de retorno del fluido motriz
= 55 lb/pg²

Gasto de producción deseado = 420 bl/día

Producción de agua = 30 %

Densidad relativa del agua = 1.03

Densidad del aceite producido = 40 °API

Relación gas-aceite = 400 pie³/bl

Fluido motriz = agua con densidad relativa igual a 1.02

Temperatura superficial = 120 °F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 220 °F

Considerar :

Eficiencia de la bomba = 80 %

Eficiencia del motor = 85%

Sistema cerrado con bomba libre para T. R. , similar a la - -

Fig. 3.12

Solución :

(1) Determinar la presión de fondo fluyendo ,

$$P_{wf} = P_{ws} - \frac{q}{IP} = 2400 - \frac{420}{1.0} = 1980 \text{ lb/pg}^2$$

(2) Tipo de instalación.

Sistema cerrado con bomba libre para T. R.

(3) Capacidad de la bomba .

De la Fig. 3.26 con $P_{wf} = 1980 \text{ lb/pg}^2$, $R = 400 \text{ pie}^3/\text{bl}$ y 30% agua, la eficiencia teórica de la bomba es de 93.5 % por lo que el gas puede pasar a través de la bomba (por ser la eficiencia teórica muy alta)

De la ec. 3.2 :

$$Q_4' = \frac{Q_4}{\left(\frac{Q_4}{Q_4'}\right)} = \frac{420}{0.8 \times 0.935} = \frac{420}{0.748} = 562 \text{ bl/día}$$

- (4) Seleccionar la bomba subsuperficial .

De la ec. 3.1 :

$$\frac{P}{E} \text{ real} = \frac{10000}{12000} = 0.833$$

De la Fig. 3B (4), Apéndice 3B se seleccionó una bomba - -
VFR20161616 con :

$$P/E = 0.81$$

$$q_1 = 6.86 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

$$q_4 = 4.49 \text{ bl/día} \times \text{SPM}$$

Velocidad máxima = 150 SPM

Capacidad de la bomba al 100% de eficiencia = 673 bl/día

Capacidad máxima del pistón de la bomba = 4.49 bl/día x SPM

De la ec. 3.2 :

$$\text{SPM} = \frac{q_4}{q_4 \times \left(\frac{q_4}{q_4'} \right)} = \frac{420}{4.49 \times 0.748} = 125$$

$$\begin{aligned} \% \text{ de la velocidad de bombeo} &= \frac{\text{SPM} \times 100}{\text{Velocidad máxima, SPM}} \\ &= \frac{125 \times 100}{150} = 83.3 \end{aligned}$$

como 83.3% < 85% por lo tanto cumple.

- (5) De la Fig. 3.29, la viscosidad del agua a una temperatura -
de 220 °F es de 0.28 cs.

De la Fig. 3.27, con la línea correspondiente a la Fig. 3B
(4), $\mu_w = 0.28 \text{ cs.}$ y 83.3% de la velocidad de bombeo :

$$\Delta P = 700 \times Y_w = 700 \times 1.02 = 714 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 3.6 :

$$F_{PE} = \frac{0.25 \times 714 \times 4.49 \times 0.748}{4.49} = 134 \text{ lb/pg}^2$$

como $F_{PE} > 50 \text{ lb/pg}^2$, entonces :

$$F_p = 0.75 \Delta P + F_{PE} = 0.75 \times 714 + 134 = 670 \text{ lb/pg}^2$$

Gasto de fluido motriz, Q_1

De la ec. 3.3 :

$$Q_1 = \frac{6.86 \times 125}{0.85}$$

a). $Q_1 = 1009 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

- (6) Calcular las pérdidas de presión por fricción en la tubería de inyección, de retorno y espacio anular.

De la Fig. 3.29, a una temperatura media de - - - -

$\bar{T} = \frac{120 + 220}{2} = 170 \text{ }^\circ\text{F}$, la viscosidad del agua es de - -

0.38 cs.

Para la tubería de inyección del fluido motriz, utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y -- flujo turbulento, con :

$d = 2.5 \text{ pg.}$

$L = 12000$

$j = 0.38 \text{ cs.}$

$Y = 1.02$

$q = 1009 \text{ bl/día ; se tiene :}$

$$F_1 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 1.02 \times 0.38^{0.21} \times 1009^{1.79} \times 12000}{2.5^{4.79}} = 31 \text{ lb/pg}^2$$

Para la tubería de retorno del fluido motriz, con $d = 1.5 \text{ pg}$.

$$F_2 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 1.02 \times 0.38^{0.21} \times 1009^{1.79} \times 12000}{1.5^{4.79}} = 357 \text{ lb/pg}^2$$

Para el espacio anular :

De la Fig. 3.28, la viscosidad del aceite producido de - -
40 °API a una temperatura media de 170 °F es de 1.75 cs.

De la Fig. 3.29, la viscosidad del agua producida a una --
temperatura media de 170 °F es de 0.38 cs.

$$G_4 = \frac{Q_5 G_5 + Q_6 G_6}{Q_4}$$

De la Tabla 1, para el aceite de 40 °API, $\gamma_o = 0.8251$ y

$$G_5 = 0.3574 \text{ lb/pg}^2/\text{pie} .$$

$$G_6 = 0.433 \times \gamma_w = 0.433 \times 1.03 = 0.4460 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$G_4 = \frac{420 \times 0.7 \times 0.3574 + 420 \times 0.3 \times 0.4460}{420} = 0.3839 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\gamma_4 = \frac{G_4}{0.433} = \frac{0.3839}{0.433} = 0.8866$$

$$\rho_4 = \frac{Q_5 \rho_5 + Q_6 \rho_6}{Q_4}$$

$$\rho_4 = \frac{420 \times 0.7 \times 1.75 + 420 \times 0.3 \times 0.38}{420} = 1.339 \text{ cs.}$$

$$\rho_4 = 0.8866 \times 1.0 \text{ g/cm}^3 = 0.8866 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_4 = C_4 \times V_4 = 0.8866 \times 1.339 = 1.19 \text{ cp.}$$

Produciendo por el espacio anular, obteniendo un diámetro equivalente entre las tuberías de inyección y descarga del fluido motriz de :

$$d \text{ equiv.} = \left(\frac{4 \times \text{Area equiv.}}{\pi} \right)^{1/2}$$

$$\text{Area equiv.} = A_1 + A_2 = \frac{\pi}{4} (2.875^2 + 1.9^2) = 9.327 \text{ pg}^2$$

$$d \text{ equiv.} = \left(\frac{4 \times 9.327}{\pi} \right)^{1/2} = 3.446 \text{ pg.} = D2$$

$$D1 = 6.456 \text{ pg.}$$

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones anulares y flujo turbulento, se tiene :

$$F_3 = \left[\frac{202 \times 10^{-8} \times 12000 [(6.456^2 - 3.446^2) / (6.456 - 3.446)]^{0.21}}{(6.456 - 3.446)(6.456^2 - 3.446^2)^2 [6.456 / (6.456 - 3.446)]^{0.1}} \right] \times$$

$$\left[\left(\frac{1.19}{0.3839} \right)^{0.21} \times 0.3839 \right] \times 430^{1.79}$$

$$F_3 = \frac{3.9231456 \times 10^{-2}}{2885.9249} \times 25194.498 = 0.342 = 0 \text{ lb/pg}^2$$

(7) Calcular la presión superficial de inyección del fluido motriz, Ps.

$$G_1 = 1.02 \times 0.433 = 0.4416 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$P_1 = h_1 G_1 - F_1 + P_s = 12000 \times 0.4416 - 31 + P_s = 5268 + P_s$$

$$P_2 = h_1 G_1 + F_2 + P_{PR} = 12000 \times 0.4416 + 357 + 55 = 5711 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_3 = h_1 G_4 + F_3 + P_{wh} = 12000 \times 0.3839 + 0 + 135 = 4742 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 3.10 :

$$5268 + P_s - 5711 - (4742 - 1980) 0.81 - 670 = 0$$

$$\text{b) } \underline{P_s = 3350 \text{ lb/pg}^2}$$

(8) Calcular la Potencia de la bomba superficial

$$\text{HP sup.} = P_s \times Q_1 \times 1.7 \times 10^{-5} = 3350 \times 1009 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{c) } \underline{\text{HP sup.} = 58}$$

(9) Calcular la Potencia de la bomba subsuperficial.

$$\text{HP subsup.} = (P_3 - P_4) Q_4 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{HP subsup.} = (4742 - 1980) 420 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$\text{d) } \underline{\text{HP subsup.} = 20}$$

PROBLEMAS PROPUESTOS

SERIE I. VI

- 1.1 En un pozo de 15000 pie de profundidad será instalado el B.H. - tipo pistón y se conocen los datos siguientes :

Presión de fondo estática = 2000 lb/pg²

Presión de fondo fluyendo = 1500 lb/pg²

Presión de saturación = 2000 lb/pg²

Gasto de aceite = 100 bl/día a condiciones superficiales

Densidad del aceite = 40 °API

Producción de agua = 0%

Calcular la capacidad de la bomba para producir en la superficie :

- a). 100 bl/día de aceite con una relación gas-aceite de 600 pie³/bl
- b). 150 bl/día de aceite con una relación gas-aceite de 1000 pie³/bl

Considerar que el gas pasa por la bomba en ambos casos.

Solución :

a). $Q_4' = 161$ bl/día a condiciones de bomba.

b). $Q_4' = 441$ bl/día a condiciones de bomba.

- 1.2 Utilizando los datos del problema resuelto 2 y empleando las --- Figs. 3B (4) a la (7) y de la (9) a la (14) del Apéndice 3B, seleccionar la bomba subsuperficial adecuada.

Solución :

Figs. 3B	Bombas Seleccionadas pg.	Relación P/E	Desplaza- miento bl/día
(4)	VFR 25202015	0.41	630
	VFR 25202017	0.56	858
	VFR 25202020	0.73	1119
(5)	V 2511118	1.18	1419
	V 2511095	0.95	1299
(6)	V 2521075	0.75	1173
	V 2521063	0.63	1072
(7)	251616	1.00	455
	252016	0.64	540
	252018	0.81	683
	252020	1.00	841
(9)	$2 \frac{1}{2} \times 1 \frac{7}{16} \times 1 \frac{1}{4} \times 1 \frac{1}{4}$	1.40	984
(10)	$2 \frac{1}{2} \times 1 \frac{3}{4} \times 1 \frac{1}{2}$	0.685	744
(11)	$2 \frac{1}{2} \times 1 \frac{3}{4} \times 1 \frac{1}{2} \times 1 \frac{1}{2}$	1.336	1452
(12)	$2 \frac{1}{2} \times 1 \frac{7}{16} \times 1 \frac{3}{4} \times 1 \frac{1}{2}$	0.411	744
	$2 \frac{1}{2} \times 1 \frac{7}{16} \times 1 \frac{3}{4} \times 1 \frac{3}{4}$	0.608	1086
(13)	$2 \frac{1}{2} \times 1 \frac{7}{16} \times 1 \frac{3}{4} \times 1 \frac{1}{2} \times 1 \frac{1}{2}$	0.813	1452
	$2 \frac{1}{2} \times 1 \frac{7}{16} \times 1 \frac{3}{4} \times 1 \frac{3}{4} \times 1 \frac{1}{2}$	0.976	1794
	$2 \frac{1}{2} \times 1 \frac{7}{16} \times 1 \frac{3}{4} \times 1 \frac{3}{4} \times 1 \frac{3}{4}$	1.196	2136
(14)	$2 \frac{1}{2} \times 1 \frac{3}{4}$	1.146	2397

* Desplazamiento al 100% de eficiencia volumétrica.

- 1.3 Dada la información de un pozo acondicionado en B.H. tipo pistón :

Profundidad de colocación de la bomba = 8000 pie

Diámetro exterior de T.P. = 2 7/8 pg.

Gasto de aceite = 650 bl/día a condiciones superficiales

Producción de agua = 0%

Seleccionar dos bombas fijas para T.R. en sistema cerrado, Fig. 3.8, que operen al 80% de su capacidad.

Solución :

Figs. 3B	Bomba Seleccionada pg.	Relación P/E	Desplazamiento * bl/día
(2)	2 1/2 x 2 x 2	1.21	831
(3)	VFR 252017	1.00	858

* Desplazamiento al 100% de eficiencia volumétrica .

- 1.4. Calcular el gasto de fluido motriz a condiciones superficiales - para un pozo con B.H. tipo pistón, si se tienen los siguientes - datos :

Gasto de aceite = 300 bl/día a condiciones superficiales

Gasto de agua = 200 bl/día a condiciones superficiales

Desplazamiento del motor, $q_1 = 30.80$ bl/día x SPM

Desplazamiento de la bomba, $q_4 = 23.60$ bl/día x SPM

Considerar :

Eficiencia del motor = 85%

Eficiencia de la bomba = 75%

Solución :

$$Q_1 = 1024 \text{ bl/día a condiciones superficiales.}$$

- 1.5 Con los datos del problema resuelto 4, seleccionar la bomba adecuada y calcular : la presión superficial de inyección del fluido motriz y las potencias superficial y subsuperficial para un pozo con B.H. tipo pistón, considerando como fluido motriz - agua de densidad relativa 1.04

Solución :

Bomba de $2 \times 1 \frac{3}{16} \times 1 \frac{3}{8} - 1 \frac{3}{8} \times 1 \frac{3}{8}$ pg.

$$Q_1 = 843 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$$

$$P_s = 4226 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{HP sup.} = 61$$

$$\text{HP subsup.} = 25$$

SERIE 2.VI

2.1 Con los datos del problema resuelto 6, considerando como fluido motriz agua ($\gamma_w = 1.03$) para ambos pozos, determinar :

- Gasto de fluido motriz para cada pozo.
- Presión superficial de inyección del fluido motriz .
- Potencia de las bombas superficial y subsuperficial.

Solución :

a) Pozo 1 : $Q_1 = 1668 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

Pozo 2 : $Q_1 = 998 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

b) Pozo 1 : $P_s = 2357 \text{ lb/pg}^2$

Pozo 2 : $P_s = 3076 \text{ lb/pg}^2$

c) Pozo 1 : $HP_{sup.} = 67$
 $HP_{subsup.} = 40$

Pozo 2 : $HP_{sup.} = 53$
 $HP_{subsup.} = 19$

2.2 Con los datos del problema resuelto 7, considerando como fluido motriz agua de densidad relativa = 1.02, determinar :

- a) Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales.
- b) Presión superficial de inyección del fluido motriz.
- c) Potencia superficial .
- d) Potencia subsuperficial.

Solución :

a) $Q_1 = 2050 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

b) $P_s = 4199 \text{ lb/pg}^2$

c) $HP \text{ sup.} = 147$

d) $HP \text{ subsup.} = 45$

2.3 Con los datos del problema resuelto 5, considerando un sistema cerrado con tubería de inyección concéntrica a la tubería de --descarga, bomba fija para T.R. y produciendo por espacio anular (Fig. 3.8), obtener la P sup., HP superficial y HP subsuperficial .

Solución :

a). $Q_1 = 1630 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

b). $P_s = 3675 \text{ lb/pg}^2$

c). $HP \text{ sup.} = 102$

d). $HP \text{ subsup.} = 31$

- 2.4 Con los datos del problema resuelto 5, pero considerando para un sistema cerrado, con tubería de inyección concéntrica a la tubería de descarga, bomba fija para T.R. y produciendo por espacio anular (Fig. 3.8), con fluido motriz aceite de 35 °API, obtener Q_1 , Ps, HP sup. y HP subsup.

Solución :

- a). $Q_1 = 1630$ bl/día a condiciones superficiales
- b). $P_s = 3875$ lb/pg²
- c). $HP_{sup.} = 108$
- d). $HP_{subsup.} = 31$

- 2.5 En un pozo de B.H. tipo pistón, con bomba libre en sistema abierto, con tuberías paralelas, Fig. 3.9, tubería de inyección de 3 pg. d.i. y tubería de retorno de 1 1/4 pg. d.i. y gas venteadado a la superficie por el espacio anular, cuenta con la información siguiente :

Gasto de aceite = 200 bl/día a condiciones superficiales
(40 °API)

Gasto de agua = 100 bl/día a condiciones superficiales
($\gamma_w = 1.03$)

Presión de fondo fluyendo = 600 lb/pg²

Presión en cabeza del pozo = 75 lb/pg²

Profundidad de colocación de la bomba = 10000 pie

Temperatura superficial = 100 °F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 180 °F

Fluido motriz = aceite de 40 °API

Considerar :

Eficiencia del motor = 90 %

Eficiencia de la bomba = 85 %

Calcular la presión superficial de inyección del fluido matriz
Ps. De la Fig. 3B (7), Apéndice 3B, considerar la bomba - - -
252020

Solución :

$$P_s = 4436 \text{ lb/pg}^2$$

SERIE 3.VI

- 3.1 Con los mismos datos del problema propuesto 2.5, calcular la -- presión de inyección del fluido motriz. Considerar la bomba -- 252016 de la Fig. 3B (7), Apéndice 3B

Solución :

$$P_s = 3663 \text{ lb/pg}^2$$

- 3.2 En un pozo se desea diseñar una instalación de B.H. tipo pistón en sistema abierto con tuberías paralelas y bomba libre (Fig. 3.9). Se cuenta con la siguiente información :

Profundidad de colocación de la bomba = 9200 pie

Diámetro de tubería de revestimiento = 7 pg. (6.456 pg. d.i.)

Diámetro de tubería de inyección = 2 7/8 pg. (2.5 pg. d.i.)

Diámetro de tubería de producción = 1 7/8 pg. (1.5 pg. d.i.)

Presión de fondo fluyendo = 700 lb/pg²

Presión en la cabeza del pozo = 85 lb/pg²

Gasto de líquido = 350 bl/día a condiciones superficiales

Producción de agua = 27% ($\gamma_w = 1.03$)

Densidad relativa del aceite producido = 40 °API

Temperatura en cabeza del pozo = 100 °F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 175 °F

Relación gas-aceite = 600 pie³/bl

Fluido motriz = aceite de 40 °API

Considerar :

Eficiencia de la bomba = 85 %

Eficiencia del motor = 90%

Calcular :

- a). Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales .
- b). Presión superficial de inyección del fluido motriz .
- c). Potencia de la bomba superficial .
- d). Potencia de la bomba subsuperficial .

Solución :

- a). $Q_1 = 458 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$
- b). $P_s = 3836 \text{ lb/pg}^2$
- c). $\text{HP sup.} = 30$
- d). $\text{HP subsup.} = 18$

- 3.3 Resolver el problema propuesto 3.2, considerando que el fluido motriz es agua con densidad relativa = 1.03

Solución :

- a). $Q_1 = 458 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$
- b). $P_s = 3944 \text{ lb/pg}^2$
- c). $\text{HP sup.} = 31$
- d). $\text{HP subsup.} = 21$

- 3.4 En un pozo de 9000 pie de profundidad se instalará el B.H. tipo pistón. Seleccionar una bomba subsuperficial y calcular el gasto de fluido motriz, P_s , HP sup. y HP subsuperficial, considerando sistema abierto con bomba fija para T.R. (Fig. 3.6) pro--

duciendo por espacio anular. Además se cuenta con la informa--
ción siguiente :

Diámetro de tubería de revestimiento = 5 1/2 pg. (4.154 pg.d.i.)
Diámetro de tubería de inyección = 2 3/8 pg. d.e.
Profundidad de colocación de la bomba = 7500 pie
Presión de fondo estática = 2000 lb/pg²
Presión en la cabeza del pozo = 110 lb/pg²
Índice de productividad = 1.0 bl/día/lb/pg² (constante)
Producción bruta = 700 bl/día a condiciones superficiales
Producción de agua = 40% a condiciones superficiales ($\gamma_w = 1.07$)
Densidad del aceite producido = 35 °API
Relación gas-aceite = 400 pie³/bl
Temperatura superficial = 80 °F
Temperatura a la profundidad de la bomba = 180 °F
Fluido matriz = aceite de 35 °API
Considerar :
Eficiencia de la bomba = 85%
Eficiencia del motor = 90%

Solución :

Bomba V25-11-095

$Q_1 = 1170$ bl/día a condiciones superficiales

$P_s = 2372$ lb/pg²

HP sup. = 48

HP subzup. = 21

- 3.5 Con los datos del problema resuelto 9 y del Apéndice 3B Fig. 3B (13), considerando la bomba de 2 1/2 x 1 7/16 x 1 3/4 - 1 3/4 x 1 1/2 pg. para el pozo 3, determinar el HP superficial requerida

para este pozo y HP superficial total para los cuatro pozos, - si se tiene una planta central de inyección del fluido motriz. Incrementar 200 lb/pg² a la presión de inyección del fluido motriz requerida para permitir una operación adecuada de las válvulas de control superficial.

Solución :

Pozo	Q ₁ (bl/día)	Ps + 200 (lb/pg ²)	Potencia Sup. real (HP)	Potencia Sub - superficial (HP)
1	479	4166	34	12
2	1757	3871	116	50
3	1080	4263	79	35
4	814	4219	59	34
TOTAL	4130	4263	300	

SERIE 4. VI

- 4.1 Con los datos del problema resuelto 5, pero considerando como fluido motriz aceite de 35 °API, obtener la P sup., HP sup. y HP subsuperficial.

Solución :

- a). $Q_1 = 1630$ bl/día a condiciones superficiales. |
b). $P_s = 3899$ lb/pg² |
c). $HP_{sup.} = 108$ |
d). $HP_{subsup.} = 31$ |

- 4.2 Calcular el gasto de fluido motriz, la P_s, HP sup. y HP subsuperficial para un pozo con una instalación de B.H. tipo pistón que cuenta con la información siguiente :

Diámetro de tubería de revestimiento = 5 1/2 pg. (4.778 pg.d.i.)

Diámetro de tubería de inyección = 2 3/8 pg. (2 pg. d.i.)

Profundidad de colocación de la bomba = 7000 pie

Presión de fondo estática = 1530 lb/pg²

Presión en cabeza del pozo = 100 lb/pg²

Índice de productividad = 1.0 bl/día/lb/pg² (constante)

Gasto de líquido = 430 bl/día a condiciones superficiales

Producción de agua = 25% ($\gamma_w = 1.03$)

Densidad del aceite producido = 30 °API

Relación gas-aceite = 350 pie³/bl

Temperatura superficial = 90 °F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 170 °F

Fluido motriz = aceite de 30 °API

Eficiencia de la bomba = 85%

Eficiencia del motor = 80%

Además seleccionar el tipo de instalación con la información dada.

Solución :

Instalación de sistema abierto con bomba fija para T.R.

Bomba 2 x 1 3/16 x 1 3/8 - 1 3/16 x 1 3/16 pg.

$Q_1 = 993$ bl/día a condiciones superficiales

$P_s = 2241$ lb/pg²

HP sup. = 38

HP subsup. = 13

- 4.3 Seleccionar el tipo de instalación de B.H. tipo pistón y calcular : el gasto del fluido motriz P_s , HP sup. y HP subsuperficial con la información siguiente :

Diámetro de tubería de revestimiento = 7 pg. (6.456 pg. d.i.)

Diámetro de tubería de inyección = 2 7/8 pg. (2.5 pg. d.i.)

Profundidad de colocación de la bomba = 8000 pie

Gasto de líquido = 800 bl/día a condiciones superficiales

Producción de agua = 30% ($\gamma_w = 1.03$)

Índice de productividad = 1.5 bl/día/lb/pg² (constante)

Relación gas-aceite = 400 pie³/bl

Presión de fondo estática = 1600 lb/pg²

Presión en la cabeza del pozo = 120 lb/pg²

Densidad del aceite producido = 40 °API

Temperatura superficial = 100 °F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 180 °F

Fluido motriz : aceite de 40 °API

Eficiencia del motor = 80 %

Eficiencia de la bomba = 80 %

Solución : Instalación con sistema abierto y bomba fija para T.R.

Bomba de 3 x 1 3/4 x 2 1/8 - 1 7/8 x 1 7/8 pg.

$Q_1 = 1787$ bl/día a condiciones superficiales.

$P_s = 2260$ lb/pg²

HP sup. = 69

HP subsup. = 27

- 4.4 Con los mismos datos del problema resuelto 8, pero considerando un sistema cerrado con bomba libre para T.R. (Fig. 3.12), tuberías paralelas y produciendo por espacio anular, el gas pasa -- por la bomba y además se tienen los datos siguientes :

Tubería de revestimiento = 7 pg. (6.456 pg. d.i.)

Relación gas-aceite = 400 pie³/bl

Presión en la tubería de retorno = 50 lb/pg²

Seleccionar una bomba de la Fig. 3B (4) Apéndice 3B y calcular la presión superficial de inyección del fluido motriz .

Solución :

Bomba VFR25202020 pg.

$P_s = 3531$ lb/pg²

- 4.5 Calcular la presión superficial de inyección del fluido motriz, para el problema propuesto 2.5, considerando bomba fija para -- T.R. en sistema cerrado con tuberías paralelas (Fig. 3.7) y que el gas pasa por la bomba. Se tienen además los siguientes datos adicionales :

Diámetro de tubería de inyección = 1 1/4 pg. (1.66 pg. d.e.)

Diámetro de tubería de retorno = 1 1/4 pg. (1.66 pg. d.e.)

Tubería de producción : el espacio anular con T.R. de 5 pg.d.i.

Relación gas-aceite = 200 pie³/bl

Contrapresión en tubería de retorno = 30 lb/pg²

De la Fig. 3B (2), Apéndice 3B, utilizar la bomba de 2 1/2 x 2 x 1 1/2 pg. y considerar :

Eficiencia de la bomba = 85%

Eficiencia del motor = 90%

Solución :

$$P_s = 3973 \text{ lb/pg}^2$$

G L O S A R I O

- Bomba fija:** Bomba unida mecánicamente a la tubería por lo que su introducción o extracción del pozo va ligada a dicha tubería.
- Bomba libre:** La bomba no está conectada a ninguna de las tuberías, por lo que puede ser anclada por circulación del fluido motriz y desanclada por circulación inversa.
- Circuito o sistema abierto:** El fluido motriz retorna a la superficie mezclado con los fluidos producidos, ya sea a través de la tubería de descarga o por el espacio anular de las tuberías o por el espacio anular de las tuberías de revestimiento, producción o inyección, dependiendo del equipo subsuperficial que se tenga.
- Circuito o sistema cerrado:** El fluido motriz retorna a la superficie, independientemente de los fluidos producidos, fluyendo nuevamente hasta el tanque de almacenamiento.
- Fluido motriz:** Fluido inyectado a presión al pozo por una unidad de potencia superficial.
- Flujo turbulento:** Flujo en el cual las partículas se mueven en forma desordenada en todas direcciones.
- Relación bomba/motor (P/E):** Es la relación del área neta de la bomba con respecto al área neta del motor

Viscosidad cinemática (ν):

Es la relación de dividir la viscosidad absoluta entre la densidad de un fluido.

REFERENCIAS

- 1) Gómez Cabrera J. Angel; "Apuntes de Producción de Pozos I"; Facultad de Ingeniería U.N.A.M., 1988.
- 2) López Juvera Ramón; "Aplicación del Análisis Nodal en el Diseño de Instalaciones de Bombeo Hidráulico"; Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería U.N.A.M., 1986.
- 3) Conrado Jiménez Guzmán y Roger Paulino Ortiz Polo; "Aplicación del Bombeo Hidráulico en Pozos Petroleros ". Tesis profesional, Facultad de Ingeniería U.N.A.M., 1988.
- 4) De Antuñano Muñoz Yuri y Martínez Pérez José; "Bombeo Hidráulico Tipo Pistón"; Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería U.N.A.M., 1985.

CAPITULO VII

BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET (A CHORRO)

Generalidades.

El bombeo hidráulico tipo jet es un sistema artificial de producción especial, a diferencia del tipo pistón, no ocupa partes móviles y su acción de bombeo se realiza por medio de transferencia de energía entre el fluido motriz y los fluidos producidos.

Las bombas jet operan bajo el principio de Venturi Fig.7.1.

El fluido motriz a alta presión entra en la tobera de la bomba, la presión se reduce debido a la alta velocidad del fluido motriz. Esta reducción de la presión hace que el fluido producido se introduzca en la cámara y se mezcle con el fluido motriz.

En el difusor, la energía en forma de alta velocidad es convertida en una alta presión, suficiente para bombear el gasto de fluido motriz y fluido producido a la superficie. Por lo anterior, en el sistema de bombeo hidráulico tipo jet únicamente se tendrá el sistema abierto de fluido motriz.

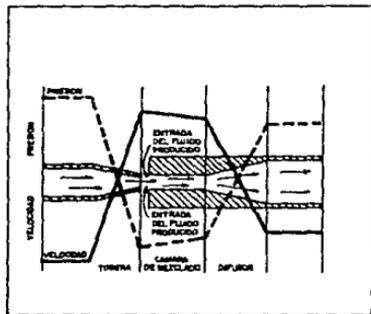


Fig. 7.1 Comportamiento de la velocidad⁽²⁾ y la presión en una bomba Jet.

En este sistema artificial de producción se requiere de una presión de succión relativamente alta para evitar la cavitación, - además de que la eficiencia mecánica es baja; sin embargo presenta ventajas sobre el bombeo hidráulico tipo pistón como son: permite manejar cualquier tipo de fluidos (aún contaminados); - la bomba subsuperficial es de fácil instalación; se adapta a -- a cualquier profundidad en el pozo; permite obtener gastos mayores. Al igual que el bombeo hidráulico tipo pistón, el tipo jet utiliza agua o aceite como fluido motriz. Las bombas jet - generalmente requieren más potencia superficial que las bombas tipo pistón ya que son menos eficientes.

En este capítulo se tratan problemas relacionados a los cálculos de eficiencia de las bombas jet, así como los correspondientes a los parámetros de diseño (gasto de inyección del fluido motriz, presión de inyección del fluido motriz, y potencias de las bombas subsuperficial y superficial) de las instalaciones de bombeo hidráulico tipo jet.

Cabe aclarar que en dichos problemas para calcular la presión de descargas de la bomba subsuperficial, P_2 , se utilizaron curvas de gradiente de presión en tubería vertical (para el caso donde el gas pasa a través de la bomba) similares a las que aparecen en la referencia 4.

BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET (A CHORRO)

PROBLEMAS RESUELTOS

1. Una instalación de Bombeo Hidráulico tipo jet, cuenta con la información siguiente:

$$\text{Presión a la entrada de la tobera} = 5000 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Presión de descarga} = 2500 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Presión de succión} = 750 \text{ lb/pg}^2$$

Determinar M y las eficiencias para las relaciones de bombeo A, B, C, D y E.

Solución:

Sustituyendo valores en la ec. 4.37:

$$H = \frac{2500 - 750}{5000 - 2500} = 0.7$$

De la Fig. 4.5 con $H = 0.7$ se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %
A	0.26	18.0
B	0.12	8.5

Para las relaciones de bombeo C, D y E no tienen suficiente capacidad para las características de bombeo con $H = 0.7$

2. Una bomba subsuperficial de una instalación de B.H. tipo jet, cuenta con los datos siguientes:

$$\text{Presión a la entrada de la tobera} = 6000 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Presión de descarga} = 4000 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Presión de succión} = 1000 \text{ lb/pg}^2$$

Determinar M y las eficiencias para las relaciones de bombeo A, B, C, D y E.

Solución:

Sustituyendo valores en la ec. 4.37:

$$H = \frac{4000 - 1000}{6000 - 4000} = 1.5$$

De la Fig. 4.5 con $H = 1.5$ se observa que las relaciones de A a la E no tienen suficiente capacidad para las características de bombeo en $H = 1.5$

3. Para una bomba subsuperficial de B.H. tipo jet y dadas las siguientes condiciones:

Presión a la entrada de la tobera = 5500 lb/pg^2

Presión de descarga = 3000 lb/pg^2

Presión de succión = 1100 lb/pg^2

Verificar si existe cavitación para las relaciones de bombeo A, B, C, D y E.

Solución:

Sustituyendo datos en la ec. 4.37:

$$H = \frac{3000 - 1100}{5500 - 3000} = 0.76$$

De la Fig. 4.5 con $H = 0.76$ se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.21	15.6	0.410
B	0.04	5.4	0.328

Para las relaciones C, D y E no tienen suficiente capacidad para las características de bombeo en $H = 0.76$.

Entonces sustituyendo valores en la ec. 4.4B y considerando $I_c = 1.35$ y $K_j = 0.15$ se tiene que:

$$\text{Para A: } M_c = \frac{1 - 0.410}{0.410} \sqrt{1 + 0.15} \sqrt{\frac{1100}{1.35(5500 - 1100) + 1100}} = 0.609$$

$$\text{Para B: } M_c = \frac{1-0.328}{0.328} \sqrt{1+0.15} \sqrt{\frac{1100}{1.35(5500-1100)+1100}} = 0.868$$

Relación A: $M_c > M$ no existe cavitación.

Relación B: $M_c > M$ no existe cavitación.

4. Para una bomba subsuperficial de B.H. tipo jet se cuenta con 1200 bl/día de aceite como fluido motriz a condiciones superficiales de densidad relativa 0.80 (agua = 1.0) y se desea opere con las siguientes - condiciones:

Presión a la entrada de la tobera = 3600 lb/pr²

Presión de descarga = 1925 lb/pg²

Presión de succión = 1000 lb/pg²

Determinar:

- La relación de bombeo con mayor eficiencia sin cavitación
- Número y área para la tobera y cámara de mezclado de la bomba subsuperficial.
- El gasto de producción a condiciones superficiales.

Solución:

- 1) Sustituyendo datos en la ec. 4.37:

$$H = \frac{1925 - 1000}{3600 - 1925} = 0.55$$

De la Fig. 4.5 con H = 0.55 se obtiene :

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.40	21.8	0.410
B	0.34	18.8	0.328
C	0.12	6.7	0.262

Las relaciones D y E no tienen suficiente capacidad para las características de bombeo en H = 0.55

- 2) Verificando por cavitación:

De la Ec. 4.48 y considerando $I_c = 1.35$ y $K_j = 0.15$:

Para A: $M_c = \frac{1 - 0.41}{0.41} \sqrt{1 + 0.15} \sqrt{\frac{1000}{1.35 (3600 - 1000) + 1000}} = 0.726$

$M_c > M$, no presenta cavitación.

Para B: $M_c = \frac{1 - 0.328}{0.328} (0.50496) = 1.034$

$M_c > M$, no presenta cavitación.

Para C: $M_c = \frac{1 - 0.262}{0.262} (0.50496) = 1.422$

$M_c > M$, no presenta cavitación.

- a) Se selecciona la relación de bombeo A: $M = 0.40$
 $E = 21.8\%$
 $R = 0.41$
 $M_c = 0.726$

Sustituyendo datos en la ec. 4.57:

$$A_j = \frac{1200}{1214.5 \sqrt{\frac{3600 - 1000}{0.8}}} = 0.01733 \text{ pg}^2$$

De la Tabla 4.1 se observa que el área de tobera más cercana al valor calculado corresponde a:

b) Tobera No. 8 $A_j = 0.01767 \text{ pg}^2$ ($d_j = 0.15 \text{ pg}$)

Cámara de mezclado No. 8 $A_t = 0.04314 \text{ pg}^2$ ($d_t = 0.23438 \text{ pg.}$)

Calcular el gasto de aceite producido. q_3 :

De la ec. 4.1 se obtiene:

$$q_3 = q_1 \times M$$

c) $q_3 = 1200 \times 0.4 = 480 \text{ b}^1/\text{día}$ a condiciones superficiales.

5. En un pozo de 10 000 pie de profundidad se desea instalar el B.H. tipo jet para producir por espacio anular, y se tiene la siguiente información:

Profundidad de colocación de la bomba = 7950 pie
 Tubería de inyección = 2.5 pg ($2^{7/8}$ pg. d.s.)
 Tubería de revestimiento = 5 pg. d.i.
 Presión de fondo estática = $2000 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$
 Presión en la cabeza del pozo = $100 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$
 Índice de productividad = $0.3 \text{ bpd} / \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$
 Relación gas-aceite = $350 \text{ pie}^3/\text{bl}$
 Producción deseada = $300 \frac{\text{blo}}{\text{día}}$ a condiciones superficiales (35°API)
 Temperatura a la profundidad de la bomba = 170°F
 Temperatura superficial = 100°F
 Fluido motriz: aceite de 35°API

Considerando que no se bombea gas y sin producción de agua, determinar:

- Area y número de la tobera y cámara de mezclado de la bomba sub superficial.
- Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales
- Presión superficial de inyección del fluido motriz.
- Potencia de la bomba superficial

Solución:

- Calcular la caída de presión por fricción en la tubería de inyección, F_1 y en el espacio anular, F_2 :

Considerando una \bar{T} del fluido motriz y fluido producido:

$$\bar{T} = \frac{100 + 170}{2} = 135^\circ\text{F} \text{ y con la Fig. 3.28 para el aceite de } 35^\circ\text{API} \text{ se obtiene: } \mu_1 = 3.3 \text{ cs.}$$

De la Tabla 3.1 para el aceite de 35°API se obtiene:

$$\gamma_o = 0.8498 \text{ y } G_1 = 0.368 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2/\text{pie}}$$

Para secciones circulares y flujo turbulento y con la ecuación del Apéndice 3A, además suponiendo $q_1 = 550 \frac{\text{bl}}{\text{día}}$:

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{(0.8498)(3.3)^{0.21} (550)^{1.79} (7950)}{(2.5)^{4.79}}$$

$$= 1.125 \times 10^{-4} (550)^{1.79}$$

$$F_1 = 9.05 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$$

y para secciones anulares y flujo turbulento, se tiene:

$$\text{en este caso } G_1 = G_2$$

$$q_2 = 550 + 300 = 850 \text{ b}^1/\text{día}$$

$$\rho_o = 0.8498 \times 1 \text{ g/cm}^3 = 0.8498 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_o = 3.3 \times 0.8498 = 2.8 \text{ cp.}$$

entonces:

$$F_2 = \left[\frac{202 \times 10^{-8} \times 7950 \left[\frac{(5^2 - 2.875^2)}{(5 - 2.875)} \right]^{0.21}}{(5 - 2.875)(5^2 - 2.875^2)^2 \left[\frac{5}{(5 - 2.875)} \right]^{0.1}} \right]^{1/2}$$

$$\left[\left(\frac{2.8}{0.368} \right)^{0.21} (0.368) (850)^{1.79} \right]$$

$$F_2 = 3.77 \text{ lb/pg}^2$$

- 2) Determinar H suponiendo $P_3 = 4000 \text{ lb/pg}^2$:

$$\text{Para este caso } G_1 = G_2 = G_3$$

Sustituyendo datos en las ecs. 4.70 y 4.71:

$$P_1 = 7950 \times 0.368 - 9.05 + 4000 = 6916.55 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_2 = 7950 \times 0.368 + 3.77 + 100 = 3029.37 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 1.19:

$$P_3 = P_w f = 2000 - \frac{300}{0.3} = 1000 \text{ lb/pg}^2$$

Entonces de la ec. 4.37 se obtiene:

$$H = \frac{3029.37 - 1000}{6916.55 - 3029.37}$$

$$H = 0.522$$

- 3) Determinar la relación de bombeo con mayor eficiencia para el valor de H calculado.

De la Fig. 4.5 con $H = 0.522$ se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.44	22.2	0.410
B	0.40	20.7	0.328
C	0.21	10.4	0.262

Entonces la relación de bombeo adecuada es la A.

- 4) Determinar el número y área de la tobera y cámara de mezclado:
Sustituyendo datos en la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{300}{0.44} = 681.82 \text{ bl/día}$$

y de la ec. 4.57:

$$A_j = \frac{681.82}{1214.5 \sqrt{\frac{6916.55 - 1000}{0.8498}}} = 0.006728 \text{ pg}^2$$

De la Tabla 4.1 se selecciona:

- a) Tobera No. 4 $A_j = 0.00724 \text{ pg}^2$ ($d_j = 0.096 \text{ pg.}$)
Cámara de mezclado No. 4 $A_t = 0.01767 \text{ pg}^2$ ($d_t = 0.15 \text{ pg.}$)

- 5) Determinar M y H con el área de tobera seleccionada:
Sustituyendo datos en la ec. 4.80:

$$e_R = \frac{300}{1214.5 (0.00724) \sqrt{\frac{3029.37 - 1000}{0.8498}}} = 0.698$$

De la Fig. 4.8 con $e_R = 0.698$ se obtiene:

$$M = 0.435 \quad H = 0.53$$

- 6) Calcular el gasto de fluido motriz, q_1 :

De la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{300}{0.435}$$

- b) $q_1 = 690 \text{ bl/día}$ a condiciones superficiales.

- 7) Calcular la presión superficial de inyección, P_s :

De la ec. 4.58:

$$P_1 = \frac{1}{0.53} [3029.37 (1 + 0.53) - 1000] = 6858 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_1 = 1.126 \times 10^{-4} (690)^{1.79}$$

$$F_1 = 13.6 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 4.70 se obtiene:

$$P_s = P_1 - h_1 G_1 + F_1$$

$$P_s = 6858 - 7950 \times 0.368 + 13.6$$

$$c) \quad \underline{P_s = 3946 \text{ lb/pg}^2}$$

- 8) Verificar por cavitación:

Sustituyendo datos en la ec. 4.48 y considerando $I_c = 1.35$ y

$$k_j = 0.15:$$

$$M_c = \frac{1 - 0.41}{0.41} \sqrt{1 + 0.15} \sqrt{\frac{1000}{1.35(6858 - 1000) + 1000}} = 0.517$$

Entonces para la relación de bombeo $M_c > M$, no presenta cavitación.

- 9) Calcular la potencia superficial

De la ec. 3.20 :

$$HP_{sup.} = 3946 \times 690 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

$$d) \quad \underline{HP_{sup.} = 47}$$

6. El B.H. tipo jet se instalará en un pozo de 14 000 pie de profundidad y se tiene la siguiente información:

Profundidad de colocación de la bomba = 12 550 pie

Tubería de revestimiento = 7 pg. (6.456 pg. d.i.)

Tubería de inyección = 2 pg. d.i.

Tubería de retorno = 2 pg. d.i.

Presión de fondo estática = 3225 lb/pg^2

Presión en la cabeza del pozo = 100 lb/pg^2

Índice de productividad = 5 bpd/lb/pg² (constante)

Producción deseada de fluidos = 700 bl/día a condiciones superficiales.

Producción de agua = 135 bl/día a condiciones superficiales
($\gamma_w = 1.05$)

Densidad relativa del aceite producido = 40°API

Temperatura en cabeza del pozo = 110°F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 185°F

Fluido motriz: aceite de 40°API

Considerando que no se bombea gas, determinar:

- Número y área de cámara de mezclado de la bomba subsuperficial adecuada.
- Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales
- Presión superficial de inyección del fluido motriz
- Potencia en la bomba superficial.

Solución:

- Calcular la caída de presión por fricción en la tubería de inyección, F_1 y tubería de retorno, F_2 :

Considerando una \bar{T} del fluido motriz:

$$\bar{T} = \frac{110 + 185}{2} = 147.5^\circ\text{F} \text{ y con la Fig. 3.28 para el aceite}$$

de 40°API se obtiene $v_1 = 2.1$ cs.

De la Tabla 3.1 para el aceite de 40°API se obtiene:

$$\gamma_o = 0.8251 \quad G_1 = 0.3574 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

Con la ecuación del apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento, además suponiendo $q_1 = 950$ bl/día

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{(0.8251)(2.1)^{0.21}(950)^{1.79}(12550)}{(2)^{4.79}}$$

$$F_1 = 4.5708 \times 10^{-4} (950)^{1.79}$$

$$F_1 = 97.75 \text{ lb/pg}^2$$

y para la tubería de retorno:

$$q_2 = 950 + 700 = 1650 \text{ bl/día}$$

$$f_w = \frac{135}{1650} = 0.0818$$

$$f_0 = 1 - 0.0818 = 0.9182$$

$$\gamma_2 = 1.05 \times 0.0818 + 0.8251 \times 0.9182 = 0.8434$$

La viscosidad del agua a $\bar{T} = 147.5$ °F y con la Fig. 3.29 es 0.44 cs.

$$q_0 = 0.9182 \times 1650 = 1515 \text{ bl/día}$$

$$v_2 = \frac{v_o q_o + v_w q_w}{q_2}$$

$$v_2 = \frac{2.1 \times 1515 + 0.44 \times 135}{1650} = 1.964 \text{ cs.}$$

entonces:

$$F_2 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{(0.8434)(1.964)^{0.21}(1650)^{1.79}(12550)}{(2)^{4.79}}$$

$$F_2 = 4.607 \times 10^{-4} (1650)^{1.79}$$

$$F_2 = 264.68 \text{ lb/pg}^2$$

- 2) Determinar H considerando $P_B = 4000 \text{ lb/pg}^2$:

$$G_2 = 0.433 \times 0.8434 = 0.3652 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

Sustituyendo datos en las ecs. 4.70 y 4.71:

$$P_1 = 12\,550 \times 0.3574 - 97.75 + 4000 = 8387.62 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_2 = 12\,550 \times 0.3652 + 264.68 + 100 = 4947.94 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 1.19:

$$P_3 = P_{wf} = 3225 - \frac{700}{5} = 3085 \text{ lb/pg}^2$$

Entonces de la ec. 4.37 se obtiene:

$$H = \frac{4947.94 - 3085}{8387.62 - 4947.94}$$

$$H = 0.542$$

- 3) Determinar la relación de bombeo con mayor eficiencia para el valor de H. calculado:

De la Fig. 4.5 con $H = 0.542$ se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.405	21.8	0.410
B	0.350	19.2	0.328

Entonces la relación de bombeo A es la adecuada.

- 4) Para determinar la bomba subsuperficial:

Sustituyendo datos en la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{700}{0.405} = 1728.4 \text{ bl/día}$$

y de la ec. 4.57:

$$A_j = \frac{1728.4}{1214.5 \sqrt{\frac{8387.62 - 3085}{0.8251}}} = 0.01775 \text{ pg}^2$$

De la Tabla 4.1 se selecciona :

- a) Tobera No. 9: $A_j = 0.02209 \text{ pg}^2$ ($d_j = 0.16771 \text{ pg.}$)
 Cámara de mezclado No. 9: $A_t = 0.05393 \text{ pg}^2$ ($d_t = 0.26204 \text{ pg.}$)
 La bomba subsuperficial seleccionada es una 9-A

- 5) Determinar M y H con el área de tobera seleccionada:

Sustituyendo datos en la ec. 4.80:

$$e_R = \frac{700}{1214.5 (0.02209) \sqrt{\frac{4947.94 - 3085}{0.8251}}} = 0.549$$

De la Fig. 4.8 con $e_R = 0.549$ se obtiene:

$$M = 0.335, \quad H = 0.636$$

- 6) Calcular el gasto de fluido motriz, q_1 :

De la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{700}{0.335}$$

- b) $q_1 = 2090 \text{ bl/día}$, a condiciones superficiales.

- 7) Calcular la presión superficial de inyección, Ps:

De la ec. 4.58:

$$P_1 = \frac{1}{0.636} [4947.94 (1 + 0.636) - 3085] = 7877 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_1 = 4.5708 \times 10^{-4} (2090)^{1.79} = 401 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 4.70 se obtiene:

$$P_s = P_1 - h_1 G_1 + F_1$$

$$P_s = 7877 - 12550 \times 0.3574 + 401$$

c) $P_s = 3793 \text{ lb/pg}^2$

B) Verificar por cavitación:

Sustituyendo datos en la ec. 4.48 y considerando $I_c = 1.35$

y $K_j = 0.15$:

$$M_c = \frac{1 - 0.41}{0.41} \sqrt{1 + 0.15} \sqrt{\frac{3085}{1.35 (7877 - 3085) + 3085}} = 0.876$$

Entonces para la relación de bombeo $M_c > M$, no presenta cavitación en la bomba.

9) Calcular la potencia superficial

De la ec. 3.20:

$$HP_{sup} = 3793 \times 2090 \times 1.7 \times 10^{-5}$$

d) $HP_{sup} = 135$

7. Calcular los incisos a-d) con los datos del problema resuelto 6, pero con fluido motriz agua, densidad relativa 1.05.

Solución:

1) Calcular la caída de presión por fricción en la tubería de inyección, F_1 y en la tubería de retorno, F_2 .

$$\text{Considerando una temperatura media } \bar{T} = \frac{110 + 185}{2} = 147.5^\circ F$$

De la Fig. 3.29 para el agua a \bar{T} , se obtiene:

$$\nu_1 = 0.44 \text{ cs.}; \quad G_1 = 0.433 \times \nu = 0.433 \times 1.05 = 0.45465 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2/\text{pie}}$$

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento, considerando $q_1 = 1400 \text{ bl/día}$

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{(1.05)(0.44)^{0.21}(1400)^{1.79}(12550)}{(2)^{4.79}}$$

$$F_1 = 179.35 \text{ lb/pg}^2$$

Para el fluido de retorno:

De la Fig. 3.28 para el aceite de 40°API a \bar{T} se obtiene:

$$\nu_o = 2.1 \text{ cs.}$$

De la Tabla 3.1 para el aceite de 40°API se obtiene:

$$\gamma_o = 0.8251; G_3 = 0.3574 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$q_2 = q_1 + I_3 = 1400 + 700 = 2100 \text{ bl/día}; f_w = \frac{q_w}{q_3}$$

$$f_w = \frac{135}{700} = 0.1928$$

De la ecuación para calcular G_2 , se tiene:

$$G_2 = 0.433 \left[\frac{1400 \times 1.05 + 700(0.1928)(1.05) + 700(1-0.1928)(0.8251)}{2100} \right]$$

$$G_2 = 0.4284 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}; \gamma_2 = \frac{2100 G_2}{0.433} = 0.9894$$

De igual manera para calcular la viscosidad cinemática, ν_2 :

$$\nu_2 = \frac{1400 \times 0.44 + 700(0.1928)(0.44) + 700(1-0.1928)(2.1)}{2100}$$

$$\nu_2 = 0.8866 \text{ cs.}$$

Por lo tanto:

$$F_2 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 0.9894 \times 0.8866^{0.21} \times 2100^{1.79} \times 12550}{(2)^{4.79}}$$

$$F_2 = 404.57 \text{ lb/pg}^2$$

2) Determinar H considerando $P_s = 4000 \text{ lb/pg}^2$

Sustituyendo datos en las ecs. 4.70 y 4.71

$$P_1 = 12550 \times 0.45465 - 179.35 + 4000 = 9526.50 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_2 = 12550 \times 0.4284 + 404.57 + 100 = 5881 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 1.19

$$P_3 = P_{wf} = 3225 - \frac{700}{5} = 3085 \text{ lb/pg}^2$$

Entonces de la ec. 4.37 se obtiene:

$$H = \frac{5881 - 3085}{9526.5 - 3085} = 0.4340$$

- 3) Determinar la relación de bombeo con máxima eficiencia para el valor de H. calculado:

De la Fig. 4.5 con H = 0.4340 se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.525	22.30	0.410
B	0.550	22.85	0.328
C	0.450	20.50	0.262
D	0.100	5.00	0.210

Entonces la relación de bombeo adecuada es la B

- 4) Determinar el número y área de la tobera y cámara de mezclado. Sustituyendo datos en la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{700}{0.55} = 1272.72 \text{ bl/dfa}$$

y de la ec. 4.57:

$$A_j = \frac{1272.72}{1214.5 \sqrt{\frac{9526.50 - 3085}{1.05}}} = 0.0133795 \text{ pg}^2$$

De la Tabla 4.1 se selecciona:

- a) Tobera No. 7: $A_j = 0.01414 \text{ pg}^2$, $d_j = 0.13416 \text{ pg}$,
 Cámara de mezclado No. 8: $A_t = 0.04314 \text{ pg}^2$, $dt = 0.23438 \text{ pg}$.
 Entonces la bomba seleccionada es una 7-8

- 5) Determinar M y H con el área de tobera seleccionada. Sustituyendo datos en la ec. 4.80:

$$\theta R = \frac{700}{1214.5 \times 0.01414 \times \sqrt{\frac{5881 - 3085}{1.05}}} = 0.7899$$

De la Fig. 4.9 con $\theta R = 0.7899$ se obtiene:

$$M = 0.46$$

$$H = 0.48$$

- 6) Calcular el gasto de fluido motriz real, q_1
 De la ec. 4.1 a: $q_1 = \frac{700}{0.46}$
- b) $q_1 = 1521.73 \text{ bl/día}$ a condiciones superficiales.
- 7) Calcular la presión superficial de inyección, P_s :
 De la ec. 4.58

$$P_1 = \frac{1}{0.48} [5881 (1 + 0.48) - 3085] = 11706 \text{ lb/pg}^2$$

Para $q_1 = 1521.73 \text{ bl/día}$, la caída de presión por fricción en la tubería de inyección es:

$$F_1 = 208.21 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 4.81 se obtiene:

$$P_s = 11706 - 12550 \times 0.45465 + 208.21$$

c) $P_s = 6208.35 \text{ lb/pg}^2$

Como se puede apreciar, la presión superficial de inyección resulta ser mayor a 4000 lb/pg^2 (presión máxima de diseño) provocando de igual manera una potencia de la bomba superficial muy alta (HPsup. = 161)

Por lo anterior se puede concluir que para este pozo en particular no se debe inyectar agua como fluido motriz para obtener el gasto deseado y lo más conveniente es inyectar aceite para disminuir las cargas y por consiguiente la presión superficial de inyección y la potencia superficial, aún cuando existan arreglos de tobera y cámara de mezclado que manejen el gasto de inyección de fluido motriz.

8. A un pozo se le instalará el sistema de B.H. tipo Jet y cuenta con las siguientes características:

Profundidad del pozo = 8000 pie

Profundidad de colocación de la bomba = 7950 pie

Diámetro de la tubería de inyección = $2 \frac{3}{8} \text{ pg. (d.e.)}$

Diámetro de la tubería de retorno = $2 \frac{3}{8} \text{ pg. (d.e.)}$

Diámetro de la tubería de revestimiento = 7 pg. (d.e.)

Presión en la cabeza del pozo = 100 lb/pg^2

Índice de productividad = $0.3 \text{ bl/día/lb/pg}^2$ (constante)

Gasto de aceite = 350 bl/día

Producción de agua = 0.0 %

Relación gas-aceite = 500 pie³/bl

Temperatura superficial = 105°F

Temperatura a profundidad de la bomba = 170°F

Presión de fondo estática = 2000 lb/pg²

Considerar como fluido motriz el aceite producido y con paso de gas por la bomba, determinar:

- Número y área de la tobera y cámara de mezclado de la bomba subsuperficial.
- Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales.
- Potencia de la bomba superficial

Solución:

- Suponer $M = 0.5$, de la ec. 4.82

$$RGL = \frac{0.5 \times 500(1-0)}{1 + 0.5} = 166.67 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

- Calcular el gasto de fluido motriz, q_1 ; de la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{350}{0.5} = 700 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$$

- Calcular las pérdidas de presión por fricción en la tubería de inyección del fluido motriz, F_1 .

De la Tabla 3.1, para un aceite de 35°API se tiene:

$$\gamma_o = 0.8498 \text{ y } G_1 = 0.3680 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

De la Fig. 3.28, para el aceite de 35°API, a una temperatura promedio. $\bar{T} = \frac{105 + 170}{2} = 137.5^\circ\text{F}$, su viscosidad cinemática

ν_o es de 3.0 cs.

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento.

$$F_1 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 0.8498 \times 3.0^{0.21} \times 700^{1.79} \times 7950}{2^{4.79}}$$

$$F_1 = 39.79 \text{ lb/pg}^2$$

- Calcular la presión de entrada a la bomba subsuperficial, P_1 . De la ec. 4.81:

$$P_1' = 7950 \times 0.368 - 39.79 + P_s$$

donde $P_s = 4000 \text{ lb/pg}^2$

$$P_1 = 6885.81 \text{ lb/pg}^2$$

- 5) Calcular la presión de descarga de la bomba subsuperficial, P_2 . Ya que no existe producción de agua: $G_1 = G_3 = G_2 = 0.3680 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$.
- $$v_1 = v_3 = v_2 = 3.0 \text{ cs}$$
- $$\gamma_1 = \gamma_3 = \gamma_2 = 0.8498$$

$$q_2 = q_1 + q_3 = 700 + 350 = 1050 \text{ bl/día}$$

Utilizando curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical para 100% aceite, $q_2 = 1050 \text{ bl/día}$, $D = 7950 \text{ pie}$. $RGL = 166.67 \text{ pie}^3/\text{bl}$, diámetro interior de la tubería de retorno = 2 pg, $P_{wh} = 100 \text{ lb/pg}^2$ se tiene:

$$P_2 = 2640 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Fig. A-207)}$$

De la ec. 1.19

$$P_3 = P_{wf} = 2000 - \frac{350}{0.3} = 833.33 \text{ lb/pg}^2.$$

- 6) De la ec. 4.37:

$$H = \frac{2640 - 833.33}{6885.81 - 2640} = 0.4255$$

- 7) Determinar la relación de bombeo con máxima eficiencia para el valor de H calculado.

De la Fig. 4.5 con $H = 0.4255$ se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.525	22.25	0.410
B	0.550	23.75	0.328
C	0.450	19.10	0.262
D	0.100	5.00	0.210

Entonces la relación de bombeo adecuada es la B

- 8) De la Fig. 3.26 con $RGA = 500 \text{ pie}^3/\text{bl}$, $P_{wf} = 833.33 \text{ lb/pg}^2$ y 0% agua, se obtiene una eficiencia volumétrica de 47% (se considerará constante para el diseño).

- 9) El valor de M modificado es:
 $M_{corr.} = M \times E_v$
 $M_{corr.} = 0.550 \times 0.47 = 0.2585$

- 10) Recalcular P_1
 De la ec. 4.1 a:
 $q_1 = \frac{350}{0.2585} = 1353.93 \text{ bl/dfa}$
 $q_2 = 1353.93 + 350 = 1703.93 \text{ bl/dfa}$
 $F_1 = 129.6 \text{ lb/pg}^2$
 De la ec. 4.81:
 $P_1 = 7950 \times 0.368 - 129.6 + 4000 = 6796 \text{ lb/pg}^2$

- 11) Recalcular P_2 .
 De la ec. 4.82 con $M = 0.2585$ se tiene:
 $RGL = \frac{0.2585 \times 500 (1-0)}{1 + 0.2585} = 102.70 \text{ pie}^3/\text{bl}$

Utilizando curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical para 100 % aceite, $q_2 = 1703.93 \text{ bl/dfa}$,
 $D = 7950 \text{ pie}$, $RGL = 102.70 \text{ pie}^3/\text{bl}$, diámetro interior de la tubería de retorno = 2 pg., $P_{wh} = 100 \text{ lb/pg}^2$ se tiene:

$$P_2 = 2770 \text{ lb/pg}^2 \quad (\text{Figs. A-261 y 264})$$

- 12) Recalcular H.
 De la ec. 4.37:
 $H = \frac{2770 - 833.33}{6796 - 2770} = 0.4810$

- 13) Con el valor de H calculado, de la Fig. 4.5 se tiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.465	22.3	0.410
B	0.465	22.2	0.328
C	0.310	14.5	0.262

Entonces la relación de bombeo adecuada es la A
 $M_{corr} = 0.465 \times 0.47 = 0.21855$

$$\text{Comparando: } \left| \frac{0.21855 - 0.2585}{0.21855} \right| \times 100 = 18.27\% > 5\%$$

por lo tanto repetir los pasos 10 a 13:

$$10') \quad q_1 = \frac{350}{0.21855} = 1601.46 \text{ bl/día}$$

$$F_1 = 175.03 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_1 = 7950 \times 0.3680 - 175.03 + 4000 = 6750.57 \text{ lb/pg}^2$$

$$11') \quad RGL = \frac{0.21855 \times 500(1-0)}{1 + 0.21855} = 89.67 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

$$q_2 = 1601.46 + 350 = 1951.46 \text{ bl/día}$$

$$P_2 = 2860 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Figs. A-219 y 222)}$$

$$12') \quad H = \frac{2860 - 833.33}{6750.57 - 2860} = 0.5209$$

13') De la Fig. 4.5 con $H = 0.5209$ se tiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.435	22.20	0.410
B	0.400	20.50	0.328
C	0.20	10.50	0.262

Entonces la relación de bombeo adecuado es la A

$$M_{\text{corr}} = 0.435 \times 0.47 = 0.20445$$

$$\text{Comparando } \left| \frac{0.20445 - 0.21855}{0.20445} \right| \times 100 = 6.89\% > 5\% \text{ por lo tanto:}$$

$$q_1 = \frac{350}{0.20445} = 1711.91 \text{ bl/día}$$

$$F_1 = 197.23 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_1 = 7950 \times 0.368 - 197.23 + 4000 = 6728.37 \text{ lb/pg}^2$$

$$RGL = \frac{0.20445 \times 500(1-0)}{1 + 0.20445} = 84.87 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

$$q_2 = 1711.91 + 350 = 2061.91 \text{ bl/día}$$

$$P_2 = 2900 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Figs. A-264 y 267)}$$

$$H = \frac{2900 - 833.33}{6728.37 - 2900} = 0.5398$$

Para la relación A con H = 0.5398 se tiene:

$$M = 0.420, \text{ Eficiencia} = 22.10\% \text{ y } R = 0.410$$

$$\text{donde: } M_{\text{corr}} = 0.420 \times 0.47 = 0.1974$$

$$\text{Comparando: } \left| \frac{0.1974 - 0.20445}{0.1974} \right| \times 100 = 3.57\% < 5\% \text{ por lo tanto:}$$

$$M = 0.1974$$

- 14) De la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{350}{0.1974} = 1773.05 \text{ bl/día}$$

- 15) De la ec. 4.57:

$$A_j = \frac{1773.05}{1214.5 \frac{6728.37 - 833.33}{0.8498}} = 0.0175282 \text{ pg}^2$$

- 16) De la Tabla 4.1 con el valor de A_j calculado se selecciona:

a) Tobera No. 8: $A_j = 0.01767 \text{ pg}^2, d_j = 0.1500 \text{ pg}$

Cámara de Mezclado No. 8: $A_t = 0.04314 \text{ pg}^2, d_t = 0.23438 \text{ pg}$

De esta forma la bomba seleccionada es una 8-A1

- 17) Con el valor de A_j seleccionado, de la ec. 4.56 calcular el gasto de fluido motriz, q_1 :

$$q_1 = 1214.5 \times 0.01767 \times \frac{6728.37 - 833.33}{0.8498}$$

b) $q_1 = 1787.39 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

- 18) Verificar por cavitación.

De la ec. 4.48 y considerando $K_j = 0.15$ e $I_c = 1.35$:

$$Mc = \frac{1 - 0.410}{0.410} \cdot 1 + 0.15 \frac{833.33}{1.35(6728.37 - 833.33) + 833.33} = 0.4751$$

Como $Mc < M$, 0.4751 < 0.1974 no existe cavitación en la bomba.

- 19) Calcular la potencia de la bomba superficial.

De la ec. 3.20 :

$$H P_{sup.} = 1.7 \times 10^{-5} \times 1787.39 \times 4000$$

c) $\underline{H P_{sup.} = 122}$

9. Resolver el problema resuelto 8 considerando como fluido motriz agua de densidad relativa 1.02 . Utilizar una tubería de retorno de 2 7/8 pg. (d.e.).

Solución :

- 1) Suponer $M = 0.5$, de la ec. 4.82 :

$$RGL = \frac{0.5 \times 500(1-0)}{1 + 0.5} = 166.67 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

2) $q_1 = \frac{350}{0.5} = 700 \text{ bl/día}$

- 3) Calcular las pérdidas de presión por fricción en la tubería de inyección del fluido motriz, F_1 .

$$G_w = 1.02 \times 0.433 = 0.44166 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

De la Fig. 3.29 para el agua a una temperatura promedio

$$\bar{T} = \frac{105 + 170}{2} = 137.5 \text{ }^\circ\text{F, su viscosidad cinemática, } \nu_w, \text{ es de } 0.49 \text{ cs.}$$

Utilizando la ecuación del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento.

$$F_1 = \frac{1.045 \times 10^{-6} \times 1.02 \times 0.49^{0.21} \times 700^{1.79} \times 7950}{2^{4.79}}$$

$$F_1 = 32.64 \text{ lb/pg}^2.$$

- 4) Calcular la presión de entrada a la bomba subsuperficial, P_1

De la ec. 4.61:

$$P_1 = 7950 \times 0.44166 - 32.64 + P_s$$

$$\text{donde } P_s = 4000 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_1 = 7478.55 \text{ lb/pg}^2$$

- 5) Calcular la presión de descarga de la bomba subsuperficial, P_2 .

De la Tabla 3.1 para un aceite de 35°API se tiene:

$$\gamma_o = 0.8498 \text{ y } G_o = 0.3680 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

De la Fig. 3.28 para el aceite de 35°API, a una temperatura promedio de 137.5°F, su viscosidad cinemática, ν_o , es de 3.0 cs.

$$G_2 = \frac{q_1 G_1 + q_3 G_3}{q_1 + q_3} = \frac{700 \times 0.44166 + 350 \times 0.368}{700 + 350} = 0.4171 \text{ lb/}$$

$$\text{pg}^2/\text{pie}$$

$$\gamma_2 = \frac{G_2}{0.433} = \frac{0.4171}{0.433} = 0.9633$$

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5 = \frac{141.5}{0.9633} - 131.5 = 15.4$$

$$q_2 = q_1 + q_3 = 700 + 350 = 1050 \text{ bl/día}$$

$$f_w = 700/1050 = 0.66, \quad f_o = 1 - 0.66 = 0.34 \text{ (34\% aceite)}$$

Utilizando curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical para 34% aceite, $D = 7950 \text{ pie}$,

$q_2 = 1050 \text{ bl/día}$, $HGL = 166.67 \text{ pie}^3/\text{bl}$, diámetro interior de la tubería de retorno = 2.5 pg., $P_{wh} = 100 \text{ lb/pg}^2$ se tiene:

$$P_2 = 2765 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Figs. A-253 y 254)}$$

De la ec. 1.19:

$$P_3 = P_{wf} = 2000 - \frac{350}{0.3} = 833.33 \text{ lb/pg}^2$$

- 6) De la ec. 4.37:

$$H = \frac{2765 - 833.33}{7478.55 - 2765} = 0.4098$$

- 7) Determinar la relación de bombeo con máxima eficiencia para el valor de H calculado.

De la Fig. 4.5 con H = 0.4098 se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.550	22.0	0.410
B	0.590	24.1	0.328
C	0.500	20.5	0.262
D	0.200	8.2	0.210

Entonces la relación de bombeo adecuada es la B

- 8) De la Fig. 3.26 con RGA = 500 pie³/bl, Pwf = 833.33 lb/pg² y 0% agua se obtiene una eficiencia volumétrica de 47% (se considerará constante para el diseño).

- 9) El valor de M modificado es:

$$M_{corr.} = M \times E_v$$

$$M_{corr.} = 0.590 \times 0.47 = 0.2773$$

- 10) Recalcular P₁.

De la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{350}{0.2773} = 1262.17 \text{ bl/día} \quad , \quad q_2 = 1262.17 + 350 = 1612.17 \text{ bl/día.}$$

$$F_1 = 93.76 \text{ lb/pg}^2$$

De la ec. 4.81 :

$$P_1 = 7950 \times 0.44166 - 93.76 + 4000 = 7417.43 \text{ lb/pg}^2$$

- 11) Recalcular P₂.

De la ec. 4.82 con M = 0.2773 se tiene:

$$RGL = \frac{0.2773 \times 500 (1-0)}{1 + 0.2773} = 108.54 \text{ pie}^3/\text{bl.}$$

Utilizando curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical para $q_2 = 1612.17 \text{ bl/día}$, $D = 7950 \text{ pie}$,

$RGL = 108.54 \text{ pie}^3/\text{bl}$, diámetro interior de la tubería de retorno = 2.5 pg , $P_{wh} = 100 \text{ lb/pg}^2$ y:

$$G_2 = \frac{1262.17 \times 0.44166 + 350 \times 0.368}{1612.17} = 0.4256 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\gamma_2 = \frac{0.4256}{0.433} = 0.9830$$

$$*API = \frac{141.5}{0.9830} - 131.5 = 12.43$$

$$f_w = \frac{1262.17}{1612.17} = 0.78, \quad f_o = 0.22 \text{ (22\% aceite)}$$

$$P_2 = 3110 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Figs. A-259, 260, 262 y 263)}$$

- 12) Recalcular H.

De la ec. 4.37:

$$H = \frac{3110 - 833.33}{7417.43 - 3110} = 0.5285$$

- 13) Con el valor de H calculado, de la Fig. 4.5 se tiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.425	22.10	0.410
B	0.400	20.50	0.328
C	0.190	10.00	0.262

Entonces la relación de bombeo adecuada es la A

$$M_{corr.} = 0.425 \times 0.47 = 0.19975$$

$$\text{Comparando: } \left\{ \frac{0.19975 - 0.2773}{0.19975} \right\} \times 100 = 38.82\% > 5\% \text{ por lo tanto}$$

repetir los pasos 10 a 13:

$$10') \quad q_1 = \frac{350}{0.19975} = 1752.19 \text{ bl/día}$$

$$F_1 = 168.66 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_1 = 7950 \times 0.44166 - 168.66 + 4000 = 7342.53 \text{ lb/pg}^2$$

$$11') \text{ RGL} = \frac{0.19975 \times 500 (1-0)}{1 + 0.19975} = 83.24 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

$$q_2 = 1752.19 + 350 = 2102.19 \text{ bl/día}$$

$$C_2 = \frac{1752.19 \times 0.44166 + 350 \times 0.368}{2102.19} = 0.42939 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$Y_2 = \frac{0.42939}{0.433} = 0.99167$$

$$\text{API} = \frac{141.5}{0.99167} - 131.5 = 11.18$$

$$f_w = \frac{1752.19}{2102.19} = 0.83, \quad f_o = 1 - 0.83 = 0.17 \text{ (17\% aceite)}$$

$$P_2 = 3340 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Figs. A-262, 263, 265 y 266)}$$

$$12') \text{ H} = \frac{3340 - 833.33}{7342.53 - 3340} = 0.6262$$

13') De la Fig. 4.5 con $H = 0.6262$ se tiene:

Relación	M	Eficiencia %	R
A	0.340	20.50	0.410
B	0.240	14.50	0.328

Entonces la relación de bombeo adecuada es la A

$$M_{\text{corr.}} = 0.340 \times 0.47 = 0.1598$$

$$\text{Comparando } \left\{ \frac{0.1598 - 0.19975}{0.1598} \right\} \times 100 = 25\% > 5\% \text{ por lo tanto:}$$

$$q_1 = \frac{350}{0.1598} = 2190.23 \text{ bl/día}$$

$$F_1 = 251.47 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_1 = 7950 \times 0.44166 - 251.47 + 4000 = 7259.71 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{RGL} = \frac{0.1598 \times 500(1-0)}{1 + 0.1598} = 68.89 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

$$q_2 = 2190.23 + 350 = 2540.23 \text{ b}^1/\text{día}$$

$$G_2 = \frac{2190.23 \times 0.44166 + 350 \times 0.368}{2540.23} = 0.4315 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\gamma_2 = \frac{0.4315}{0.433} = 0.9965$$

$$\alpha_{API} = \frac{141.5}{0.9965} - 131.5 = 10.48$$

$$f_w = \frac{2190.23}{2540.23} = 0.86, \quad f_o = 1 - 0.86 = 0.14 \text{ (14\% aceite)}$$

$$P_2 = 3380 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Figs. A-265 y 266)}$$

$$H = \frac{3380 - 833.33}{7259.71 - 3380} = 0.6564$$

De la Fig. 4.5 para $H = 0.6564$ se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.300	19.5	0.410
B	0.180	12.0	0.328

Entonces la relación de bombeo adecuada es la A

$$M_{corr.} = 0.300 \times 0.47 = 0.141$$

$$\text{Comparando } \left| \frac{0.141 - 0.1598}{0.141} \right| \times 100 = 13.33\% \text{ por lo tanto:}$$

$$q_1 = \frac{350}{0.141} = 2482.27 \text{ b}^1/\text{día}$$

$$F_1 = 314.63 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_1 = 7950 \times 0.44166 - 314.63 + 4000 = 7195.56 \text{ lb/pg}^2$$

$$RGL = \frac{0.141 \times 500 (1-0)}{1 + 0.141} = 61.78 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

$$q_2 = 2482.27 + 350 = 2832.27 \text{ b}^1/\text{día}$$

$$G_2 = \frac{2482.27 \times 0.44166 + 350 \times 0.368}{2832.27} = 0.43255 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$Y_2 = \frac{0.43255}{0.433} = 0.9989$$

$$*API = \frac{141.5}{0.9989} = 131.5 = 10.14$$

$$f_w = \frac{2482.27}{2832.27} = 0.87, \quad f_o = 1 - 0.88 = 0.13 \quad (13\% \text{ aceite})$$

$$P_2 = 3400 \text{ lb/pg}^2 \quad (\text{Figs. A-265 y 268})$$

$$H = \frac{3400 - 833.33}{7196.56 - 3400} = 0.6760$$

De la Fig. 4.5 para $H = 0.6760$ se obtiene:

$M = 0.295$ (Relación de bombeo A), Eficiencia = 19.2%, $R = 0.410$

$$M_{\text{corr.}} = 0.295 \times 0.47 = 0.13865$$

$$\text{comparando: } \left| \frac{0.13865 - 0.141}{0.13865} \right| \times 100 = 1.69\% < 5\% \text{ por lo tanto:}$$

$$M = 0.13865$$

14) De la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{350}{0.13865} = 2524.34 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$$

15) De la ec. 4.57:

$$A_j = \frac{2524.34}{1214.5 \times \sqrt{\frac{7196.56 - 833.33}{1.02}}} = 0.0263155 \text{ pg}^2$$

16) De la Tabla 4.1 con el valor de A_j calculado se selecciona:

$$\text{a) Tobera No. 10 } A_j = 0.02761 \text{ pg}^2, \quad d_j = 0.18750 \text{ pg}$$

$$\text{Cámara de Mezclado No. 10: } A_t = 0.06741 \text{ pg}^2, \quad dt = 0.29297 \text{ pg}$$

De esta forma la bomba seleccionada es una 10-A

17) Con el valor de A_j seleccionado, de la ec. 4.56 calcular el gasto de fluido motriz, q_1 :

$$q_1 = 1214.5 \times 0.02761 \times \sqrt{\frac{7196.56 - 833.33}{1.02}}$$

b) $q_1 = 2648.51 \text{ bl/día}$ a condiciones superficiales

18) Verificar por cavitación

De la ec. 4.48 y considerando $K_f = 0.15$ e $I_c = 1.35$:

$$M_c = \frac{1 - 0.410}{0.410} \sqrt{1 + 0.15} \sqrt{\frac{833.33}{1.35 (7196.56 - 833.33) + 833.33}} = 0.4588$$

Como $M_c > M$, $0.4588 > 0.13865$ no existe cavitación en la bomba.

19) Calcular la potencia de la bomba superficial.

De la ec. 3.20:

$$H \text{ Psup.} = 1.7 \times 10^{-5} \times 2648.51 \times 4000$$

c) $H \text{ Psup.} = 181$

10. A un pozo se le instalará el sistema de B.H. tipo Jet y cuenta con las siguientes características:

Profundidad del pozo = 9000 pie

Profundidad de colocación de la bomba = 8850 pie

Diámetro de la tubería de inyección = $2 \frac{7}{8}$ pg. (d.e.)

Diámetro de la tubería de retorno = $2 \frac{7}{8}$ pg. (d.e.)

Diámetro de la tubería de revestimiento = 7 pg. (d.e.)

Presión en la cabeza del pozo = $120 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$

Producción de agua = 50% ($\gamma_w = 1.07$)

Índice de productividad = $2.0 \frac{\text{bl}}{\text{día}} / \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$ (constante)

Gasto de líquido deseado = $750 \frac{\text{bl}}{\text{día}}$

Aceite producido = 35°API

Relación gas-aceite = $400 \text{ pie}^3 / \text{bl}$

Temperatura superficial = 115°F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 200°F

Presión de fondo estática = $2200 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$

Considerando fluido motriz aceite de 35°API y bombeando gas determinar:

- a) Número y área de cámara de mezclado de la bomba subsuperficial (seleccionar la bomba adecuada)
- b) Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales.
- c) Potencia en la bomba superficial

Solución:

- 1) Suponer $M = 0.5$ y de la ec. 4.82:

$$RGL = \frac{0.5(400)(1-0.5)}{1 + 0.5} = 66.7 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

- 2) Calcular el gasto de fluido motriz, q_1 :

De la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{750}{0.5} = 1500 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$$

- 3) Calcular la caída de presión por fricción en la tubería de inyección, F_1 :

De la Tabla 3.1 para el aceite de 35°API se obtiene:

$$\gamma_o = 0.8498 \quad G_1 = 0.368 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2/\text{pie}}$$

Considerando una \bar{T} del fluido motriz:

$$\bar{T} = \frac{115 + 200}{2} = 157.5^\circ\text{F} \text{ y con la Fig. 3.28 se obtiene}$$

$$v_1 = 2.45 \text{ cs.}$$

Con la ec. del Apéndice 3A para secciones circulares y flujo turbulento se obtiene:

$$F_1 = 1.045 \times 10^{-6} \times \frac{(0.8498)(2.45)^{0.21}(1500)^{1.79}(8850)}{(2.5)^{4.79}}$$

$$F_1 = 1.1775 \times 10^{-4} (1500)^{1.79}$$

$$F_1 = 57 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$$

- 4) Calcular la presión de entrada en la bomba subsuperficial, P_1 :

De la ec. 4.81:

$$P_1 = 8850 \times 0.368 - 57 + P_s$$

donde $P_s = 4000 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$ (presión máxima de diseño)

$$P_1 = 7199.8 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}$$

- 5) Calcular la presión de descarga en la bomba subsuperficial, P_2 :

$$q_2 = 1500 + 750 = 2250 \text{ b}^1/\text{d}fa$$

$$C_w = 0.433 \times 1.07 = 0.4633 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

De la ec. 4.83:

$$f_w = \frac{0.5 \times 0.5}{1 + 0.5} = 0.1667, \quad f_o = 1 - 0.1667 = 0.8333$$

$$q_o = (1 - 0.1667) 2250 = 1874.93 \text{ b}^1/\text{d}fa$$

$$q_w = 0.1667 \times 2250 = 375.07 \text{ b}^1/\text{d}fa$$

Para la densidad del fluido de retorno en °API :

$$G_2 = \frac{q_o G_o + q_w G_w}{q_2}$$

$$G_2 = \frac{1874.93 \times 0.368 + 375.07 \times 0.4633}{2250} = 0.3838 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\gamma_2 = \frac{0.3838}{0.433} = 0.8863$$

$$^\circ\text{API} = \frac{141.5}{0.8868} - 131.5 = 28$$

Utilizando curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical: con 83.33% aceite, $RGL = 66.7 \text{ pie}^3/\text{b}^1$ diámetro de tubería de retorno 2.5 pg. (d.i.) , $q_2 = 2250 \text{ b}^1/\text{d}fa$, $h = 8950 \text{ pie}$ y $P_{wh} = 120 \text{ lb/pg}^2$ se obtiene:

$$P_2 = 3440 \text{ lb/pg}^2 \quad (\text{Figs. A-263, A-264, A-266 y A-267})$$

- 6) De la ec. 1.19:

$$P_3 = P_{wf} = 2200 - \frac{750}{2} = 1825 \text{ lb/pg}^2$$

- 7) De la ec. 4.37:

$$H = \frac{3440 - 1825}{7199.8 - 3440} = 0.4295$$

- 8) Determinar la relación de bombeo con mayor eficiencia con el valor de H calculado:

De la Fig. 4.5 con $H = 0.4295$ se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.525	22.3	0.410
B	0.550	23.8	0.328
C	0.450	19.2	0.262

Por lo tanto la relación B es la adecuada.

- 9) De la Fig. 3.26 con $Pw_f = 1825 \text{ lb/pg}^2$, $R = 400 \text{ pie}^3/\text{bl}$ y 50% de agua se obtiene una eficiencia volumétrica de 94%. Entonces calculando nuevamente el valor de M (relación B) considerando la eficiencia volumétrica:

$$M_{\text{corr.}} = 0.55 \times 0.94 = 0.517$$

Repetiendo los pasos (1) al (5), (7) y (8):

- 1') $M = 0.517$ y de la ec. 4.82:

$$RGL = \frac{0.517(400)(1-0.5)}{1 + 0.517} = 68.16 \text{ pie}^3/\text{bl}$$

- 2') De la ec. 4.1 a):

$$q_1 = \frac{750}{0.517} = 1450.6 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$$

- 3') $F_1 = 1.1775 \times 10^{-4} (1450.6)^{1.79} = 53.72 \text{ lb/pg}^2$

- 4') De la ec. 4.81, considerando $P_s = 4000 \text{ lb/pg}^2$:

$$P_1 = 8850 \times 0.368 - 53.72 + 4000$$

$$P_1 = 7203.08 \text{ lb/pg}^2$$

- 5') De la ec. 4.83:

$$fw_2 = \frac{0.517 \times 0.5}{1 + 0.517} = 0.1704, \quad fo = 1 - 0.1704 = 0.8296$$

$$q_2 = 1450.6 + 750 = 2200.6 \text{ bl/día}$$

$$q_o = (1 - 0.1704) 2200.6 = 1825.6 \text{ bl/día}$$

$$q_w = 0.1704 \times 2200.6 = 375 \text{ bl/día}$$

Para la densidad del fluido de retorno en °API:

$$G_2 = \frac{1825.6 \times 0.368 + 375 \times 0.4633}{2200.6} = 0.3842 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\gamma_2 = \frac{0.3842}{0.433} = 0.8873$$

$$^\circ\text{API} = \frac{141.5}{0.8873} - 131.5 = 28$$

Utilizando curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tubería vertical con 82.96% aceite, RGL = 68.16 pie³/bl, diámetro interior de tubería de retorno 2.5 pg., $q_2 = 2200.6$ bl/día.

D = 8850 pie y Pwh = 120 lb/pg² se obtiene:

$$P_2 = 3450 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Figs. A-263, A-264, A-266 y A-267)}$$

7') De la ec. 4.37:

$$H = \frac{3450 - 1825}{7203.08 - 3450} = 0.4329$$

8') De la Fig. 4.5 con H = 0.4329 se obtiene:

Relación	M	Eficiencia, %	R
A	0.515	22.3	0.410
B	0.540	23.5	0.328
C	0.445	19.1	0.262

Por lo tanto la relación B es la adecuada.

$$M_{\text{corr.}} = 0.54 \times 0.94 = 0.5076$$

Comparando:

$$\left| \frac{0.5076 - 0.517}{0.5076} \right| \times 100 = 1.85 \% < 5\%$$

Entonces $M = 0.5076$

10) De la ec. 4.1 a:

$$q_1 = \frac{750}{0.5076} = 1477.5 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$$

11) De la ec. 4.57:

$$A_j = \frac{1477.5}{1214.5 \sqrt{\frac{7203.08 - 1825}{0.8498}}} = 0.01529 \text{ pg}^2$$

De la Tabla 4.1 con el valor de A_j calculado se selecciona:

a) Tobera Núm. 8 $A_j = 0.01767 \text{ pg}^2$ $d_j = 0.15 \text{ pg.}$

Cámara de mezclado Núm. 9 $A_t = 0.05393 \text{ pg}^2$ $d_t = 0.26204 \text{ pg.}$

Entonces la bomba seleccionada es una 8-B

Con el valor de A_j seleccionada y de la ec. 4.56 calcular el gasto de fluido motriz, q_1 :

$$q_1 = 1214.5 \times 0.01767 \sqrt{\frac{7203.08 - 1825}{0.8498}}$$

b) $q_1 = 1707.22 \text{ bl/día}$ a condiciones superficiales.

12) Verificar por cavitación:

De la ec. 4.48 y considerando $I_c = 1.35$ y $K_j = 0.15$:

$$M_c = \frac{1 - 0.328}{0.328} \sqrt{1 + 0.15 \sqrt{\frac{1825}{1.35(7203.08 - 1825) + 1825}}} = 0.9847$$

Como $M_c > M$ para la relación de bombeo B, no existe cavitación en la bomba.

Calcular la potencia de la bomba superficial:

De la ec. 3.20:

$$HP_{sup.} = 1.7 \times 10^{-5} \times 1707.22 \times 4000$$

c) $HP_{sup.} = 116$

PROBLEMAS PROPUESTOS

SERIE I. VII

- 1.1 Resolver el problema resuelto 2 considerando presión de descarga = 3000 lb/pg².

Solución :

Relación	M	Eficiencia, %
A	0.28	19.0
B	0.16	10.7

- 1.2 Resolver el problema resuelto 3 con una presión de entrada a la tobera de 7500 lb/pg².

Solución :

Relación A : $M_c < M$ existe cavitación

Relación B : $M_c < M$ no existe cavitación

Relación C : $M_c < M$ no existe cavitación

Relación D : $M_c < M$ no existe cavitación

- 1.3 Dadas las siguientes condiciones de operación de una bomba tipo jet :

¿Cuál es la relación de bombeo que proporciona la mayor eficiencia sin presentar cavitación ?

Presión a la entrada de la tobera = 8000 lb/pg²

Presión de descarga = 3000 lb/pg²

Presión de succión = 1000 lb/pg²

Solución :

Relación B) :

$$M = 0.60$$

$$E = 24.2\%$$

$$R = 0.328$$

$$M_c = 0.679$$

1.4 Para las siguientes condiciones :

Presión a la entrada de la tobera = 3600 lb/pg²

Presión de descarga = 2000 lb/pg²

Presión de succión = 1100 lb/pg²

¿ Qué producción a condiciones superficiales puede obtenerse -- con una bomba subsuperficial tipo jet, tobera número 5 y una relación de bombeo B ? Considerar una densidad relativa del fluido motriz de 0.83 (agua = 1.0)

Solución :

Gasto de aceite producido :

$$q_3 = 193 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$$

1.5 Con los datos del problema propuesto 1.4 determinar :

- a) La relación de bombeo sin presentar cavitación y con mayor eficiencia.
- b) El gasto de producción a condiciones superficiales del inciso a)

Solución :

a) Relación A) :

$$M = 0.39$$

$$E = 21.8\%$$

$$R = 0.410$$

$$M_c = 0.765$$

b) Gasto de aceite producido :

$$q_3 = 235.25 \text{ bl/día a condiciones superficiales.}$$

SERIE 2: VII

- 2.1 En un pozo con B.H. tipo jet se desea producir 1500 bl/día a -- condiciones superficiales con una presión de descarga 1600 lb/pg² y una presión de succión de 700 lb/pg², determinar :
- a) La presión mínima a la entrada de la tobera y la relación - de bombeo a la máxima eficiencia sin presentar cavitación.
 - b) Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales, aceite de densidad relativa 0.80 (agua = 1.0)
 - c) Area y número de la tobera y cámara de mezclado de la bomba subsuperficial.

Solución :

a) $P_1 = 5636 \text{ lb/pg}^2$

Relación de bombeo a la máxima eficiencia, D:

$M = 1.150$

$E = 25.6\%$

$R = 0.21$

$M_c = 1.243$

b) $q_1 = 1349 \text{ bl/día, a condiciones superficiales.}$

c) Tobera No. 7

$A_j = 0.01414 \text{ pg}^2 \quad (d_j = 0.13416 \text{ pg})$

Cámara de mezclado No. 10

$A_t = 0.06741 \text{ pg}^2 \quad (d_t = 0.29297 \text{ pg.})$

- 2.2 Resolver con los datos del problema resuelto 5, considerando -- que 80 bl/día de la producción es agua de densidad relativa 1.04

Solución :

- a) Tobera No. 5 :

$$\underline{A_j = 0.00905 \text{ pg}^2 \quad (d_j = 0.10733 \text{ pg.})}$$

Cámara de mezclado No. 5

$$\underline{A_t = 0.02209 \text{ pg}^2 \quad (d_t = 0.16771 \text{ pg.})}$$

- b) $q_1 = 882.4$ bl/día a condiciones superficiales

- c) $P_s = 3507$ lb/pg²

- d) $HP_{sup.} = 53$

- 2.3 Resolver con los datos del problema resuelto 5 considerando flujo motriz agua de densidad relativa 1.04

Solución :

- a) Tobera No. 5 :

$$\underline{A_j = 0.00905 \text{ pg}^2, \quad (d_j = 0.10733 \text{ pg.})}$$

Cámara de mezclado No. 5

$$\underline{A_t = 0.02209 \text{ pg}^2, \quad (d_t = 0.16771 \text{ pg.})}$$

b) $q_1 = 882.35 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

c) $P_s = 3875.14 \text{ lb/pg}^2$

d) $HP_{sup.} = 59$

2.4 Con los datos del problema propuesto 4.3, resolver considerando que no se bombea gas.

Solución :

a) Tobera No. 2;

$$A_j = 0.00463 \text{ pg}^2 ; \quad (d_j = 0.07680 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 2;

$$A_t = 0.01131 \text{ pg}^2 ; \quad (d_t = 0.12000 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 2-A

b) $q_1 = 468.75 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$.

c) $P_s = 3562.94 \text{ lb/pg}^2$

d) $HP_{sup.} = 29$

2.5 Con los datos del problema propuesto 4.3, resolver considerando que no se bombea gas y que el fluido motriz es agua de densidad relativa 1.02.

Solución :

a) Tobera No. 3 :

$$A_j = 0.00579 \text{ pg}^2 ; \quad (d_j = 0.08587 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 3

$$A_t = 0.01414 \text{ pg}^2 ; \quad (d_t = 0.13416 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 3-A

b) $q_1 = 555.55 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$.

c) $P_s = 3695.88 \text{ lb/pg}^2$

d) $HP_{sup.} = 35$

SERIE 3.VII

3.1 En un pozo se desea instalar el B.H. tipo jet para producir por espacio anular, y se tiene la siguiente información :

Profundidad de colocación de la bomba = 8000 pie

Tubería de inyección = 2 3/8 pg. d.e.

Tubería de revestimiento = 5 1/2" pg. d.e. (4.950 pg. d.i.)

Relación gas-aceite = 300 pie³/bl

Produciendo 100% aceite (35 °API)

Presión de fondo estática = 1600 lb/pg²

Presión en la cabeza del pozo = 100 lb/pg²

Índice de productividad = 0.4 bl/día/lb/pg² (constante)

Temperatura a la profundidad de la bomba = 180 °F

Temperatura superficial = 115 °F

Considerando una producción deseada de 400 blo/día y que no se bombea gas; suponer como fluido motriz el aceite producido, determinar :

- Número y área de tobera y cámara de mezclado de la bomba --- subsuperficial. (seleccionar la bomba adecuada)
- Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales.
- Presión superficial de inyección del fluido motriz.
- Potencia de la bomba superficial.

Solución :

a) Tobera No. 7

$$A_j = 0.01414 \text{ pg}^2, \quad (d_j = 0.13416 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 7

$$A_t = 0.03451 \text{ pg}^2, \quad (d_t = 0.20963 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 7-A

b) $q_1 = 1481.48 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

c) $P_s = 3801.41 \text{ lb/pg}^2$

d) $HP_{sup.} = 96$

- 3.2 Resolver con los datos del problema propuesto 3.1 y considerando que el fluido motriz es agua de densidad relativa 1.02.

Solución :

a) Tobera No. 8

$$A_j = 0.01767 \text{ pg}^2, \quad (d_j = 0.15000 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 8

$$A_t = 0.04314 \text{ pg}^2, \quad (d_t = 0.23438 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 8-A

b) $q_1 = 1702.12 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

c) $P_s = 3904.42 \text{ lb/pg}^2$

d) $HP_{sup.} = 113$

- 3.3 En un pozo se requiere instalar el bombeo hidráulico tipo jet -- para producir 2500 bl/día por espacio anular, además se cuenta -- con la siguiente información :

Diámetro de la tubería de inyección = 2 7/8 pg. (d.e.)
 Diámetro de la tubería de revestimiento = 7 pg. d.e. (6.456 pg. d.i.)
 Producción de agua = 50% (densidad relativa del agua = 1.07)
 Relación gas-aceite = 400 pie³/bl
 Presión de fondo estática = 1920 lb/pg²
 Índice de productividad = 5 bl/día/lb/pg² hasta el punto de burbujeo
 de 1500 lb/pg² después del cual considerar la solución del Vogel.
 Aceite producido de 35 °API
 Presión en la cabeza del pozo = 120 lb/pg²
 Profundidad de colocación de la bomba = 8000 pie
 Temperatura a la profundidad de la bomba = 170 °F
 Temperatura superficial = 109 °F
 De una prueba de producción se obtuvo : 2400 bl/día a 1435 lb/pg²
 Considerando que no se bombea gas y que el fluido motriz es el -
 aceite producido, determinar :

- a) Número y Área de tobera y cámara de mezclado de la bomba -- subsuperficial (Seleccionar la bomba adecuada)
- b) Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales
- c) Presión superficial de inyección del fluido motriz
- d) Potencia de la bomba superficial .

Solución :

- a) Tobera No. 14;

$$A_j = 0.06741 \text{ pg}^2, \quad (d_j = 0.29297 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 14

$$A_t = 0.16458 \text{ pg}^2, \quad (d_t = 0.45776 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 14-A

b) $q_1 = 6097.56 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

c) $P_s = 4164.91 \text{ lb/pg}^2$

d) $HP_{sup.} = 432$

- 3.4 Resolver con los datos del problema propuesto 3.3 considerando que la producción deseada en la superficie es de 2000 bl/día y empleando como fluido motriz agua de densidad relativa 1.02. - Suponer que no se bombea gas.

Solución :

a) Tobera No. 14 :

$$A_j = 0.06741 \text{ pg}^2, \quad (d_j = 0.29297 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 14 :

$$A_t = 0.16458 \text{ pg}^2, \quad (d_t = 0.45776 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 14-A

b) $q_1 = 6060.60 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

c) $P_s = 3836.65 \text{ lb/pg}^2$

d) $HP_{sup.} = 396$

- 3.5 En un pozo se instalará el B.H. tipo jet y cuenta con los datos siguientes :

Profundidad de colocación de la bomba = 8500 pie

Tubería de revestimiento = 6.456 pg. d.i.

Tubería de inyección = 2.5 pg. d.i.

Tubería de retorno = 2.5 pg. d.i.

Presión en cabeza del pozo = 100 lb/pg²

Presión de fondo estática = 1900 lb/pg²

Índice de productividad = 2.2 bl/día/lb/pg² (constante)

Producción deseada de fluidos = 700 bl/día a condiciones superficiales

Producción de agua = 35 % ($\gamma_w = 1.03$)

Densidad relativa del aceite producido = 40 °API

Relación gas-aceite = 300 pie³/bl

Temperatura superficial = 105 °F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 180 °F

Considerando fluido motriz agua de densidad relativa 1.03 y bombeando gas, determinar :

- Número y área de la tobera y cámara de mezclado de la bomba subsuperficial (seleccionar la bomba adecuada)
- Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales.
- Potencia de la bomba superficial

Solución :

a) Tobera No. 8 :

$$A_j = 0.01767 \text{ pg}^2 \quad (d_j = 0.15 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 8 :

$$A_t = 0.01767 \text{ pg}^2 \quad (d_t = 0.1500 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : B-A

b) $q_1 = 1660 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$.

c) HP_{sup.} = 113

SERIE 4.VII

- 4.1 Resolver el problema propuesto 3.5 considerando como fluido motriz el aceite producido .

Solución :

- a) Tobera No. 7 :

$$A_j = 0.01414 \text{ pg}^2 , \quad (d_j = 0.13416 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 8 :

$$A_t = 0.04314 \text{ pg}^2 , \quad (d_t = 0.23438 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 7-B

- b) $q_1 = 1391.34 \text{ bl/día a condiciones superficiales.}$

- c) $HP_{\text{sup.}} = 95$

- 4.2 Resolver el problema resuelto 10 considerando fluido motriz agua de densidad relativa 1.07

Solución :

- a) Tobera No. 9 :

$$A_j = 0.02209 \text{ pg}^2 , \quad (d_j = 0.16771 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 9 :

$$A_t = 0.05393 \text{ pg}^2 , \quad (d_t = 0.26204 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 9-A

b) $q_1 = 2039.23$ bl/día, a condiciones superficiales.

c) $HP_{sup.} = 139$

4.3 A un pozo se le instalará el sistema de B.H. tipo jet y cuenta con los datos siguientes :

Profundidad de colocación de la bomba = 7600 pie

Diámetro de la tubería de inyección = 2 3/8" d.e.

Relación gas-aceite = 400 pie³/bl

Diámetro de la tubería de retorno = 1.9" d.e. (1.610" d.i.)

Presión en la cabeza del pozo = 80 lb/pg²

Presión de fondo estática = 1500 lb/pg²

Presión de burbujeo = 1500 lb/pg²

Gasto de producción deseado = 150 bl/día a Pwf = 750 lb/pg²

Producción de agua = 0 %

Aceite producido de 35 °API

Temperatura superficial = 109 °F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 170 °F

Si el fluido motriz es el aceite producido y se bombea gas, determinar :

- Número y área de la tobera y cámara de mezclado de la bomba subsuperficial (seleccionar la bomba adecuada)
- Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales
- Potencia de la bomba superficial

Solución :

a) Tobera No. 3 :

$$A_j = 0.00579 \text{ pg}^2, \quad (d_j = 0.08587 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 4 :

$$A_t = 0.01767 \text{ pie}^2, \quad (d_t = 0.15 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 3-B

b) $q_1 = 591.98 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

c) $HP_{sup.} = 41$

4.4 En un pozo se desea instalar el sistema de B.H. tipo jet y cuenta con la siguiente información :

Profundidad de colocación de la bomba = 9000 pie

Diámetro de la tubería de inyección = 2 3/8 pg. d.e.

Diámetro de la tubería de retorno = 2 7/8 pg. d.e.

Diámetro de la tubería de revestimiento = 7 pg. d.e.

Presión de fondo estática = 2200 lb/pg²

Índice de productividad = 6.0 bl/día/lb/pg² (constante)

Presión en la cabeza del pozo = 140 lb/pg²

Gasto de líquido deseado = 1000 bl/día

Producción de agua = 0.0 %

Aceite producido = 38 °API

Relación gas-aceite = 600 pie³/bl

Temperatura superficial = 130 °F

Temperatura a la profundidad de la bomba = 210 °F

Considerando que se bombea gas y que el fluido motriz es el aceite producido, determinar :

- Número y área de la tobera y cámara de mezclado de la bomba subsuperficial (seleccionar la bomba adecuada)
- Gasto de fluido motriz a condiciones superficiales
- Potencia de la bomba superficial

Solución :

a) Tobera No. 4 :

$$A_j = 0.00724 \text{ pg}^2, \quad (d_j = 0.09600 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 8 :

$$A_t = 0.04314 \text{ pg}^2, \quad (d_t = 0.23438 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 4-E

b) $q_1 = 692.79 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

c) $HP_{sup.} = 48$

4.5 Resolver con los datos del problema propuesto 4.4 considerando como fluido motriz agua de densidad relativa 1.04 .

Solución :

a) Tobera No. 8 :

$$A_j = 0.01767 \text{ pg}^2, \quad (d_j = 0.15000 \text{ pg.})$$

Cámara de mezclado No. 10 :

$$A_t = 0.06741 \text{ pg}^2, \quad (d_t = 0.29297 \text{ pg.})$$

Bomba seleccionada : 8-C

b) $q_1 = 1613.04 \text{ bl/día a condiciones superficiales}$

c) $HP_{sup.} = 110$

REFERENCIAS

- 1) Gómez Cabrera J. Angel; "Apuntes de Producción de Pozos I", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. México, 1988.
- 2) Jiménez Guzmán Conrado y Ortiz Polo Roger P.; "Aplicación del Bombeo Hidráulico en Pozos Petroleros", Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. México 1988.
- 3) López Juvera Ramón; Aplicación del Análisis Nodal en el diseño de Instalaciones de Bombeo Hidráulico", Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. México 1986.
- 4) Brow , K.E. et al.; "The Technology of Artificial Lift Methods", Penn Well Books, 1977 Volúmenes 3a y 3b.
- 5) Brow, K.E. et al.; "The Technology of Artificial Lift Methods", Penn Well Books, 1977 Volumen 2b
- 6) Tjondrodiputro Bambang, Gaul Robert B. and Gower G.H.; "Hydraulic Jet Pumping in a Remote Location", World Oil, December 1986.
- 7) Petrie, H.L. and Smart E.; "Jet Pumping Oil Wells", World Oil, November 1983.