



UNIVERSIDAD GRUPO CEDIP
MAESTRIA EN INGENIERIA PETROLERA

MANEJO DE LA PRODUCCION II

CUARTO SEMESTRE

ASESOR: RAMON AVILES JIMENEZ

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 congénita en el yacimiento, conjuntamente con cierta cantidad de agua. Al producir y obtener los hidrocarburos en la superficie, la temperatura y la presión de la mezcla se reducen. El estado de 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% de 1 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 pies de altura y completamente llenas con agua salada de $72 \text{ lb}/\text{pie}^3$. La base de la 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 un área de 1 pie^2 . De la misma manera, la tubería menor de diámetro esta constituida por 10 secciones de 1 pie de altura por un área de $1/144 \text{ pie}^2$, y tiene un volumen de $10 \times 1/144 = 0.069 \text{ pie}^3$ siendo el peso de la columna de líquido de $0.069 \times 72 = 5 \text{ lb}$: el cual representa la fuerza ejercida sobre un área de 1 pg^2

La presión se expresa comúnmente en lb/pg^2 , definiéndose como:

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

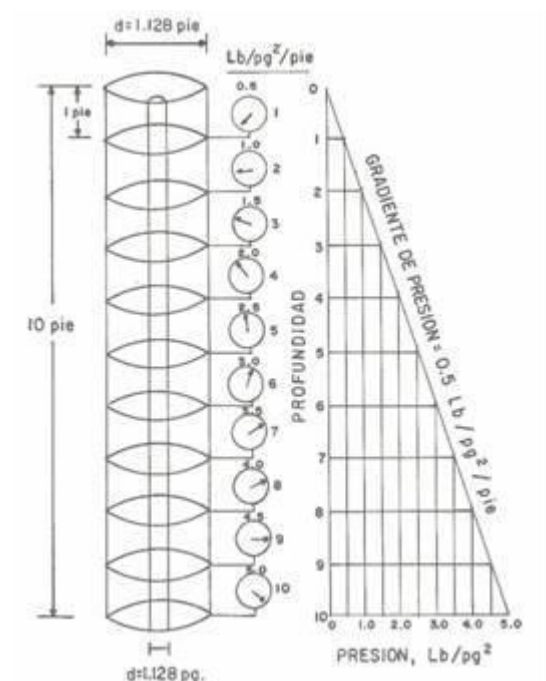


Fig. 3.1 GRADIENTE DE PRESIÓN

De este modo, la presión ejercida sobre la base de la tubería de menor diámetro es de

$5 \text{ lb} / 1 \text{ pg}^2 = 5 \text{ lb} / \text{pg}^2$ y sobre la de mayor diámetro es de $720 \text{ lb} / 1 \text{ pie}^2 \times 1 \text{ pie}^2 / 144 \text{ pg}^2 = 5 \text{ lb} / \text{pg}^2$.

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

$$\text{de } 53 \text{ lb} / \text{pg}^3 \times \frac{1 \text{ pie}^3}{144 \text{ pg}^2} = 0.368 \text{ lb} / \text{pg}^2 / \text{pie}$$

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

Así mismo se presentan problemas sobre gases ideales y reales para mezcla 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 lb/pg^2 abs. y una temperatura de 300°F

Componentes	Mol (%)
Metano	70.0
Etano	10.0
Propano	7.0
n-Butano	3.0
Bióxido de Carbono	6.0
Nitrógeno	4.0
	<hr/> 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 serán iguales debido a las desviaciones en los factores de compresibilidad, los cuales son diferentes para cada componente de la mezcla del gas.

(1) Componente	(2) n_i (lb-mol)	(3) fracción molar, n_i	(4) T_{ci} ($^\circ\text{R}$)	(5) P_{ci} (lb/pg ² abs.)	(6) $n_i x T_{ci}$ ($^\circ\text{R}$)	(7) $n_i x P_{ci}^2$ (lb/pg ² abs.)
CH ₄	70.0	0.70	343.37	667.8	240.359	467.46
C ₂ H ₆	10.0	0.10	550.09	707.8	55.009	70.78
C ₃ H ₈	7.0	0.07	666.01	616.3	46.6207	43.141
n-C ₄ H 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
	<hr/> 100.0	<hr/> 1.00			<hr/> 406.9362	<hr/> 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 pie^3 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:

- Tubular P_{ci} y T_{ci} para cada componente de la mezcla del gas (columna 4 y 5).
- Multiplicar la fracción molar de cada componente por su respectiva P_{ci} y T_{ci} (columna 6 y 7).
- Sumar los valores separadamente en las columnas 6 y 7. 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 el determinación de la presión y temperatura pseudo reducidas. (p_{Pr} y p_{Tr})

Donde:

$$p_{Tr} = \frac{T}{p T_c} = \frac{760}{406.9362} = 1.867$$

$$p_{Pr} = \frac{P}{p P_c} = \frac{1520}{681.882} = 2.229$$

Haciendo referencia a la Fig. 1 con los valores de p_{Pr} y p_{Tr} se determina el factor de compresibilidad del gas.

$$Z = 0.926$$

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:

$$p T_c = 167 + 316.67 \gamma g$$

$$p P_c = 702.5 - 50 \gamma g$$

Por lo que únicamente se requiere conocer la densidad relativa del gas (γg).

Para la determinación del factor de compresibilidad del gas (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/pg² 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:

$$P_2 = \frac{P_1 \times T_2}{T_1}$$

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

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

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:

$$\frac{P_1 V_1}{Z_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{Z_2 T_2} \quad \text{donde:} \quad \begin{aligned} P_1 &= 814.7 \frac{\text{lb}}{\text{pg}_2} \text{ abs.} \\ T_1 &= 540^\circ R \\ T_2 &= 640^\circ R \end{aligned}$$

Procedimiento:

- 1) Suponer constantes e iguales 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:

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

- 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) $V_1 = V_2$
- 2) Los valores de Z se obtendrán utilizando la Fig. 2 Para:
 - 3) $P_1 = 814.7 \text{ lb / pg}_2 \text{ abs.}$ y $T_1 = 80^\circ F$

$$Z_2 = 0.87$$

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

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

5.42 > 1.0 por lo que:

P_2 supuesta = 1021.1 lb / pg₂ abs. y $T_2 = 180^\circ\text{F}$

$Z_1 = 0.915$

De donde :

$$P_2 = \frac{814.7 \times 0.915 \times 640}{0.87 \times 540} = 1015.5 \text{ lb abs}$$

$$er = \left| \frac{1015.1 - 1021.1}{1015.5} \right| \times 100 = 0.55\%$$

0.55 < 1.0 por lo que:

$P_2 = 1015.5 \text{ lb / pg}_2 \text{ abs}$

$P_2^{\text{P domo}} = 1015.5 - 14.7 = 1000.8 \text{ lb / pg}_2 \text{ man.}$

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

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

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:

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

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

$$R_1 = 10.73 \frac{\text{psia} \cdot \text{pie}^3}{\text{lb} \cdot \text{mol} \cdot \text{R}}$$

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

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

Por lo que:

$$Z_1 = 0.925$$

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

b) Determinar las lb-mol de gas a una presión de 800 lb/pg² abs.

$$P_2 V_2 = Z_2 n_2 R_2 T_2$$

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

$$Z_2 = 0.925$$

Por lo que:

$$n_2 = \frac{800 \times 1500}{0.937 \times 10.73 \times 660} = 180.84 \text{ lb} \cdot \text{mol}$$

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 estándar ocupa un volumen de 379.4 pie³, entonces el volumen de gas recuperado es de:

$$\frac{379.4 \text{ pie}_3}{1 \text{ lb-mol}} \times 48.14 \text{ lb-mol} = 18264.3 \text{ pie}_3 \text{ a.c.s.}$$

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 lb/pg² abs. y la temperatura promedio de 150°F

Solución:

Utilizando la siguiente ecuación empírica:

$$P_2 = P_1 + 2.5 \frac{P}{100} \frac{L}{1000}$$

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

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

$$P_2 = 1000 + 2.5 \frac{1000}{100} \frac{10000}{1000}$$

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

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

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

$$p \text{ Pr} = \frac{1125}{665} = 1.73$$

$$P_{tr} = 1.50$$

donde: Z = 0.84 (De la figura 1.)

$$l = \frac{2.7 \times 1125 \times 0.75}{455 \text{ lb/pie}^3 \times 0.84 \times 610}$$

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

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

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

0.68 < 1.0 por lo que:

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

Comprobación utilizado la siguiente ecuación.

$$P_2 = p_1 e^{(0.01877)(\gamma_g(L)/TZ)}$$

Donde:

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

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

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

$$\bar{Z} = 0.845$$

$$\gamma_g = 0.75 \quad (0.01877 \times 0.75 \times 10000) / (610 \times 0.845)$$

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

$$P_2 = 1000 \times e$$

$$P_2 = 131404 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs}$$

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)

b) P_{wh} = 300 lb/pg² man.

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

6. Calcular la densidad (lbm/pie³) y gradiente de presión (lb/pg²/pie) de una mezcla de fluidos que contiene 50% de agua salada ($\gamma_w = 1.08$), 30% de aceite (400 API) y 20% de gas ($\gamma_g = 0.65$, aire = 1.0) a 50 lb/pg² abs

Considerar un gas ideal a una temperatura de 1000F.

Solución:

Para la densidad de la mezcla (l m):

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

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

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

$$l_g = 2.7 \frac{P\gamma_g}{ZT}$$

Para gas ideal Z = 1.0

$$l_g = 2.7 \frac{50 \times 0.65}{1 \times (100 + 460)} = 0.1566 \text{ lbm} / \text{pie}^3$$

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

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

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

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

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

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

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

7. Determinar el factor de compresibilidad (Z) de un gas de densidad relativa 0.70 (aire = 1.0) a una presión de 1500 lb/pg² abs. y a una temperatura de 80°C.

Solución:

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

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

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

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

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

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

donde: $Z = 0.86$ (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 lb/pg² abs. y 200°F

b) 1500 lb/pg² 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)	$n_i \times M_i$ (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
C ₂ O	0.02	44.010	0.8802
N ₂	0.03	28.013	0.8404
	1.00		19.7668

$$y_g = \frac{\bar{M}_g}{M_{aire}}, \text{ donde } M_{aire} = 28.97 \text{ lb/lb-mol}$$

$$y_g = \frac{19.7668}{28.97}$$

$$pT_c = 167 + 316.67y_g = 167 + 316.67 \times 0.6823 = 383.06^\circ R$$

$$pP_c = \frac{702.5 - 50y_g}{200 + 460} = \frac{702.5 - 50 \times 0.6823}{200 + 460} = 668.38 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs}$$

$$pTr = \frac{3000}{383.06} = 1.722$$

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

donde : $Z = 0.87$

De la figura 1.

b)

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

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

donde $Z = 0.888$ De la figura 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 $T = 80^\circ\text{F} = 540 \text{ }^\circ\text{R}$

$Z = 0.82$ (De la figura 4.)

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

por lo tanto:

$$n = \frac{1500 \times 300 \times 0.000}{0.82 \times 10.73 \times 540}$$

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

De la ley de Avogadro:

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

donde: $\overline{M}_{CH_4} = 16.043 \frac{\text{lbm}}{\text{lb-mol}}$ de la tabla 1

Por lo tanto :

$$m = n \times Mg$$

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

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

10. Dada la composición de 100 pie^3 de gas natural a 300°F y $2500 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$, calcular:

- El porcentaje molar
- El porcentaje en peso

Componente	Volumen (%)
CH_4	67.0
C^2H^6	30.0
C^3H^8	1.0
CO_2	2.0
	100.0

Solución:

a) Empleando la Tabla 1, 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 × \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	49.95
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 1.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 lb-mol**

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

Solución: **M_{aire} = 15264.3 lbm**

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

Componente	Fracción Molar (n _i)
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:

Peso molecular promedio = **22.828 lbm/lb-mol**

1.4 Calcular la densidad relativa el gas natural del problema propuesto 1.3

Solución: **γ_g = 0.7879**

1.5 ¿Qué volumen (pie³) ocuparan 200 lbm de un gas de densidad relativa de 0.60 (aire=1.0) a una presión de 3000 lb/pg² abs. Y una temperatura e 200 °F.

Solución: **V= 24.71 pie³**

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: $\rho_g = 2.70 \frac{P\gamma_g}{ZT}$
 $\rho_g = 8.973 \text{ lbm/Pie}^3$

2.2 Determinar la presión en el domo de una válvula de Bombeo Neumático (B.N.) cargada con nitrógeno a 800.1b/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) $p = 988 \text{ lb/pg}^2 \text{ man}$
 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/pie³

c) Densidad en lbm/gal

d) Densidad en lbm/bl

e) Gradiente en lb/pg²/pie

f) Compresibilidad en (lb/pg²)⁻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 lb/pg², ¿Cuáles serán los volúmenes (en bl.) a 1500 lb/pg² y 60 lb/pg² ?

Solución:

Para 1500 lb/pg^2 :

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

Para 60 lb/pg^2 :

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

2.5 ¿Qué gradiente de presión ($\text{lb/pg}^2/\text{pie}$) ejercerá el agua salada con densidad relativa de 1.5 (agua=1.0) ? ¿Que presión hidrostática se tendrá a una profundidad de 8,500 pies?

Solución:

$$\mathbf{G_{ws} = 0.048833 \text{ lb/pg}^2/\text{Pie}}$$

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

SERIE 3.III

3.1 Calcular el gradiente de presión ($\text{lb/pg}^2/\text{pie}$) de una mezcla con 62% aceite (37 API) Y 38% agua salada ($\gamma_w = 1.15$)

Solución: **Gm = 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/pg^2 . 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 pie

b) N.E. = 4485.32 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 pie^3/bl . Empleando la ecuación empírica desarrollada por L.N. Jhonson (Referencia 3).

Solución:

$\mu_o = 6.78 \text{ cp}$

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

	Presión (lb/pg^2)	Temperatura
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) $V_2 = 380.7 \text{ Pie}^3/\text{lb-mol}$

$$c) \quad V_2 = 371.2 \text{ Pie}^3 / 1\text{b-mol}$$

$$d) \quad V_2 = 358.97 \text{ Pie}^3 / 1\text{b-mol}$$

$$e) \quad V_2 = 371.26 \text{ pie}^3 / 1\text{b-mol}$$

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

a) Pie^3 , lb/pg^2 , $^{\circ}\text{R}$, lbm-mol

b) cm^3 , atm , $^{\circ}\text{K}$, gm-mol

c) pie^3 , atm , $^{\circ}\text{R}$, lb-mol

d) pie^3 , lb/pie^2 , $^{\circ}\text{R}$, lb-mol

e) lt , atm , $^{\circ}\text{K}$, gm-mol

Solución:

$$R = 10.7253 \frac{\text{lb} / \text{pg}^2 \text{ pie}^3}{\text{lb} - \text{mol}^{\circ}\text{R}}$$

$$b) 81.9139 \frac{\text{atm} - \text{cm}_3}{\text{g} \text{ } ^{\circ}\text{K} \text{ } m\text{-mol}}$$

$$c) R = 0.7296 \frac{\text{atm} - \text{pie}_3}{\text{lb} - \text{mol}^{\circ}\text{R}}$$

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

$$e) R = 0.08210 \frac{\text{atm} - \text{lt}}{\text{gm-mol} - ^{\circ}\text{k}}$$

SERIE4.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:

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

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

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

e) 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	10.0
	100.0

Solución:

a)

Componente	Porcentaje Molar $n(\%) = \frac{n_i}{n} \times 100$
CH ₄	80.0
C ₂ H ₆	10.0
C ₃ H ₈	10.0
	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 $260 \text{ }^\circ\text{F}$

Solución:

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

TABLAS Y FIGURAS

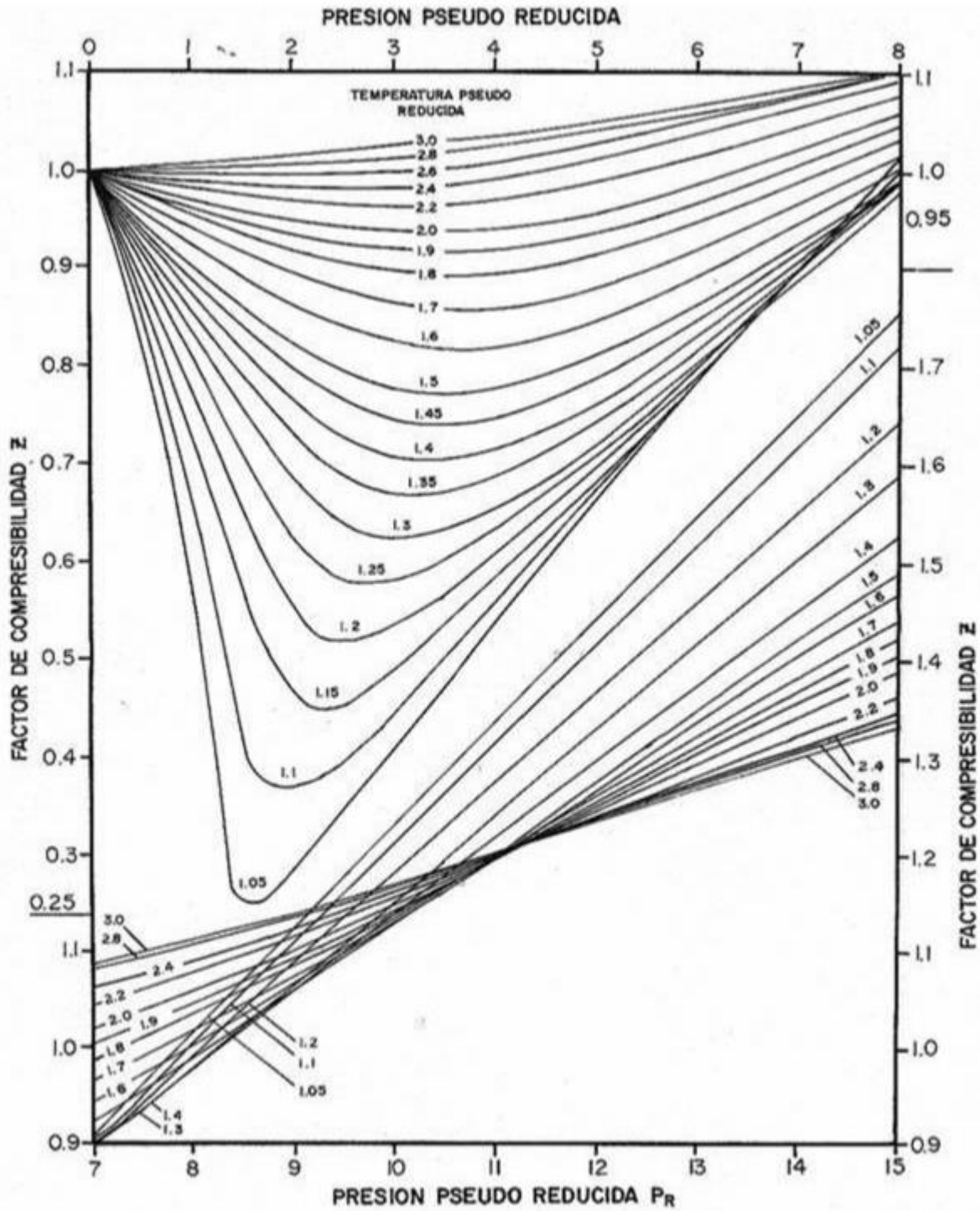
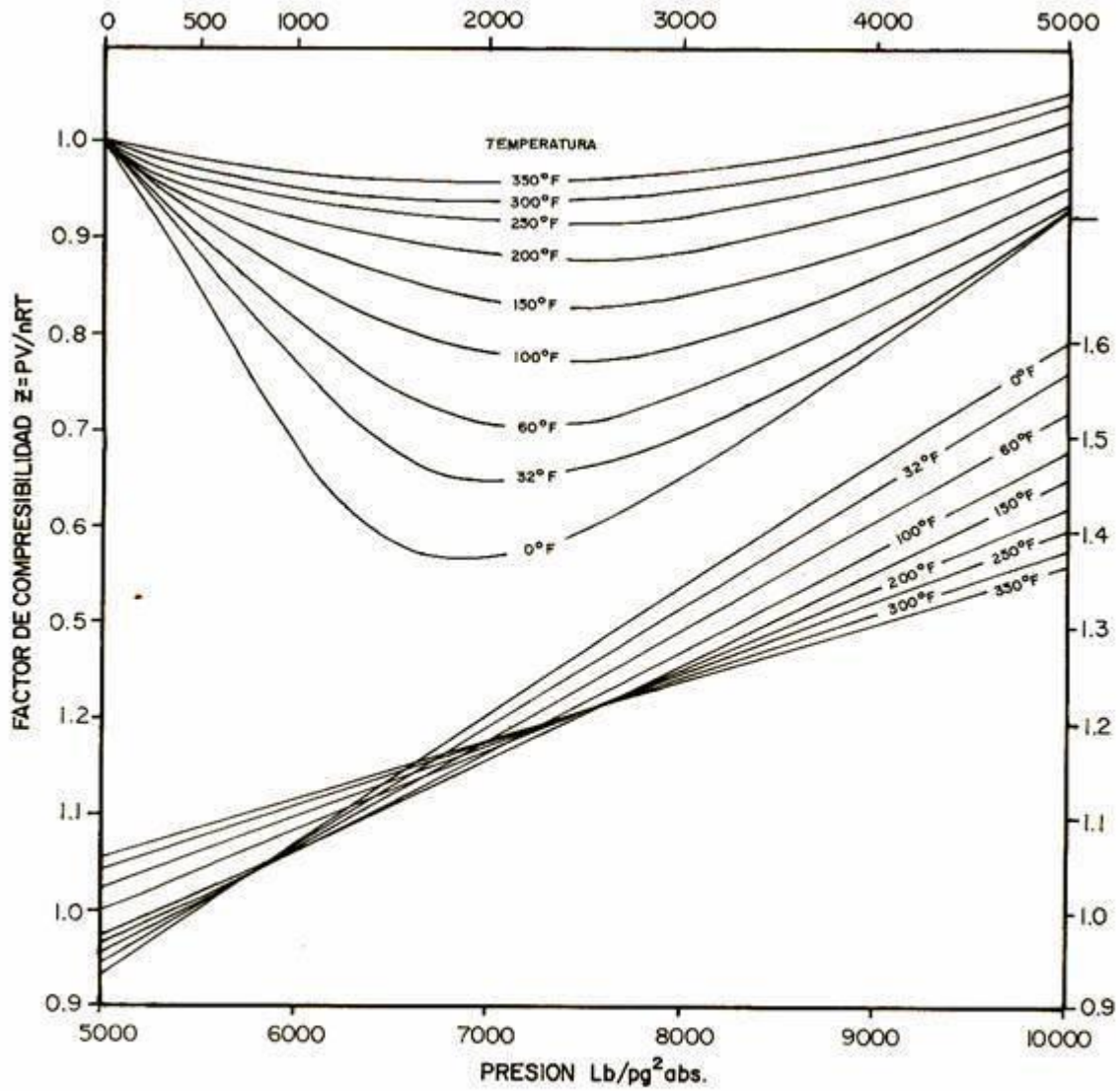


Fig. 1 Factores de compresibilidad de gases naturales, como ⁽³⁾ función de la presión y temperatura reducida.



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

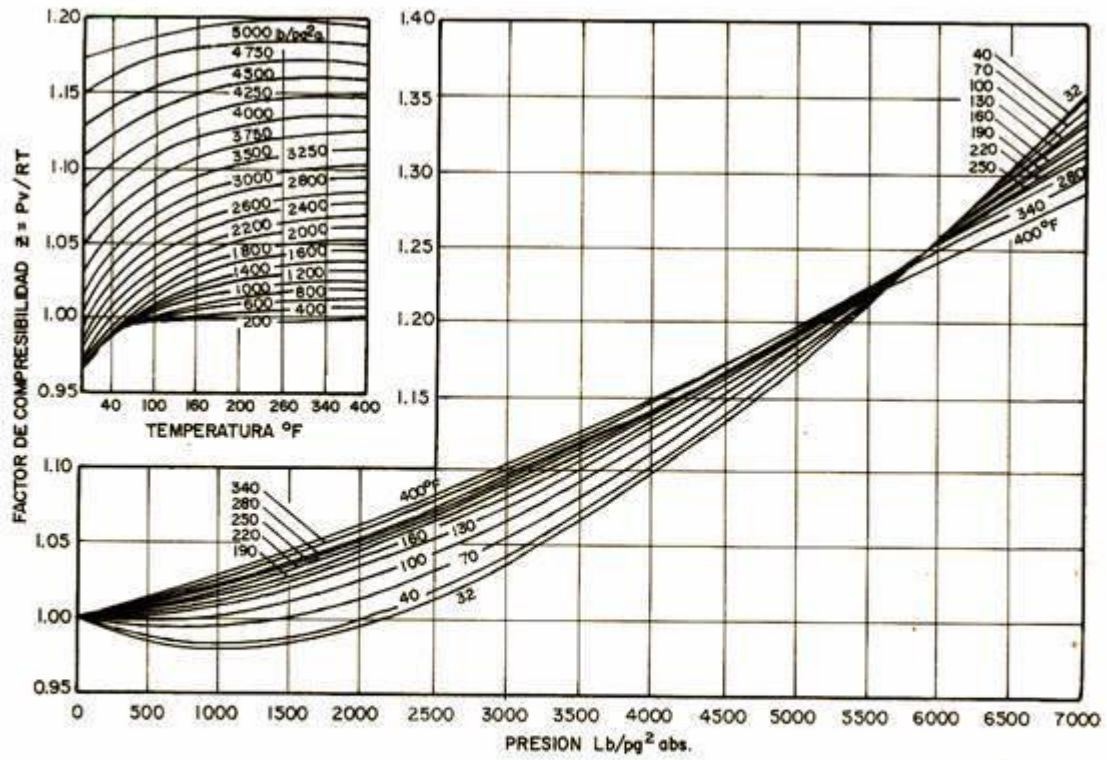


Fig. 3 Factores de compresibilidad "Z" para⁽³⁾ el nitrógeno.

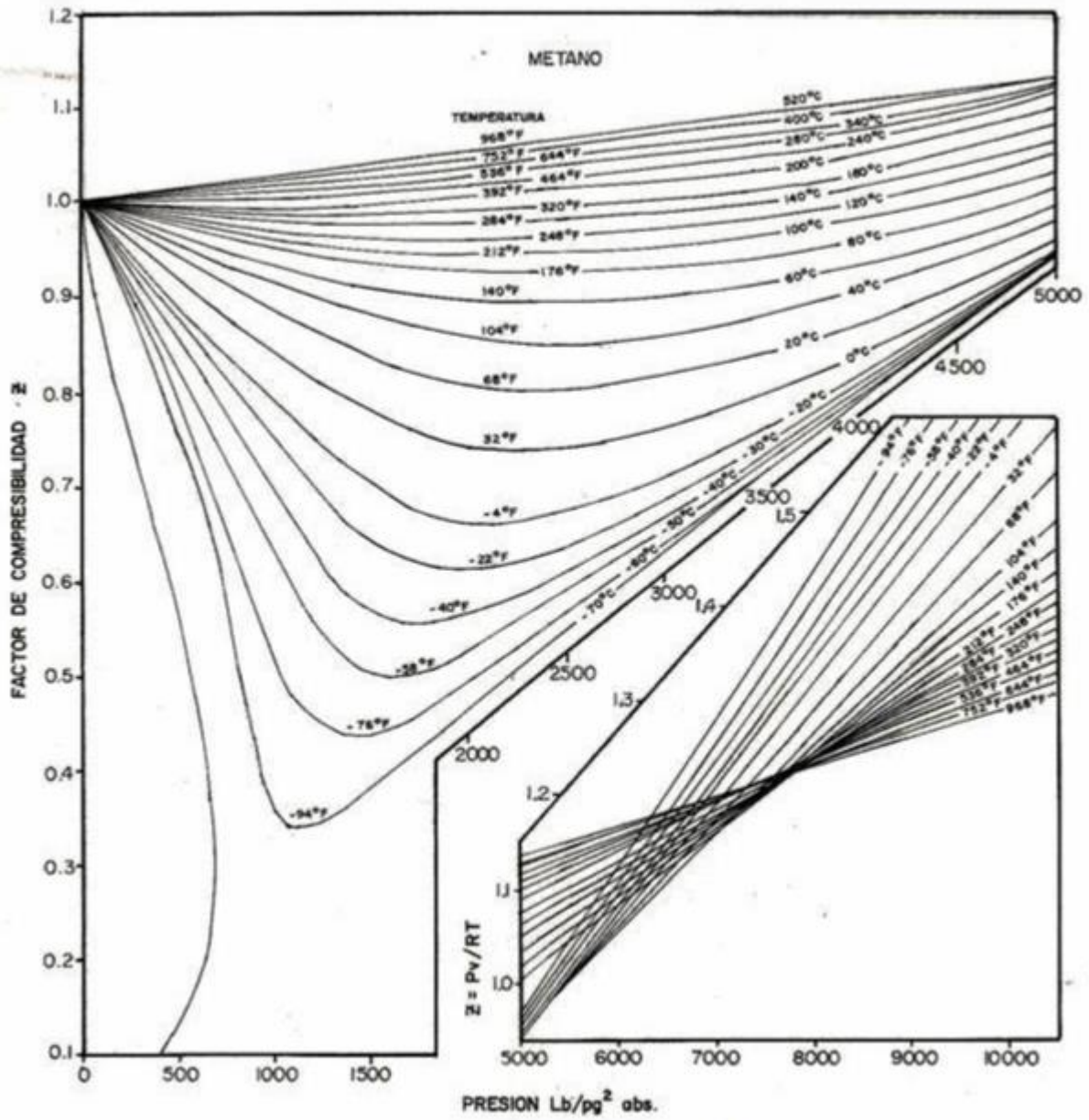


Fig.4 Factores de compresibilidad del metano⁽³⁾

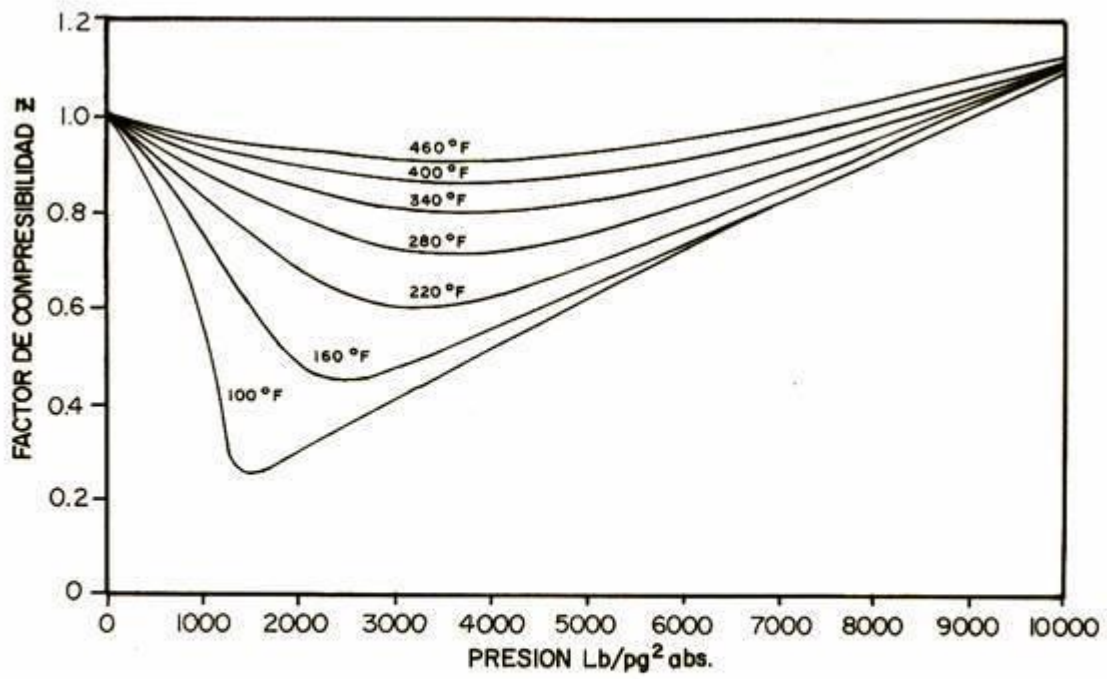


Fig. 5 Factores de compresibilidad "Z" para⁽³⁾ bióxido de carbono (CO_2)

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

FORMULA	COMPONENTE	MASA MOLECULAR	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	Bióxido de Carbono	44.010	1071.170	87.923
HCl	Ácido Clorhídrico	36.461	1198.170	124.517
H ₂ O	Agua	18.015	3208.170	705.617
H ₂ S	Ácido 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 este ocupa.

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;

$$\gamma_1 = \frac{\rho_1}{\rho_{\text{agua}}} \quad \gamma_{\text{gas}} = \frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{aire}}}$$

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:

$$W_i = \frac{W_i}{W_m}, i = 1,2,3,\dots$$

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:

$$v_i = \frac{V_i}{V_m}, i = 1,2,3,\dots$$

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:

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

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 si su presión inicial aumenta dos veces y manteniendo su volumen constante si 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:

$$PV = nZRT$$

Gradiente de Presión: Esta 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: $P_e =$

ρg 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 esta.

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 Petirena Francisco; "Apuntes de Transporte de Hidrocarburos", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F.