

En el Capítulo 2 se presentaron varias ecuaciones y métodos para el cálculo de la presión de fondo fluyendo en pozos de gas, en la cabeza del pozo, en la válvula subsuperficial, en la válvula de fondo, en el estrangulador superficial así como en la línea de descarga, entre otras presiones, con sus respectivas caídas de presión en los nodos principales que componen al sistema integral de producción. La solución de esas ecuaciones es iterativa y, a menos que una computadora esté disponible, puede requerir una cantidad considerable de tiempo para resolverla.

Por lo anterior se sugiere el uso de programas de cómputo para el cálculo más exacto y en menor tiempo del comportamiento de las presiones en los principales nodos así como los efectos que producen en tiempo real como a tiempo futuro, es decir, que efectos van a tener los cambios en las caídas de presión en los elementos del sistema respecto al comportamiento de flujo del pozo.

Las estimaciones en el campo se dan utilizando curvas de presión, las cuales pueden ser calculadas utilizando condiciones relativas a un campo específico, de manera práctica y con resultados cercanos a los exactos. Estas curvas características de un campo pueden ser preparadas utilizando la ecuación 2.3.27 ó el método de Cullender y Smith (ver figuras 5. A1, 5.A2). Cabe señalar que cuando se utilizan las curvas preparadas, no se tiene control sobre la densidad del gas, la temperatura fluyendo, la viscosidad del gas o la rugosidad de la tubería, pero dan resultados aproximados en tiempos cortos.

A continuación se presentan algunos ejemplos representativos de métodos presentados anteriormente y que en la actualidad siguen dando resultados muy aceptables, a demás de que los programas de cómputo utilizados con el mismo fin de los métodos están basados en los mismos.

5.1 EJEMPLO 5.1, (H. Dale Beggs, 2002).

Un líquido con una densidad específica de 0.82 y una viscosidad de 0.003 kg/m-s fluye en un diámetro de tubería de 4 pg a una velocidad de 9.14 m/s. El material de la tubería es acero comercial. Calcular el factor de fricción usando la ecuación de Colebrook y la ecuación de Jain.

Solución:

De la figura 2.19, para un acero comercial, $\epsilon/d=0.00045$. La solución por Colebrook usando la ecuación de Drew, Koo, McAdams para una primera aproximación es:

$$N_{Re} = \rho v d / \mu = \frac{(820)(9.14)(.1016)}{.003} = 253,824$$

$$f_g = 0.0056 + 0.5 N_{Re}^{-0.32} = 0.0056 + 0.5(253,824)^{-0.32}$$

$$f_g = 0.015$$

$$f_c = \left[1.74 - 2 \log \left(\frac{2\varepsilon}{d} + \frac{18.7}{N_{Re} \sqrt{f_g}} \right) \right]^{-2}$$

$$f_c = \left[1.74 - 2 \log \left(2(0.00045) + \frac{18.7}{253,824 \sqrt{0.015}} \right) \right]^{-2}$$

$$f_c = 0.0183$$

Este valor no está lo suficientemente cerca para f_g ; por consiguiente se requiere de otro intento usando $f_g=0.0183$.

$$f_c = \left[1.74 - 2 \log \left(2(0.00045) + \frac{18.7}{253,824 \sqrt{0.0183}} \right) \right]^{-2}$$

$$f_c = 0.0182$$

Un tercer intento usando $f_g=0.0182$,

Resultando $f_c=0.0182$.

Solución de Jain:

$$f = \left[1.14 - 2 \log \left(\frac{\varepsilon}{d} + \frac{21.25}{N_{Re}^{0.9}} \right) \right]^{-2}$$

$$f = \left[1.14 - 2 \log \left(0.00045 + \frac{21.25}{253,824^{0.9}} \right) \right]^{-2}$$

$$f = 0.0183$$

5.2 EJEMPLO 5.2. (H. Dale Beggs, 2002).

Usando los datos siguientes, calcular Pws, con la ecuación 2.3.23.

H=10,000 pie

$\gamma_g = 0.6$,

$P_{ts} = 4000$ psia.

$$T_s = 70^\circ\text{F} = 530^\circ\text{R},$$

$$T_f = 220^\circ\text{F} = 680^\circ\text{R}$$

Solución:

Una primera hipótesis para obtener P_{ws} :

$$p_{ws}^* = p_{ts} (1 + 2.5 \times 10^{-5} H)$$

$$p_{ws}^* = 4000 (1 + 2.5 \times 10^{-5} (10000)) = 5000 \text{ psia}$$

$$\bar{T} = \frac{T_s + T_f}{2} = \frac{530 + 680}{2} = 605 \text{ R}$$

$$\bar{p} = \frac{p_{ts} + p_{ws}^*}{2} = \frac{4000 + 5000}{2} = 4500 \text{ psia}$$

$$Z = 0.932$$

$$p_{ws} = 4000 \text{ EXP}[(0.01875)(0.6)(10000)/(605)Z]$$

$$p_{ws} = 4000 \text{ EXP}[(0.18595)/Z] = 4000 \text{ EXP}[0.18595/0.932]$$

$$p_{ws} = 4883 \text{ psia}$$

Este valor no es lo suficientemente cercano al valor estimado de 5000 psia.

Establecer el cálculo del valor de P_{ws} como el valor próximo estimado y continuar hasta que la convergencia sea aceptable.

p_{ws}^*	\bar{p}	\bar{Z}	P_{ws}
5000	4500	0.932	4883
4883	4442	0.928	4887
4887	4444	0.928	4887

Como se muestra en la tabla se llegó a la convergencia con un valor supuesto de $P_{ws} = 4887 \text{ psia}$.

El cálculo también puede ser hecho suponiendo un valor inicial de Z y compararlo con los valores calculados de Z hasta que la convergencia de Z se obtenga.

5. 3 EJEMPLO 5.3. (H. Dale Beggs, 2002).

Trabajar en el ejemplo anterior usando el método de Cullender y Smith.

Solución:

Temperatura a cualquier profundidad:

$$h = 70 + \frac{220 - 70}{10000}$$

$$h = 70 + 0.015h$$

calculando I_{ts} :

a $T=70$ °F, $P=4000$ psia, $Z=0.84$

$$I_{ts} = \frac{TZ}{P} = \frac{530(0.84)}{4000} = 0.1113$$

estimando P_{ms} :

$$P_{ms}^* = P_{ts} (1 + 2.5 \times 10^{-5} H/2)$$

$$P_{ms}^* = 4000 (1 + 2.5 \times 10^{-5} (5000)) = 4500 \text{ psia}$$

$$\bar{T} = 70 + 0.015(5000) = 145 \text{ °F}$$

$$Z = 0.93$$

calculando I_{ms} :

$$I_{ms} = \frac{\bar{T}Z}{p_{ms}} = \frac{605(0.93)}{4500} = 0.1250$$

calculando P_{ms} :

$$P_{ms} = P_{ts} + \frac{0.01875 \gamma_g H}{I_{ms} + I_{ts}}$$

$$P_{ms} = 4000 + \frac{0.01875(0.6)(10000)}{0.1250 + 0.1113}$$

$$P_{ms} = 4000 + 476 = 4476 \text{ psia}$$

El valor obtenido no es lo suficientemente cercano al valor estimado de 4500 psia, por lo tanto $P_{ms}^* = 4476$ y se repite el procedimiento:

$$a \quad \bar{T} = 145 \text{ }^\circ\text{F}, \quad P_{ms}^* = 4476 \text{ psia}, \quad Z = 0.93$$

$$I_{ms} = \frac{605(0.93)}{4476} = 0.1257$$

$$P_{ms} = 4000 + 475 = 4475, \text{ el cual no es suficiente}$$

estimando P_{ws} :

$$P_{ws}^* = P_{ts} (1 + 2.5 \times 10^{-5} H)$$

$$P_{ws}^* = 4475 (1 + 5000(2.5 \times 10^{-5})) = 5034 \text{ psia}$$

Para: $P_{ws}^* = 5034 \text{ psia}$, $T = 220^\circ\text{F}$ y $Z = 1.006$

Calculando I_{ts} :

$$I_{ts} = \frac{680(1.006)}{5034} = 0.1359$$

$$P_{ws} = P_{ms} + \frac{0.01875 \gamma_g H}{I_{ms} + I_{ws}}$$

$$P_{ws} = 4475 + \frac{112.5}{0.1250 + 0.1359} = 4905 \text{ psia}$$

Para un segundo intento, $Z = 0.998$

$$I_{ts} = \frac{680(0.998)}{4905} = 0.1384$$

$$P_{ws} = 4475 + 426 = 4901 \text{ psia}$$

Como se puede ver en el segundo intento se llegó a la convergencia resultando un valor de presión de fondo estática más exacto.

5. 4 EJEMPLO 5.4. (H. Dale Beggs, 2002).

Usando el método de la presión y temperatura promedio calcular la presión de fondo fluyendo para el pozo direccional que cuenta con los siguientes datos:

$$\gamma_g = 0.75 \quad MD = 10,000 \text{ ft} \quad TDV = 7,000 \text{ ft}, \quad T_s = 110^\circ\text{F}, \quad T_f = 245^\circ\text{F}$$

$$P_{tf} = 2000 \text{ psia}, \quad q_{sc} = 4.915 \text{ MMscfd}, \quad d = 2.441 \text{ in}, \quad \varepsilon = 0.0006 \text{ in},$$

$$\bar{\mu} = 0.012 \text{ cp}$$

Solución:

En términos de gasto másico, el número de Reynolds es.

$$N_{Re} = \frac{C\gamma_g q_{sc}}{\mu d} \quad (2.3.28)$$

VARIABLE	UNIDADES	
	CAMPO	SI
q_{sc} = gasto de gas	MMpcd	MM m ³ /día
γ_g = gravedad del gas	-----	-----
μ = viscosidad del gas	cp	Kg/m-seg
d=diámetro interior	pg	m
C= Constante	20011	17.96

$$N_{Re} = \frac{20011\gamma_g q_{sc}}{\mu d} = \frac{20011(0.75)(4.915)}{0.012(2.441)} = 2.518 \times 10^6$$

de la ecuación 2.3.17, f=0.15

(1) Suponer $Z^* = 0.9$

$$S = \frac{0.0375(0.75)(7000)}{638Z^*} = \frac{0.3086}{Z^*}$$

(2) $P_{wf}^2 = (2000)^2 \text{EXP}(0.3086/Z^*) +$

$$\frac{25(.75)(4.915)^2(638)Z^*(.015)(10,000)[\text{EXP}(0.3086/Z^*) - 1]}{\frac{0.3086}{Z^*}(2.441)^5}$$

$$P_{wf}^2 = 4 \times 10^6 \text{EXP}(0.3086/Z^*) + 1.621 \times 10^6 (Z^*)^2 (\text{EXP}(0.3086/Z^*) - 1)$$

Para: $Z^* = 0.9$, $P_{wf}^2 = 5.636 \times 10^6 + 536,966$, $P_{wf}^2 = 6.173 \times 10^6$, $P_{wf} = 2485 \text{ psia}$.

$$(3) \bar{p} = \frac{(p_{tf} + p_{wf})}{2} = \frac{2000 + 2485}{2} = 2242 \text{ psia}$$

(4) con $P=2242$ psia y $T=178^\circ\text{F}$, $Z=0.806$

$$(5) \frac{\text{abs}(Z-Z^*)}{Z} = \frac{0.9-0.806}{0.806} = 0.117$$

que es demasiado grande.

(2) Para $Z^* = 0.806$, $P_{wf}^2 = 5.866 \times 10^6 + 491,187$

$$P_{wf}^2 = 6.357 \times 10^6, \quad P_{wf} = 2521 \text{ psia}$$

$$(3) \bar{P} = \frac{2000 + 2521}{2} = 2261 \text{ psia}$$

(4) para $P=2261$ psia y $T=178^\circ\text{F}$, $Z=0.805$

$$(5) \frac{\text{abs}(Z-Z^*)}{Z} = \frac{\text{abs}(0.805-0.806)}{0.805} = 0.001$$

Este valor ya se aproxima más.

Por lo tanto, $P_{wf}=2521$ psia.

5.5 EJEMPLO 5.5. (H. Dale Beggs, 2002).

Los siguientes datos pertenecen a un pozo de gas. Usar el método de Cullender y Smith para calcular la presión de fondo fluyendo.

$$\gamma_g = 0.75, \quad H = 10,000 \text{ ft}, \quad T_s = 110^\circ\text{F},$$

$$T_f = 245^\circ\text{F}, \quad P_{tf} = 2000 \text{ psia}, \quad q_{sc} = 4.915 \text{ MMscfd},$$

$$d = 2.441 \text{ in}, \quad \epsilon = 0.0006 \text{ in}, \quad \bar{\mu} = 0.012 \text{ cp}, \quad \phi = 0^\circ$$

Solución:

Calcular f y F^2 :

$$N_{Re} = \frac{20011(0.75)(4.915)}{0.012(2.441)} = 2.518 \times 10^6$$

de la ecuación 2.3.17: $f=0.015$

$$F^2 = \frac{0.667(0.015)(4.915)^2}{(2.441)^5} = 0.00279$$

Calculando I_{wh} :

a $P=2000$ psia, $T=110^\circ\text{F}$, $Z=0.71$

$$\frac{P}{TZ} = \frac{2000}{(570)(0.71)} = 4.942$$

$$I_{wh} = \frac{4.942}{(0.001)(4.942)^2 + 0.00279} = 181.60$$

Estimando P_{ms}^* (Primer intento)

$$P_{ms}^* = 2000 \left(1 + 2.5 \times 10^{-5} (5000) \right) = 2250 \text{ psia}$$

Calculando I_{wh}

a $P=2250$, $T=110+67.5=178$, $Z=0.797$

$$\frac{P}{TZ} = \frac{2250}{(638)(0.797)} = 4.425$$

$$I_{mf} = \frac{4.425}{(0.001)(4.425)^2 + 0.00279} = 197.81$$

Calculando P_{mf} :

$$P_{mf} = P_{wh} + \frac{18.75\gamma_g H}{I_{mf} + I_{wh}} = 2000 + \frac{18.75(0.75)(10000)}{197.81 + 181.60}$$

$$P_{mf} = 2000 + 371 = 2371 \text{ (no es lo suficientemente cerca para } P_{mf}^*)$$

Calculando I_{mf} (Segundo intento)

a $P=2371$ psia, $T=178^\circ\text{F}$, $Z=0.796$

$$\frac{P}{TZ} = \frac{2371}{(638)(0.796)} = 4.669$$

$$I_{mf} = \frac{4.669}{(0.001)(4.669)^2 + 0.00279} = 189.88$$

Calculando P_{mf} :

$$P_{mf} = 2000 + \frac{140625}{189.88 + 181.60} = 2379$$

Calculando I_{mf} (Tercer intento)

a $P=2379$ psia, $T=178$ °F, $Z=0.796$

$$\frac{P}{TZ} = \frac{2379}{(638)(0.796)} = 4.684$$

$$I_{mf} = \frac{4.684}{(0.001)(4.684)^2 + 0.00279} = 189.41$$

Calculando P_{mf} :

$$P_{mf} = 2000 + \frac{140625}{189.41 + 181.60} = 2379 \text{ psia}$$

Por lo tanto, la presión en el punto medio del pozo es 2379 psia. El valor de P_{wf} se calculado ahora.

Estimando P_{wf}^* :

Calculando I_{wf} :

a $P=2676$ psia, $T=245$ °F, $Z=0.867$

$$\frac{P}{TZ} = \frac{2676}{(705)(0.867)} = 4.378$$

$$I_{wf} = \frac{4.378}{(0.001)(4.378)^2 + 0.00279} = 199.39$$

Calculando P_{wf}^* (Primer intento)

$$P_{wf} = P_{mf} + \frac{140625}{199.39 + 189.41} = 2379 + 362 = 2741 \text{ psia}$$

Calculando I_{wf} (Segundo intento)

a $P=2741$ psia, $T=245$ °F, $Z=0.868$

$$\frac{P}{TZ} = \frac{2741}{(705)(0.868)} = 4.479$$

$$I_{wf} = \frac{4.479}{(0.001)(4.479)^2 + 0.00279} = 196.00$$

Calculando P_{wf}^* :

$$P_{wf} = 2379 + \frac{140625}{196.00 + 189.41} = 2744 \text{ psia}$$

Este valor está cerca del valor previamente calculado de 2741 psia. Por lo tanto, la presión de fondo fluyendo es 2744 psia.

5. 6 EJEMPLO 5.6. (H. Dale Beggs, 2002).

Un gasoducto entrega 320 MMPCD de gas a una presión de 600 psia. Usando los siguientes datos, calcular la presión corriente arriba del gasoducto requerida para que éste entregue el volumen de gas a esa presión mencionados.

$$\bar{T} = 45^\circ\text{F}, \quad \gamma_g = 0.67, \quad d = 25.375 \text{ pg}, \quad L = 100 \text{ millas}, \quad \epsilon = 0.0006 \text{ pg}$$

Solución:

Usando la ecuación 2.3.35. P_1 se debe estimar para determinar \bar{P} y \bar{Z} . Estimando $\Delta P/\Delta L = 0.0005$ psi/pie. Entonces $P_1^* = P_2 + 0.0005(528,000) = 600 + 264 = 864 \text{ psia}$.

Tabla 5.1.

Valor de C para varias unidades.

P	T	d	L	q	C
psia	°R	pg	mi	pcd	77.54
psia	°R	pg	pie	pcd	5634
psia	°R	pg	pie	MMpcd	5.634×10^{-3}
kPa	°K	pg	m	m ³ /d	1.149×10^{-3}

$$\bar{P} = \frac{P_1^* + P_2}{2} = \frac{864 + 600}{2} = 732 \text{ psia}$$

a $P=732$ psia, $T=45^\circ\text{F}$, $Z=0.844$, $\mu=0.012\text{cp}$

Determinar f:

$$N_{Re} = \frac{20011\gamma_g q}{\mu d} = \frac{20011(0.67)(320)}{0.012(25.375)} = 14.1 \times 10^6$$

De la ecuación 2.3.17 (Ec. Jain), $f=0.0097$

Calculando P_1 :

$$P_1^2 = P_2^2 + \frac{25\gamma_g q^2 \bar{T} \bar{Z} f L}{d^5}$$

$$P_1^2 = (600)^2 + \frac{25(0.67)(320)^2(505)\bar{Z}(0.0097)(528,000)}{(25.375)^5}$$

$$P_1^2 = 360,000 + 421,680Z = 360,000 + 355,898$$

$$P_1^2 = 715,898 \quad P_1 = 846 \text{ psia}$$

Este valor no está lo suficientemente cerca del valor estimado de 864 psia, establecer $P_1^* = 846, \text{psia}$ y re calcular P_1 :

Segundo intento:

$$\bar{P} = \frac{600 + 846}{2} = 723 \text{ psia}$$

$Z=0.846$

$$P_1^2 = 360,000 + 421,680(0.846) = 716,567$$

$$P_1 = 847 \text{ psia}$$

Ya que dos valores sucesivos de P_1 son aproximadamente iguales, la solución de iteración converge. La presión corriente arriba requerida es **847 psia**.

5. 7 EJEMPLO 5.7. (H. Dale Beggs, 2002).

Usando los siguientes datos, calcular la capacidad de flujo del gasoducto usando la ecuación de Weymouth, la ecuación de Panhandle B y la ecuación de Panhandle A.

$P_1=847 \text{ psia}$, $P_2=600 \text{ psia}$, $d=25.375 \text{ pg}$, $L=100 \text{ millas}$, $\gamma_g=0.67$,
 $\bar{T} = 505^\circ R$, $\bar{Z} = 0.846$

$T_b = 520^\circ R$, $P_b = 14.7 \text{ psia}$, $E = 1.0$

Solución:

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{\bar{T} \bar{Z} L} = \frac{847^2 - 600^2}{505(0.846)(100)} = 8.366$$

$$\frac{T_b}{P_b} = \frac{520}{14.7} = 35.374$$

Weymouth:

$$q = 433.5(35.374)^{1.0}(8.366)^{0.5} \left(\frac{1}{0.67}\right)^{0.5} (25.375)^{2.667}$$

$$q = 301,610,000 \text{ pies}^3/\text{d}\hat{\text{a}} = 301.6 \text{ MMpcd}$$

Panhandle B:

$$q = 737.0(35.374)^{1.02}(8.366)^{0.51} \left(\frac{1}{0.67}\right)^{0.49} (25.375)^{2.53}$$

$$q = 359,732,857 \text{ pies}^3/\text{d}\hat{\text{a}} = 359.7 \text{ MMpcd}$$

Panhandle A:

$$q = 435.87(35.374)^{1.0788}(8.366)^{0.5394} \left(\frac{1}{0.67}\right)^{0.4604} (25.375)^{2.618}$$

$$q = 364,247,375 \text{ pies}^3/\text{d}\hat{\text{a}} = 364.2 \text{ MMpcd}$$

Las capacidades de flujo usando varias ecuaciones varían considerablemente y pueden ser comparadas con los resultados de la ecuación 2.3.5, el cual muestra que la línea entrega 320 MMPCD a las presiones específicas. Si se supone que éste es el valor correcto para el q , los factores de eficiencia de 1.061, 0.890, y 0.879 pueden ser aplicados a las ecuaciones de Weymouth, Panhandle B y Panhandle A respectivamente.

5.8 EJEMPLO 5.8. (H. Dale Beggs, 2002).

Las siguientes condiciones fueron determinadas en un pozo de gas produciendo líquido, a presión y temperatura promedio de la tubería.

$P=1500$ psia, $T=180$ °F, $d=2.992$ pg, $\gamma_g=0.012$ cp, $\mu_L=0.45$ cp, $\sigma=25$ dinas/cm

$V_{sg}=30$ pie/seg, $v_{sL}=5$ pie/seg, $\epsilon=0.0006$ pies, $\rho_L=50$ lbm/pie³, $\rho_g=8$ lbm/pie³

Usando el método de Hagedorn y Brown, determinar el gradiente de presión.

Solución:

Antes de encontrar H_L y f , se realizan algunos cálculos:

$$v_m = v_{sL} + v_{sg} = 5 + 30 = 35 \text{ pies/seg}$$

$$\lambda = 5/35 = 0.143$$

$$\rho_n = 500(0.143) + 8(1 - 0.143) = 14 \text{ lb/pie}^3$$

$$A_p = \pi d^2/4 = 0.7854(0.249)^2 = 0.0487 \text{ pie}^2$$

$$\rho_L/\sigma = 50/25 = 2$$

$$N_{Lv} = 1.938(5)(2)^{0.25} = 11.52$$

$$N_{gv} = 1.938(30/2)^{0.25} = 69.14$$

$$N_d = 120.872(0.249)(2)^{0.5} = 42.56$$

$$N_L = 0.15726(0.45)(1/(50)(25)^3)^{0.25} = 0.0024$$

Determinar H_L :

1. $N_L = 0.0024$
2. De la **Figura 2.21**, $CN_L = 0.002$
3. $\bar{X}_H = \frac{11.52(0.002)(1500)^{0.1}}{42.56(69.14)^{0.575}(14.7)^{0.1}} = 7.53 \times 10^{-5}$
4. De la **Figura 2.22**, $\frac{H_L}{\psi} = 0.29$
5. $\bar{X}_\psi = \frac{69.14(0.0024)^{0.38}}{(42.56)^{2.14}} = 2.28 \times 10^{-3}$
6. De la **Figura 2.23**, $\psi = 1.0$
7. $H_L = 1.0(0.29) = 0.29$

$$\rho_m = 50(0.29) + 8(1 - 0.29) = 20.18 \text{ lb/pie}^3$$

$$\rho_f = (14)^2/20.18 = 9.71 \text{ lb/pie}^3$$

$$\mu_m = (0.45)^{0.29}(0.012)^{(1-0.29)} = 0.034 \text{ cp}$$

$$N_{Rem} = \frac{1488(14)(35)(0.249)}{0.034} = 5.29 \times 10^6$$

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{0.0072}{2.992} = 0.0024$$

de la **Figura 2.18** o la ecuación 2.3.17:

$$f = 0.025$$

$$\begin{aligned}\frac{dp}{dh} &= 20.18 + \frac{0.025(9.71)(35)^2}{2(32.2)(0.249)} = 20.18 + 18.54 = 38.72 \text{ lb/pie}^3 \\ &= 0.269 \text{ psi/pie}\end{aligned}$$

5.9 EJEMPLO 5.9. (H. Dale Beegs, 2002).

Se llevó a cabo una prueba de estabilización de gasto en un pozo de gas para obtener datos de entrada de flujo. Determinar la capacidad de flujo de gas del pozo, tanto para 1.995 pulgadas y 2.441 de diámetro en la TP si, $P_{wh} = 1000 \text{ psia}$ es constante. Otros datos son:

$$n = 0.83$$

$$C = 0.0295 \text{ MPCD/psia}^2$$

$$\bar{P}_y = 1952 \text{ psia}$$

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

Solución:

La ecuación para generar la curva de entrada de flujo es:

$$q_{cs} = C(\bar{P}_y^2 - P_{wf}^2)^n$$

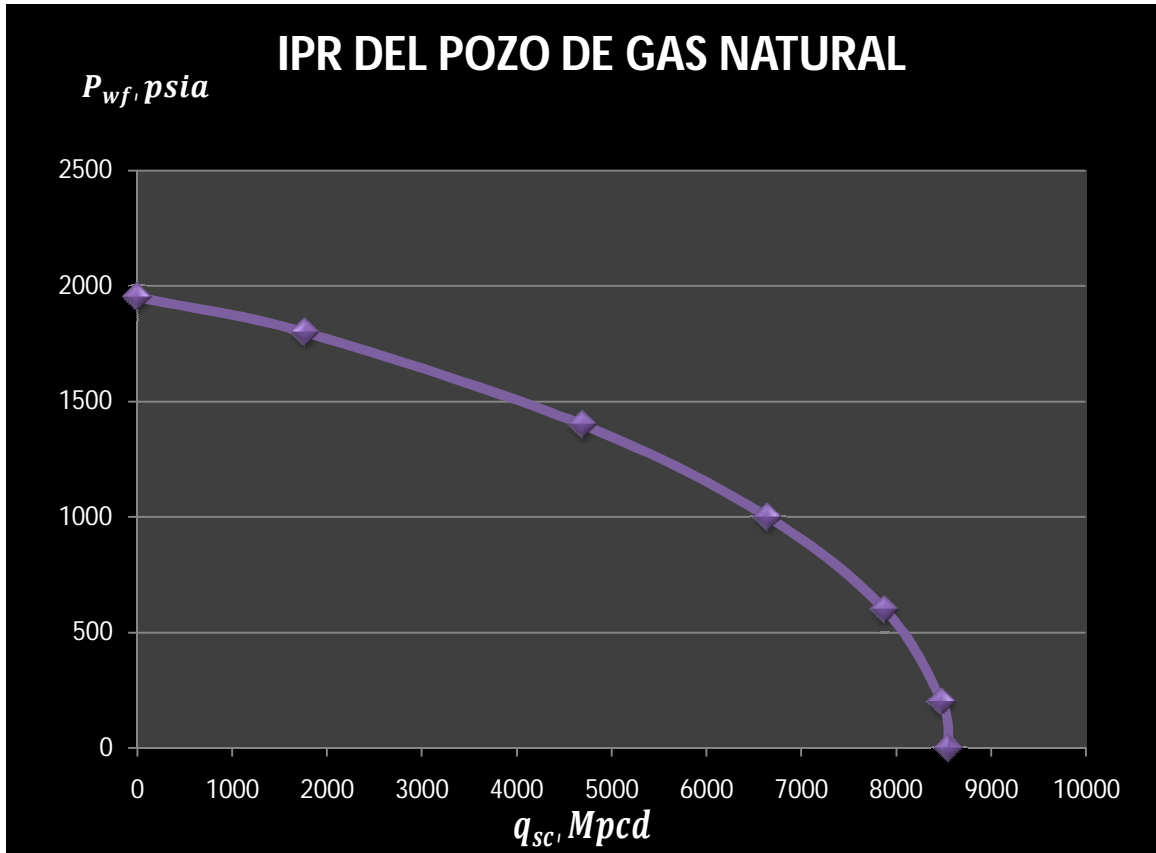
$$q_{cs} = 0.0295(1952^2 - P_{wf}^2)^{0.83}$$

1.- Suponer distintos valores de P_{wf} y calcular q_{cs} :

Flujo en la entrada:

P_{wf}, psia	q_{cs}, MPCD
1952	0
1800	1767.63
1400	4694.98
1000	6641.82
600	7874.87
200	8476.46
0	8551.03

2. Graficar P_{wf} vs q_{cs} (Gráfica. 5.1)



Gráfica 5.1. IPR del pozo productor de gas.

3. Suponer varios gastos de flujo diferentes y encontrar el valor de P_{wf} que son las presiones de fondo fluyendo respectivas a cada diámetro para superar la caída de presión en la TP y la cabeza del pozo para cada gasto. Se realiza el cálculo para cada diámetro de TP. A modo de ejemplo, los valores se obtienen a partir de las Figuras 5.A1 y 5.A2.

Flujo de salida:

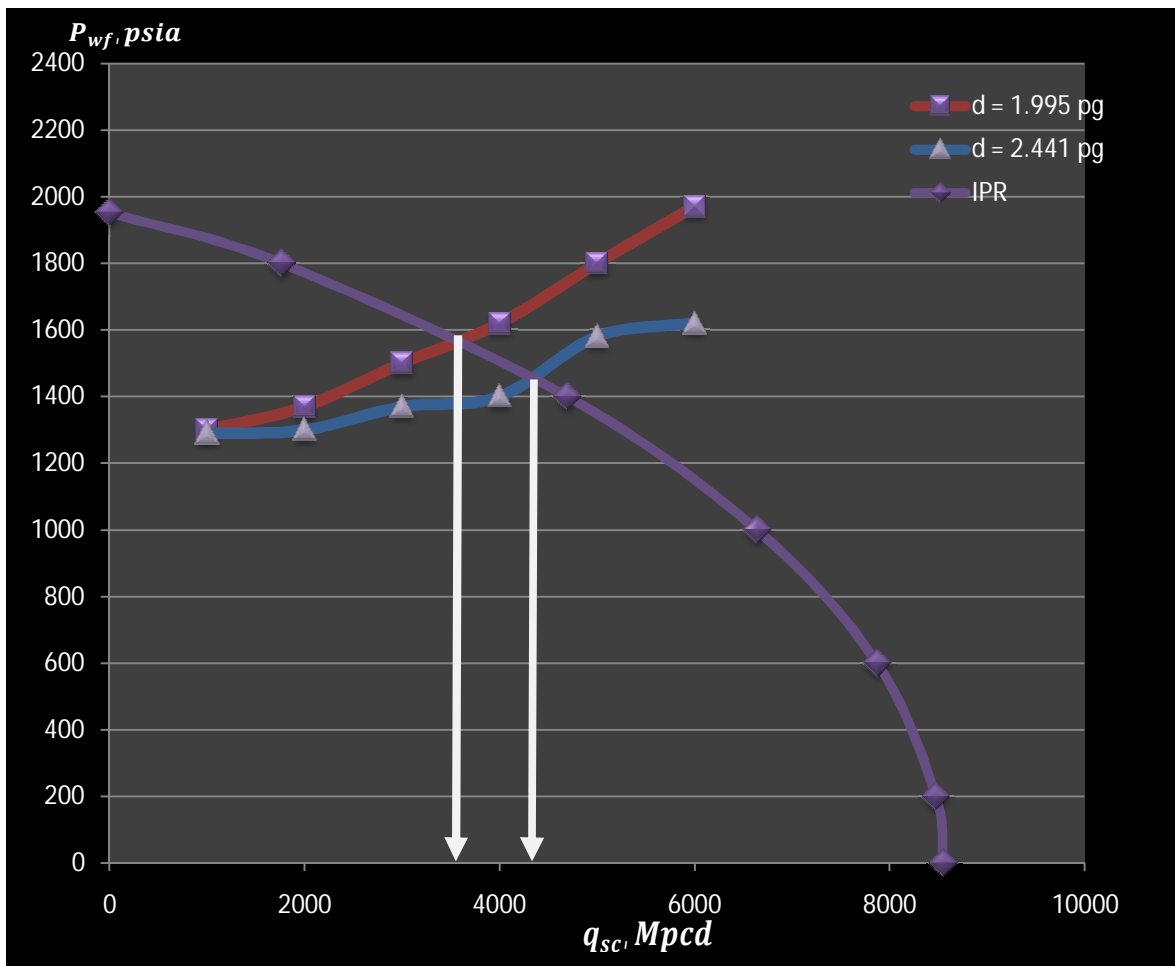
$q_{cs}, MMPCD$	$P_{wf}, psia$	
	$d = 1,995 \text{ pg}$	$d = 2,441 \text{ pg}$
1000	1300	1290
2000	1370	1300
3000	1500	1370
4000	1620	1400
5000	1800	1580
6000	1970	1620

4. Graficar P_{wf} vs q_{sc} de los dos diámetros de tubería de producción en la misma gráfica (Figura 5.1). El único valor que satisface ambos subsistemas, es decir,

yacimiento-pozo, es la intersección de la curva de IPR del pozo productor de gas con las curvas de presión de fondo fluyendo calculadas con los diámetros mencionados, respectivamente. Los siguientes valores son los puntos de intersección entre dichas curvas.

Diámetro de la TP, pg	P_{wf} , psia	q_{cs} , MMPCD
1,995	1560	3500
2,441	1440	4350

Los valores anteriores se muestran en la gráfica siguiente.



Gráfica 5.2. Solución del ejemplo 5.9.

Mediante la instalación de diámetros de TP más grandes, la capacidad de flujo del pozo se puede aumentar a 850 Mpcd, es decir, la producción puede aumentar alrededor del 24%.

5.10 EJEMPLO 5.10. (H. Dale Beggs, 2002).

Un pozo vertical productor de gas cuenta con una tubería de producción de 1.995 pg a 10 000 pies y una línea de descarga de 6000 pies. La presión de separación se fija en 1000 psia. Utilizando los datos siguientes, determinar la capacidad de flujo para el sistema, tanto para una línea de descarga de 1.995 ID y una línea de 2,441 ID.

$$\gamma_g = 0.67$$

$$T_y = 220^\circ \text{ F}$$

$$T_{wh} = 100^\circ \text{ F}$$

$$T_{sep} = 60^\circ \text{ F}$$

$$\mu_g = 0.012 \text{ cp}$$

$$\epsilon = 0.0018 \text{ pg}$$

$$n = 0.83$$

$$\bar{Z} = 0.95$$

$$C = 0.0295 \text{ Mpcd} / \text{psia}^{1.86}$$

$$P_y = 1952 \text{ psia}$$

Solución:

1. La ecuación de flujo de entrada es:

$$q_{cs} = C(\bar{P}_y^2 - P_{wf}^2)^n$$

O

$$P_{wf} = \left[\bar{P}_y^2 - \left(\frac{q_{cs}}{C} \right)^{1/n} \right]^n$$

$$P_{wf} = \left[1952^2 - \left(\frac{q_{cs}}{0.0295} \right)^{1.205} \right]^{0.5}$$

Suponer gastos de flujo de 1, 2, 3 y 4 MMpcd, y calcular los valores correspondientes de P_{wf} .

q_{cs}, MPCD	P_{wf}, psia
1000	1876.873448
2000	1774.024634
3000	1652.083214
4000	1510.46939

2. Utilizar la presión media y el método de la temperatura para calcular P_{wh} respecto cada uno de los gastos supuestos y la presión de fondo fluyendo. La ecuación con la que se calcula P_{wh} es la siguiente:

$$P_{wh} = \left[\frac{P_{wf}^2 - [25\gamma_g q_{cs}^2 \bar{T} \bar{Z} f H (EXP(S) - 1)] / S d^5}{EXP(S)} \right]^{0.5}$$

q_{cs}, MPCD	P_{wf}, psia	P_{wh}, psia
1000	1876.873448	1500
2000	1774.024634	1362
3000	1652.083214	1158
4000	1510.46939	840

Flujo de entrada

Flujo de salida

q_{cs}, MPCD	P_{wf}, psia	P_{wh}, psia	$P_{wh} (1.995)$	$P_{wh} (2.441)$
1000	1876.873448	1500	1016	1006
2000	1774.024634	1362	1062	1022
3000	1652.083214	1158	1134	1049
4000	1510.46939	840	1227	1085

3. Los valores para cada uno de gastos y P_{wh} para el subsistema yacimiento-pozo se representan en la **Gráfica 5.3**.

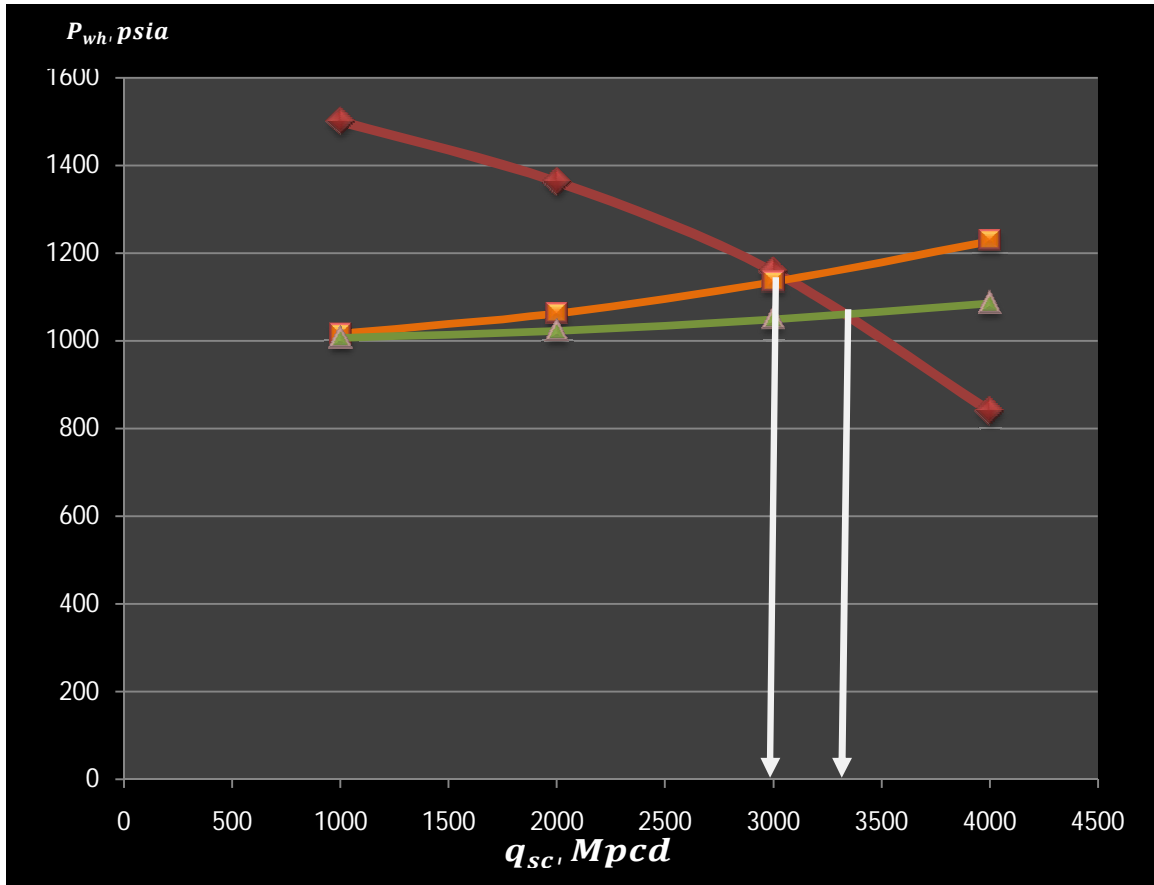


Figura 5.3 Solución al ejemplo 5.10

4. Los mismos flujos de gasto que se supusieron en el paso 1 se utilizan para calcular la P_{wh} con una P_{sep} fija de 1000 psia, tanto para los diámetros de 1.995 pg y 2.441 pg en las líneas de flujo, respectivamente. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$P_{wh} = [P_{sep}^2 + (25\gamma_g q_{cs}^2 \bar{T} \bar{Z} fl) / d^5]^{0.5}$$

5. Los valores de gasto y P_{wh} para cada tamaño de diámetro del subsistema línea de descarga-separador se representan en la **Gráfica 5.3**. Las intersecciones de flujo del yacimiento con la línea de descarga dan una capacidad de flujo de 3080 Mpcd y 3360 Mpcd para un diámetro de 1.995 pg y 2,441 pg, respectivamente.

5.11 EJEMPLO 5.11 (William C. Lyons, 1996).

Un pozo fluye un gasto de 7.20 MMpcd. La presión de estabilización en la cara de la arena a partir de la prueba de flujo fue de 1155 psia, la presión promedio del yacimiento fue estimada de 1930 psia. Determinar a partir de los parámetros de flujo usando el método modificado de Mishra – Caudle:

a) El potencial absoluto del pozo a condiciones de presión de yacimiento.

$$(P_y = 1930 \text{ psia})$$

b) El comportamiento de flujo a una $P_{wf} = 1000 \text{ psia}$

c) El potencial absoluto del pozo futuro a una $P_{yf} = 1600 \text{ psia}$

e) El comportamiento futuro a una $P_{wf} = 1155 \text{ psia}$

SOLUCION

Para una presión por debajo de 2100 psia se utiliza la ecuación siguiente:

$$\frac{q}{q_{\max}} = \frac{5}{4} \left(1 - 5 \left(\frac{P_{wf}^2}{P_y^2} - 1 \right) \right)$$

$$AOFP = q_{\max} = \frac{7.2 \text{ MMpcd}}{\frac{5}{4} \left[1 - 5 \left(\frac{1155^2}{1930^2} - 1 \right) \right]} = 8.94 \text{ MMpcd}$$

$$b) q = 8.94 \times 10^6 \times \frac{5}{4} \left[1 - 5 \left(\frac{1000^2}{1930^2} - 1 \right) \right] = 7.73 \text{ MMpcd}$$

$$c) \frac{(AOFP)_f}{(AOFP)_p} = \frac{5}{3} \left[1 - 0.4 \frac{P_{yf}^2}{P_y^2} \right]$$

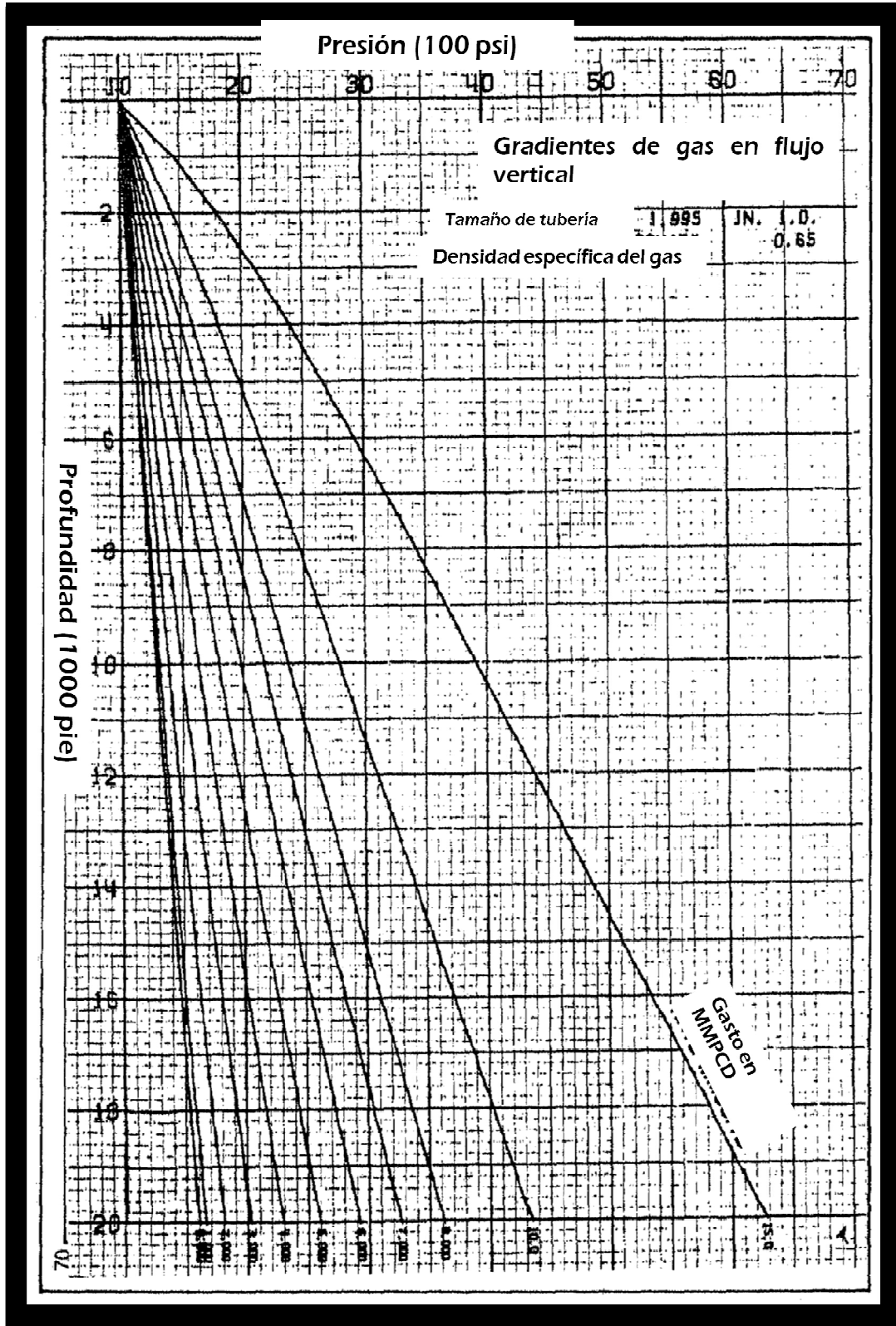
$$(AOFP)_f = 8.94 \times 10^6 \times \frac{5}{3} \left(1 - 0.4 \frac{1600^2}{1930^2} \right) = 6.96 \text{ MMpcd}$$

d) En este inciso se utiliza nuevamente la ecuación anterior:

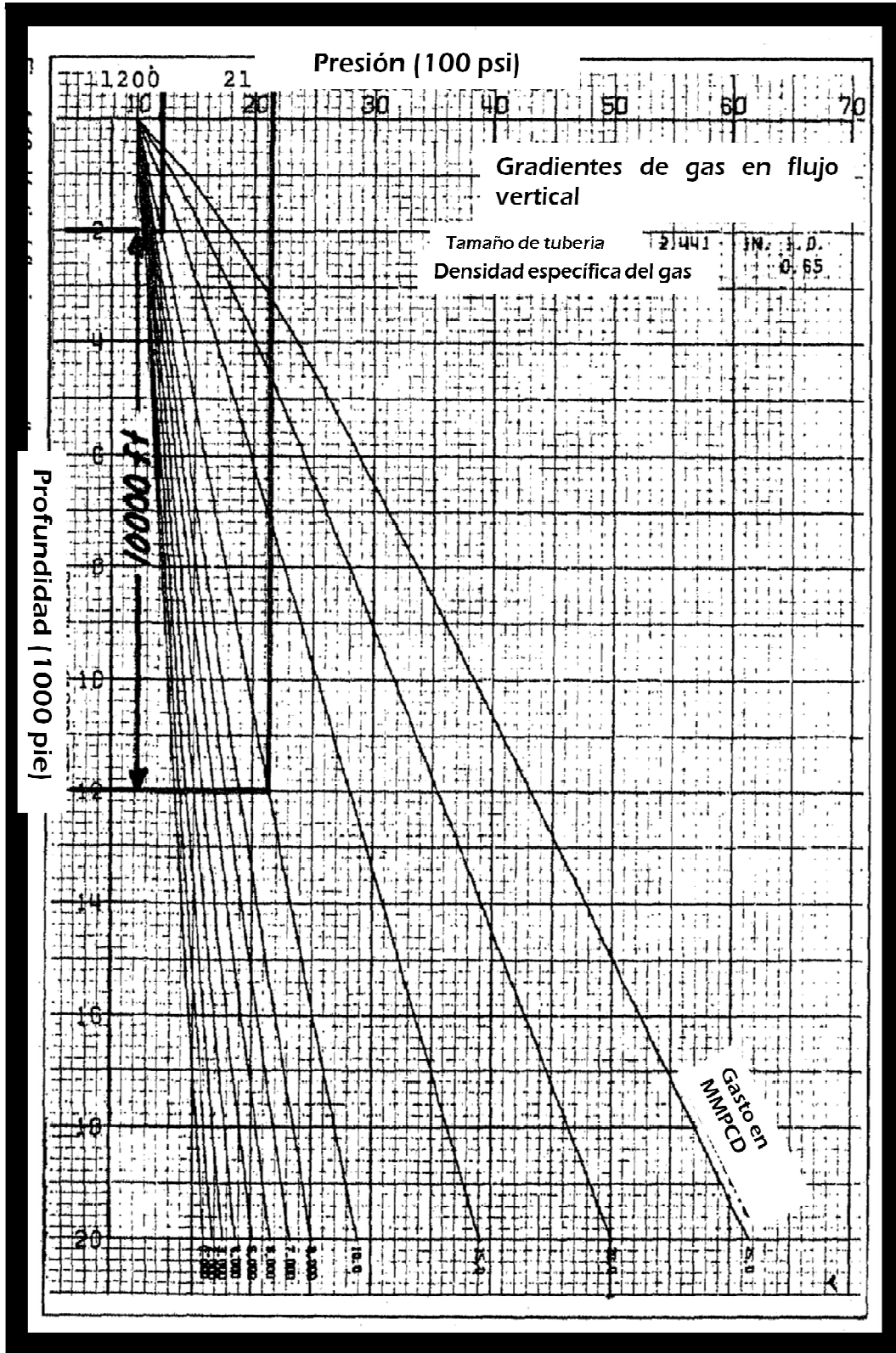
$$q_f = (AOFP) \times \frac{5}{4} \left[1 - 5 \left(\frac{P_{wf}^2}{P_y^2} \right)_f^{-1} \right]$$

$$= 6.96 \times 10^6 \times \frac{5}{4} \left[1 - 5 \left(\frac{1155}{1600} \right)^2 - 1 \right]$$

$$q_f = 4.675 \text{ MMpcd}$$



Gráfica 5.A1 Gradientes para flujo vertical para pozos de gas.
(H. Dale Beggs, 2002).



Gráfica 5.A2 Gradientes para flujo vertical en pozos de gas.
(H. Dale Beggs, 2002).