



2ej. 13

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

**DETERMINACION DE LAS CAIDAS DE PRESION EN POZOS
FLUYENTES, LOCALIZADOS EN YACIMIENTOS DE GAS Y
GEOTERMICOS DE FASE VAPOR DOMINANTE.**

TESIS QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A:

Héctor Gutiérrez Puente

MEXICO, D. F.

1984.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

	CONTENIDO	PAG.
Capítulo I.	Planteamiento del problema.	1
Capítulo II.	Revisión de la literatura.	4
Capítulo III.	Descripción de las mejores correlaciones disponibles.	7
III.1.	Gas seco.	8
III.1.1.	Método de compresibilidad y temperatura promedio.	9
III.1.2.	Método de Cullender y Smith.	13
III.1.3.	Método de Messer, Raghavan y Ramey.	16
III.1.4.	Método de Kalid Aziz.	26
III.2.	Vapor seco saturado y vapor sobrecalentado.	31
III.2.1.	Extensión del método propuesto por G. Hiriart.	32
III.2.2.	Ampliación del método de Aziz.	35
III.2.3.	Método propuesto por F. Garibay.	41
Capítulo IV.	Validación de las correlaciones mediante casos reales de pozos de gas y vapor	
Capítulo V.	Conclusiones.	67
	Agradecimientos.	70
	Referencias.	71
	Nomenclatura.	75
	Anexo A. Ecuaciones fundamentales y principales correlaciones.	
A-1.	Deducción de las ecuaciones fundamentales del fluido.	79
A-2.	Ecuación general para el flujo de gas en una tubería vertical.	88
A-3.	Método de compresibilidad y temperatura promedio.	94
A-4.	Método de Cullender y Smith.	96
A-5.	Método de Messer, Raghavan y Ramey.	98

A-6.	Integración de la ecuación de Sukkar y Cornell.	101
A-7.	Método de G. Hiriart.	104
A-8.	Ampliación del método de Kalid Aziz.	107
A-9.	Método de F. Garibay.	109

Anexo B. Listados de los programas de sarrollados.

B-1.	Programa "PRES".	113
B-2.	Programa "PWF".	125
B-3.	Programa "PFON".	141
B-4.	Programa "PREFON".	155
B-5.	Programa "VAPOR".	161
B-6.	Programa "FLUJO".	169
B-7.	Programa "MONOFAS".	178

Anexo C. Varios.

C-1.	Cálculo del factor de fricción.	190
C-2.	Determinación de la viscosidad de un gas.	192
C-3.	Integral de Sukkar y Cornell.	193
C-4.	Propiedades pseudoreducidas de un gas	195
C-5.	Factor de compresibilidad de un gas real	197
C-6.	Propiedades termodinámicas del vapor.	200
C-7.	Validación de la hipótesis $pv=cte$.	201

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los grandes incrementos en la demanda de gas tanto para consumo casero como industrial ha provocado que en zonas tradicionalmente productoras de gas seco mantengan sus pozos produciendo por períodos de tiempo cada vez mayores lo que implica se tengan mediciones de fondo cada vez mas espaciadas. Esto sumado a la carestía que han venido teniendo tanto equipos como servicios para la realización de estas mediciones hace que cada día exista una mayor tendencia a la utilización de métodos de cálculo capaces de reproducir el comportamiento termodinámico de los fluidos en los pozos.

La primera parte de esta tesis pretende mostrar un panorama actual de los modelos existentes, partiendo de la descripción del fenómeno físico que ocurre dentro del pozo y enmarcarlo a partir de los principios fundamentales de la ingeniería, como son la conservación de la masa, el momento y la energía. Posteriormente se presenta una selección de los métodos, que a juicio del autor, se consideran más adecuados y prácticos para su utilización.

En el capítulo IV se presenta la validación de estos métodos mediante su aplicación a casos prácticos de pozos de gas y se escribieron programas adecuados a calculadoras de bolsillo de tal forma que su utilización pueda ser lo

más amplia posible.

Por otra parte, el desarrollo geotérmico en México,-- afortunadamente, ha sido fuertemente impulsado gracias a lo cuál se cuentan ya con 740 MW de capacidad eléctrica instalada y con altas posibilidades de crecer aún más.

Como consecuencia de esto, la exploración y explotación de nuevos campos geotérmicos ha traído consigo la localización de zonas productoras de vapor seco saturado y en otros casos, sobrecalentado, contra lo que tradicionalmente se obtiene en estos pozos; una mezcla de agua y vapor.

En geotermia en general, las técnicas de perforación y de producción utilizan mucho de la tecnología desarrollada originalmente para la explotación petrolera, a pesar de la fuerte limitación que representan las altas temperaturas existentes en estos campos. Debido a esto, la utilización de herramientas de medición en los pozos es muy reducida y bastante cara, por lo que se tiene otro caso de necesidad de contar con métodos de cálculo para la predicción del comportamiento termodinámico del vapor a lo largo del pozo.

Tradicionalmente han sido desarrollados métodos de -- cálculo para el flujo de la mezcla agua-vapor, que es el de ocurrencia común en los pozos geotérmicos, pero no contemplan el caso del flujo de vapor en una sola fase, que como se dijo, comienza a ser frecuente en el país.

En el capítulo III de este trabajo, se presentan los métodos empleados para la determinación de las propiedades de fondo en los pozos de vapor con sus respectivos programas de cómputo.

Finalmente se presentan tres anexos en los que se en-

contrará el análisis del fenómeno de flujo que ocurre en --
los pozos con las deducciones formales de los diferentes mé
todos aquí empleados, asimismo los listados de computadora-
escritos con este fin.

II. REVISION DE LA LITERATURA

La mayor parte de los trabajos desarrollados para la determinación de caídas de presión en pozos ha sido enfocada a los pozos productores de aceite y gas. No obstante desde hace algunos años, diversos trabajos en los que se considera únicamente el flujo de gas en una tubería vertical, han sido desarrollados y aplicado convenientemente.

Prácticamente todas las técnicas para calcular la presión de fondo en un pozo, parten de la ecuación general de flujo -- (A-4.18), descrita en el anexo A-4, y varían únicamente en las suposiciones impuestas para resolver esta expresión.

Uno de los primeros trabajos efectuados al respecto, fue el de Rzasz y asoc.²³ que determinó la presión de fondo en un pozo de gas natural en condiciones estáticas. Fowler⁸, Joffe²⁴ y Poettmann²⁵ plantearon la ecuación de flujo de gas tal y como se conoce actualmente y sus trabajos difieren únicamente en las consideraciones que hacen al integrar el término $\int v dp$. -- Smith y asoc.²⁶ hacen consideraciones importantes sobre el efecto del factor de fricción en la determinación de la caída de presión en tuberías. Baker²⁷ y Smith y asoc.²⁸ realizan experiencias sobre el efecto del cambio de energía cinética cuando fluye gas por una tubería vertical.

Janicek y F. Emde²⁹ proponen un modelo de flujo en un tubo, en régimen no permanente. Sukkar y Cornell⁹ presentan valores de la integral del término $\int v dp$, y proponen una ecuación sencilla y fácil de manejar. Cullender y Smith⁵ introducen un método numérico muy sencillo en la solución de la ecuación de flujo, y además hacen la consideración de la temperatura cuando se tienen pozos con gradientes térmicos considerables.

Dranchuk y Mc Farland¹⁷ describen los efectos sobre el cálculo de la caída de presión al variar los cambios de momento en el fondo del pozo.

Aziz¹⁸ propone un método de solución utilizando una técnica numérica (regla trapezoidal de segundo orden) y posteriormente presenta un trabajo en el que compara trece técnicas numéricas diferentes para resolver la integración que se presenta en la ecuación de flujo.

Young³¹ desarrolló un trabajo particularmente importante en el que analiza los efectos que varios factores tienen sobre la presión de fondo calculada. Analiza los siguientes factores: el despreciar el cambio de energía cinética, el considerar un promedio de temperatura y de densidad, la longitud del intervalo seleccionado para el cálculo, etc., que son utilizados en prácticamente todos los métodos existentes. A últimas fechas se han desarrollado trabajos en que se considera la parte de condensado presente en algunos pozos de gas, por ejemplo, el de Govier y Fogarasi³².

Por lo que respecta al caso de flujo de vapor en pozos geotérmicos, el número de trabajos existentes se reduce notablemente. Esto en parte, por tratarse de una fuente de energía explotada hace pocos años, y también debido a que en la -

mayoría de los campos geotérmicos en explotación del mundo, - (Wairakei, Ahuachapán, Otake, Cerro Prieto, etc.) el flujo -- que ocurre en los pozos es bifásico, mezcla de agua y vapor, - por lo que la mayoría de los trabajos existentes versan sobre este caso.

Algunas bases teóricas son consideradas en la publica-- ción presentada por Kestin y asoc.³³ Truesdel, A.H. y Natherson, M.³⁴. analizan el flujo de vapor dentro de un pozo en Castle - Rock, en los Geysers, compararon los valores calculados con-- tra datos medidos en el campo.

En este trabajo se presentan tres métodos de solución - diferentes para determinar las caídas de presión y las varia-- ciones termodinámicas del vapor dentro de los pozos.

Existe un modelo para flujo de vapor monofásico desarro-- llado por la compañía INTRCOMP denominado WELLFOW, pero no se encontró información disponible sobre este programa, probable-- mente por tratarse de una firma comercial.

III. DESCRIPCION DE LAS MEJORES CORRELACIONES

En este capítulo se presentan las correlaciones utilizadas con mayor frecuencia ya sea por su precisión y/o por su sencillez. Como se ha mencionado, en este trabajo se pretende proporcionar métodos analíticos de fácil utilización para el cálculo de las caídas de presión en pozos de gas.

Se tratan inicialmente las correlaciones para el caso de flujo de gas en una sola fase y posteriormente el caso del flujo de vapor en pozos geotérmicos.

Aún cuando en los últimos años se realizan esfuerzos tendientes a la utilización del sistema internacional de unidades como sistema universal, en la práctica, y en particular, en nuestro país, las empresas dedicadas a la explotación de los yacimientos de gas y geotérmicos utilizan sistemas de unidades diferentes, predominando el sistema inglés en la industria petrolera, mientras el sistema internacional comienza a ser usado con mayor frecuencia en la industria geotérmica. Debido a esto, se presenta un sistema diferente de unidades para cada caso que se trata; utilizando el sistema inglés en los casos de pozos de gas seco y el internacional para el caso de los pozos geotérmicos.

III.I. Gas Seco.-

Existen diversas formas de calcular la presión de fondo fluyendo en los pozos de gas natural, pero todas se reducen a dar solución a la ecuación general de flujo, la cual se deriva a partir de las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía, además del uso de la Primera y Segunda -- ley de la termodinámica.

La diferencia principal de los diversos métodos consiste en las suposiciones que se realizan al integrar la ecuación (A-2.18).

En el anexo A-2 se muestra el procedimiento para la deducción de la ecuación general para el flujo de gas a través de una tubería, la cual queda expresada como:

$$\frac{53.34 T Z}{S.G.} \frac{dp}{p} + dL + 0.0107 \frac{f}{D^5} \left(\frac{T Z}{p}\right)^2 Q^2 dL = 0 \quad (A-2.18)$$

III.1.1. Método De Compresibilidad Y Temperatura Promedio.¹

El método consiste básicamente en resolver la ecuación general de flujo (A-2.18) bajo las siguientes suposiciones:

- a) Se considera un perfil lineal de temperatura -- desde la superficie hasta el fondo del pozo.
- b) El factor de compresibilidad del gas (Z), se -- considera como un promedio aritmético entre dos profundidades dadas.
- c) El factor de fricción es constante a lo largo -- de la tubería de producción.

Si se integra la ec. (A-2.18) bajo las consideraciones anteriores, la expresión que resulta es de la forma:

$$P_{ff}^2 = P_s^2 e^S + \frac{100 \text{ S.G. } T Z f L (e^S - 1) Q^2}{d^5 S} \quad (1)$$

En donde

P_{ff} = presión de fondo fluyendo, psia

S = (2 S.G. L) / (53.34 T Z)

T = temperatura promedio entre la del fondo y la de la superficie.

Z = compresibilidad promedio medida a la temperatura promedio y la presión calculada.

La deducción de la ecuación (1) se presenta en el anexo (A-3).

Si se divide la profundidad del horizonte productor en dos o más intervalos, la presión de fondo fluyendo se obtiene con mayor exactitud. En la fig. (III.1) se muestra la variación del error obtenido conforme se aumenta el número de intervalos en que sea dividida la línea de flujo.

El procedimiento utilizado para la solución de la ecuación (1) es el siguiente:

- 1) Escoger el número de intervalos en que se dividirá la profundidad del horizonte productor.
- 2) Calcular la temperatura promedio para cada intervalo.
- 3) El factor de fricción se encuentra resolviendo la ecuación de Colebrook² mediante el procedimiento propuesto en el Anexo C-1.
- 4) La viscosidad del gas se obtiene mediante la correlación propuesta por Lee, González y Eakin.³ En el Anexo C-2 se muestra esta correlación.
- 5) Determinar el factor Z para cada intervalo, mediante la gráfica propuesta por Standing-katz⁴. Esta gráfica se presenta en la fig.(III.2.)
- 6) Calcular el término $S = (2 S.G. L) / (53.34 T Z)$
- 7) Obtener la presión de fondo fluyendo mediante la ec.(1).
- 8) En el caso de haber dividido la línea de flujo en más de dos intervalos, sustituir el valor de p_{ff} por p_s y repetir los pasos del 5 al 8 hasta que se alcance la profundidad correspondiente al fondo del intervalo productor.

En el Anexo B-1 se presenta un programa para resolver esta ecuación en una calculadora de bolsillo, tanto para una Hewlett-Packard 41-CV (HP. 41-CV), como para una Texas Instruments 59 (TI-59). El nombre de este programa es " PRES ".

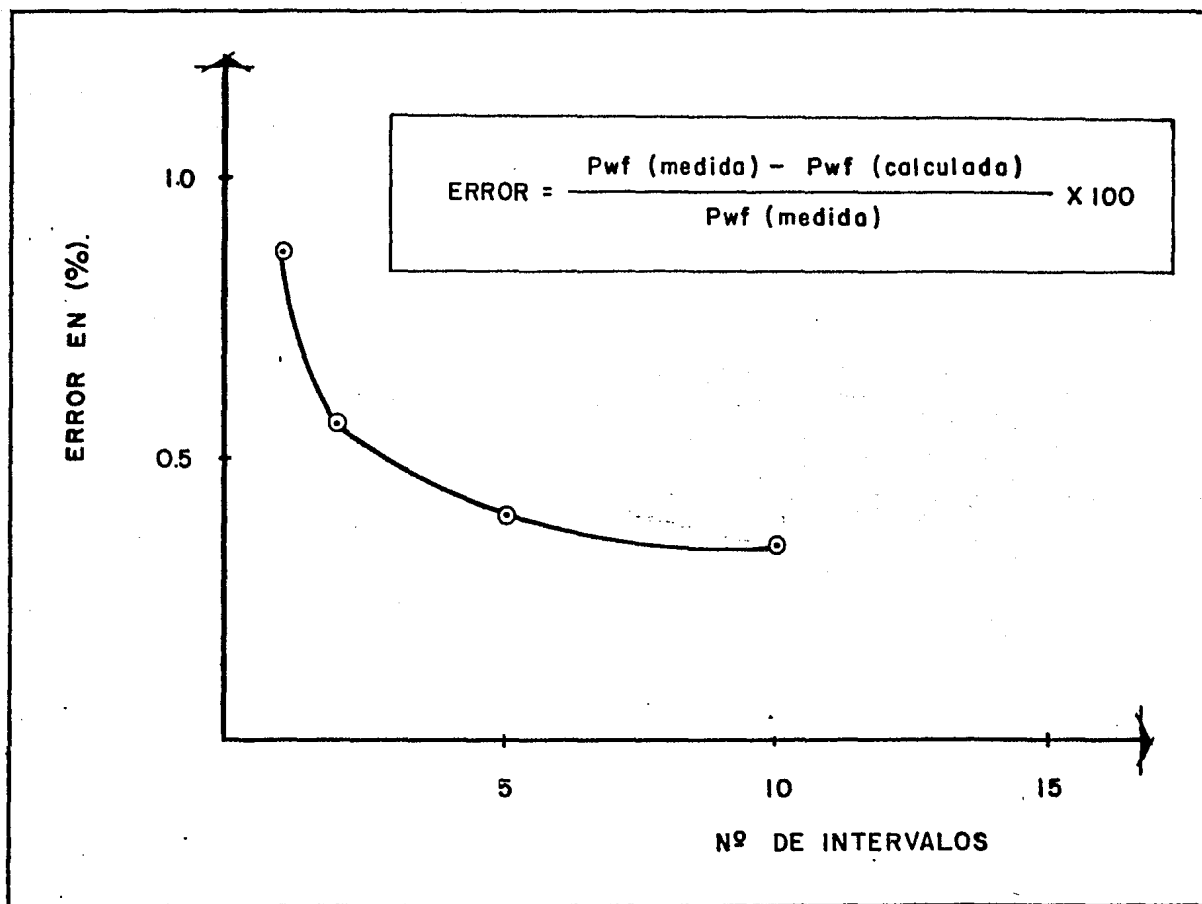


Fig. (III.1.)

Variación del error de la presión de fondo vs el número de intervalos.

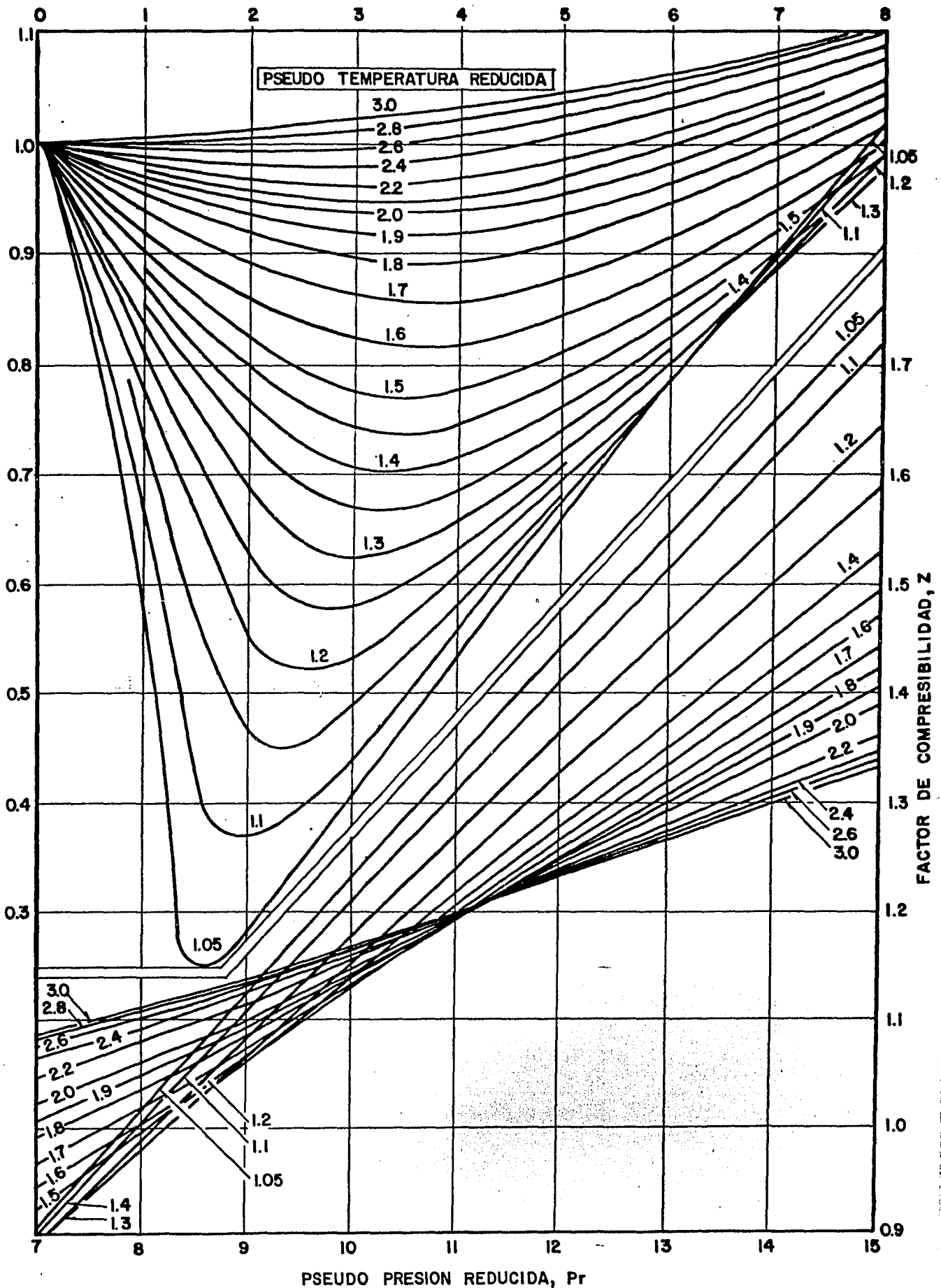


Fig. (III .2) El factor de compresibilidad para los gases naturales. De Standing y Katz⁴.

III.1.2. Método De Cullender Y Smith.⁵

M.H.Cullender y R.V.Smith⁵ propusieron para la solución de la ecuación general de flujo (A-2.18) la aplicación de un método numérico para resolver la integración que se presenta en dicha ecuación. Este método considera un perfil lineal de temperatura, entre la de fondo y la medida en la cabeza del pozo.

La solución de la ec.(A-2.18) es de la forma:

$$\frac{1000 \text{ S.G. L}}{53.34} = \int_{p_s}^{p_{ff}} \frac{\frac{p}{T Z} dp}{F^2 + 0.001 \left(\frac{p}{T Z}\right)^2} \quad (2)$$

En donde

$$F^2 = \frac{2.6665 f Q^2}{d^5} \quad (3)$$

En el Anexo A-4 se presenta una deducción detallada de la forma de obtener la expresión anterior a partir de la ecuación (A-2.18).

El término derecho de la ecuación (2) puede resolverse por algún método numérico. Los autores⁵ propusieron la aproximación de Simpson⁶, con la cual, el término izquierdo de la ec.(2) puede ser aproximado mediante:

$$\frac{1000 \text{ S.G. L}}{53.34} \approx \frac{(p_{mf} - p_s) (I_{mf} + I_s)}{2} + \frac{(p_{ff} - p_{mf}) (I_{ff} + I_{mf})}{2} \quad (4)$$

la ecuación anterior también puede ser escrita como:

$$37.5 \text{ S.G. } L \cong (p_{mf} - p_s) (I_{mf} + I_s) + (p_{ff} - p_{mf}) (I_{ff} + I_{mf}) \quad (5)$$

En donde

p_{mf} = presión en la mitad de la línea de flujo

p_s = presión en la cabeza del pozo (fluyendo)

p_{ff} = presión de fondo fluyendo

$$I = \frac{ \left(\frac{p}{T Z} \right) }{ F^2 + 0.001 \left(\frac{p}{T Z} \right)^2 } \quad (6)$$

la ecuación (5) puede ser separada en dos términos, correspondientes a cada uno de los medios de la línea de flujo en que se ha dividido.

Para el medio superior:

$$37.5 \text{ S.G. } \frac{L}{2} = (p_{mf} - p_s) (I_{mf} + I_s) \quad (7)$$

Para el medio inferior:

$$37.5 \text{ S.G. } \frac{L}{2} = (p_{ff} - p_{mf}) (I_{ff} + I_{mf}) \quad (8)$$

El procedimiento utilizado para solucionar las ecuaciones (7) y (8) es el siguiente:

- 1) Calcular el término F^2 de la ec.(3), en la que es necesario conocer el factor de fricción, el que puede determinarse mediante la ecuación de Colebrook² presentada en el Anexo C-1. La viscosidad del gas se determina mediante la correlación de Lee , González y Eakin³ descrita en el Anexo C-2.

- 2) Se calcula el término I_s , es decir, a condiciones de superficie, con la ec. (6). El factor de compresibilidad (Z), se obtiene de la gráfica de Standing-Katz⁴.
- 3) Se supone $I_s = I_{mf}$
- 4) Se resuelve la ec. (7) para el medio superior de la línea de flujo;

$$p_{mf} = p_s + \frac{37.5 \text{ S.G. } L/2}{(I_s + I_{mf})}$$

- 5) Con este valor de p_{mf} , se calcula el valor de I_{mf} a esta presión
- 6) Se resuelve la ec. (7) nuevamente
- 7) Si la diferencia entre esta nueva presión y la calculada anteriormente es mayor que 1 psia, se vuelve a calcular un nuevo valor de I_{mf} y así sucesivamente hasta que dicha diferencia sea menor que 1 psia, o alguna tolerancia previamente seleccionada.
- 8) Con el último valor obtenido de p_{mf} , se calcula I_{mf} y se supone $I_{mf} = I_{ff}$
- 9) Se resuelve la ec. (8) para el medio inferior de la línea de flujo;

$$p_{ff} = p_{mf} + \frac{37.5 \text{ S.G. } L/2}{(I_{mf} + I_{ff})}$$

- 10) Se realiza el mismo procedimiento que en el paso 7
- 11) Cuando se tiene el valor de p_{ff} , se realiza una interpolación parabólica para obtener un valor más aproximado; utilizando para ello la regla de Simpson⁶

$$p_{ff} = p_s + \frac{112.5 \text{ S.G. } L}{(I_s + 4I_{mf} + I_{ff})}$$

En el Apéndice B-2 se presentan dos programas para calculadora de bolsillo Hewlett-Packard 41 CV y Texas Instruments 59, escritos para la solución de la ecuación (2). Estos programas tienen el nombre de " PWF ".

III.1.3. Método de Messer, Raghavan y Ramey⁷.

Este método fue desarrollado para ser utilizado en los modernos pozos de gas perforados actualmente a profundidades mayores de 7 000 metros, en los que, como es de esperarse, sus presiones son mucho mayores que la de los pozos perforados hasta hace tiempo y, consecuentemente su temperatura es también elevada.

Los autores⁷ de éste método tomaron como base los trabajos desarrollados por Fowler⁸, el cual amplió el método de Sukkar y Cornell⁹ para el cálculo de la presión de fondo.

El método propuesto por Sukkar y Cornell consiste en resolver la siguiente ecuación:

$$\frac{0.01875 \text{ S.G. } L \cos \alpha}{T} = \int_{p_{sr}}^{p_{fr}} \frac{(Z/p_r) dp_r}{1 + B(Z/p_r)^2} \quad (9)$$

En donde

p_{sr} = presión reducida en la cabeza del pozo
(psia)

p_{fr} = presión reducida en el fondo del pozo
(psia)

$$B = \frac{667 f Q^2 T^2}{d^5 p_s^2 \cos \alpha} \quad (10)$$

En el Anexo A-5 se presenta la deducción de la ecuación (9) a partir de la ecuación básica de flujo (A-2.18).

Sukkar y Cornell calcularon tablas para valores de la integral que contiene la ec. (9) cubriendo un rango de presiones reducidas desde 1.0 hasta 12.0 y un rango de valores del factor B, desde 0.0 (caso estático), hasta 20.0 (fluyendo) y temperaturas reducidas de 1.5, 1.6 y 1.7. En el Anexo C-3 se presentan los valores de la integral para los rangos anteriores.

El procedimiento utilizado por Sukkar y Cornell es el siguiente: Calcular el valor de la constante B, para la temperatura reducida promedio del pozo. La integral es entonces evaluada para la presión reducida en la cabeza del pozo. Se calcula el miembro izquierdo de la ecuación (9) y se resta a el valor leído de la integral. Este resultado es el valor de la integral evaluada a condiciones de fondo. Nuevamente es utilizada la tabla de valores de la integral, con el valor de B obtenido anteriormente y T_r , se lee el valor de p_r a condiciones de fondo. La presión de fondo reducida es convertida a presión de fondo fluyendo al multiplicarla por la presión crítica del gas.

Este método no implica de ninguna forma un cálculo iterativo o por ensaye y error, sin embargo, sí implica realizar interpolaciones al trabajar con las gráficas del valor de la integral.

Al ampliar el método de Sukkar y Cornell para altas presiones y temperaturas, se presentó el problema de que la mayoría de los pozos profundos presentaban una cantidad apreciable de elementos contaminantes (ácido sulfhídrico, nitrógeno y/o dióxido de carbono), para lo cuál, la gráfica de la ley de desviación para los gases reales, propuesta por Standing y Katz⁴, no es adecuada, ya que Z no puede ser calculada únicamente como función de p_r y T_r . Wichert y Aziz¹⁰ determinaron un factor de corrección para Z, conociendo la fracción de dióxido de carbono y ácido sulfhídrico contenida en el gas.

Esta corrección se aplica en la determinación de las propiedades pseudo críticas para poder utilizar la gráfica de Z.

En el Anexo C-4 se muestra cómo utilizar ésta corrección.

Al ampliar el rango de aplicabilidad de la ecuación de Sukkar y Cornell se encontró que en la región de alta presión, en la gráfica de Standing-Katz⁴, el factor Z es una función lineal de p_r para valores de $10 \leq p_r \leq 30$ y $1.1 \leq T_r \leq 3.0$,

$$Z = C + G p_r \quad (11)$$

en donde C y G son constantes

Sustituyendo la ec. (11) en la integral de la ec. (9), esta se podrá integrar analíticamente. En el Anexo A-6 se presenta el desarrollo de esta integración.

Para el caso de una columna estática, es decir, $B = 0$, el resultado de la integración es el siguiente:

$$\int_{p_{r1}}^{p_{r2}} \frac{(Z/p_r) dp_r}{1 + B (Z/p_r)^2} = [C \ln (p_r) + G p_r]_{p_{r1}}^{p_{r2}} \quad (12)$$

Se puede observar en el Anexo A-6 que la forma general de la solución analítica de la integral, es muy elaborada, y, no se aprecia fácilmente su uso. Debido a esto se decidió evaluar la integral numéricamente, solo que al realizar una gráfica de p_r contra el valor de la integral, fué similar para valores de B mayores o iguales a cero. Por esto se pensó que una ecuación de la forma de (12) podría ser una buena correlación para resolver numéricamente la integral.

Messer, Raghavan y Ramey Jr⁷ encontraron que la solución de la integral de la ec. (12) es de la forma:

$$\int_{0.2}^{p_r} \frac{(Z/p_r) dp_r}{1 + B (Z/p_r)^2} = J + K p_r + U \ln (p_r) \quad (13)$$

La relación anterior fué encontrada al evaluar la integral de la ec. (9) para valores de T_r comprendidos entre 1.0 y 3.0, y para un rango de presiones reducidas de 2.0 a 30.0.- Estos límites fueron escogidos ya que son los valores para los que se encuentra definida la gráfica de Standing-Katz⁴

A continuación se elaboró un programa estadístico de regresión para determinar los coeficientes J,K y U de (13).

En la fig.(III.3) se muestra el rango cubierto por la ecuación de Sukkar y Cornell⁷ en su trabajo, y el rango de valores una vez ampliado para p_r y T_r . En las Figs.(III. 4) a la (III. 6) se representan los coeficientes J,K y U como una función del parámetro B, en donde se puede observar la dependencia que existe entre los coeficientes de la integral (13) , y los parámetros B y T_r .

Para un rango de p_r entre 0.0 y 12.0, es conveniente utilizar el método originalmente propuesto por Sukkar y Cornell⁷ utilizando las gráficas presentadas en el Anexo C-3.

Cuando se presentan valores de presión y temperatura - - altos, es conveniente utilizar los coeficientes de regresión encontrados. Estos se utilizan en dos rangos; 1).- para va - - lores de p_r entre 10.0 y 30.0 y T_r entre 1.1 y 3.0 y valores de B entre 0.0 y 25.0. Estos coeficientes de regresión son:

$$\begin{aligned} J = & (-0.00262 B + 0.18011) T_r^2 \\ & - (-0.01517 B + 1.21216) T_r \\ & - (-0.00552 B + 0.28026) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} K = & (-0.00043 B + 0.02246) T_R^2 \\ & - (-0.00226 B + 0.12792) T_R \\ & + (-0.00274 B + 0.21463) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} U = & - (-0.00262 B + 0.17584) T_R^2 \\ & + (-0.01474 B + 1.08235) T_R \\ & - (-0.00771 B + 0.81075) \end{aligned} \quad (16)$$

Para valores de B entre 10 y 100 y los mismos rangos de p_r y T_r , estos coeficientes son:

$$\begin{aligned} J = & (-0.001594 B + 0.297336) T_R^2 \\ & + (0.009678 B - 1.664290) T_R \\ & - (0.001963 B - 0.429648) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} K = & (-0.000171 B + 0.019112) T_R^2 \\ & + (0.000941 B - 0.107041) T_R \\ & - (0.001259 B - 0.188162) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} U = & (0.001435 B - 0.212139) T_R^2 \\ & + (0.000941 B - 0.107041) T_R \\ & + (0.006320 B - 1.00389) \end{aligned} \quad (19)$$

El procedimiento de cálculo para determinar la presión de fondo fluyendo, mediante este método es el siguiente:

- 1) Calcular las propiedades pseudocríticas y reducidas para el gas, y hacer las correcciones necesarias -- cuando contengan algunos contaminantes (Anexo C-4).

- 2) Calcular el valor de la constante B, mediante la ecuación (10)
- 3) Con los valores de B, p_r y T_r escoger el grupo de coeficientes J, K y U según sea el caso, y calcularlos con las ecuaciones (14) a la (19)
- 4) Una vez determinados los valores de estos coeficientes, sustituirlos en la ecuación (13) para obtener el valor de la integral.
- 5) El resultado obtenido sumarlo al término izquierdo de la ec.(9). Este valor corresponde a el de la integral a condiciones de fondo
- 6) Sustituir el valor de la integral anteriormente calculado, y el de los coeficientes J, K y U, en la ec.(13) y resolver para p_r
- 7) El valor de la presión de fondo fluyendo se obtiene al multiplicar el valor de p_r calculado en el inciso anterior, por la presión crítica del gas, determinada en el inciso 1

Se elaboró un programa para calcular la presión de fondo fluyendo en los pozos con altas presiones y temperaturas, por el método anteriormente propuesto. Este programa está diseñado para ser utilizado en una calculadora de bolsillo HP- 41 CV o en una calculadora TI- 59, con la finalidad de facilitar el uso de este método. Estos programas se presentan en el Anexo-B-3, y están identificados con el nombre de " PFON ".

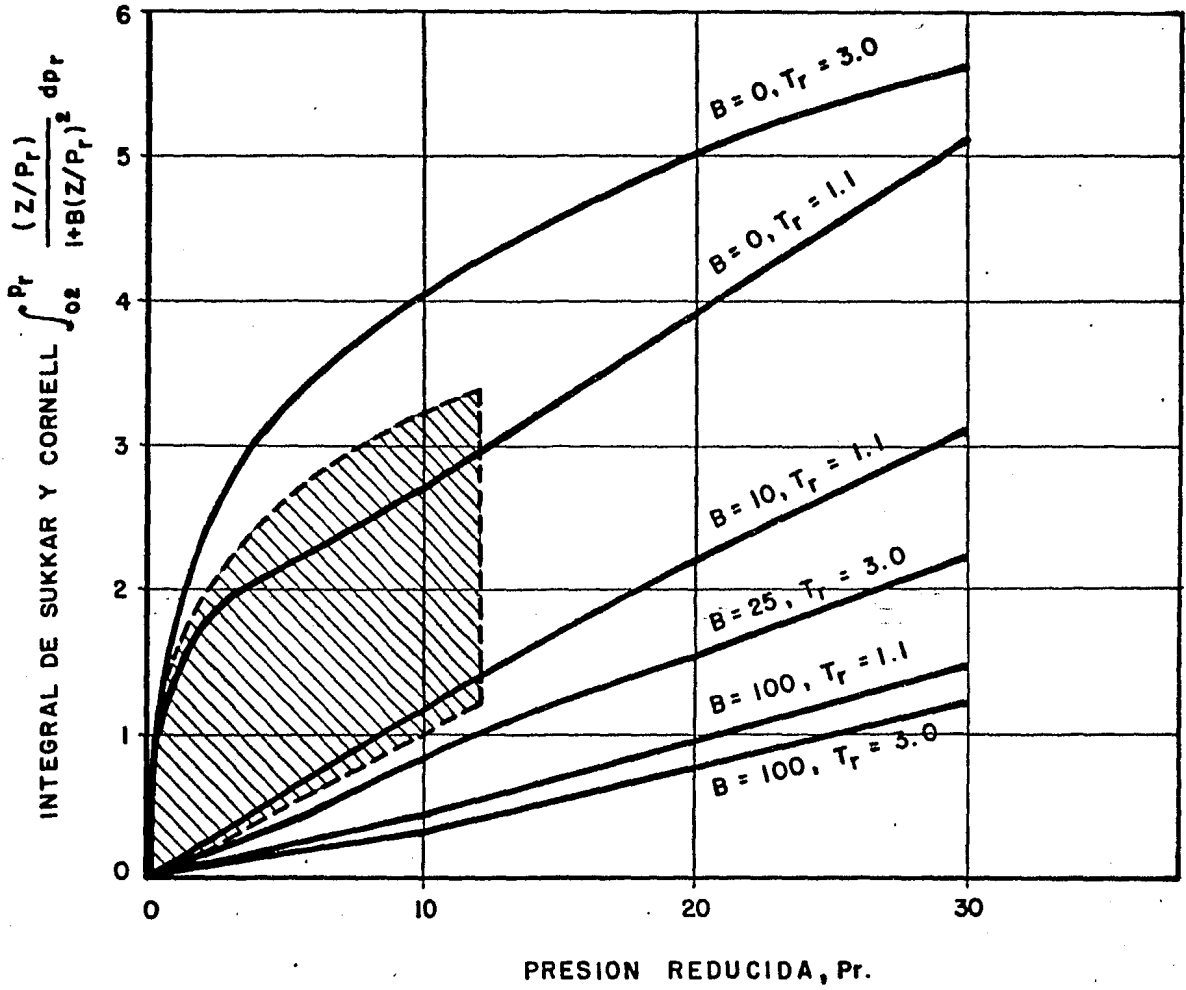


Fig. (III.3)

Integral de Sukkar y Cornell vs -
pseudo presión reducida⁷.

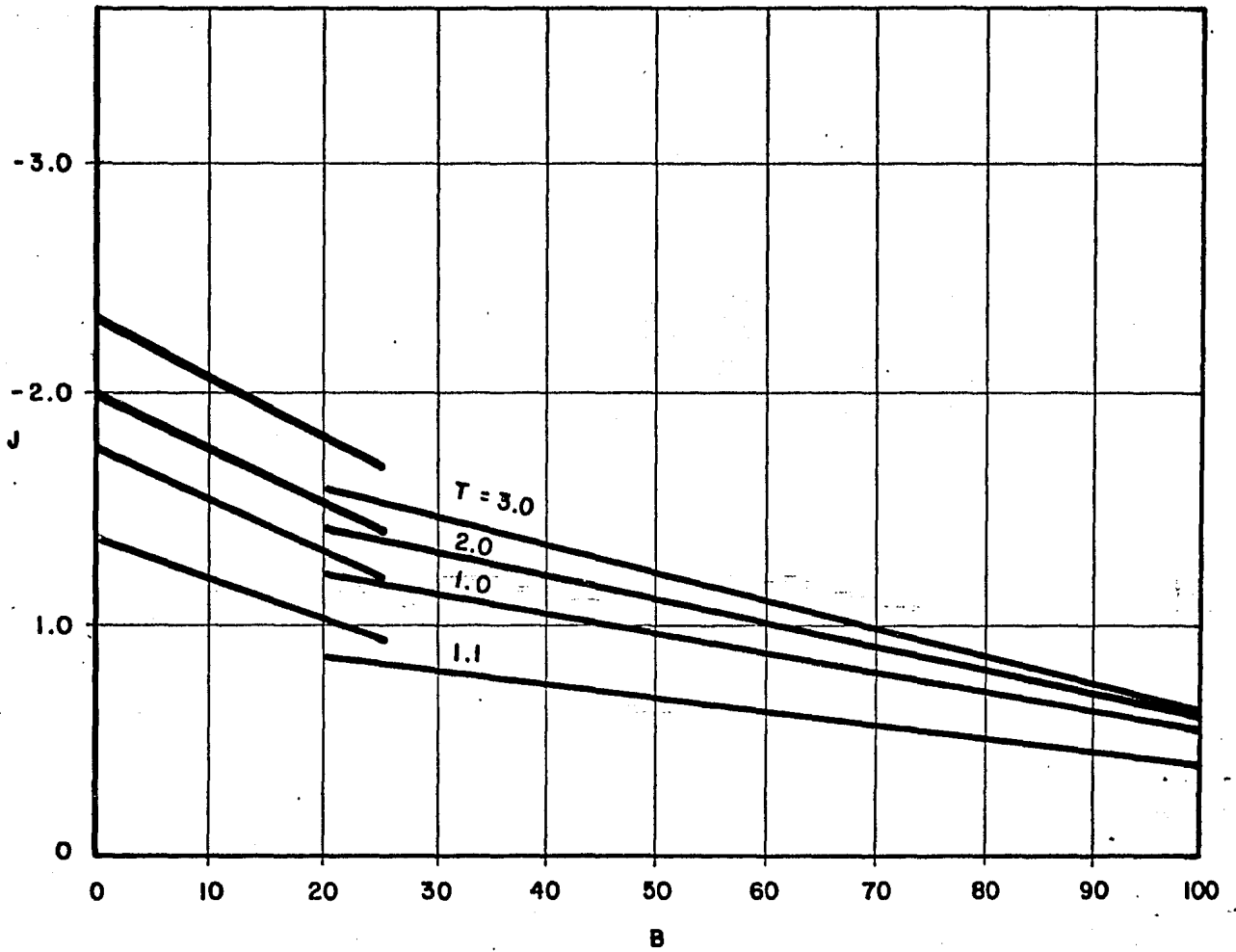


Fig. (III. 4).- Coeficiente J vs el valor de la constante B, de Sukkar y Cornell⁷.

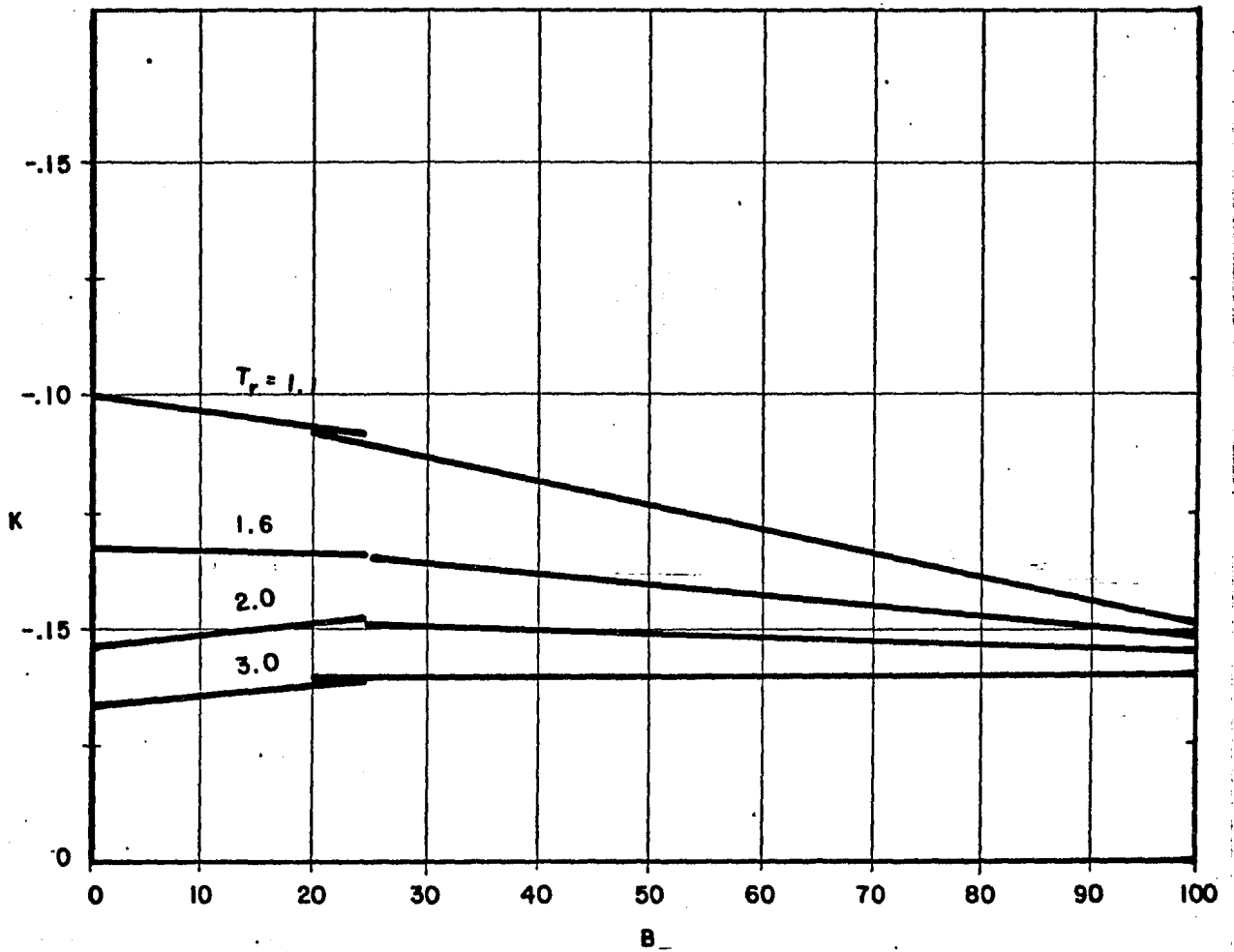


Fig. (III. 5).- Coeficiente K vs el valor de la constante B, de Sukkar y Cornell⁷.

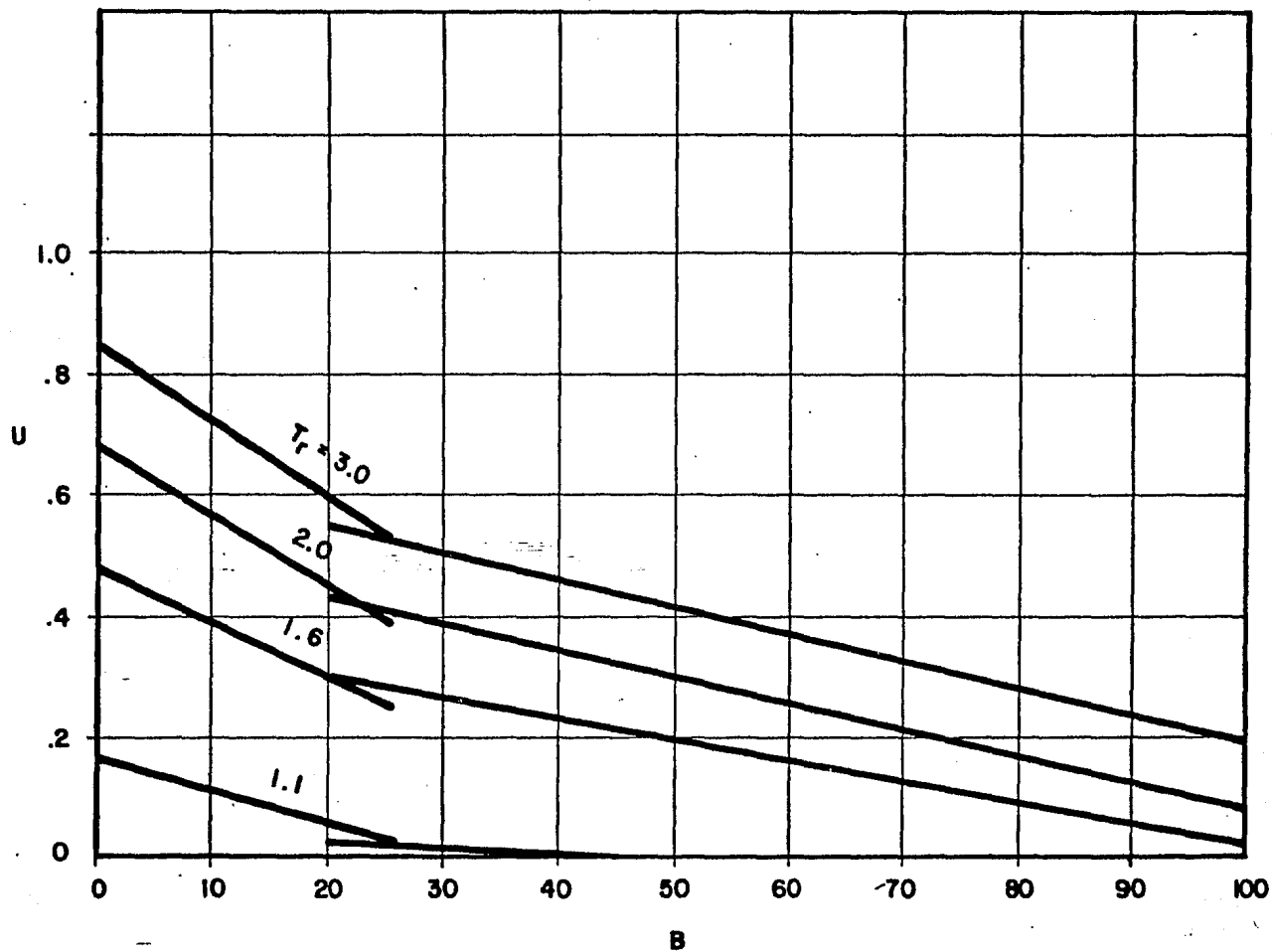


Fig. (III. 6).- Coeficiente U vs el valor de la constante B, de Sukkar y Cornell⁷.

III.1.4. Cálculo De La Presión De Fondo Fluyendo Método De Khalid Aziz¹¹

Este método consiste en resolver la ecuación de flujo en una tubería, desarrollada por Cullender y Smith⁵, sin hacer uso de las simplificaciones ni suposiciones que los otros métodos realizan.

Aziz¹¹, realizó un estudio comparativo de los resultados obtenidos al utilizar diferentes técnicas numéricas al resolver la integral contenida en la ec.(2), cuyo desarrollo se presentó en el Anexo A-8.

Se encontró que al utilizar un método de tercer orden⁶ al resolver la integral, los resultados son más precisos que con otros métodos. (Ver referencia 11).

La ecuación propuesta por Cullender y Smith⁵, es de la forma:

$$\frac{1000 \text{ S.G. L}}{53.34} = \int_{P_2}^{P_1} \frac{\left(\frac{P}{T Z}\right)}{F^2 + \frac{\left(\frac{P}{T Z}\right)^2}{1000}} dp \quad (2)$$

en donde

$$F^2 = \frac{2.665 f Q^2}{d^5}$$

Cullender y Smith resolvieron esta integración mediante el método de Simpson o Trapezoidal⁶, que es de las formas más simples de aproximar una integral.

Escribiendo la ec. (2) en la siguiente forma:

$$\phi (p_f) = X \int_{p_s}^{p_f} y dp = 0 \quad (20)$$

en donde

$$X = (1000 \text{ S.G. L} / 53.34)$$

$$y = \frac{p T}{Z} / F^2 + \frac{(\frac{p}{T Z})^2}{1000}$$

$$\phi (p_f) = \frac{1000 \text{ S.G. L}}{53.34} \int_{p_s}^{p_f} \frac{(\frac{p}{T Z})}{F^2 + \frac{(\frac{p}{T Z})^2}{1000}} dp \quad (21)$$

Aquí el problema se reduce a encontrar las raíces de la ec. (20), es decir, encontrar el valor de p_f para el cual se cumple que $\phi (p_f) = 0$

Para resolver la ec. (20) se utiliza el método de Newton Raphson de segundo orden¹², en donde:

$$p_f^{(n+1)} = p_f^{(n)} - \frac{\phi (p_f^{(n)})}{\phi' (p_f^{(n)})} \quad (22)$$

Aquí el superíndice n , se refiere al número de la iteración y $\phi' (p_f^{(n)})$ es la primera derivada de la función, la cual se obtiene al derivar la ecuación (21) con respecto a p_f ; esta derivada es la siguiente:

$$\phi' (p_f^{(n)}) = \frac{p_f^{(n)}}{T Z^{(n)}} \left(F^{(n)} \right)^2 + \frac{p_f^{(n)}}{1000} \quad (23)$$

Al iniciar las iteraciones se tiene que suponer una aproximación razonable de $p_f^{(n+1)}$ y utilizar la ecuación (22) - - para obtener mejores estimaciones de p_f .

El factor de fricción se determina mediante la ecuación de Colebrook² resolviendola por el método de Newton-Raphson^{1,2}, presentado en el Anexo C-2. Este factor de fricción se con- sidera constante a lo largo de la línea de flujo.

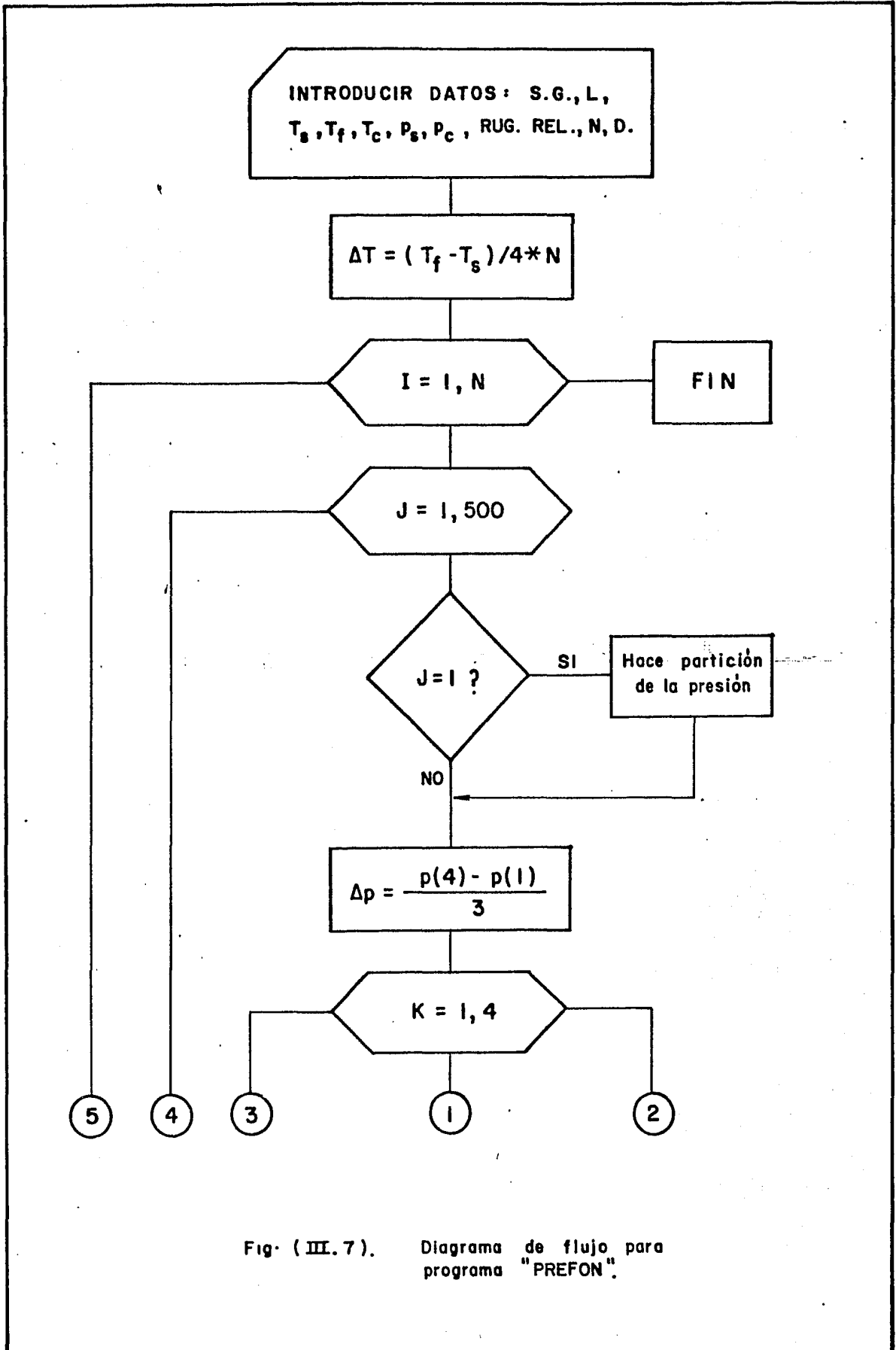
El factor de compresibilidad Z, se calcula mediante el método analítico propuesto por L. Yarbrough y K.R. Hall^{1,3}, - desarrollado en el Anexo C-5.

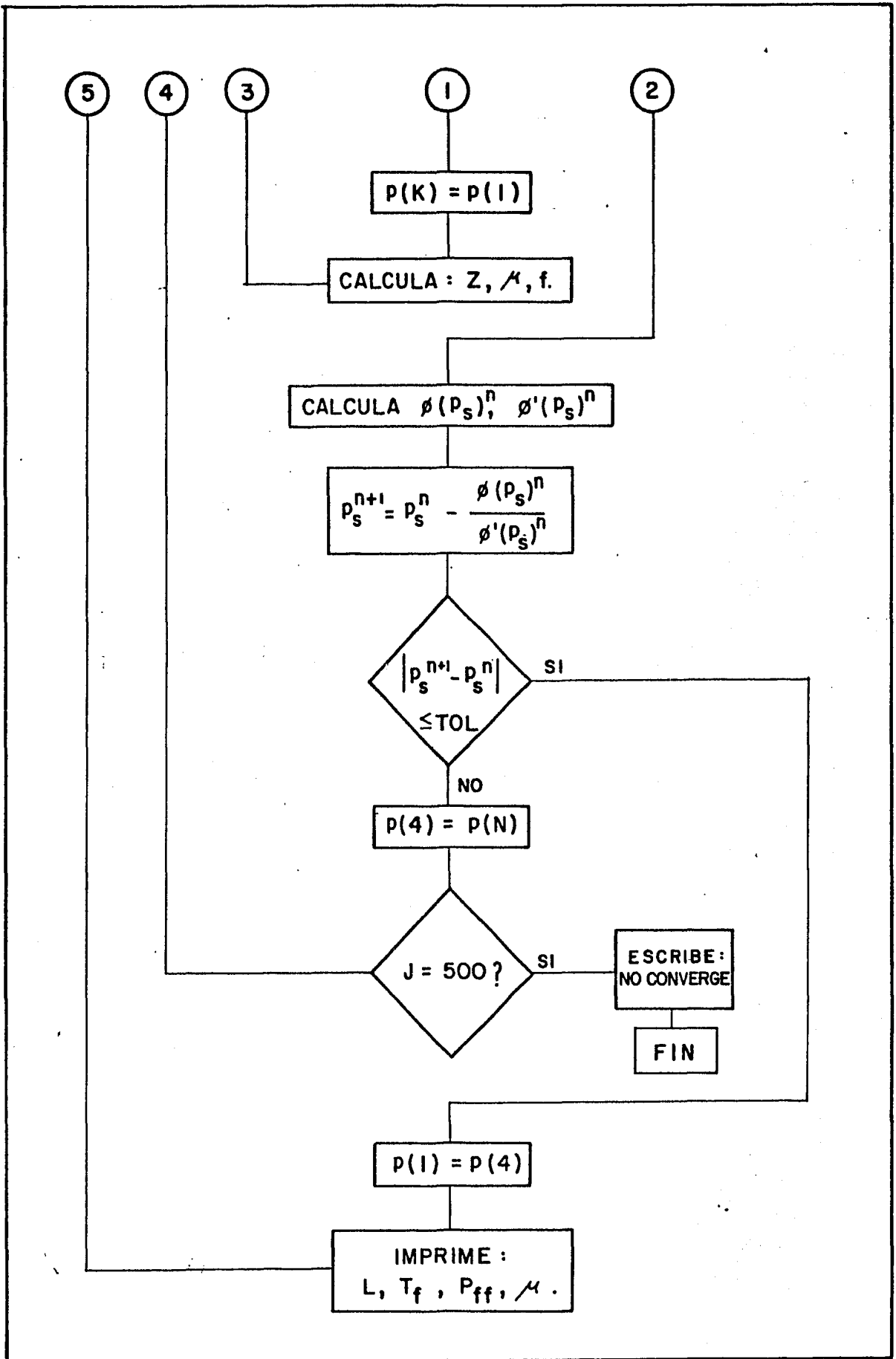
Para evaluar el término $\int_{p_s}^{p_f} y dp$, se utiliza el método de Newton de tercer orden⁶ el cual es escrito como:

$$\int_{p_s}^{p_f} y dp \approx (p_f - p_s) \left[\frac{1}{8} y_0 + \frac{3}{8} y_1 + \frac{3}{8} y_2 + \frac{1}{8} y_3 \right] \quad (24)$$

El valor de la viscosidad es calculado mediante el método propuesto por Lee, González y Eakin³, y se supone constante, ya que tanto los cambios de viscosidad como en el Número de Reynolds son pequeños.

En la fig.(III.7), se presenta un diagrama de bloques para resolver la ecuación (2) mediante este método. En el Anexo B-4 se incluye el programa "PREFON" escrito en lenguaje Fortran para la solución de este caso.





III.2. Vapor Seco Saturado Y Vapor Sobrecalentado

En la actualidad se han propuesto numerosos modelos matemáticos para simular el comportamiento termodinámico de los fluidos en el interior de los pozos geotérmicos. La mayor parte de estos trabajos, estan desarrollados para el estudio del bifásico (agua y vapor) que ocurre en los pozos, pero estos modelos no contemplan el caso del flujo de vapor en forma monofásica.

Como en el caso anterior, (sección III.1) para el flujo de gas seco en los pozos, los modelos propuestos fueron desarrollados a partir de la ecuación general de flujo (A-2.18) - para este caso, el flujo de vapor en un pozo vertical se representa por la ecuación (a-1.19), de la siguiente forma:

$$\frac{dp}{\rho} + gdL + V dV + \text{Pérdidas por fricción} - dq_H = 0$$

En el Anexo A-1 se presenta el desarrollo completo de la expresión anterior.

En esta sección se proponen tres formas distintas de resolver la ecuación diferencial presentada para el caso de flujo de vapor en una sola fase.

III.2.1 Extensión Del Método Propuesto Por G. Hiriart.²⁰

G. Hiriart²⁰ propone un método para determinar la caída de presión a lo largo de las tuberías en los pozos geotérmicos. Este modelo fue desarrollado para el caso en el que se tiene fluyendo una mezcla de agua y vapor en forma homogénea.

En este caso se utilizará la suposición básica del método que consiste en considerar que el producto de la presión por el volumen específico de la mezcla permanece prácticamente constante, $pv=cte$. Para adecuarlo al caso de flujo de vapor monofásico en los pozos, se supone que el flujo de vapor es adiabático, consideración que es prácticamente válida cuando los pozos han fluído durante un tiempo suficientemente largo.

En el Anexo C-7 se presenta la validación de la suposición de $pv=cte$., y también se presenta la variación de la entalpía manteniendo $pv=cte$.

La expresión para determinar la caída de presión en un pozo es de la forma:

$$(1 + \gamma p_1^2) = (1 + \gamma p_0^2) e^{\beta L} \quad (25)$$

en donde:

$$\gamma = \frac{2gD}{f \left(\frac{\dot{m}}{A} \right)^2 (p_0 v_0)} \quad (26)$$

$$\beta = \frac{2g}{p_0 v_0} \quad (27)$$

en donde se tiene que:

p = presión absoluta del vapor, Pa

v = volumen específico del vapor, m^3/Kg

\dot{m} = gasto másico de vapor, Kg/seg.

D = Diámetro de la tubería, m

g = valor local de la gravedad, m/seg^2

Los subíndices 0 y 1 denotan condiciones iniciales y - condiciones posteriores respectivamente. En el Anexo A-7 se presenta una deducción detallada de la ec. (25).

Como podrá observarse, esta expresión es bastante sencilla y no requiere de uso de computadora para resolverse, - lo que amplía la facilidad para su utilización. Los únicos - tres parámetros que es necesario determinar antes de calcular la caída de presión son los siguientes:

a) El volumen específico del vapor. Esto se obtiene a partir de las condiciones de presión y entalpía a boca de pozo, ya que el cálculo de la entalpía es mucho más frecuente que la medición de temperatura en pozos geotérmicos.

b) La viscosidad dinámica del vapor. Se puede obtener a partir de la expresión propuesta por Mercer y R. Faust²¹ en función de la temperatura del vapor. En el Anexo C-6 se detalla esta expresión.

c) El factor de fricción. Este puede ser leído del -- diagrama de Moody¹⁴ o bien calculado mediante la ecuación propuesta por Colebrook².

Una vez obtenido lo anterior se selecciona la profundidad a la que se desea determinar la presión de fondo fluyendo y se resuelven las ecuaciones (26) y (27) y finalmente la ecuación (25). Si se desea calcular una nueva presión a diferente profundidad, se resuelve únicamente la ecuación (25).

Debido a la sencillez del método, se escribió un programa para calculadoras de bolsillo (HP-41 CV y TI-59) para facilitar el cálculo. En el Anexo B-5 se presenta el programa "VAPOR" que determina la presión de fondo fluyendo a diferentes profundidades mediante este método.

III.2. Ampliación del método de Aziz¹¹

Khalid Aziz¹¹ después de efectuar un estudio comparativo de diferentes métodos numéricos para resolver la integración que se presenta en la ecuación de flujo de gas, propuso un método analítico para resolver el flujo de gas seco en una tubería vertical.

Este estudio se puede extender al caso del flujo de vapor en los pozos geotérmicos, manejando adecuadamente la ecuación diferencial que se presenta.

La expresión propuesta es de la forma:

$$\int_{p_s}^{p_f} \frac{\left(\frac{P}{TZ}\right) dp}{g \left(\frac{P}{TZ}\right)^2 + \beta} = 2.166 E-3 \Delta L \quad (28)$$

en donde:

$$\beta = \frac{\lambda f \dot{m}^2}{D^5} \quad (29)$$

$$\lambda = \frac{8 R^2}{M^2 \pi^2} \quad (30)$$

En el Anexo A- 8 se tiene el desarrollo completo de la ecuación (28). Esta puede ser expresada también como:

$$\Phi_1(p_f) = X_1 - \int_{p_s}^{p_f} y dp = 0 \quad (31)$$

en donde: $X_1 = 2.166 E-3 \Delta L$

$$y = \frac{p T}{Z} / g \left(\frac{p T}{Z} \right)^2 + \beta$$

Entonces, como anteriormente se tenía (sección III.1.4) el problema aquí consiste en encontrar las raíces de la ecuación (31), es decir, encontrar el valor de p_f para el cuál se tenga que $\Phi (p_f) = 0$.

Utilizando el método de Newton Raphson¹² de segundo orden se tiene ;

$$p_{f(n+1)} = p_{f(n)} - \frac{\Phi (p_{f(n)})}{\Phi'(p_{f(n)})} \quad (32)$$

En donde n es el número de iteración y $\Phi'(p_{f(n)})$ es la primera derivada de la ec. (31) la cuál queda expresada como:

$$\Phi' (p_{f(n)}) = \frac{\frac{p_f^n}{T Z^n}}{(\beta^{(n)})^2 + g \left(\frac{p_f^n}{T Z^n} \right)^2} \quad (33)$$

Para evaluar el término $\int_{p_s}^{p_f} y dp$, se utiliza el método de Newton de tercer orden⁶, para el cuál se tiene que:

$$\int_{p_s}^{p_f} y dp \approx (p_f - p_s) \left[\frac{1}{8} y_0 + \frac{3}{8} y_1 + \frac{3}{8} y_2 + \frac{1}{8} y_3 \right] \quad (34)$$

El factor de fricción se calcula mediante la expresión propuesta por Colebrook² detallada en el Anexo C-2.

El factor de compresibilidad del vapor se calcula mediante la ecuación de estado para los gases reales¹⁹, la que establece ;

$$pv = Z n R T$$

La entalpía, la densidad y la viscosidad del vapor son determinadas mediante las ecuaciones de estado presentadas por Faust y Mercer²¹ y que son detalladas en el Anexo C-6.

En la figura (III. 8) se muestra un diagrama de flujo que ilustra el procedimiento utilizado para la determinación de la caída de presión en un pozo. También fué elaborado un programa de computadora en lenguaje Fortran llamado "FLUJO" y se presenta en el Anexo B-6.

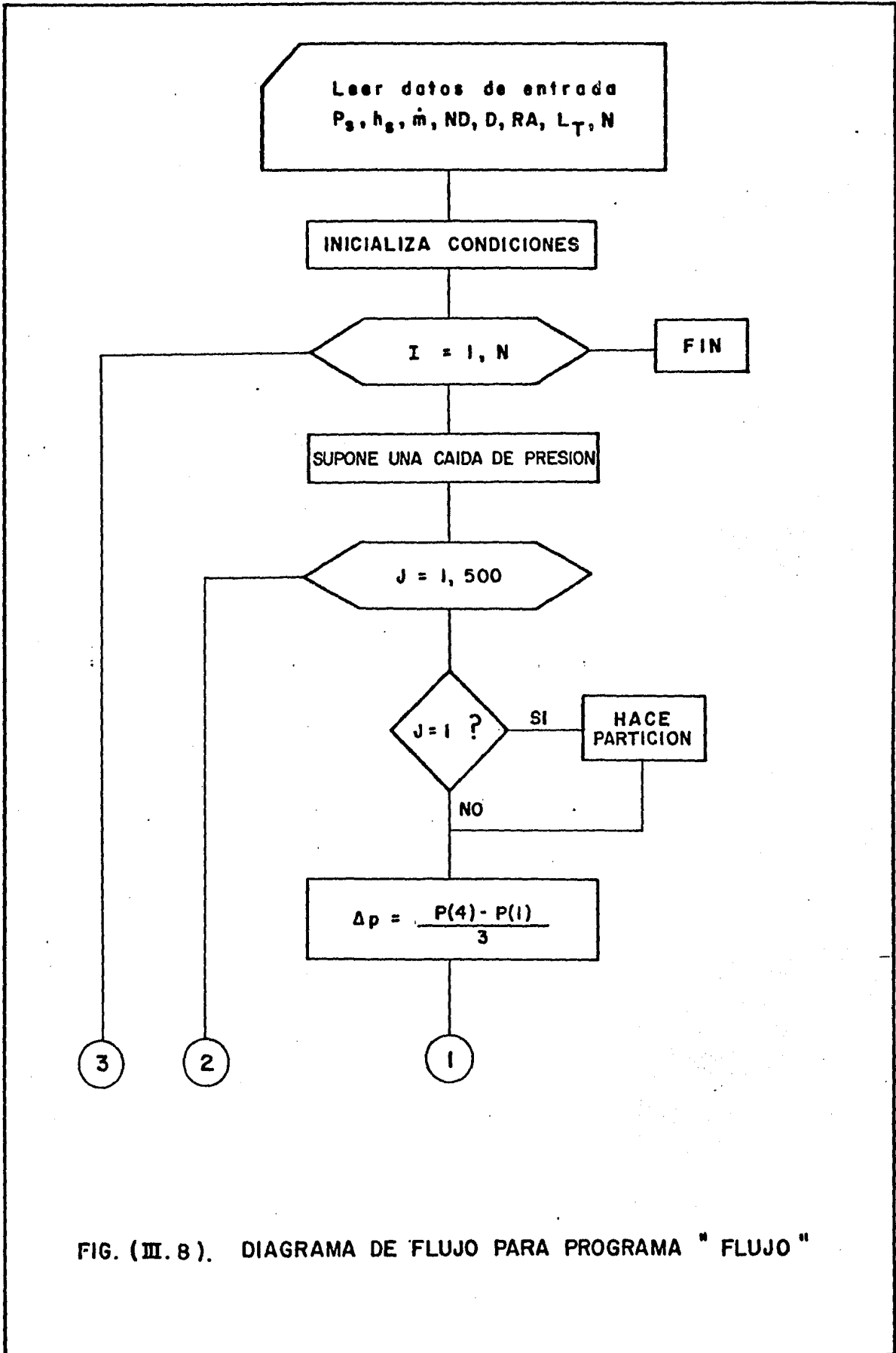
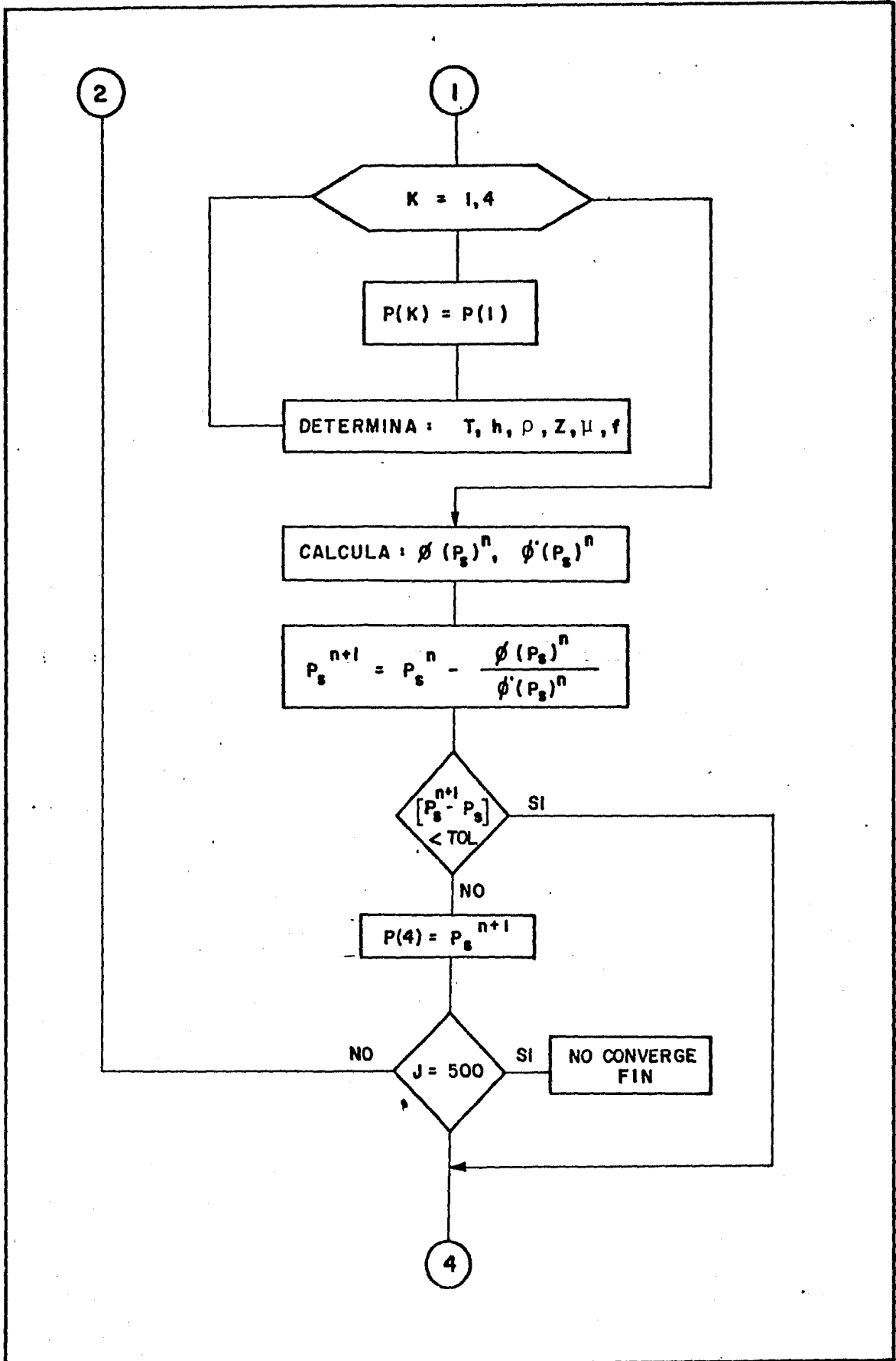
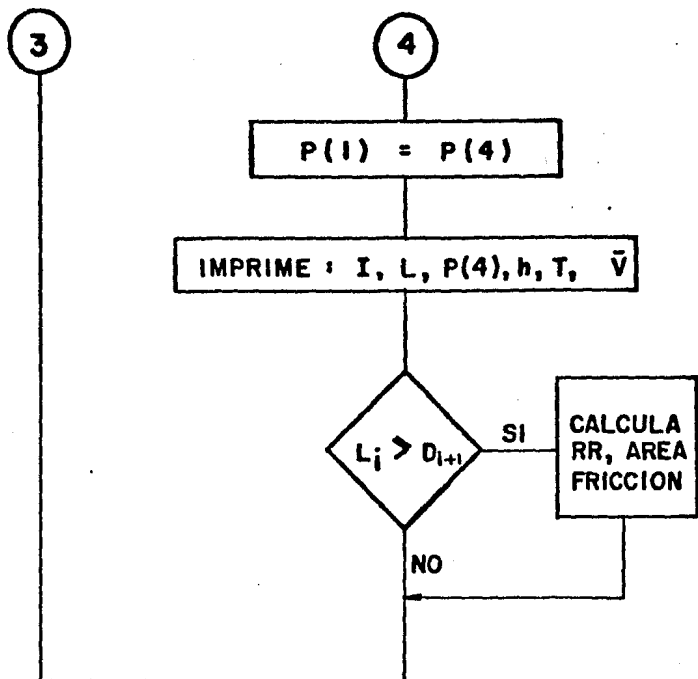


FIG. (III. 8). DIAGRAMA DE FLUJO PARA PROGRAMA " FLUJO "





III.2.3. Método propuesto por F. Garibay³⁵.

F. Garibay³⁵ presenta un método de solución para el caso del flujo de vapor en un pozo geotérmico. Lo interesante del método es que no hace las simplificaciones comunes en estos casos, por ejemplo, el considerar el proceso de flujo en condición isoentálpico.

En el Anexo A-1 fueron deducidas las ecuaciones básicas que gobiernan el flujo de fluido en una tubería vertical las que pueden ser escritas de la siguiente forma:

$$\rho VA = \text{CTE} \quad (35)$$

$$\frac{dp}{dL} = \rho V \frac{dV}{dL} + \rho g \cos \alpha + \frac{f}{2D} \rho V^2 \quad (36)$$

$$\frac{\partial}{\partial L} \left[h + \frac{V^2}{2} \right] = -g \cos \alpha - \frac{\partial Q_H}{\partial L} - \frac{\partial Q_H}{\partial r} \quad (37)$$

Aquí es posible hacer las siguientes consideraciones :

- a) El pozo es completamente vertical, $\alpha = 0$
- b) No hay transferencia de calor entre el fluido y las paredes del tubo, por lo que, $\partial Q_H / \partial r = 0$
- c) No existe transferencia de calor verticalmente, $\partial Q_H / \partial L = 0$

Si además se utiliza alguna relación empírica para la densidad del vapor, por ejemplo la descrita en el Anexo C-6 ;

$$\rho = F (p, h) \quad (38)$$

Aquí se tienen cuatro ecuaciones y presentan cuatro incógnitas a resolver: p, h, ρ y V .

Las ecuaciones de la (35) a la (38) pueden ser escritas también de la siguiente forma:

$$\frac{dV}{dL} = - \frac{V}{\rho} \frac{d\rho}{dL} \quad (39)$$

$$\frac{dp}{dL} = \rho V \frac{dV}{dL} + \rho g + \frac{f}{2D} \rho V^2 \quad (40)$$

$$\frac{dh}{dL} = -g - V \frac{dV}{dL} \quad (41)$$

$$\frac{d\rho}{dL} = \frac{\partial F}{\partial p} \frac{dp}{dL} + \frac{\partial F}{\partial h} \frac{dh}{dL} \quad (42)$$

En donde $\partial F / \partial p$ y $\partial F / \partial h$ se obtienen a partir de la ecuación de estado descrita en el anexo C-6.

Sustituyendo las ecuaciones (39), (40) y (41) en (42) se obtiene el sistema de ecuaciones diferenciales a resolver; esto es:

$$\frac{dV}{dL} = \frac{[(\frac{g}{V} + \frac{f}{2D} V) \frac{\partial F}{\partial p} + \frac{g}{\rho V} \frac{\partial F}{\partial h}]}{(\frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial h} - \frac{\partial F}{\partial p} - \frac{1}{V^2})} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dL} = & \frac{\rho V [(\frac{g}{V} + \frac{f}{2D} V) \frac{\partial F}{\partial p} + \frac{g}{\rho V} \frac{\partial F}{\partial h}]}{(\frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial h} - \frac{1}{V^2} - \frac{\partial F}{\partial p})} \\ & + \rho g + \frac{f}{2D} \rho V^2 \end{aligned} \quad (44)$$

$$\frac{dh}{dL} = (g-V) \frac{[(\frac{g}{V} + \frac{f}{2D} V) \frac{\partial F}{\partial p} + \frac{g}{\rho V} \frac{\partial F}{\partial h}]}{(\frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial h} - \frac{\partial F}{\partial p} - \frac{1}{V^2})} \quad (45)$$

$$\frac{d\rho}{dL} = \frac{[(\rho g + \frac{f}{2D} \rho V^2) \frac{\partial F}{\partial p} + g \frac{\partial F}{\partial h}]}{(1 + V^2 (\frac{\partial F}{\partial p} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial h}))} \quad (46)$$

En el Anexo A-9 se presenta el desarrollo en detalle de la determinación de las derivadas y la secuencia para obtener las ecuaciones anteriores.

El sistema anterior se resolvió originalmente mediante la técnica numérica de diferencias finitas implícitas pero -- presentó el inconveniente de tenía que trabajar con diferencias de profundidad demasiado pequeñas para lograr la estabilidad del método. Esto incrementa exageradamente la cantidad de cálculos a realizar, consecuentemente el tiempo de ejecución es bastante considerable (ver referencia 35).

Esto pudo ser resuelto utilizando el método de Runge -- Kutta de 4^º Orden ³⁶ el que establece que para un sistema de -- ecuaciones diferenciales :

$$\frac{dy_i}{dL} = f_i (L, y_1, \dots, y_m) \quad (47)$$

en donde y_i es la i ésima ecuación diferencial del sistema, el que puede resolverse mediante el siguiente algoritmo;

$$y_i^{n+1} = y_i^n + \Delta y_i^n$$

y n es el paso de cálculo y $n+1$ su siguiente.

$$\Delta y_n^i = \frac{\Delta L}{6} (K_0^{(i)} + 2K_1^{(i)} + 2K_2^{(i)} + 3K_3^{(i)}) \quad (48)$$

en donde el valor de los coeficientes K son:

$$\begin{aligned}K_0^{(i)} &= f_i (L_n, y_i^n), \\K_1^{(i)} &= f_i (L_n + \frac{\Delta L}{2}, y_i^n + \frac{K_0^{(i)}}{2} \Delta L), \\K_2^{(i)} &= f_i (L_n + \frac{\Delta L}{2}, y_i^n + \frac{K_1^{(i)}}{2} \Delta L), \\K_3^{(i)} &= f_i (L_n + \Delta L, y_i^n + K_2^{(i)} \Delta L)\end{aligned}\quad (49)$$

en donde $(i) = 1, 2, 3, \dots, m$ es el orden del sistema a resolver.

El factor de fricción es calculado mediante la ecuación propuesta por Colebrook² para encontrar el factor de fricción de Moody. La viscosidad del vapor se obtiene a partir de la expresión empírica presentada por Faust y Marcer²¹ en función de la temperatura del vapor y detallada en el Anexo C-6.

IV. Validación de las correlaciones.

IV.1. Gas seco.

Los métodos expuestos en este trabajo fueron comparados contra mediciones realizadas en cuatro diferentes pozos. Los datos usados se obtuvieron de la Superintendencia de Ingeniería de Producción del Distrito Frontera Noreste de PEMEX. Se analizan mediciones de los pozos: Monclova 1, Monclova 3, Monclova 22 y Reynosa 447.

I. Pozo Monclova 1. Para este pozo se estudia el comportamiento de las presiones de fondo a tres gastos diferentes para los cuatro métodos anteriormente expuestos, y los resultados se presentan de manera gráfica.

Caso 1. El grupo de los datos utilizados para el caso número uno es el siguiente:

A). Registro M.1.1.

Presión en la cabeza del pozo = 74.50 Kg/cm^2 man.

Gasto de gas producido = 8.0 MMSCFD.

Temperatura en la superficie = 40 °C.

Temperatura de fondo = 60 °C.

Profundidad del pozo = 2 220 mts.

Tubería de producción = 2 7/8" de 0 - 2 010 m. N-80, -
65 lb/pie EUE.

Condición del pozo = fluyendo por estrangulador ajustable.

Análisis del Gas:

Componente:	Por ciento mol:
N ₂	1.98
CH ₄	97.63
CO ₂	0.16
C ₂ H ₆	0.41
C ₃ H ₈	0.02

La figura IV.1 contiene los resultados obtenidos al utilizar cada uno de los métodos propuestos.

Caso 2. La segunda corrida de prueba se efectuó con datos tomados 2.5 años después del primer registro, teniéndose entonces lo siguiente:

A). Registro M.1.2

Presión en la cabeza del pozo = 37.58 Kg/cm² man.

Gasto de gas producido = 4.0 MMSCFD.

Temperatura del gas en la superficie = 35 °C.

Temperatura del gas en el fondo = 75 °C.

Profundidad del pozo = 2 220 mts.

Tubería de producción = 2 7/8" de 0-2 010 m. N-80,
65 lb/pie EUE.

Condición del pozo = fluyendo por estrangulador ajustable.

La figura IV.2 muestra los resultados comparativos del uso de los 4 modelos usados.

Caso 3. La tercera y última corrida se efectuó con datos tomados 1 año después del segundo registro. En este caso los datos utilizados son:

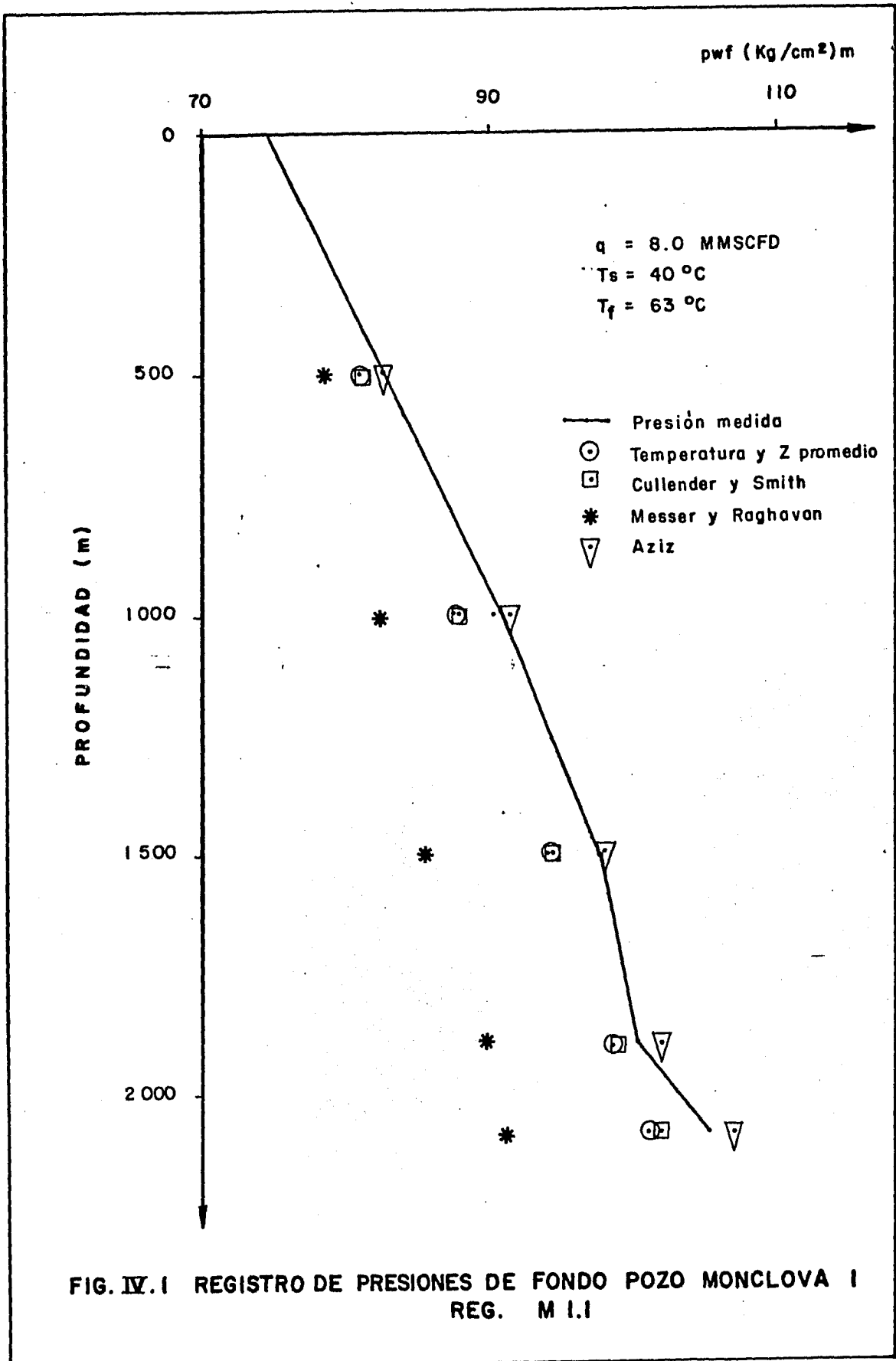


FIG. IV.1 REGISTRO DE PRESIONES DE FONDO POZO MONCLOVA I
REG. M I.1

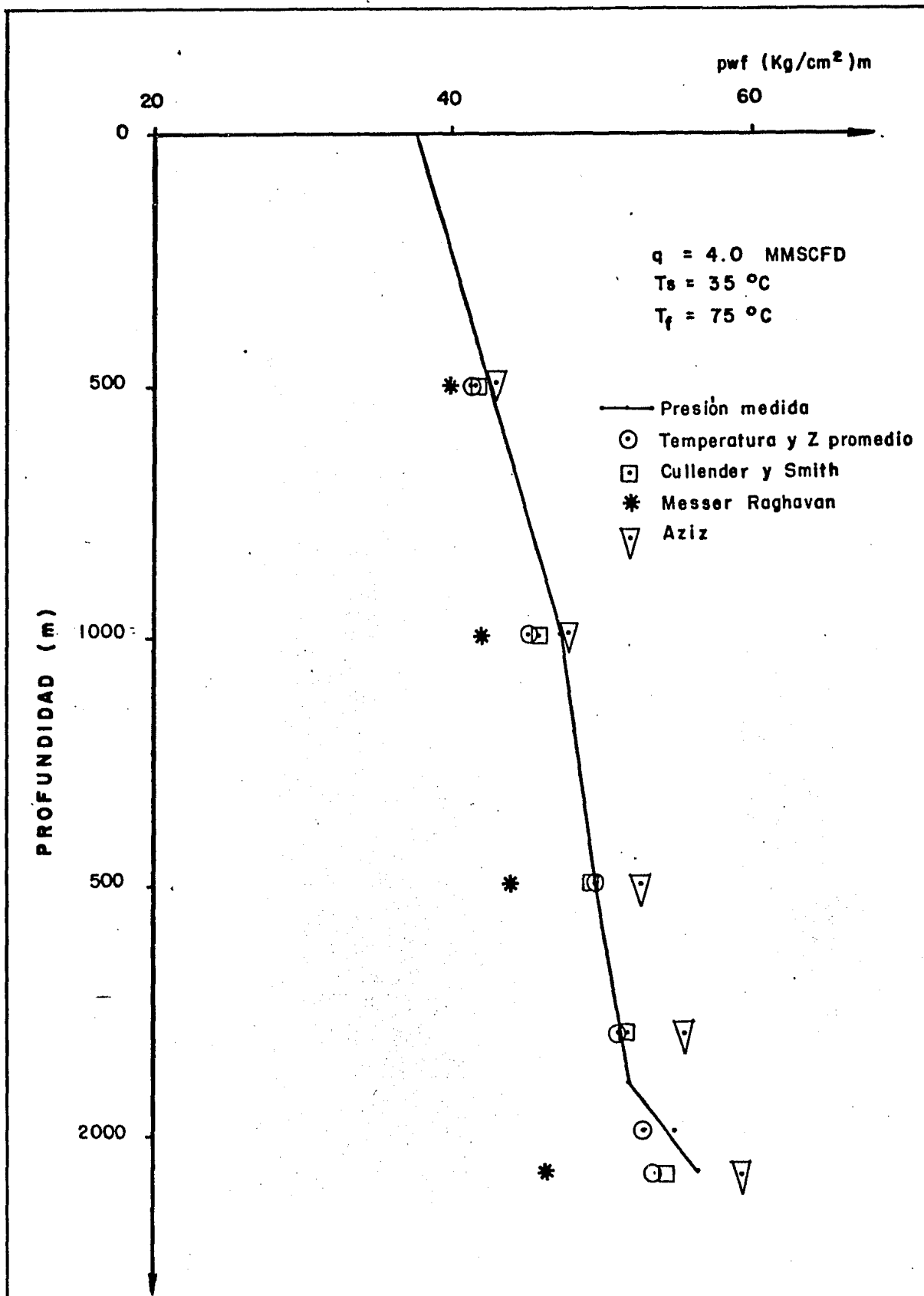


FIG. IV.2 REGISTRO DE PRESIONES DE FONDO POZO MONCLOVA I
REG. M 1.2

A). Registro M.1.3

Presión en la cabeza del pozo = 26.7 Kg/cm^2 man.

Gasto de gas producido = 2.7 MMSCFD.

Temperatura del gas en superficie = $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Temperatura del gas en el fondo = $75 \text{ }^\circ\text{C}$.

Profundidad del pozo = 2 220 mts.

Tubería de producción = $2 \frac{7}{8}$ " de 0-2 010 m. N-80,
65 lb/pie EUE.

Condición del pozo = fluye franco por T.P.

En la figura IV.3 se muestran los resultados de esta corrida con los diferentes métodos usados.

Es conveniente aclarar que es posible ajustar de mejor manera los resultados calculados con los datos medidos, al variar las condiciones físicas de las paredes de la tubería (rugosidad absoluta). Sin embargo, los 4 métodos de solución fueron probados con las mismas condiciones mecánicas del pozo para poder comparar de esta manera, la exactitud que se puede esperar al utilizar las diferentes técnicas aquí propuestas.

II. Pozo Monclova 3. Para este pozo se presentan dos registros de presiones de fondo, el primero de estos con los siguientes datos:

A) Registro M.3.1

Presión de la cabeza del pozo = 35.3 Kg/cm^2 man.

Gasto de vapor producido = 12.65 MMSCFD.

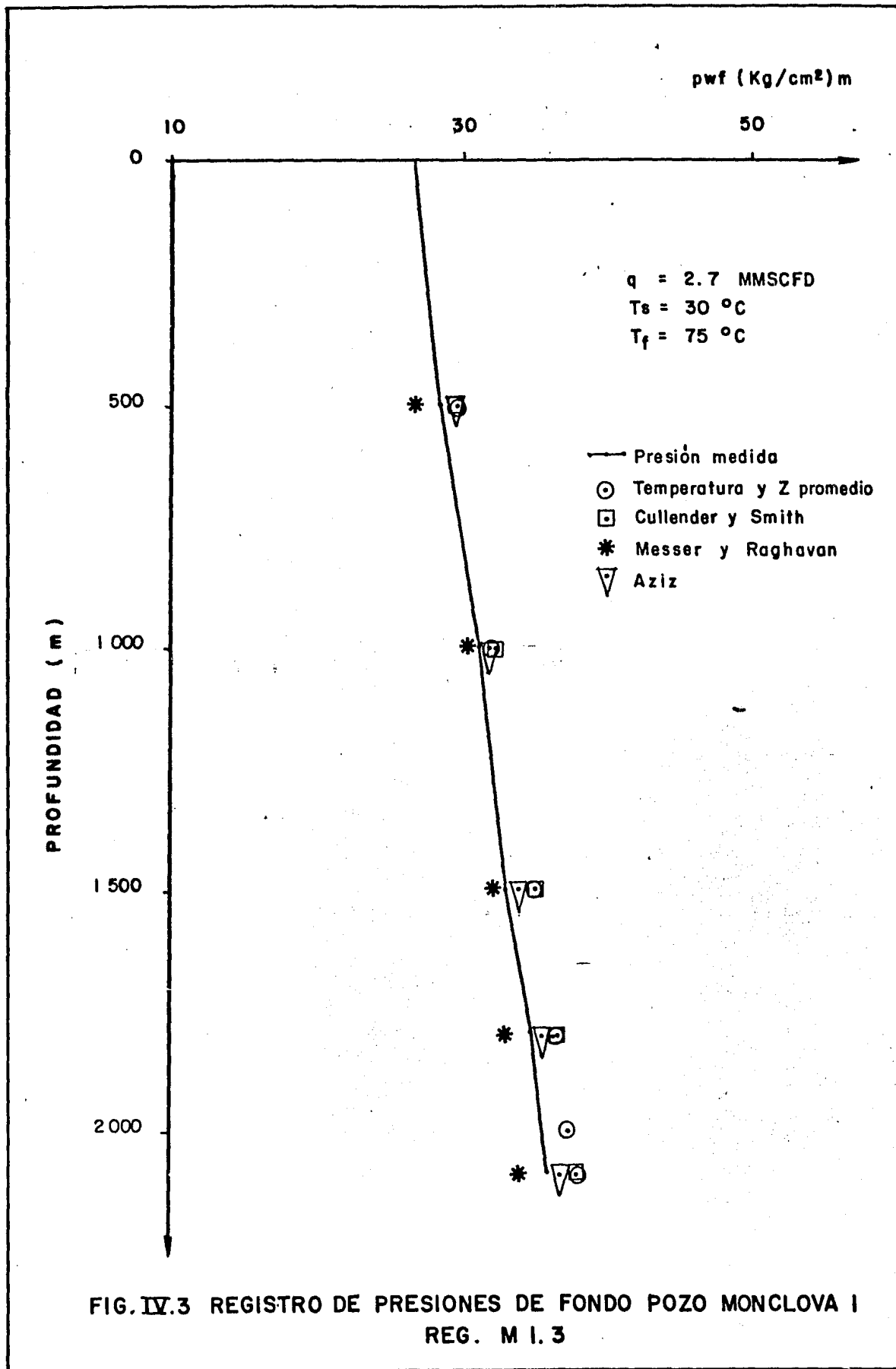
Temperatura del gas en la superficie = $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Temperatura del gas en el fondo = $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Profundidad del pozo = 2 328.5 m.

Tubería de producción = T.P. de $2 \frac{3}{8}$ " de 0-1 933 m.
N-80, 65 lb/pie EUE.

Intervalo productor = 1 950 - 2 328 m.



Análisis del Gas:

Compuesto	Fracción (%)
CO ₂	0.16
CH ₄	79.76
C ₂ H ₆	0.39
C ₃ H ₈	0.02
N ₂	1.67

La figura IV.4 muestra los resultados obtenidos para este caso.

El siguiente registro se corrió para los datos:

A). Registro M.3.2

Presión en la cabeza del pozo = 25.88 Kg/cm².

Gasto de gas producido = 4.6 MMSCFD.

Temperatura del gas en la superficie = 20 °C

Temperatura del gas en el fondo = 73 °C.

Profundidad del pozo = 2 328.5 m.

Tubería de producción : T.P. 2 3/8" de 0-1 933 m. N-80,
65 lb/pie EUE.

Intervalo productor = 1 950 - 2 328 m.

Los resultados obtenidos con esta corrida se presentan en la fig. IV.5.

III. Pozo Monclova 22. En este caso solo se obtuvo un solo registro de presiones de fondo, en el que se utilizó los siguientes datos:

A) Registro M.22.1.

Presión en la cabeza del pozo = 89.0 Kg/cm² man.

Gasto de gas producido = 1.3 MMSCFD

Temperatura del gas en la superficie = 38 °C.

Temperatura del gas en el fondo = 77 °C.

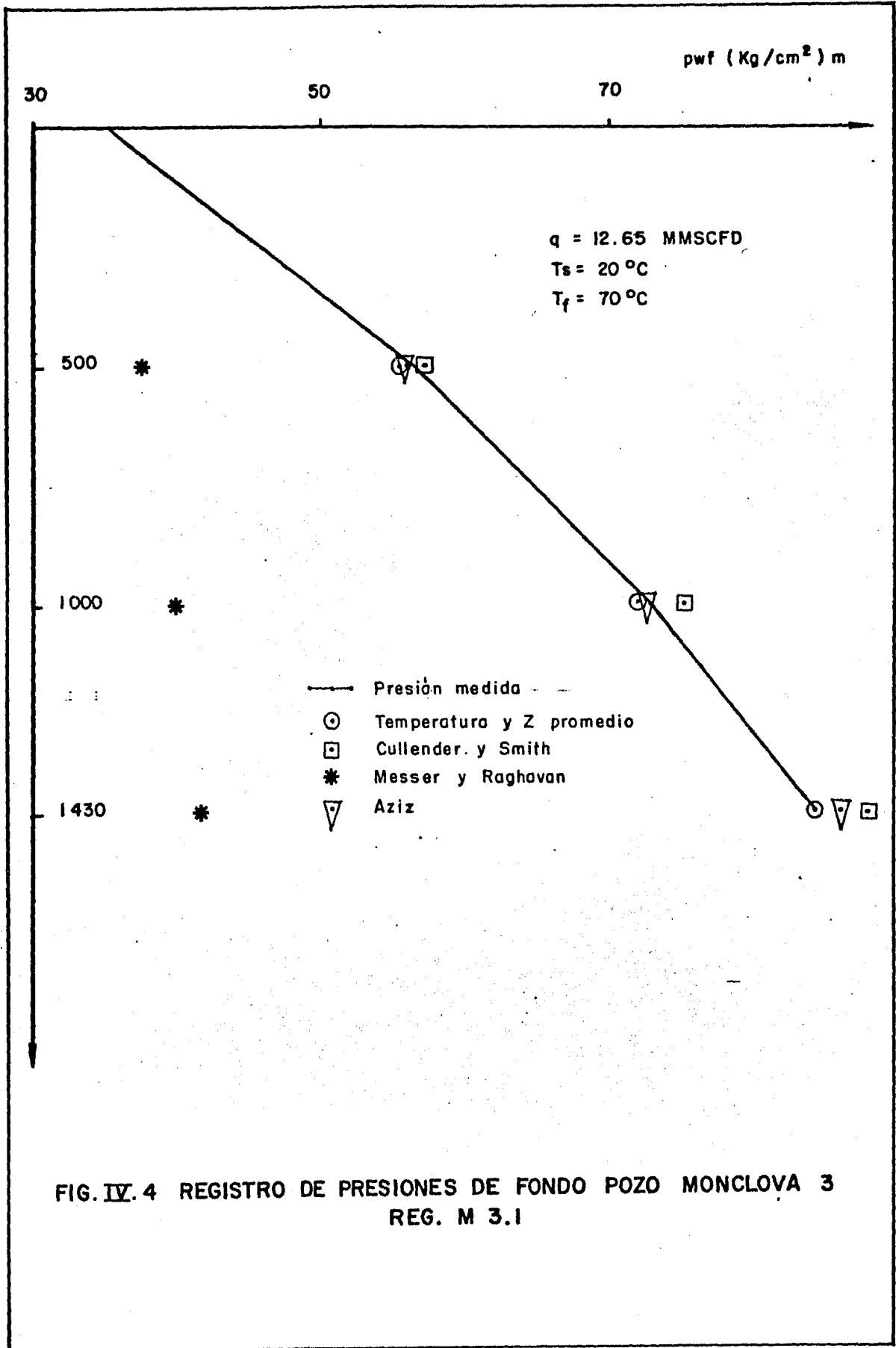


FIG. IV. 4 REGISTRO DE PRESIONES DE FONDO POZO MONCLOVA 3
REG. M 3.1

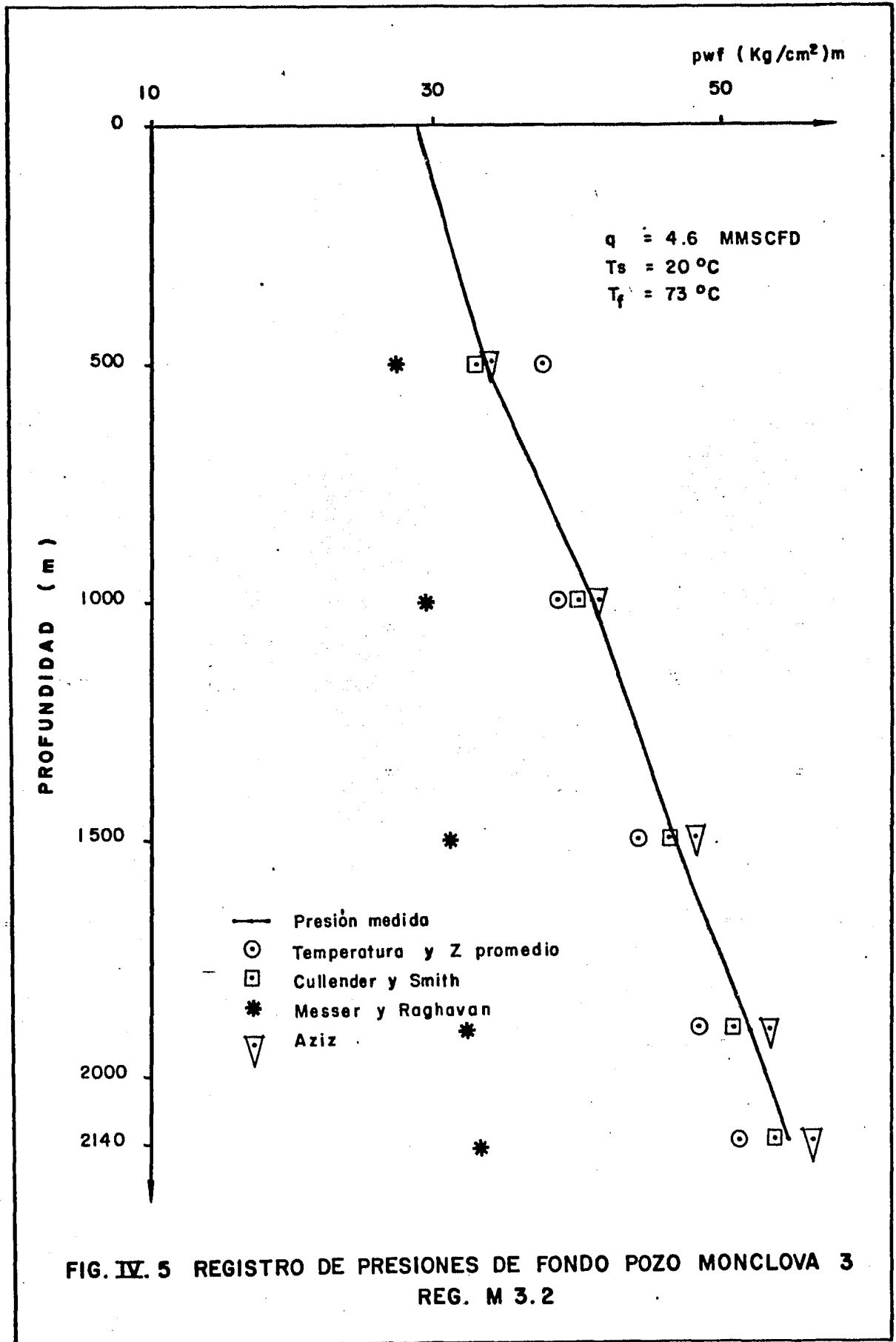


FIG. IV. 5 REGISTRO DE PRESIONES DE FONDO POZO MONCLOVA 3
REG. M 3.2

Tubería de producción = T.P. de 2 3/8" de 0-2 200 m.
N-80, 65 lb/pie EUE.
Profundidad del pozo = 2 300 mts.

Análisis del Gas:

Compuesto	Fracción (%)
Etano	0.4
Metano	97.33
Propano	0.01
CO ₂	0.15
N	2.11

En la figura IV.6 se presentan los resultados obtenidos con estos datos.

III. Pozo Reynosa 447. En este caso se dispone de dos registros de presiones de fondo diferentes; el primero de ellos se utilizó con los siguientes datos:

- A) Registro R.447.1
Presión en la cabeza del pozo = 60.6 Kg/cm² man.
Gasto de gas producido = 1.165 MMSCFD.
Temperatura del gas en la cabeza del pozo = 35 °C.
Temperatura del gas en el fondo = 85 °C.
Profundidad del pozo = 3 218 m.
Tubería de producción = T.P. 2 7/8" de 0-2 310 m.
Intervalo productor = 2 320 - 2 324 m.

Análisis del Gas:

Componente	Fracción (%)
Metano	99.10
Etano	4.63
Propano	1.88
Isobutano	0.50

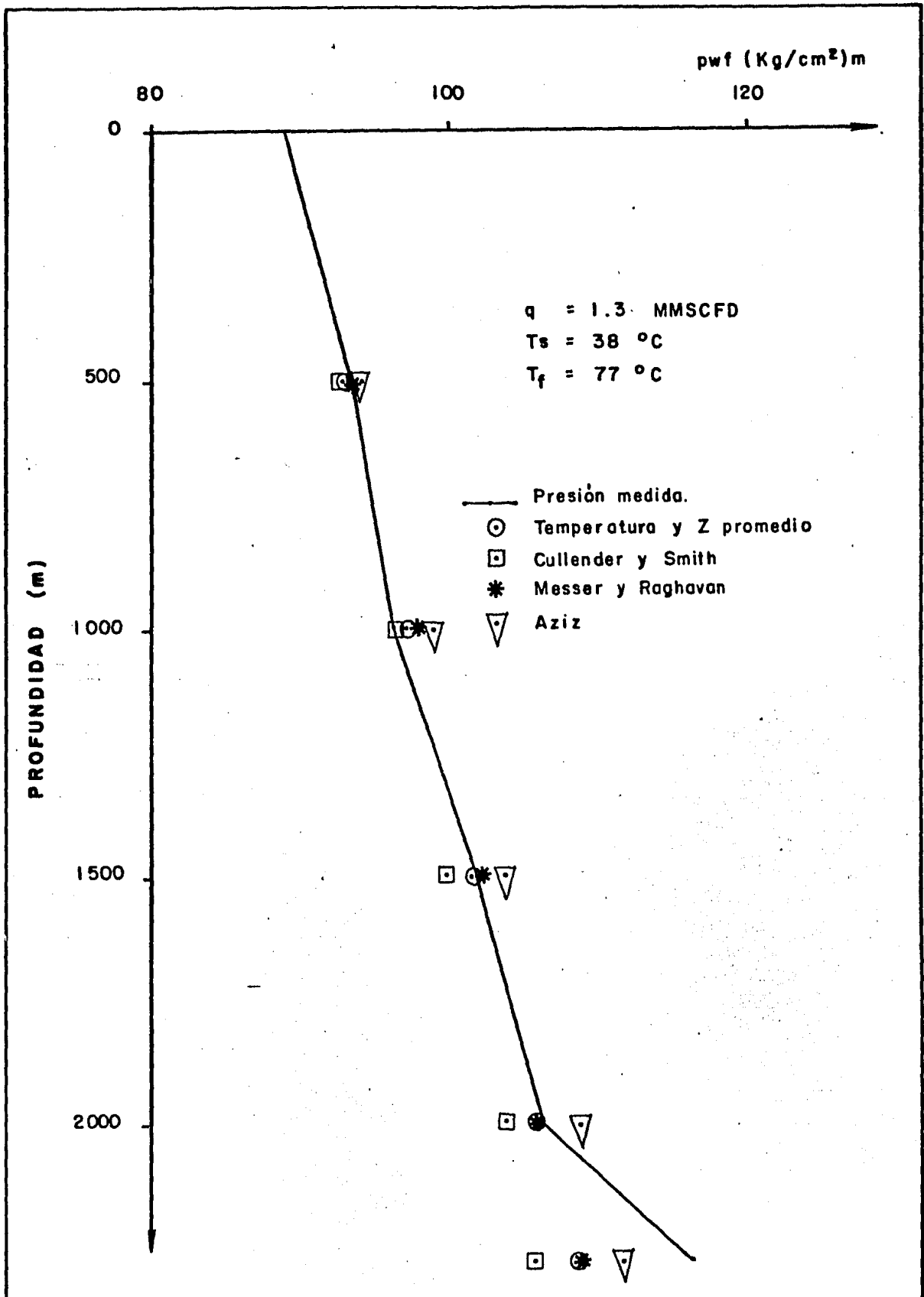


FIG. IV.6 REGISTRO DE PRESIONES DE FONDO POZO MONCLOVA 22
REG. M 22.1

Butano-normal	0.43
Nitrógeno	0.41
Hexano	0.31
Isopentano	0.24
CO ₂	0.18
Heptano	0.16
Pentano-normal	0.08

Condensado	:	0.162	G.P.M.
Agua	:	0.006	G.P.M.
RGA	:	259.24	MCF/bbl

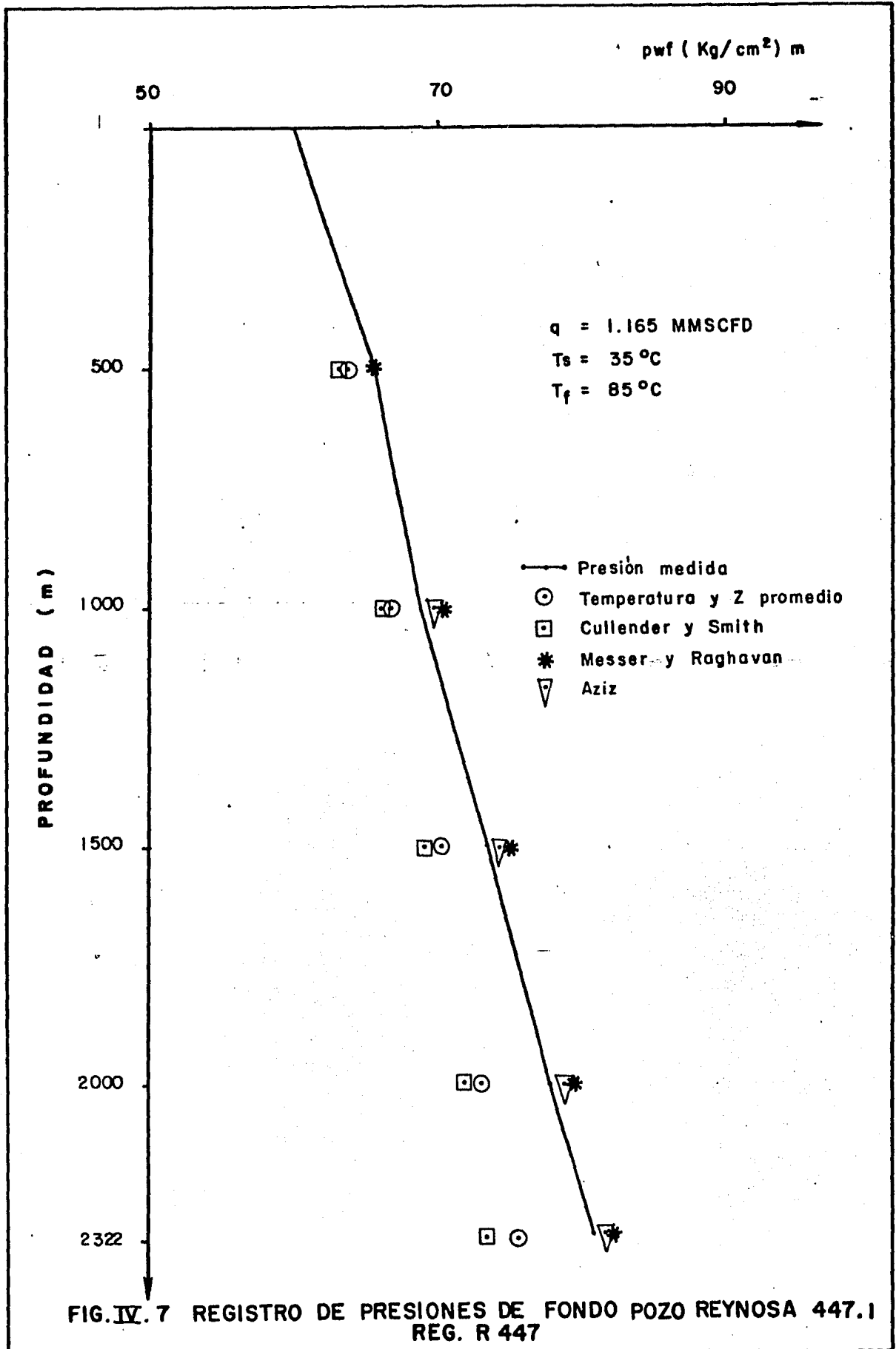
Como puede observarse, en este caso se tiene un pozo de gas produciendo una pequeña cantidad de condensado (0.162 G.P.M) y de agua (0.006 G.P.M) con lo que se puede observar la desviación que acusan los diferentes métodos utilizados a diferencia de los pozos productores únicamente de gas.

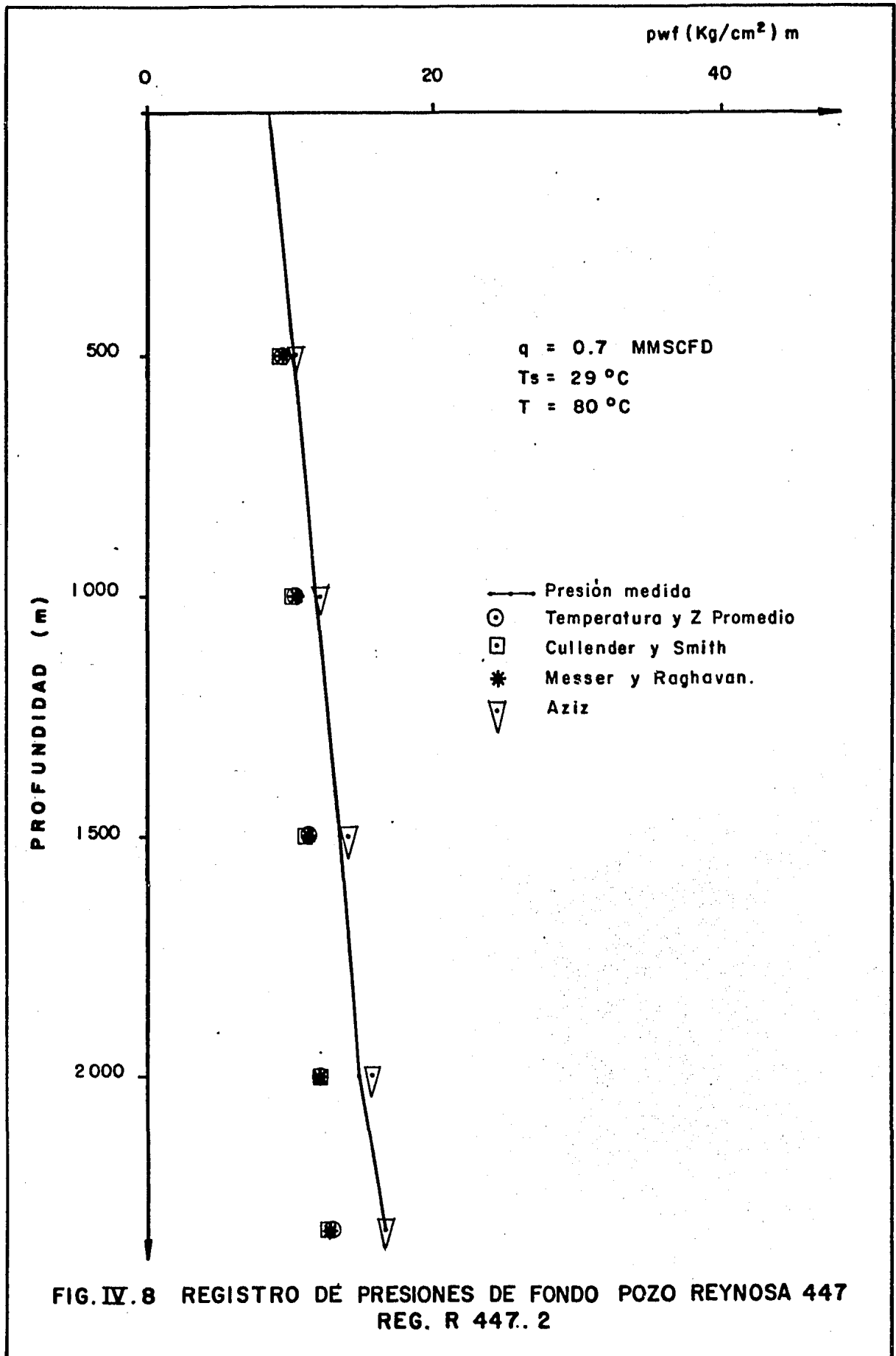
El análisis de gas producido corresponde a la fecha - del primer registro de presiones presentado (Jun-20-80) y -- sus resultados pueden observarse en la fig. IV.7.

El siguiente registro de presiones es tomado 3 años - después con los siguientes datos:

- A) Registro R.447.2
Presión en la cabeza del pozo = 8.44 Kg/cm² man.
Gasto de gas producido = 0.7 MMSCFD.
Temperatura del gas en la superficie = 29 °C.
Temperatura del gas en el fondo = 80 °C.
Profundidad del pozo = 3 218 m.
Tubería de producción = T.P. 2 7/8" de 0-2 310 m.
Intervalos productor = 2 320 - 2 324.

En este registro no se tomó muestra de gas para su - análisis por lo que se supuso que no existieron cambios en





POZO	No. REGISTRO	pwf Medido (Kg/cm ²)	(pwf) _{CTP} (Kg/cm ²)	(pwf) _{CS} (Kg/cm ²)	(pwf) _{MRR} (Kg/cm ²)	(pwf) _A (Kg/cm ²)	(error) _{CTP} (%)	(error) _{CS} (%)	(error) _{MRR} (%)	(error) _A (%)
MONCLOVA 1	M 1.1	105.34	101.06	102.1	91.20	107.32	- 4.1	- 3.1	-13.4	+ 1.9
MONCLOVA 1	M 1.2	56.87	53.50	54.0	46.65	58.5	- 5.9	- 5.0	-18.1	+ 2.8
MONCLOVA 1	M 1.3	36.11	40.21	38.2	34.09	37.2	+ 11.4	+ 5.8	- 5.6	+ 3.0

MONCLOVA 3	M 3.1	84.7	84.75	88.89		86.6	+ 0.1	+ 4.9		+ 2.2
MONCLOVA 3	M 3.2	54.76	51.42	53.78	33.03	56.8	- 6.5	- 1.8	-39.8	+ 5.5

MONCLOVA 22	M 22.1	117.08	109.08	106.24	109.00	111.99	- 6.8	- 9.3	- 6.9	- 4.3
-------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	-------

REYNOSA 447	R 447.2	81.0	75.53	73.76	82.27	82.2	- 6.8	- 8.9	+ 1.6	+ 1.5
REYNOSA 447	R 447.2	16.62	12.93	12.93	12.77	17.08	-22.2	-22.2	-23.2	- 2.7

TABLA IV.1

RESULTADOS COMPARATIVOS DE LOS DIFERENTES METODOS USADOS EN LA DETERMINACION DE LA PRESION DE FONDO FLUYENDO EN POZOS DE GAS SECO.

METODO DE COMPRESIBILIDAD Y TEMPERATURA PROMEDIO (CTP)
 METODO DE CULLENDEY Y SMITH (CS)
 METODO DE MESSER, RAGHAVAN Y RAMEY (MRR)
 METODO DE KALID AZIZ (A)

su composición.

El resultado de esta corrida se encuentra graficado en la fig. IV.8.

La tabla IV.1 presenta un resumen de las presiones de fondo fluyendo calculadas comparadas con las presiones medidas, así como el error cometido en esta determinación, para los 4 pozos mencionados.

El error es evaluado mediante la siguiente expresión.

$$\text{error (\%)} = \frac{(\text{Pwf}) \text{ calculada} - (\text{Pwf}) \text{ registrada}}{(\text{Pwf}) \text{ registrada}} \times 100$$

IV.2. Vapor seco saturado - sobrecalentado

En esta parte se presenta la utilización de los tres métodos propuestos en casos reales de flujo de vapor en pozos geotérmicos.

Los pozos en los que se tienen registros de presiones de fondo se obtuvieron en la Superintendencia de Producción del Campo Geotérmico Los Azufres, Mich.

Estas mediciones corresponden a los pozos AZ-06 y AZ-33.

I). AZ-06. En este caso se analizaron 2 registros de presiones tomados en fechas diferentes estos pozos, el primero de estos tiene las siguientes características:

A) Registro AZ-06.1

Presión en la cabeza del pozo = 24.63 Kg/cm² man.

Gasto de vapor producido = 19.4 Ton/hr.

Entalpía del vapor en superficie = 2 806.3 KJ/Kg.

Entalpía de la saturación = 2 798.0 KJ/Kg.

Tuberías de producción = T.R. 9 5/8" de 0-544 m. L-80,
43.5 lb/pie Rosca buttross Li-
ner Ranurado de 7" sw 544.0 --
881.0 m. N-80, 43.5 lb/pie Ros
ca Hydrill.

Intervalo ranurado = 648-810.0 m.

Profundidad del pozo = 900 m.

Fluyendo por orificio de 1.0"

Por ciento de gases incondensables = 1.2

Los resultados obtenidos al utilizar los 3 métodos pro-
puestos, se presentan en la fig. IV.10.

El siguiente registro de presiones de fondo utilizado -
tiene las siguientes características.

B). Registro AZ-06.2

Presión en la cabeza del pozo = 36.65 Kg/cm² man.

Gasto de vapor producido = 29 T/h.

Entalpía del vapor en superficie = 2 804.4 KJ/Kg.

Entalpía de saturación = 2 796.1 KJ/Kg.

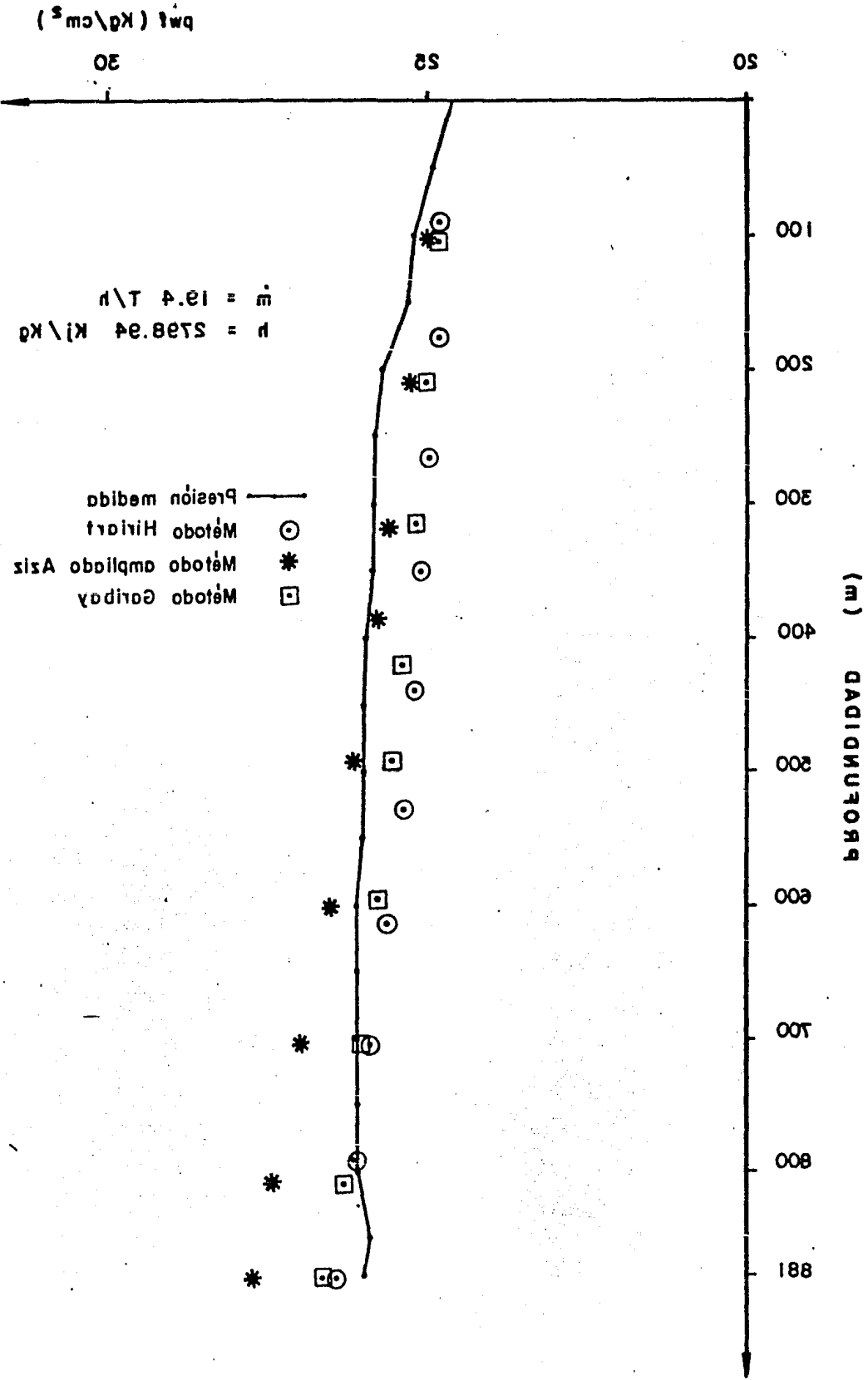
Tuberías de producción = T.R. 9 5/8" de 0-544.0 m. L-80,
43.5 lb/pie Rosca Buttress Li-
ner ranurado de 7" de 544.0 -
881.0 m. N-80, 29 lb/pie Rosca
Hydrill .

Intervalo ranurado = 648-810.0 mts.

Profundidad del pozo = 900.0 mts.

Fluyendo por orificio de 2"

Por ciento de gases incondensables = 8.0



REG. A2 - 06
FIG. IV. 10 REGISTRO DE PRESIONES DE FONDO POZO. A2 - 06

En la fig. IV.11 se presentan los perfiles de presión de fondo obtenidos al utilizar los métodos propuestos en este trabajo.

II. Pozo AZ-33. En este pozo únicamente se ha corrido un registro de presión con el pozo fluyendo, que es el que se presenta aquí. Los datos para este pozo son:

A) Registro AZ-33.1

Presión en la cabeza del pozo = $38.49 \text{ Kg/cm}^2 \text{ man.}$

Gasto de vapor producido = 52.6 T/h.

Entalpía del vapor en superficie = $2\,763 \text{ KJ/Kg.}$

Entalpía de saturación = $2\,801.2 \text{ KJ/Kg.}$

Tuberías de producción = T.R. $9 \frac{5}{8}''$ de 0-486.0 m. L-80, 43.5 lb/pie. Rosca Hydrill Linner ranurado $7''$ de 486.0-683.0 m. N-80, 29.0 lb/pie. Rosca -- Hydrill.

Intervalo ranurado = 602-683 mts.

Profundidad del pozo = 686 m.

Fluyendo por orificio = $2''$

Por ciento de gases incondensables = 1.2.

Los resultados se presentan en la fig. IV.12

Se elaboró una tabla comparativa de las presiones de fondo calculadas con respecto a las presiones medidas en los pozos, presentandose en la tabla IV.2.

Los valores de rugosidad absoluta de la tubería se conservaron iguales en los diferentes métodos con la finalidad de poder apreciar los cambios obtenidos con las diferentes técnicas aquí presentadas.

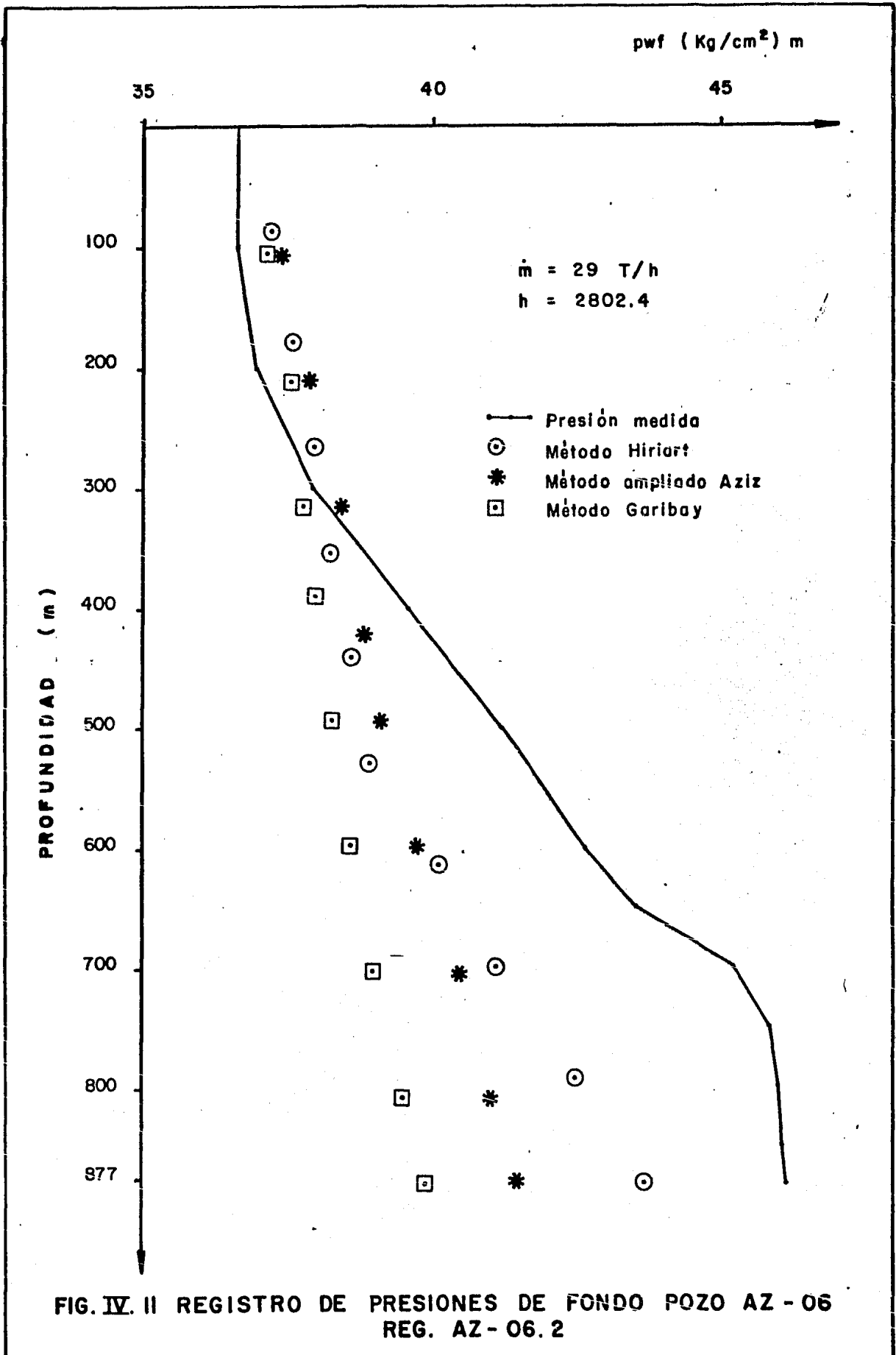


FIG. IV. II REGISTRO DE PRESIONES DE FONDO POZO AZ - 06
REG. AZ - 06. 2

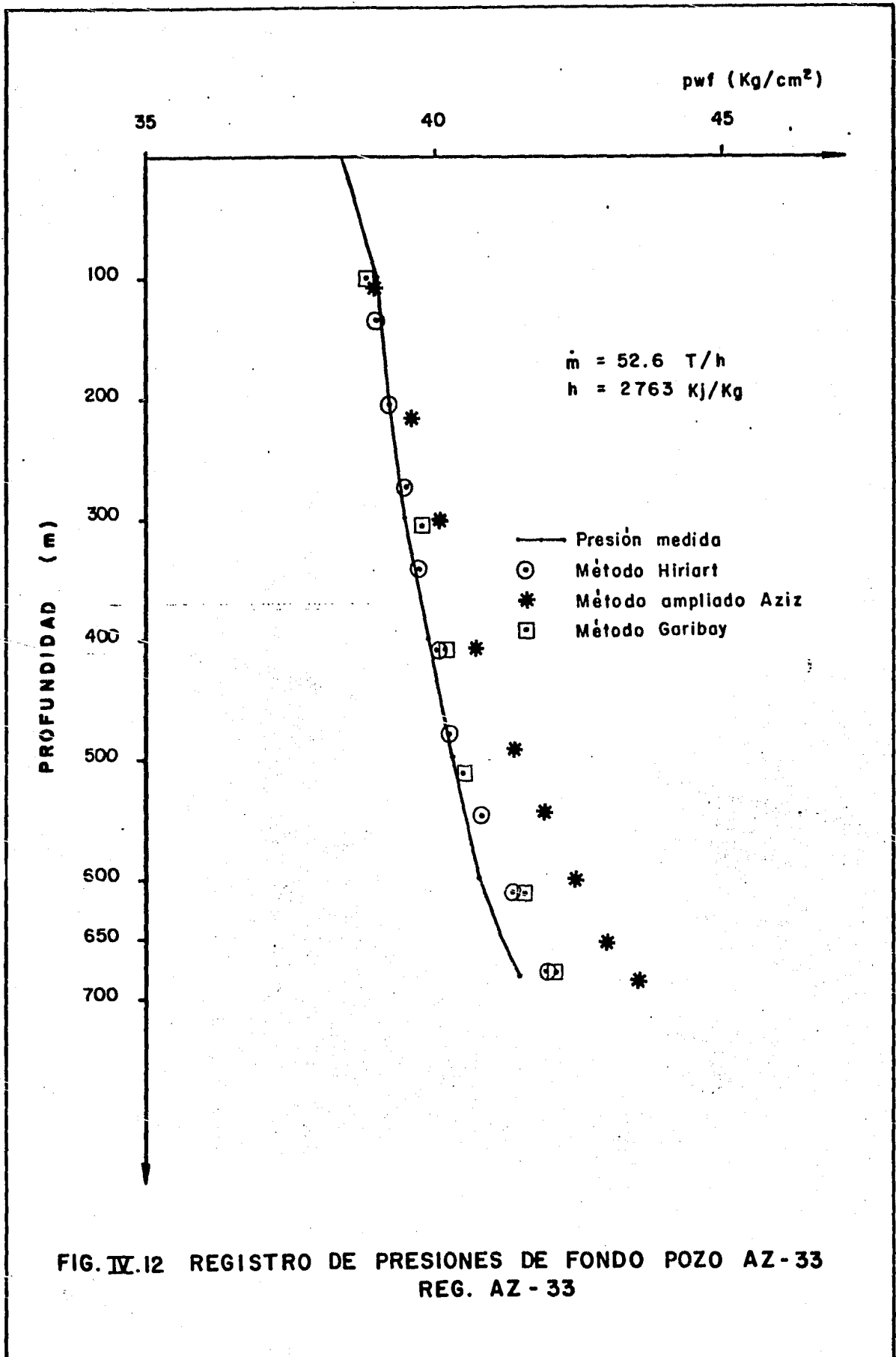


FIG. IV.12 REGISTRO DE PRESIONES DE FONDO POZO AZ-33
REG. AZ - 33

POZO	No. REGISTRO	pwf. medida (Kg/cm) m	pwf. calc. (H)	pwf. calc. (AA)	pwf. calc. (G)	(error) H (%)	(error) AA (%)	(error) G (%)
AZ - 06	P - 10	25.04	26.46	27.70	26.63	+ 1 . 6	+ 6 . 4	+ 2 . 2
AZ - 06	P - 11	46.19	43.70	41.49	39.88	- 5 . 4	-10 . 8	-13 . 6

AZ - 33	P - 15	41.55	42.01	43.59	42.13	+ 1 . 1	+ 4 . 9	+ 1 . 4
---------	--------	-------	-------	-------	-------	---------	---------	---------

TABLA IV. 2

RESULTADOS COMPARATIVOS DE LA PRESION DE FONDO CALCULADA Y LA PRESION DE FONDO MEDIDA, INCLUYENDO ERROR OBTENIDO EN CADA CASO.

(H) HIRIART
(G) GARIBAY
(AA) AZIZ AMPLIADO

V. Conclusiones.

Se presentan a continuación las conclusiones obtenidas al verificar la exactitud de los métodos planteados en este trabajo para el cálculo de las caídas de presión en tuberías verticales para los casos de flujo de gas y flujo de vapor - en pozos.

Para el caso de gas, el método de compresibilidad y temperatura promedio, no obstante las hipótesis que se hacen se obtienen buenos resultados en prácticamente la totalidad de los casos tratados. Este método resulta efectivo aplicarlo - en pozos de gas seco no muy profundos en los que los gra--dientes de temperatura no sean demasiado altos.

El método propuesto por Cullender y Smith al ser utilizado con los mismos datos que para el caso anterior, arroja resultados más exactos. Aunque se aprecia que es mucho más - sensible a los errores que se cometan en la determinación -- del factor de compresibilidad al no contar con un análisis - del gas en el momento en que se tomaron los registros de pre--sión.

El método de Messer, Raghavan y Ramey como se explicó - en la sección III.1.3, fue desarrollado para casos de flujo de gas en pozos profundos en los que el orden de magnitud de sus presiones y temperaturas de fondo, afectan notablemente

a la mayoría de los métodos existentes; se cree que debido a ésto , su aplicación se ve reducida en los casos presentados para pozos que no rebasan los 3 000 m. de profundidad, - pues resultó ser la técnica que presenta una mayor desvia- - - ción de los métodos aquí presentados.

Finalmente, el método propuesto por Kalid Aziz, resultó el más exacto en todos los casos en que fue probado. Esto - puede atribuirse al hecho de que no hace las suposiciones - que generalmente se realizan en los otros métodos. Su único inconveniente quizá, sea que es necesario disponer de una - mini o microcomputadora, como mínimo.

Para la segunda parte del trabajo, en el caso de flujo de vapor en pozos geotérmicos, se presentaron tres formas de calcular las caídas de presión y las variaciones de las propiedades termodinámicas del vapor.

Se encontró que el método propuesto por Hiriart no obstante su sencillez, permitió obtener muy buenos resultados - en los casos en que fue probado, considerando que este méto- do fue desarrollado originalmente para los casos en que se - tiene fluyendo una mezcla de agua y vapor.

El método ampliado de Aziz resultó ser el que presenta mayor desviación con respecto a los datos de campo medidos, pero esta desviación es bastante pequeña, menos del 10% del valor real. Esta técnica resulta útil cuando se desea conocer aparte de la caída de presión, parámetros en el fondo del pozo tales como velocidad, densidad y temperatura del - vapor . Quizá resulta conveniente ensayar con alguna otra - técnica numérica de integración para tratar de reproducir - con mayor exactitud el comportamiento del vapor en el pozo.

El último modelo, desarrollado por Garibay, resulto ser

la técnica con mayor precisión para los casos en que fue probado. Como el método no supone que el flujo ocurre en condición isoentálpica, es posible calcular el cambio en la entalpía al viajar del fondo hasta la superficie en los pozos. El máximo cambio calculado fue del orden de 0.3% del valor de la entalpía en la superficie. Este resultado permite comprobar la validez de la suposición que generalmente se realiza, de que el flujo de vapor ocurre en un proceso isoentálpico.

Una observación necesaria es el caso del pozo Az-06 (registro Az-06.1) en el que se puede ver que la desviación que acusan los tres métodos probados es bastante considerable. - Esto es imputable al hecho de que el pozo produce un 8% en peso de gases no condensables (CO_2 principalmente) por lo que el cálculo de las propiedades termodinámicas no se realiza de una manera adecuada.

Resultaría interesante desarrollar alguna técnica para corregir, para diferentes concentraciones de gases no condensables, el cálculo de propiedades del vapor.

Finalmente, se puede afirmar que con los casos probados en los pozos Az-06 y Az-33 del campo geotérmico de los Azufres, permite tener un nivel de confianza elevado en este tipo de modelos teóricos para ser usados en la determinación de parámetros de fondo a partir únicamente de mediciones realizadas en superficie.

AGRADECIMIENTOS

Quiero aquí hacer patente mi agradecimiento a la Comisión Federal de Electricidad por permitirme el desarrollo del presente trabajo. También a la Superintendencia de Ingeniería de Producción del Distrito Frontera Noreste de PEMEX, en especial al Ing. Héctor Bautista por la valiosa información que de allí obtuve.

Asimismo a todas las personas que de una manera u otra me prestaron su ayuda en el logro de este objetivo, en particular quiero citar a Cuauhtemoc Hernández A, Alfonso Aragón A, Gerardo Hiriart L, María Villarroel M, Fernando Ascencio C, Fernando Garibay B. A Pilar y Lourdes Espinoza por la mecanografía y sus dibujos respectivamente.

Finalmente deseo expresar mi agradecimiento al Dr. Jesús Rivera R. por su paciencia, orientación y ayuda durante la preparación y desarrollo de este trabajo.

A todos y cada uno de ellos, gracias.

REFERENCIAS

- 1.- THEORY AND PRACTICE OF THE TESTING OF GAS WELLS. Oil & Gas conservation Board of Alberta (July, 1965).
- 2.- Colebrook, C.F. "TURBULENT FLOW IN PIPES WITH PARTICULAR REFERENCE TO THE TRANSITION REGION BETWEEN THE SMOOTH AND ROUGH PIPE LAWS", J. Inst. Civil Eng. (London) (1938-1939), 11, 133.
- 3.- Lee, A.L., González, M.H. y Eakin, B.E.: "THE VISCOSITY OF NATURAL GASES". J. Pet. Eng. (Aug. 1966) 997-1000.
- 4.- Standing, M.B. y Katz, D.L.: "DENSITY OF NATURAL GASES" Trans. AIME, (1942) pg. 140.
- 5.- Cullender, M.H. y Smith, R.V.: "PRACTICAL SOLUTION OF GAS FLOW EQUATIONS FOR WELLS AND PIPELINES WITH LARGE TEMPERATURE GRADIENTS". Trans., AIME (1956) 207, pg. 281 - 287.
- 6.- Carnahan, B.: APPLIED NUMERICAL METHODS . Wiley, New York 1969.
- 7.- Messer, P.H., Raghavan, R. y Ramey, H.J. Jr.: "CALCULATION OF BOTTOM HOLE PRESSURES FOR DEEP, HOT, SOUR GAS WELLS". JPT. Jan. 1974. pgs. 85-92.
- 8.- Fowler, F.C. "CALCULATIONS OF BOTTOM-HOLE PRESSURES". Pet. Eng. (1974) 19, No.3, pgs. 88-90.
- 9.- Sukkar, Y.K. y Cornell, D.: "DIRECT CALCULATION OF BOTTOM-HOLE PRESSURES IN NATURAL GAS WELLS". Trans. AIME (1955) No. 204, pgs. 43-48.

- 10.- Wicher, E., y Aziz, K.: COMPRESSIBILITY FACTOR OF SOUR NATURAL GASES. Report No. Cer/3, U. of Calgary, - Calgary, Alta; Canada (July 1970).
- 11.- Aziz, K.: "CALCULATION OF BOTTOM-HOLE PRESSURE IN GAS-WELLS". JPT. Jun. 1967, pgs. 897-899.
- 12.- Olivera, S.L.: METODOS NUMERICOS. Limusa, México. 1978.
- 13.- Yarborough, L. y Hall, K.R.: "HOW TO SOLVE EQUATION OF-STATE FOR Z-FACTORS". Oil and Gas Journal Feb. 1974. - pgs. 86-88.
- 14.- Streeter, L.V.: MECANICA DE LOS FLUIDOS. Mc. Graw-Hill 4a. Edición 1971. México.
- 15.- Giles, R.V.: MECANICA DE LOS FLUIDOS E HIDRAULICA. Mc. Graw-Hill. Segunda Edición 1978. México.
- 16.- Gockcen, N.A.: THERMODINAMICS. Techscience Inc. Hawthorne, 1975. California, USA.
- 17.- Dranchuk, P.M. y Hawkins, M.F.: "THE EFFECT OF THE RATE-OF CHANGE OF MOMENTUM ON BOTTOM-HOLE PRESSURE IN FLOWING GAS WELLS". JPT. 1974. pgs. 34-38.
- 18.- Aziz, K.: "WAYS TO CALCULATE GAS FLOW STATIC HEAD". Pet. Eng. 1963.
- 19.- Craft, B.C. y Hawkins M.F.: PETROLEUM RESERVOIR ENGINEERING. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.Y. 1959.
- 20.- Hiriart, G.: "CALCULO DE LA PRESION DE FONDO FLUYENDO-EN POZOS GEOTERMICOS." IX Congreso Academia Nacional - De Ingeniería. 1983. pgs. 11-14.

- 21.- Mercer, J.W. y Faust, R.: "SIMULATION OF WATER-AND- - VAPOR DOMINATED HYDROTHERMAL RESERVOIRS". U.S. Geolo-- gical Survey. SPE. paper No. 5520, 1975.
- 22.- Keenan, J.H. y Keyes, F.G.: STEAM TABLES. A. Wiley In- terscience Publication. John Wiley & Son. New York 1977.
- 23.- Rzaza, M.J. y Katz, D.L.: "CALCULATION OF STATIC PRE - SSURE GRADIENTS IN GAS WELLS". Trans. AIME 1945. 100.
- 24.- Joffe, J.: GAS FLOW IN LONG PIPELINES. Chem. Eng. 1949 . NO. 8, pg. 130.
- 25.- Poettmann, F.H.: "THE CALCULATION OF PRESSURE DROP IN- FLOW OF NATURAL GAS THROUGH PIPES". Trans. AIME (1951) 192, pg. 317.
- 26.- Smith, R.V., Dewees, E.L. y Williams, R.H.: "MEASURE-- MENT OF RESISTENCE TO FLOW OF FLUIDS IN NATURAL GAS -- WELLS". Trans. AIME (1954), pgs. 201-279.
- 27.- Baker, O. y Swerdloff, W.: "SPEED UP FLOW CALCULATIONS FOR DESIGN OF GAS-GATHERING SYSTEMS". Oil & Gas Jour.- (1955), pgs. 54 y 148.
- 28.- Smith, R.V., Miller, J.S. y Ferguson, J.W.: "FLOW OF - NATURAL GAS THOUGH EXPERIMENTAL PIPE LINES AND TRANS - MISSION LINES". Bureau Of Mines and American Gas. mono^ugraph 9. (156), pg. 89.
- 29.- Janicek, J. y Katz, D.L.: "APPLICATIONS OF UNSTEDAY- - STATE GAS FLOW CALCULATIONS". U. of Michigan publishing services, Ann Arbor, Mich.

- 30.- Aziz, K.: "CALCULATION OF BOTTOM-HOLE PRESSURE IN GAS-WELLS". JPT. 19, pgs. 897-899.
- 31.- Young, K.L.: "EFFECT OF ASSUMPTIONS USED TO CALCULATE - BOTTOM-HOLE IN GAS WELLS". JPT. (1967), pgs. 547-899.
- 32.- Govier, W.G. y Fogarasi, M.: "PRESSURE DROP IN WELLS - PRODUCING GAS AND CONDENSATE". 26 th. Annual Technical-Meeting of the Petroleum Society of CIM in banff, 1975.
- 33.- Kestin, J. y asoc.: SOUREBOOK ON THE PRODUCTION OF ELE
CTRICITY FROM GEOTHERMAL ENERGY. Brown University, - -
Rhode Island, 1980.
- 34.- Truesdel, A.H. y Natherson, M.: "DOWNHOLE MEASUREMENT-
AND FLUID CHEMISTRY OF A CASTLE ROCK STEAM WELL". U.S.
Geological Survey. Menlo Park, Calif. USA. Geothermics
Vol. 10, 1981.
- 35.- Garibay, F.: FLUJO MONOFASICO EN POZOS GEOTERMICOS. Re
porte interno Depto. Evaluación De Yacimientos. G.P.G.
CFE. 1984..
- 36.- Kuo, S.: COMPUTER APPLICATIONS OF NUMERICAL METHODS. -
Addison-Wesley Publishing Co. 1972.

NOMECLATURA

- A = área de la sección transversal de una tubería, L^2
A(f) = función definida por la ecuación (C-1.2), Adim.
B = constante definida por la ecuación (10), Adim.
C = constante definida por la ecuación (11), Adim.
D = diámetro de la tubería de producción, L
d = diámetro de la tubería de producción, pulg.
E = energía interna de un sistema, ML^2T^{-2}
e = energía interna específica de un sistema, L^2T^{-2}
 θ = base del logaritmo neperiano.
F = constante definida en la ecuación (3), LT^{-1}
f = factor de fricción, Adim.
G = constante definida por la ecuación (11), Adim.
g = valor de la gravedad local, LT^{-2}
 h_1 = pérdida de carga, L
h = entalpía por unidad de masa, L^2T^{-2}
J, K = constantes definidas en las ecuaciones (14) a la (19)
Adim.
Ke = constante definida por la ecuación (C-2.2), Adim.
L = profundidad del pozo, L
M = peso molecular de un gas, lb_m/lb_{mol}
m = masa del gas, M
 \dot{m} = gasto de vapor producido, en masa, MT^{-1}
N = número de intervalos en que se divide la línea de --
flujo.
n = número de moles contenidos en un gas.
P = perímetro de la tubería, L
p = presión absoluta a la que se encuentra el gas,
 $ML^{-1}T^{-2}$.
 p_c = presión crítica del gas, $ML^{-1}T^{-2}$.
 p_c' = presión crítica corregida, $ML^{-1}T^{-2}$.
 p_f = presión en el fondo del pozo, $ML^{-1}T^{-2}$.
 p_{ff} = presión de fondo fluyendo, $ML^{-1}T^{-2}$
 p_{fr} = presión de fondo reducida, Adim.

- p_R = presión reducida del gas, Adim.
 p_s = presión en la cabeza del pozo (fluyendo), $ML^{-1}T^{-2}$
 p_{sr} = presión reducida del gas en la cabeza del pozo, Adim
 Q = gasto de gas producido, L^3T^{-1} .
 Q_H = calor aportado o extraído de un sistema, ML^2T^{-2} .
 q_H = calor aportado o extraído por unidad de masa, L^2T^{-2} .
 R = constante de los gases reales, psia·pie/lb_m °R.
 R_e = Número de Reynolds, Adim.
 S = constante definida por la ecuación (1), pie/°R.
S.G = gravedad específica del gas, aire = 1; Adim.
 T = temperatura del gas, °R o °K.
 T_c = temperatura crítica del gas, °R.
 T_c' = temperatura crítica corregida del gas, °R.
 t = tiempo, T
 U = constante definida por la ecuación (16), Adim.
 u = energía intrínseca por unidad de masa, L^2T^{-2} .
 V = velocidad del gas, LT^{-1}
 V = volumen ocupado por el gas, L^3
 v = volumen específico del gas, L^3M^{-1} .
 W = trabajo realizado por o sobre el gas, ML^2T^{-2} .
 w_s = trabajo por unidad de masa, L^2T^{-2}
 X = constante definida en la ecuación (20), L
 x = constante definida por la ecuación (C-2.3), Adim.
 Y = constante definida en la ecuación (C-2.4), Adim.
 y_i = fracción en por ciento de un componente i.
 Z = factor de compresibilidad del gas, Adim.
- α = ángulo de desviación entre la vertical y el eje del pozo, grados.
 ϵ = factor de corrección de la pseudo temperatura reducida, °R.
 μ = viscosidad del gas, $ML^{-1}T^{-1}$.
 ρ = densidad del gas, ML^{-3} .
 γ = radio hidráulico. (ver Anexo A-2), L.

θ = ángulo entre el módulo de la velocidad de un elemento diferencial y la normal a la superficie de control, °.

τ = esfuerzo cortante en la pared del tubo. L^2

ξ = rugosidad absoluta de la tubería, L.

ψ, θ = constantes definidas en la ecuación (A-6.10), Adim.

ζ, κ = constantes definidas en la ecuación (A-6.10), Adim.

Δ = incremento

ΔL = incremento de profundidad, L.

A N E X O A

ANEXO A-1

Deducción De Las Ecuaciones Fundamentales Del Fluido.

Ecuación De Continuidad¹⁴

Esta ecuación es una representación analítica del principio de conservación de la materia, el que establece que la masa del interior de un sistema permanece constante con el tiempo (no considerando efectos de la relatividad). En la fig. (A-1.1) se toma el volumen de control con los mismos contornos que un sistema en un cierto instante t . Se hacen las siguientes consideraciones:

- a) El sistema se mueve debido al flujo.
- b) El volumen de control no cambia en el espacio.
- c) En un intervalo pequeño de tiempo (δt) después, los contornos del sistema se habrán separado de la superficie de control.
- d) La masa que sale del volumen de control en el tiempo δt , es δm_s .
- e) La masa que entra en el volumen de control en el tiempo δt , es δm_e .
- f) La masa contenida en el volumen de control en el instante t , es m_{vct} y $m_{vct+\delta t}$ es la masa en el volumen de control en el tiempo $t+\delta t$.

Haciendo un balance de materia, lo que entra menos lo que sale es igual a lo que se acumula, y dividiendo todo por δt ,

$$\frac{\delta m_e}{\delta t} - \frac{\delta m_s}{\delta t} = \frac{m_{vc(t+\delta t)} - m_{vct}}{\delta t} \quad (A-1.1)$$

El término $\delta m_s / \delta t$ en la ecuación (A-1.1) en el límite,-

cuando t tiende a cero, es el gasto másico que sale del volumen de control, por lo que,

$$\frac{\delta m_s}{\delta t} = \rho V_n dA = \rho V_n \cos \theta dA_s \quad (A-1.2)$$

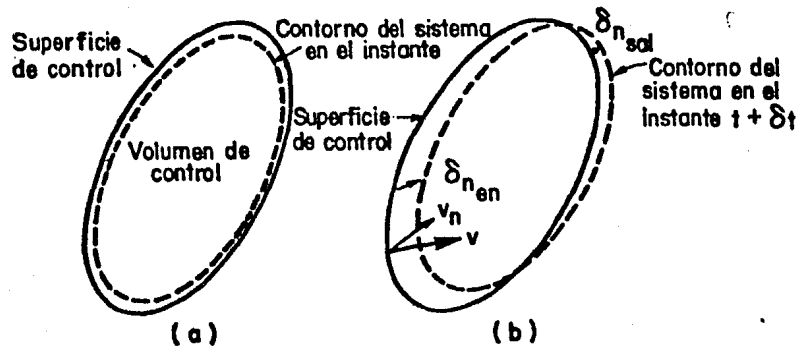


Fig. (A.1.1).- (a) Volumen y sistema de control en el instante t . (b) Volumen y sistema de control en el instante $t + \delta t$.

El término $\delta m_e / \delta t$ de la ec. (A-1.1) en el límite, cuando δt tiende a cero, es el gasto másico que entra en el volumen de control, esto es,

$$\frac{\delta m_e}{\delta t} = - \int \rho V dA_e = - \int_{A_e} \rho V \cos \theta dA_e \quad (A-1.3)$$

Por lo que el gasto másico neto en el volumen de control es,

$$\frac{\delta m_e}{\delta t} - \frac{\delta m_s}{\delta t} = - \int_A \rho V \cos \theta dA = - \int_{sc} \rho V \cdot dA \quad (A-1.4)$$

En donde la integral de superficie se extiende sobre la superficie de control completa y el elemento de área dA , viene dado por un vector que se representa normal al elemento de -- área, su módulo es proporcional al elemento y positivo cuando se dirige hacia afuera del volumen de control.

El término de la derecha, en la ec. (A-1.1), es la velocidad de aumento de la masa dentro del volumen de control, - -- cuando δt tiende a cero

$$\frac{\partial m_{vc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho dV = \int_{vc} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (A-1.5)$$

En donde, dV , es un elemento de volumen diferencial, del volumen de control. La derivada parcial se puede introducir - en la integral de volumen por que dicha integral se extiende - sobre un volumen fijo, y las operaciones son independientes.

Sustituyendo las ecuaciones (A-1.4) y (A-1.5), en la ec. (A-1.1), se tiene que

$$\int_v \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \int_{sc} \rho V \cdot dA \quad (A-1.6)$$

Esta expresión representa la ecuación de continuidad para un volumen de control. Expresado en palabras, esta ecuación es el gasto másico neto que entra es igual a la velocidad de va-- riación de la masa en el interior del volumen de control.

Deducción De La Ecuación De Cantidad De Movimiento Para Una Tubería De Sección Circular^{14, 15}

Esta deducción se hace a partir del segundo principio de Newton, realizando un balance de las fuerzas que actúan sobre un elemento diferencial de masa, que se desplaza a lo largo de un conducto de sección circular en la dirección +s.

En la fig. (A.1.2), se muestra el diagrama en el que se representan las fuerzas que actúan sobre el elemento diferencial de masa, δm .

La fuerza de gravedad es $\rho g \delta A \delta s$. En la base situada aguas arriba, la fuerza debido a la presión es $p \delta A$, en la dirección +s; en la base situada aguas abajo es $(p + \delta p) \delta A$, y actúa en dirección -s. Las fuerzas cortantes ejercidas por las partículas fluidas adyacentes, se representan como δF_s . La masa del elemento diferencial es, $\rho \delta A \delta s$.

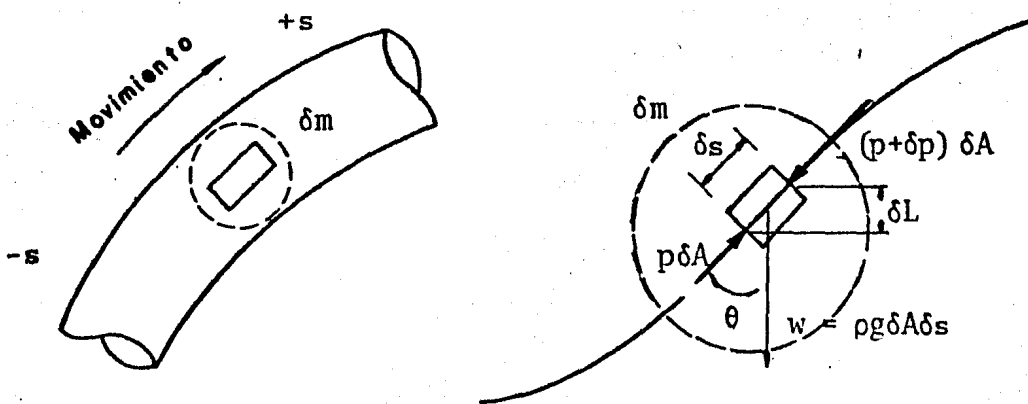


Fig. (A.1.2).- Fuerzas que se ejercen sobre un elemento diferencial de masa, δm .

Sustituyendo en el segundo principio de Newton del movimiento, $\Sigma F_s = \delta m a$ y arreglando la expresión se tiene que:

$$\frac{1}{\rho g} \delta p + \delta s \operatorname{sen} \theta_s + \frac{\delta F_s}{\rho g \delta A} + \frac{\delta s}{g} a_s = 0 \quad (\text{A-1.7})$$

Por otra parte, la aceleración a es dV / dt . En general, si V depende de s y del tiempo t , $V = V(s, t)$

$$a_s = \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{ds} \frac{ds}{dt} + \frac{dV}{dt} \quad (\text{A-1.8})$$

sustituyendo la expresión anterior en la ecuación (A-1.7) considerando que $\delta s \operatorname{sen} \theta_s = dL$ y que $ds/dt = V$ para un régimen-permanente se tiene que;

$$\frac{1}{\rho g} \delta p + dL + \frac{\delta F_s}{\rho g \delta A} + \frac{1}{g} V dV = 0 \quad (\text{A-1.9})$$

El término $\frac{\delta F_s}{\rho g \delta A}$, representa la resistencia que se opone al movimiento en la longitud dL . Las fuerzas cortantes δF_s , pueden sustituirse por el producto del esfuerzo cortante por el área sobre la que actúa (perímetro x longitud), esto es, $\delta F_s = \tau dP ds$, entonces se tiene que,

$$\frac{\delta F_s}{\rho g \delta A} = \frac{\tau dP ds}{\rho g dA} = \frac{\tau ds}{\rho g \gamma} \quad (\text{A-1.10})$$

En donde γ se le conoce como radio hidráulico y se define como el cociente del área de la sección recta por el perímetro mojado, en este caso dA/dP . La pérdida de energía mecánica en régimen permanente de un flujo en una tubería está dado por la ecuación de Darcy-Weisbach¹⁵ que es:

$$dh_L = f \frac{dL}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{A-1.11})$$

Sustituyendo (A-1.10) y (A-1.11) en (A-1.9) y multiplicando todo por g , se tendrá la ecuación de cantidad de movimiento presentada en forma diferencial,

$$\frac{dp}{\rho} + g dL + V dV + f \frac{dL}{D} \frac{V^2}{2} = 0 \quad (A-1.12)$$

Deducción De La Ecuación De Energía.¹⁴

A partir del principio de la conservación de la energía, la Primera Ley de la Termodinámica establece que el calor que se aporta a un sistema Q_H , menos el trabajo W realizado por el sistema, depende solo de los estados inicial y final, siendo independiente de la trayectoria entre ambos estados. La diferencia entre estos dos estados se le conoce como energía interna del sistema, E . Esto es, para los estados 1 y 2 ;

$$Q_H - W = E_2 - E_1 \quad (A-1.13)$$

La energía interna del sistema en el instante t es, la energía almacenada en el volumen de control en ese tiempo, esto es, $E_t = E_{vct}$, y en el instante $t+\delta t$ posterior :

$$E_{t+\delta t} - E_t = E_{vct+\delta t} - E_{vct} + dE_s - dE_e \quad (A-1.14)$$

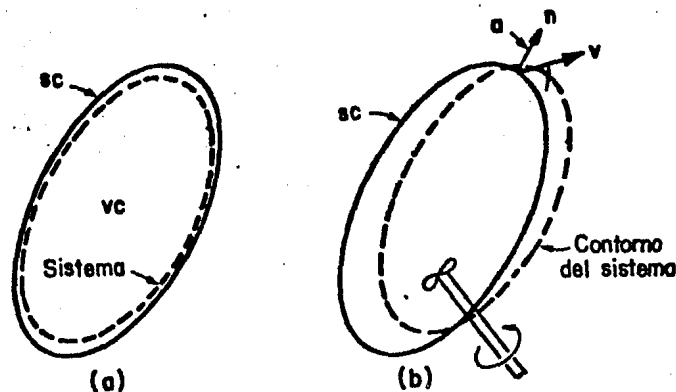


Fig. (A.1.3).- Desplazamiento del sistema partiendo del volumen de control en el tiempo δt .

Esto es, el aumento de energía interna del sistema es -- igual a la suma del aumento de energía interna en el volumen de control y del flujo neto de energía interna que sale por -- la superficie de control. El flujo neto de energía interna -- que sale es

$$\begin{aligned} dE_s - dE_e &= \delta t \int_{sc} \rho e V \cos \theta dA \\ &= \delta t \int_{sc} \rho e V \cdot dA \end{aligned} \quad (A-1.15)$$

donde e , es la energía interna por unidad de masa.

El trabajo desarrollado por las fuerzas de presión en el contorno, durante el tiempo δt es,

$$\delta W = \delta t \int_{sc} p V \cos \theta dA = \delta t \int_{sc} p V \cdot dA \quad (A-1.16)$$

que es la suma de las fuerzas por los desplazamientos normales al contorno, extendida dicha suma a toda la superficie del -- contorno durante δt . Cuando δt tiende a cero en el límite, es lógico tomar las integrales de superficie extendidas sobre la superficie del volumen de control. Si se produce algún despla-- zamiento en el contorno, también pueden realizar algún otro -- trabajo las fuerzas de cortadura que actúan sobre él. Este -- trabajo es el denominado trabajo de eje dW_s , en el intervalo δt .

Si se escoge el volumen de control de manera que todas -- las porciones no situadas en superficies fijas, sean normales al flujo, entonces no realizan trabajo en el contorno más -- fuerzas de cortadura que las que efectúan el trabajo sobre el eje.

Sustituyendo en (A-1.13) y dividiendo por δt

$$\frac{\delta Q_H}{\delta t} - \frac{\delta W_s}{\delta t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho e dV + \int_{sc} \left(\frac{P}{\rho} + e \right) eV \cdot dA \quad (A-1.17)$$

La expresión anterior representa la forma no permanente de la Primera Ley de la Termodinámica, y establece que la can-- tidad de calor suministrado, por unidad de tiempo, menos la -- cantidad de trabajo sobre el eje, por unidad de tiempo, es -- exactamente igual al aumento de energía interna dentro del -- volumen de control, por unidad de tiempo, más el trabajo de -- presión, más el flujo neto saliente, por unidad de tiempo, de energía interna a través de la superficie de control.

Sin considerar efectos nucleares, eléctricos, magnéticos ni de tensión superficial, la energía interna, e , de una sus-- tancia pura, es la suma de la energía potencial, cinética e --

intrínseca. La energía intrínseca, u , por unidad de masa, se debe a las fuerzas y la separación moleculares, esto es,

$$e = gL + \frac{V^2}{2} + u \quad (A-1.18)$$

Si se considera un tubo de corriente en régimen permanente y con las paredes rígidas, la ecuación (A-1.17) de energía aplicada entre dos puntos y dividida por la masa que atravieza el sistema por segundo, queda de la forma:

$$\frac{dp}{\rho} + g dL + V dV + du - dq_H = 0 \quad (A-1.19)$$

que representa la ecuación de energía en forma diferencial -- para el flujo a través de un tubo de corriente en régimen permanente y sin trabajo de eje.

ANEXO A-2

«Deducción De La Ecuación General Para El Flujo De Gas A Través De Una Tubería De Sección Circular Recta.

La presión de fondo fluyendo en un pozo de gas es la suma de las siguientes contribuciones: la presión en la cabeza del pozo, la presión que ejerce el peso de la columna de gas, el cambio en energía cinética y la pérdida de energía debido a la fricción del gas contra las paredes del tubo.

En el Anexo A-1, se presentó un balance de energía mecánica para el caso del flujo de gas en régimen permanente en una tubería. Este balance quedó representado por la ecuación (A-1.19) de la forma:

$$\frac{dp}{\rho} + g dL + VdV + \text{pérdidas por fricción} - dq_H = 0$$

La determinación de la presión de fondo fluyendo en un pozo, consiste en resolver la expresión anterior, para lo cual se hacen las siguientes consideraciones:

- a) El flujo de gas ocurre en régimen permanente
- b) No existe intercambio de calor entre el fluido y las paredes del pozo. ($dq_H = 0$)
- c) No se efectúa trabajo por o sobre el fluido ($dW_s = 0$)

Bajo las consideraciones anteriores, la ec.(A-1.19) queda de la forma,

$$\frac{dp}{\rho} + g dL + VdV + \text{pérdidas por fricción} = 0 \quad (\text{A-2.1})$$

En el ANEXO A-1, se demostró que las pérdidas por fricción quedan expresadas por: $f dL V^2 / (g D)$, entonces, la ec. (A-2.1) quedará expresada como:

$$\frac{dp}{\rho} + g dL + VdV + f \frac{dL}{D} \frac{V^2}{2} = 0 \quad (\text{A-2.2})$$

Dranchuk, Mc Farland¹⁷ y Aziz¹⁸ determinaron que el cambio en energía cinética, para el caso de flujo de gas en un pozo puede ser despreciable, debido a que representa una fracción muy pequeña comparada con la caída de presión total que ocurre en el pozo.

Despreciando el término de energía cinética, $V dV$, la ec. (A-2.2) es,

$$\frac{dp}{\rho} + g dL + f \frac{dL}{D} \frac{V^2}{2} = 0 \quad (\text{A-2.3})$$

Por otra parte, la ecuación de estado para un gas real, queda expresada por la relación :

$$V = \frac{Z n R T}{p} = \frac{Z m R T}{M p} \quad (\text{A-2.4})$$

En donde

p = presión a la que existe el gas

V = Volumen ocupado por el gas

Z = Factor de compresibilidad del gas

$$n = \text{número de moles} = \frac{m}{M}$$

R = Constante del gas

T = Temperatura absoluta a la que existe el gas

m = masa del gas

M = peso molecular del gas

Las unidades utilizadas dependen del valor en que se introduzca la constante R del gas, en este caso serán en el sistema inglés.

En el ANEXO A-1, se demostró que el gasto o caudal que pasa a través de una sección de tubería, en régimen permanente es:

$$Q = V A \quad ; \quad V = \frac{Q}{A} \quad (A-2.5)$$

En donde Q, es el volumen de fluido V, por unidad de tiempo t, y A es el área de la sección transversal de la tubería. Entonces, la ec. anterior se puede expresar como

$$V = \frac{V}{t} \frac{1}{A} \quad (A-2.6)$$

Sustituyendo las ecuaciones (A-2.4) y (A-2.5) en (A-2.6)

$$V = \frac{Z m R T}{M p} \frac{1}{t} \frac{1}{A} \quad (A-2.7)$$

Y como el término m/t , es la masa por unidad de tiempo, o sea ω ,

$$V = \frac{\omega Z R T}{M p} \frac{1}{A} \quad (A-2.8)$$

También, el gasto másico a condiciones standard (c.s) es:

$$\omega = \frac{m}{t} = \frac{\rho_{c.s} V_{c.s}}{t} = \rho_{c.s} Q_{c.s} \quad (A-2.9)$$

Se define como densidad específica de un gas,¹⁹ a la relación:

$$S.G. = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{aire\ c.s.}} = \frac{M_{gas}}{M_{aire\ c.s.}} \quad (A-2.10)$$

Entonces,

$$\rho_{gas} = \frac{\rho_{aire\ c.s.} M_{gas}}{M_{aire\ c.s.}} \quad (A-2.11)$$

Sustituyendo (A-2.11) en (A-2.9) se obtiene,

$$\omega = \rho_{aire\ c.s.} \frac{M_{gas}}{M_{aire\ c.s.}} Q_{c.s.} \quad (A-2.12)$$

y sustituyendo (A-2.12) en (A-2.8), se obtiene la velocidad del gas en cualquier punto de la línea de flujo;

$$V = \rho_{aire\ c.s.} \frac{Q_{c.s.}}{M_{aire\ c.s.}} \frac{Z R T}{p} \frac{1}{A} \quad (A-2.13)$$

Como se mencionó en la sección III, por razones prácticas, se utiliza el sistema inglés de unidades para el caso de flujo de gas natural en pozos. En este caso, los valores de las constantes que se utilizan son:

$$\rho_{\text{aire c.s.}} = 0.076054 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

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

$$M_{\text{aire c.s.}} = 28.964 \frac{\text{lb}_m}{\text{lb}_{\text{mol}}}$$

Sustituyendo estos valores en la ec. (A-2.13) y recordando que el área de la sección transversal es $\pi D^2/4$, se tiene:

$$V = \frac{0.4152 T Z Q}{p D^2} \quad (\text{A-2.14})$$

En donde

V = Velocidad del gas en el tubo, pie/seg.

Q = Gasto de gas producido, MMpie³/día

T = Temperatura absoluta del gas, °R

p = presión absoluta del gas, psia

D = Diámetro de la tubería, pie

Nuevamente, la ec. (A-2.4) quedó expresada como:

$$V = \frac{Z m R T}{M p}$$

y por unidad de masa:

$$\frac{V}{m} = v = \frac{1}{\rho} = \frac{Z R T}{M p} \quad (A-2.15)$$

de la ec. (A-2.10), expresada en unidades inglesas,

$$M_g = 28.964 \text{ S.G.} \quad (A-2.16)$$

Sustituyendo (A-4.16) y $R = 10.73$, en (A-4.15)

$$\rho = \frac{2.707 \text{ S.G. } p}{Z T} \quad (A-2.17)$$

Finalmente, sustituyendo las ecs. (A-2.17) y (A-2.14) en (A-2.3), e introduciendo la constante para pasar de lb/pie^3 a lb/plg.^3 y para $g = 32.223 \text{ pie/seg.}^2$

$$53.34 \frac{T Z}{\text{S.G.}} \frac{dp}{p} + dL + 0.0107 \frac{f}{D^5} \left(\frac{T Z}{p} \right)^2 Q^2 dL = 0$$

(A-2.18)

ANEXO A-3

Deducción De La Ecuación Para El Método De Compresibilidad Y Temperatura Promedio¹.

La ecuación (A-2.18) se estableció como:

$$53.34 \frac{T Z}{S.G} \frac{dp}{p} + dL + 0.0107 \frac{f}{D^5} \left(\frac{T Z}{p} \right)^2 Q^2 dL = 0 \quad (A-3.1)$$

Si se considera, $a = 53.34 \frac{T Z}{S.G}$ (A-3.2)

$$b = 0.0107 \frac{f (TZ)^2}{D^5} \quad (A-3.3)$$

Sustituyendo (A-3.2) y (A-3.3) en (A-3.1) y arreglando la expresión,

$$\left(\frac{p^2 + bQ^2}{p^2} \right) dL = - a \frac{dp}{p} \quad (A-3.4)$$

Integrando a ambos lados con respecto a L y p y haciendo $(L_1 - L_0) = L$

$$\frac{2L}{a} = \ln \left(\frac{p_f f^{2+} bQ^2}{p_s^{2+} bQ^2} \right) \quad (A-3.5)$$

Simplificando :

$$Q^2 = \frac{p_f f^{2+} - p_s^2 e^{\left(\frac{2L}{a}\right)}}{b \left(e^{\left(\frac{2L}{a}\right)} - 1 \right)} \quad (A-3.6)$$

Sustituyendo (A-3.2) y (A-3.3) en (A-3.6)

$$Q^2 = \frac{P_{ff}^2 - P_s^2}{\left(0.0107 \frac{f T^2 Z^2}{D^5}\right) (e^S - 1)} \quad (A-3.7)$$

en donde:

$$S = \frac{2 \text{ S.G. } L}{53.34 T Z}$$

multiplicando y dividiendo por S, introduciendo el factor -- para tener el diámetro de la tubería en pulgadas y despejando para p_{ff} :

$$P_{ff}^2 = P_s^2 e^S + \frac{100 \text{ S.G. } L f Q^2 T Z (e^S - 1)}{d^5 S} \quad (A-3.8)$$

y como el método supone medias aritméticas de T, Z y f, se -- tiene que la presión de fondo fluyendo en el pozo es:

$$P_{if}^2 = P_s^2 e^S + \frac{100 \text{ S.G. } L \bar{f} Q^2 \bar{T} \bar{Z} (e^S - 1)}{d^5 S} \quad (A-3.9)$$

ANEXO A-4

Deducción De La Ecuación Del Método Propuesto Por
Cullender Y Smith⁵.

La ecuación general de flujo (A-2.18) quedó expresada --
como:

$$\frac{53.34 T Z}{S.G.} \frac{dp}{p} + dL + 0.0107 \frac{f}{D^5} \left(\frac{T Z}{p} \right)^2 Q^2 dL = 0$$

haciendo

$$a = \frac{53.34}{S.G.} \quad (A-4.1)$$

$$b = \frac{f}{D^5} Q^2 (0.0107) \quad (A-4.2)$$

y agrupando términos semejantes:

$$\frac{a T Z \frac{dp}{p}}{1 + b \left(\frac{T Z}{p} \right)^2} = -dL \quad (A-4.3)$$

multiplicando y dividiendo por $\left(\frac{p}{T Z} \right)^2$ y luego integrando-
entre p_{ff} y p_s y L ,

$$\int_{p_s}^{p_{ff}} \frac{a \left(\frac{p}{T Z} \right)}{\left(\frac{p}{T Z} \right)^2 + b} dp = L_1 - L_0 \quad (A-4.4)$$

donde L_1 y L_0 son los extremos de la línea de flujo, que para este caso, $L_1 - L_0 = L =$ profundidad del horizonte productor.

Sustituyendo (A-4.1) y (A-4.2) en (A-4.4) e introduciendo el factor de conversión para que el diámetro de la tubería sea usado en pulgadas :

$$\int_{p_s}^{p_{ff}} \frac{1000 \left(\frac{p}{T Z}\right) dp}{0.0107 \frac{f}{D^5} Q + \left(\frac{p}{T Z}\right)^2} = \frac{S.G. L}{53.34} (1000) \quad (A-4.5)$$

haciendo $F^2 = \frac{2.665 f Q^2}{d^5}$, se tendrá que,

$$\frac{1000 S.G. L}{53.34} = \int_{p_s}^{p_{ff}} \frac{\frac{p}{T Z} dp}{F^2 + 0.001 \left(\frac{p}{T Z}\right)^2} \quad (A-4.6)$$

Que es la ecuación propuesta por Cullender y Smith para representar el flujo de gas en una tubería vertical.

ANEXO A- 5

Deducción De La Ecuación Para El Cálculo De La Presión De Fondo Fluyendo. Método De Messer, Raghavan. y Ramey

La ecuación (A-3.9) para el flujo a través de un tubo de corriente en régimen permanente sin trabajo de eje ni flujo de calor entre las paredes del tubo y el fluido, es:

$$\frac{dp}{\rho} + dL + V dV + f \frac{V^2}{2g} \frac{dL}{D} = 0 \quad (A- 5.1)$$

En el ANEXO A-5 se establece la expresión del volumen específico del gas, que es:

$$v = \frac{Z R T}{28.964 \text{ S.G. } p} \quad (A-5.2)$$

El gasto másico del gas quedó definido por la ec.(A-2.12) de la forma,

$$\omega = \frac{28.964 \times 10^6 \text{ S.G. pcs } Q_{cs}}{86 \ 400 \ R \ T_{cs}} \quad (A-5.3)$$

en donde Q está dado en millones de pies cúbicos por día,

Al sustituir los valores de las constantes para las unidades de campo inglesas en la ec.(A-5.3),

$$\omega = 0.880 \text{ S.G. } Q_{cs} \quad (A-5.4)$$

En el ANEXO A-1 se demostró que el gasto másico de gas en un pozo es:

$$\omega = \rho V A = v V A \quad (A-5.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones de la (A-5.2) a la (A-5.5) - en la ec.(A-5.1).

$$v \, dp + dL + \frac{\omega^2 v \, dv}{g A^2} + f \frac{\left(\frac{\omega v}{A}\right)^2}{2g} \frac{dL}{D} = 0 \quad (A-5.6)$$

Factorizando y resolviendo para dL:

$$dL = \frac{-v \, dp - \frac{\omega^2 v \, dv}{g A^2}}{1 + \frac{f \omega^2 v^2}{2g D A^2}} \quad (A-5.7)$$

considerando despreciable el término $v \, dv$ en la ec.(A-5.7) -- (ver referencia 7) y sustituyendo la ec.(A-5.2)

$$dL = \frac{-\left(\frac{Z R T}{28.964 \text{ S.G. } p}\right) dp}{1 + \frac{86 \, 400^2 f Q^2 Z^2 R^2 T^2}{28.964^2 p^2 2g D A^2}} \quad (A-5.8)$$

Sustituyendo valores y utilizando las constantes de conversión para introducir el diámetro de la tubería de produc--ción en pulgadas y el cambio de lb/pie³ a lb/plg³, y dividiendo todo por Z²,

$$\frac{0.01875 \text{ S.G.}}{T} dL = \frac{\frac{p}{Z} dp}{\left(\frac{p^2}{Z^2}\right) + \frac{667 f Q^2 T^2}{d^5}} \quad (A-5.9)$$

multiplicando y dividiendo por p_c^2 y dividiendo por (p^2/Z^2) ,

$$\frac{0.01875 \text{ S.G.}}{T} dL = \frac{-\frac{Z}{p} dp}{1 + B\left(\frac{Z}{p}\right)^2 p_c^2} \quad (\text{A-5.10})$$

En donde

$$B = \frac{667 f Q^2 T^2}{d^5 p_c^2}$$

Recordando que $p_r = \frac{p}{p_c}$, e integrando entre los límites p_s a $L=0$ y p_f a cualquier L , suponiendo un perfil lineal de temperatura,

$$\frac{0.01875 \text{ S.G. } L}{T} = \int_{p_{sr}}^{p_{fr}} \frac{\frac{Z}{p} dp}{1 + B\left(\frac{Z}{p}\right)^2} \quad (\text{A-5.11})$$

Que es la expresión general de la integral de Sukkar y Cornell⁹.

ANEXO A-6

Cuando un gas es sometido a altas presiones, la gráfica de Z, en la región de alta presión, es una función lineal de p_r . Katz y otros²⁰ mostraron que para valores de p -- entre 10 y 30 el valor de la Z es de la forma:

$$Z = C + G p_r \quad (A-6.1)$$

Con esta relación, la integral de Sukkar y Cornell es -- evaluada numéricamente. Esta integral es de la forma:

$$\int_{p_{r1}}^{p_{r2}} \frac{Z/p_r}{1 + B(Z/p_r)^2} dp_r \quad (A-6.2)$$

Suponiendo que $B > 0$ y utilizando la ec.(A-6.1), la integral es separada de la siguiente forma

$$\int_{p_{r1}}^{p_{r2}} \frac{(Z/p_r) dp_r}{1 + B(Z/p_r)^2} = \int_{p_{r1}}^{p_{r2}} \frac{(C/p_r) dp_r}{1 + B(Z/p_r)^2} + \int_{p_{r1}}^{p_{r2}} \frac{G dp_r}{1 + B(Z/p_r)^2} \quad (A-6.3)$$

Integrando adecuadamente se tiene

$$A_1 = \int_{p_{r1}}^{p_{r2}} \frac{(C/p_r) dp_r}{1 + B(Z/p_r)^2} \quad (A-6.4)$$

$$A_1 = \frac{C}{G^2 B + 1} \left\{ \text{Ln} \left[\frac{\sqrt{B \left(\frac{C}{p_r} + G \right)^2 + 1}}{\sqrt{B} \frac{C}{p_r}} \right] + G \sqrt{B} \tan^{-1} \left[\sqrt{B} \left(\frac{C}{p_r} + G \right) \right] \right\} \Bigg|_{p_{r2}}^{p_{r1}} \quad (A-6.5)$$

$$A_2 = \int_{p_{r1}}^{p_{r2}} \frac{G dp_r}{1 + B(Z/p_r)^2} \quad (A-6.6)$$

$$A_2 = -GC\sqrt{B} \left\{ \left[\frac{G\sqrt{B}(G^2B-1)}{(G^2B-1)^2 + 4G^2B} - \frac{G\sqrt{B}}{(G^2B+1)} \right] \cdot \text{Ln} \frac{C\sqrt{B}}{p_r} \right. \\ - \frac{1}{(1+G^2B)(C\sqrt{B}/p_r)} + \frac{G\sqrt{B}}{(G^2B-1) + 4G^2B} \\ \cdot \text{Ln} \left[\left(\frac{C}{p_r} + G \right)^2 B + 1 \right] + \frac{G^2B-1}{(G^2B-1)^2 + 4G^2B} \\ \left. \cdot \tan^{-1} \left[\left(\frac{C}{p_r} + G \right) \sqrt{B} \right] \right\} \Bigg|_{p_{r1}}^{p_{r2}} \quad (A-6.7)$$

Simplificando las expresiones anteriores

$$A_1 = \frac{C}{\psi^2 + 1} \left[\text{Ln} \frac{\sqrt{x^2 + 1}}{x - \psi} + \psi \tan^{-1} x \right] \Bigg|_{p_{r1}}^{p_{r2}} \quad (A-6.8)$$

$$A_2 = -G C \sqrt{B} \left[\theta \text{Ln}(x - \psi) - \frac{1}{(1 + \psi^2)(x - \psi)} + \zeta \text{Ln}(x^2 + 1) \right. \\ \left. + \kappa \tan^{-1} x \right] \Bigg|_{p_{r1}}^{p_{r2}} \quad (A-6.9)$$

En donde:

$$x = \sqrt{B} Z/p_r = \sqrt{B} (C/p_r + G)$$

$$\psi = G\sqrt{B}$$

$$\theta = \frac{\psi (\psi^2 - 1)}{(\psi^2 - 1)^2 + 4\psi^2} - \frac{\psi}{\psi^2 + 1}$$

$$\zeta = \frac{\psi}{(\psi^2 - 1)^2 + 4\psi^2}$$

$$\kappa = \frac{\psi^2 - 1}{(\psi^2 - 1) + 4\psi^2} \quad (A-6.10)$$

Si $B = 0$ entonces se tendrá que:

$$\int_{p_{r1}}^{p_{r2}} \frac{(Z/p_r) dp_r}{1 + B(Z/p_r)^2} = C \ln(p_r) + G p_r \quad (A-6.11)$$

La ecuación anterior es la integral de Sukkar y Cornell-
ampliada para altas presiones, para el caso $B=0$.

ANEXO A-7

Deducción De La Expresión Utilizada En El Método De G.-Hiriart³⁰.

En el Anexo A-1 se demostró que la ecuación de continuidad para régimen permanente queda representada por:

$$V A = \dot{m} v \quad (A-7.1)$$

en donde:

V = velocidad del fluido, m/s

A = área de la sección transversal de la tubería, m²

\dot{m} = gasto másico de vapor producido, Kg/s.

v = volumen específico del vapor, m³/Kg.

También se dedujo la ecuación de cantidad de movimiento la que en forma diferencial puede ser expresada como:

$$V \frac{\partial V}{\partial L} + v \frac{\partial p}{\partial L} + f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2} = 0 \quad (A-7.2)$$

para la cuál:

D = diámetro interno de la tubería de producción, m

p = presión absoluta del vapor, New/m².

f = factor de fricción.

L = longitud de la tubería, m.

y como el método supone: $p v = \text{cte. (K)}$ (A-7.3)
de (A-7.1) se tiene que:

$$\frac{V^2}{2} = a v^2 \quad (A-7.4)$$

en donde,
$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{m}}{A} \right)^2$$

por otra parte, derivando parcialmente la ecuación (A-7.3) -- con respecto a L y sustituyendo (A-7.3) y (A-7.4) en (A-7.2)

$$\frac{\partial av^2}{\partial L} - \frac{K}{v} \frac{\partial v}{\partial L} + f \frac{1}{D} av^2 + g = 0 \quad (\text{A-7.5})$$

en esta ecuación se puede ver que v depende únicamente de L por lo que, arreglando la expresión anterior,

$$(2av^2 - K) dv = - \left(\frac{f}{D} av \right) \left(v^2 + g \frac{D}{fa} \right) dL \quad (\text{A-7.6})$$

o bien:

$$\frac{2av^2 - K}{v \left(v^2 + \frac{gD}{fa} \right)} dv = - \frac{fa}{D} dL \quad (\text{A-7.6'})$$

multiplicando por $\left(\frac{D}{fa} \right)$ en ambos lados, multiplicando y dividiendo por g en el miembro izquierdo de (A-7.6'),

$$\left[- \frac{1}{v} + \left(\frac{gD}{Kf} + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{2v}{v^2 + \frac{gD}{fa}} \right) \right] dv = - \frac{g}{K} dL \quad (\text{A-7.7})$$

En geotermia en general, $g=9.81 \text{ m/s}^2$, $D=0.25 \text{ m}$,

$$K = 0.2 \times 10^6 \text{ (Pa m}^3\text{)}/\text{Kg.}$$

$$f \approx 0.014$$

por lo que $\frac{gD}{Kf} = 0.0017 \ll \frac{1}{2}$, entonces es posible eliminar este término de la ecuación (A-9.7), e integrando:

$$- \ln v + \frac{1}{2} \ln \left(v^2 + \frac{gD}{fa} \right) = - \frac{g}{K} L + C_1 \quad (A-7.8)$$

haciendo $L_0 - L_1 = L$ y sustituyendo para las condiciones de frontera: $L = L_0$; $v = v_0$

$$1 + \frac{\left(\frac{2gD}{fa} \right)}{K^2} p_1^2 = \left(1 + \frac{\left(\frac{2gD}{fa} \right)}{K^2} p_0^2 \right) e^{\left(\frac{2g}{KL} \right)} \quad (A-7.9)$$

definiendo $\frac{2gD}{fa} / K^2 = \gamma$ y $\beta = 2g/K$, se tendrá :

$$\left(1 + \gamma p_1^2 \right) = \left(1 + \gamma p_0^2 \right) e^{\beta L}$$

o bien:

$$p_1 = \left[\frac{\left(1 + \gamma p_0^2 \right) e^{\beta L}}{\gamma} - \frac{1}{\gamma} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A-7.10)$$

en donde:

$$\gamma = \frac{2 g D}{f \left(\frac{\dot{m}}{A} \right) \left(p_0 v_0 \right)^2} \quad \text{y} \quad \beta = \frac{2g}{p_0 v_0}$$

que es la expresión final para determinar la presión de fondo fluyendo de un pozo de vapor a cualquier profundidad, L.

ANEXO A-8

Deducción De La Ecuación De Flujo De Vapor A Través De Una Tubería Para El Método Ampliado De Aziz¹¹.

En el Anexo A-1 se mostró un balance de energía mecánica para el caso del flujo de un fluido compresible a través de una tubería vertical ($\alpha=0$), quedando representado por la ecuación (A-1.19) de la siguiente forma:

$$v dp + g dL + V dV + \text{pérdidas por fricción} - dq_H = 0$$

Se demostró también que las pérdidas por fricción en la tubería queda representado por: $f dL V^2/2D$. y despreciando el intercambio de calor fluido-paredes del tubo-formación, se tiene que :

$$v dp + g dL + V dV + \frac{f}{2D} dL V^2 \quad (A-8.1)$$

El gasto másico que atravieza una sección de la tubería se representa mediante la ecuación de continuidad para estado permanente,

$$\dot{m} = \rho V A \quad (A-8.2)$$

Por otra parte, de la ecuación de estado para un gas real (A-2.4), el volumen específico del vapor es:

$$v = \frac{Z R T}{M p} \quad (A-8.3)$$

sustituyendo las ecuaciones (A-8.2) y (A-8.3) en la (A-8.1) :

$$\frac{ZRT}{M} \frac{dp}{p} + g dL + \frac{\lambda \dot{m}^2}{D^5} \left(\frac{ZT}{p} \right)^2 dL = 0 \quad (A-8.4)$$

en donde:

$$\lambda = \frac{8 R^2}{M^2 \pi^2}$$

multiplicando y dividiendo por $(\frac{P}{TZ})^2$ y arreglando adecuadamente se tiene que:

$$\frac{\frac{R}{M} \left(\frac{P}{TZ} \right) dp}{g \left(\frac{P}{TZ} \right)^2 + \frac{\lambda f m^2}{D^5}} = - dL \quad (A-8.5)$$

haciendo $\beta = \frac{\lambda f m^2}{D^5}$ e integrando para los siguientes límites,

$$\begin{aligned} p_1 & \text{ para } L_1 \\ p_2 & \text{ para } L_2 \end{aligned}$$

$$\frac{R}{M} \int_{P_2}^{P_1} \frac{\left(\frac{P}{TZ} \right) dp}{g \left(\frac{P}{TZ} \right)^2 + \beta} = - \frac{M}{R} (L_1 - L_2) \quad (A-8.6)$$

sustituyendo los valores: $M = 18.016 \text{ Kg mol}$ y

$$R = 8314.3 \text{ Pa m}^3 / \text{Kg mol } ^\circ\text{K}$$

se tiene finalmente:

$$\int_{P_2}^{P_1} \frac{\left(\frac{P}{TZ} \right) dp}{g \left(\frac{P}{TZ} \right)^2 + \beta} = 2.16687 \times 10^{-3} \Delta L \quad (A-8.7)$$

que es la expresión a resolver en el método ampliado de Aziz.

ANEXO A-9

Desarrollo De Las Ecuaciones Diferenciales Usadas En El Método Propuesto Por F. Garibay³⁵.

Las tres ecuaciones básicas deducidas en el Anexo A-1 son de la forma:

$$\text{mom masa: } \rho V A = \text{cte.} \quad (\text{A-9.1})$$

$$\text{momentum: } \frac{dp}{dL} = \rho V \frac{dV}{dL} + \rho g \cos \alpha + \frac{f}{2D} V^2 \quad (\text{A-9.2})$$

$$\text{energía: } \frac{\partial}{\partial L} \left(h + \frac{V^2}{2} \right) = -g \cos \alpha - \frac{\partial Q_H}{\partial L} - \frac{\partial Q_H}{\partial r} \quad (\text{A-9.3})$$

y la ecuación de estado presentada en el Anexo C-6;

$$\rho = F(p, h) \quad (\text{A-9.4})$$

si se deriva (A-9.1) con respecto a la profundidad, L:

$$\frac{dp}{dL} VA + \frac{dV}{dL} \rho A + \frac{dA}{dL} V \rho = 0 \quad (\text{A-9.5})$$

como se estableció que el análisis de flujo se haría a través de un área constante:

$$\frac{dV}{dL} = - \frac{V}{\rho} \frac{d\rho}{dL} \quad (\text{A-9.6})$$

que es la ecuación (39) presentada en la sección III.2.3. Por otra parte, mediante las hipótesis planteadas en el método y derivando con respecto a la profundidad, la ecuación (A-9.3)- queda de la forma:

$$\frac{dh}{dL} = -g - V \frac{dV}{dL} \quad (\text{A-9.7})$$

y que corresponde a la expresión (41).

Derivando parcialmente la ecuación (A-9.4) se tiene:

$$\frac{d\rho}{dL} = \frac{\partial F}{\partial p} \frac{dp}{dL} + \frac{\partial F}{\partial h} \frac{dh}{dL} \quad (\text{A-9.8})$$

que es la ecuación (42) presentada anteriormente.

Si se sustituye las ecuaciones (A-9.2) y (A-9.7) en la (A-9.8),

$$\frac{d\rho}{dL} = \left[\rho V \frac{\partial F}{\partial p} - V \frac{\partial F}{\partial h} \right] \frac{dV}{dL} + \left(\rho g + \frac{f}{2D} \rho V^2 \right) \frac{\partial F}{\partial p} + g \frac{\partial F}{\partial h}$$

sustituyendo (A-9.6) en la expresión anterior:

$$\frac{d\rho}{dL} = \frac{\left(\rho g + \frac{f}{2D} \rho V^2 \right) \frac{\partial F}{\partial p} + g \frac{\partial F}{\partial h}}{\left(1 + V^2 \frac{\partial F}{\partial p} + \frac{V^2}{\rho} \frac{\partial F}{\partial h} \right)} \quad (\text{A-9.9})$$

y se tiene la expresión (46). Ahora, sustituyendo la ecuación (A-9.9) en (A-9.6) y dividiendo entre V^2 ,

$$\frac{dV}{dL} = \frac{\left(\frac{g}{V} + \frac{f}{2D} V \right) \frac{\partial F}{\partial p} + \frac{g}{\rho V} \frac{\partial F}{\partial h}}{\frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial h} - \frac{\partial F}{\partial p} - \frac{1}{V^2}} \quad (\text{A-9.10})$$

que corresponde a la primera ecuación diferencial del sistema propuesto, ecuación (43).

Si se sustituye la ecuación (A-9.10) en (A-9.2),

$$\frac{dp}{dL} = \rho V \left[\frac{\left(\frac{g}{V} + \frac{f}{2D} V \right) \frac{\partial F}{\partial p} + \frac{g}{\rho V} \frac{\partial F}{\partial h}}{\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial h} - \frac{\partial F}{\partial p} - \frac{1}{V^2} \right)} \right] + \rho g + \frac{f}{2D} V^2 \quad (\text{A-9.11})$$

que es la segunda ecuación diferencial presentada en la sección III.2.3 mediante la ecuación (44).

Sustituyendo nuevamente (A-9.10) en (A-9.7):

$$\frac{dh}{dL} = (-g - V) \left[\frac{\left(\frac{g}{V} + \frac{f}{2D} V \right) \frac{\partial F}{\partial p} + \frac{g}{\rho V} \frac{\partial F}{\partial h}}{\frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial h} - \frac{\partial F}{\partial p} - \frac{1}{V^2}} \right]$$

(A-9.12)

ecuación (45) y tercera del sistema, que, con la ecuación (A-9.9) se completa el sistema de ecuaciones diferenciales propuesto.

A N E X O B

ANEXO B-1

DESCRIPCION DEL PROGRAMA "PRES"

CALCULADORA HP-41 CV

Este programa determina la presión de fondo fluyendo de un pozo de gas, al resolver la ecuación de flujo propuesta en el método de compresibilidad y temperatura promedio, ec.(1)

Los datos necesarios para alimentar el programa son: a) - Propiedades del gas; S.G., viscosidad, temperatura crítica, - presión crítica. b) datos de producción; gasto de gas medi - do a condiciones estandar, temperatura de fondo estabilizada y temperatura del gas en la superficie, presión en la cabeza - del pozo fluyendo. c) datos del pozo; diámetro de la tubería de producción y su rugosidad relativa, profundidad del hori - zonte productor y finalmente, d) número de intervalos en que - se dividirá la línea de flujo.

Este programa está diseñado para operarse en la calcula - dora HP-41, teniendo el impresor térmico conectado a ella. El número mínimo de registros de almacenamiento deberá ser de 31 registros (SIZE 031).

Al ejecutar el programa, éste se detendrá y mostrará los valores de la presión y la temperatura reducidas, para que -- mediante la gráfica de Standing y Katz de la fig.(III.2), sea leído el valor del factor Z e introducido a él programa. Esto se hará tantas veces como intervalos se hayan escogido.

Las presiones de fondo se imprimen en forma consecutiva - hasta que la señal sonora indica el fin del programa.

Instrucciones Para El Uso Del Programa "PRES"
 Método De Compresibilidad Y Temperatura Promedio¹

CALCULADORA HP-41 CV

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
1	Disponga y cargue programa "PRES".	5 Tarjetas con "PRES".		
2	XEQ "PRES"			INSERTE DATOS S.G. (ADIM) ?
3	Introduzca datos	S.G.	R/S	PROF. (FT) ?
4		Profundidad del horizonte productor.	R/S	TEMP. SUPERF. (G. RANK.) ?
5		Temperatura en la cabeza del pozo.	R/S	TEMP. FONDO (G. RANK.) ?
6		Temperatura del horizonte productor.	R/S	P.SUP. (PSIA) ?
7		Presión absoluta en la cabeza del pozo (fluyendo)	R/S	GASTO (MMSCFD) ?
8		Gasto de gas producido en millones de pie ³ /día.	R/S	DIAM. (PLG.) ?
9		Diámetro de la tubería de producción	R/S	TEMP. CRITICA (G. RANK.) ?

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
10		Temperatura crítica del gas.	R/S	PRES. CRITICA (G. RANK.) ?
11		Presión crítica del gas.	R/S	RUG. REL (D/E)
12		Recíproco de de la rugosidad relativa de la T.P.	R/S	VISC. (C.P) ?
13		Viscosidad del gas medida a p y T promedio.	R/S	INTERVALOS ?
14		Número de intervalos a considerar.	R/S	----->--
15	Lea el valor de la temperatura reducida.		R/S	$T_r =$
16	Lea el valor de la presión reducida.		R/S	$P_r =$
17	Introduzca el valor de Z leído de la gráfica de Standing para T_r y P_r .	Z	R/S	INTRODUZCA Z=?
18	Repita pasos 15, 16 y 17 hasta N veces en que se obtiene la P_{ff} final.			$P_{ff} =$

LISTADO DE PROGRAMA "PRES"

CALCULADORA H.P. 41-CV

01 *LBL "PRES"	46 PSE	91 PROMPT
02 *PROGRAMA PARA	47 * < G. RANK. > ?"	92 STO 09
03 *EL CALCULO DE*	48 PRA	93 PRX
04 *LA PRESION DE*	49 PROMPT	94 ADV
05 *FONDO FLUYENDO"	50 STO 03	95 *VISC. <C.P. > ?"
06 " "	51 PRX	96 RA
07 " "	52 ADV	97 PROMPT
08 *TEMPERATURA Y"	53 *P. SUP. <PSIA>?"	98 STO 10
09 *COMPRESIBILIDAD"	54 PRA	99 PRX
10 *PROMEDIO"	55 PROMPT	100 ADV
11 " "	56 STO 04	101 *INTERVALOS = ?"
12 *JUNIO 1982"	57 PRX	102 PRA
13 " "	58 ADV	103 PROMPT
14 " "	59 *GASTO <MMSCFD>?"	104 STO 18
15 *INICIO"	60 PRA	105 PRX
16 AVIEW	61 PROMPT	106 ADV
17 CLR	62 STO 05	107 ADV
18 ADV	63 PRX	108 ADV
19 *INSERTE DATOS"	64 ADV	109 *RESULTADOS"
20 AVIEW	65 *DIAM. < PLG > ?"	110 PRA
21 PSE	66 PRA	111 ADV
22 ADV	67 PROMPT	112 ADV
23 *S.G. <ADIN > ?"	68 STO 06	113 ADV
24 PRA	69 PRX	114 ADV
25 PROMPT	70 ADV	115 *INICIALIZA COND"
26 STO 00	71 *TEMP. CRITICA"	116 .001
27 PRX	72 AVIEW	117 STO 11
28 ADV	73 PSE	118 .0061
29 *PROF. <FT > ?"	74 * < G. RANK. > ?"	119 STO 12
30 PRA	75 PRA	120 RCL 02
31 PROMPT	76 PROMPT	121 STO 17
32 STO 01	77 STO 07	122 RCL 04
33 PRX	78 PRX	123 STO 16
34 ADV	79 ADV	124 1
35 *TEMP.SUPERF."	80 *PRES. CRITICA"	125 STO 23
36 AVIEW	81 AVIEW	126 *PARTICION"
37 PSE	82 PSE	127 RCL 03
38 * < G. RANK. > ?"	83 * < PSIA > ?"	128 RCL 02
39 PRA	84 PRA	129 -
40 PROMPT	85 PROMPT	130 RCL 18
41 STO 02	86 STO 08	131 /
42 PRX	87 PRX	132 STO 19
43 ADV	88 ADV	133 *CALCULA FRIC"
44 *TEMP. FONDO"	89 *RUG. REL. <D/E>"	134 RCL 05
45 AVIEW	90 PRA	135 RCL 00

136 *
137 20011
138 *
139 RCL 06
140 RCL 10
141 *
142 /
143 STO 30
144 RCL 09
145 LOG
146 4
147 *
148 2.28
149 +
150 X12
151 1/X
152 STO 11
153+LBL 02
154 SORT
155 RCL 30
156 *
157 RCL 09
158 4.67
159 *
160 /
161 1/X
162 1
163 +
164 STO 21
165 LOG
166 4
167 *
168 CHS
169 2.28
170 +
171 RCL 09
172 LOG
173 4
174 *
175 +
176 RCL 11
177 SORT
178 1/X
179 -
180 STO 20
181 RCL 09
182 4.67
183 *
184 RCL 11
185 1.5
186 Y1X
187 RCL 30
188 *

189 /
190 .8686
191 *
192 RCL 21
193 /
194 RCL 11
195 1.5
196 Y1X
197 2
198 *
199 1/X
200 +
201 RCL 20
202 /
203 1/X
204 CHS
205 RCL 11
206 +
207 STO 21
208 RCL 11
209 -
210 ABS
211 RCL 12
212 Y1Y
213 X1Y?
214 GT0 03
215 RCL 21
216 STO 11
217 GT0 04
218+LBL 03
219 RCL 21
220 STO 11
221 GT0 02
222 "CALCULA FWF"
223+LBL 04
224 RCL 17
225 RCL 19
226 +
227 STO 29
228 RCL 17
229 +
230 2
231 /
232 STO 25
233 RCL 07
234 /
235 CLA
236 "PR=" *
237 ARCL X
238 AVIEW
239 STOP
240 RCL 16
241 RCL 00

242 /
243 CLA
244 "PR=" *
245 ARCL X
246 AVIEW
247 STOP
248 "INTRODUSCA Z= ?"
249 PRG
250 PROMPT
251 STO 15
252 PRX
253 ADV
254 "CALCULO DE S"
255 RCL 00
256 RCL 01
257 RCL 10
258 /
259 +
260 2
261 *
262 RCL 15
263 RCL 25
264 *
265 53.34
266 *
267 /
268 STO 20
269 RCL 06
270 5
271 Y1X
272 *
273 RCL 20
274 ETX
275 1
276 -
277 RCL 05
278 X12
279 *
280 RCL 01
281 RCL 10
282 /
283 *
284 RCL 15
285 *
286 RCL 11
287 *
288 RCL 25
289 *
290 RCL 00
291 *
292 100
293 *

294 /
295 1/X
296 RCL 20
297 ETX
298 RCL 16
299 X12
300 *
301 +
302 SORT
303 STO 16
304 CLA
305 "PMF="
306 ARCL X
307 AVIEW
308 RCL 23
309 RCL 18
310 X=Y?
311 GTO 05
312 ADV
313 ADV
314 RCL 29
315 STO 17
316 RCL 23
317 1
318 +
319 STO 23
320 GTO 04
321 LBL 05
322 ADV
323 ADV
324 ADV
325 ADV
326 ADV
327 ADV
328 ADV
329 BEEP
330 BEEP
331 .END.

Programa Para La Determinación De La Presión De Fondo Fluyendo. Método De Compresibilidad Y Temperatura - - Promedio¹.

CALCULADORA TI-59

Este programa determina la presión de fondo fluyendo de un pozo de gas. Los datos necesarios para implementar el programa son: S.G. del gas, profundidad del horizonte productor, temperatura en el fondo y en la cabeza del pozo, presión en la cabeza del pozo fluyendo, el gasto de gas producido, las condiciones críticas del gas (presión y temperatura), la viscosidad del gas calculada a las condiciones medias de presión y temperatura y la rugosidad relativa de la tubería de producción.

Al ejecutar el programa éste se detendrá y mostrará momentaneamente el valor del coeficiente de fricción f , calculado con la ecuación propuesta por Colebrook² mediante el proceso iterativo de Newton-Raphson¹².

El programa está diseñado para detenerse y mostrar las pseudo condiciones reducidas (presión y temperatura), de tal forma que pueda ser leído el factor de fricción de la gráfica de Standing y Katz⁴ mostrada en la fig.(III.2), e introducido al programa.

Al incrementar el número de intervalos (N) el valor de la presión de fondo fluyendo que se obtiene, es más exacto.

No es necesario modificar la partición inicial de la calculadora para ser operado este programa.

El programa supone un gradiente lineal de temperatura, entre la de fondo y la de superficie, asignando un promedio aritmético de ésta para cada intervalo considerado.

Instrucciones Para El Uso Del Programa "PRES".
Método De Compresibilidad Y Temperatura Promedio¹

CALCULADORA TI-59

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
1	Cargar programa "PRES"	2 Tarjetas por lados 1, 2, 3 y 4.		0
2	Inicializar programa		A	0
3	Introducir S.G. del gas. (adimensional)	S.G.	R/S	S.G.
4	Introducir profundidad del pozo. (pies)	L	R/S	L
5	Introducir temperatura en la cabeza del pozo (fluyendo), °R.	T _s	R/S	T _s
6	Introducir temperatura del horizonte productor, °R.	T _f	R/S	T _f
7	Introducir la presión en la cabeza del pozo (fluyendo), psia.	p _s	R/S	p _s
8	Introducir el gasto de gas producido, en millones de pie ³ /día.	Q	R/S	Q
9	Introducir el diámetro de la tubería de producción, plg.	d	R/S	d
10	Introducir la temperatura crítica del gas, °R.	T _c	R/S	T _c
11	Introducir la presión crítica del gas, psia.	p _c	R/S	p _c

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
12	Introducir el valor de la viscosidad del gas, en c.p. a la presión y temperatura medias.	μ	R/S	μ
13	Introducir el recíproco de la rugosidad relativa.	(d/ϵ)	R/S	(d/ϵ)
14	Introducir el número de intervalos considerados.	N	R/S	N
15	Ejecute el programa.		B	
16	El programa se detiene lea p_r			p_r
17	Continúe programa		R/S	
18	El programa se detiene lea T_r			T_r
19	Introduzca el valor de Z, leído de la gráfica (III.2).	Z	R/S	
20	Dependiendo del número de intervalos considerados, el programa va al paso 16 hasta que se ejecuta N veces. -- Cuando se da esta condición la pantalla se hace intermitente indicando que el programa finalizó y muestra el valor de la p_{ff} en psia.			
		NOTA. -		
				Si se desea calcular el valor de p_{ff} con más intervalos y los mismos datos, solamente cambie el valor del registro número 11 y ejecute.

LISTADO DE PROGRAMA "PRES"

CALCULADORA TI-59

000	76	LBL	043	71	SBR	086	95	=
001	11	A	044	75	-	087	55	÷
002	91	R/S	045	71	SBR	088	02	2
003	42	STD	046	65	x	089	95	=
004	00	00	047	43	RCL	090	42	STD
005	91	R/S	048	04	04	091	40	40
006	42	STD	049	42	STD	092	43	RCL
007	01	01	050	36	36	093	39	39
008	91	R/S	051	00	0	094	42	STD
009	42	STD	052	42	STD	095	38	38
010	02	02	053	21	21	096	43	RCL
011	91	R/S	054	42	STD	097	36	36
012	42	STD	055	37	37	098	55	÷
013	03	03	056	43	RCL	099	43	RCL
014	91	R/S	057	11	11	100	08	08
015	42	STD	058	32	X/T	101	95	=
016	04	04	059	25	CLR	102	91	R/S
017	91	R/S	060	43	RCL	103	43	RCL
018	42	STD	061	02	02	104	40	40
019	05	05	062	42	STD	105	55	÷
020	91	R/S	063	38	38	106	43	RCL
021	42	STD	064	25	CLR	107	07	07
022	06	06	065	43	RCL	108	95	=
023	91	R/S	066	37	37	109	91	R/S
024	42	STD	067	85	+	110	42	STD
025	07	07	068	43	RCL	111	13	13
026	91	R/S	069	16	16	112	71	SBR
027	42	STD	070	95	=	113	45	YX
028	08	08	071	42	STD	114	22	INV
029	91	R/S	072	37	37	115	23	LNx
030	42	STD	073	65	x	116	42	STD
031	09	09	074	43	RCL	117	42	42
032	91	R/S	075	17	17	118	75	-
033	42	STD	076	95	=	119	01	1
034	10	10	077	85	+	120	95	=
035	91	R/S	078	43	RCL	121	65	x
036	42	STD	079	02	02	122	43	RCL
037	11	11	080	95	=	123	05	05
038	91	R/S	081	42	STD	124	33	X ²
039	76	LBL	082	39	39	125	65	x
040	12	B	083	85	+	126	43	RCL
041	71	SBR	084	43	RCL	127	16	16
042	95	=	085	38	38	128	65	x

129	43	RCL	180	36	36	231	01	1
130	14	14	181	43	RCL	232	95	=
131	65	x	182	39	39	233	42	STD
132	43	RCL	183	42	STD	234	32	32
133	13	13	184	38	38	235	28	LOG
134	65	x	185	61	GTD	236	65	x
135	43	RCL	186	00	00	237	04	4
136	40	40	187	65	65	238	95	=
137	65	x	188	43	RCL	239	94	+/-
138	43	RCL	189	43	43	240	75	-
139	23	23	190	66	PAU	241	43	RCL
140	55	÷	191	66	PAU	242	31	31
141	53	(	192	66	PAU	243	34	FX
142	53	(	193	66	PAU	244	35	1/X
143	43	RCL	194	91	R/S	245	85	+
144	06	06	195	76	LBL	246	43	RCL
145	45	YX	196	95	=	247	27	27
146	05	5	197	71	SBR	248	85	+
147	54	)	198	85	+	249	53	(
148	65	x	199	43	RCL	250	43	RCL
149	43	RCL	200	28	28	251	10	10
150	41	41	201	32	XIT	252	28	LOG
151	54	)	202	43	RCL	253	65	x
152	95	=	203	10	10	254	04	4
153	85	+	204	28	LOG	255	54)
154	53	(	205	65	x	256	95	=
155	43	RCL	206	04	4	257	42	STD
156	42	42	207	85	+	258	33	33
157	65	x	208	43	RCL	259	43	RCL
158	43	RCL	209	27	27	260	32	32
159	36	36	210	95	=	261	55	÷
160	33	X²	211	33	X²	262	43	RCL
161	54	)	212	35	1/X	263	25	25
162	95	=	213	42	STD	264	95	=
163	34	FX	214	31	31	265	35	1/X
164	66	PAU	215	43	RCL	266	65	x
165	42	STD	216	26	26	267	53	(
166	43	43	217	65	x	268	53	(
167	43	RCL	218	43	RCL	269	43	RCL
168	21	21	219	10	10	270	26	26
169	85	+	220	55	÷	271	65	x
170	01	1	221	53	(	272	43	RCL
171	95	=	222	43	RCL	273	10	10
172	42	STD	223	15	15	274	54)
173	21	21	224	65	x	275	55	÷
174	67	EQ	225	43	RCL	276	53	(
175	01	01	226	31	31	277	53	(
176	88	88	227	34	FX	278	43	RCL
177	43	RCL	228	54	)	279	31	31
178	43	43	229	95	=	280	45	YX
179	42	STD	230	85	+	281	43	RCL

282	24	24
283	54)
284	65	X
285	43	RCL
286	15	15
287	54)
288	54)
289	95	=
290	85	+
291	53	(
292	53	(
293	43	RCL
294	31	31
295	45	YX
296	43	RCL
297	24	24
298	54)
299	65	X
300	02	2
301	54)
302	35	1/X
303	95	=
304	42	STD
305	34	34
306	55	÷
307	43	RCL
308	33	33
309	95	=
310	35	1/X
311	75	-
312	43	RCL
313	31	31
314	95	=
315	94	+/-
316	42	STD
317	35	35
318	66	PAU
319	75	-
320	43	RCL
321	31	31
322	95	=
323	50	I×I
324	77	GE
325	03	03
326	32	32
327	43	RCL
328	35	35
329	42	STD
330	14	14
331	92	RTN
332	43	RCL

333	35	35
334	61	GTD
335	02	02
336	13	13
337	76	LBL
338	75	-
339	53	(
340	53	(
341	43	RCL
342	03	03
343	75	-
344	43	RCL
345	02	02
346	54)
347	55	÷
348	43	RCL
349	01	01
350	95	=
351	42	STD
352	17	17
353	54)
354	92	RTN
355	76	LBL
356	65	X
357	53	(
358	43	RCL
359	01	01
360	55	÷
361	43	RCL
362	11	11
363	95	=
364	42	STD
365	16	16
366	54)
367	92	RTN
368	76	LBL
369	45	YX
370	53	(
371	02	2
372	65	X
373	43	RCL
374	00	00
375	65	X
376	43	RCL
377	16	16
378	55	÷
379	53	(
380	43	RCL
381	22	22
382	65	X
383	43	RCL

384	40	40
385	65	X
386	43	RCL
387	13	13
388	54)
389	54)
390	42	STD
391	41	41
392	92	RTN
393	76	LBL
394	85	+
395	53	(
396	53	(
397	53	(
398	43	RCL
399	29	29
400	65	X
401	43	RCL
402	00	00
403	65	X
404	43	RCL
405	05	05
406	54)
407	55	÷
408	53	(
409	43	RCL
410	09	09
411	65	X
412	43	RCL
413	06	06
414	54)
415	54)
416	42	STD
417	15	15
418	54)
419	92	RTN

ANEXO B-2

DESCRIPCION DEL PROGRAMA "PWF".

CALCULADORA HP-41 CV

Este programa determina la presión de fondo fluyendo de un pozo de gas utilizando el método propuesto por Cullender y Smith⁵. Los datos con que hay que alimentar este programa -- son los siguientes: la profundidad del horizonte productor, el gasto de gas producido, las propiedades del gas, tales -- como la viscosidad, S.G., temperatura y presión crítica; además la temperatura y la presión en la cabeza del pozo, bajo -- condiciones de flujo, y la temperatura del horizonte produc-- tor. También se requiere la rugosidad de la tubería de pro-- ducción y su diámetro interior.

Es necesario para cargar en la memoria de la máquina el programa "PWF", asignar previamente la función SIZE 050, para tener 50 registros de almacenamiento de datos.

El programa "PWF" consta de tres tarjetas magnéticas. -- Las subrutinas "IN", "FRIC" ; "ZETA" y "PW" se grabaron en -- tarjetas adicionales para poderlas utilizar independiente-- mente de ser necesario. Para grabar este programa en la memo-- ria de la calculadora, se recomienda el siguiente procedimien-- to :

- a) Ejecutar SIZE 050.
- b) Cargar programa "PWF". (tarjetas 1,2 y 3).
- c) Pulsar GØ TØ . .
- d) Leer subrutina "IN". (tarjeta 4 lado 1)
- e) Pulsar GØ TØ . .
- f) Leer subrutina "PW" (tarjeta 4 lado 2)
- g) Pulsar GØ TØ . .

- h) Leer subrutina "FRIC" (tarjeta 5 lado 1).
- i) Pulsar GØ TØ . .
- j) Leer subrutina "ZETA". (tarjeta 5 lado 2 y tarjeta 6).
- k) Pulsar GØ TØ . .
- l) Ejecutar programa.

Si la calculadora tiene conectado el impresor térmico HP los resultados son impresos en el siguiente orden:

PRESION DE CABEZA : $P_s =$ (PSIA)

PRESION EN LA MITAD
DEL INTERVALO : $P_m =$ (PSIA)

PRESION DE FONDO
FLUYENDO : $P_{wf} =$ (PSIA)

Instrucciones Para El Uso Del Programa "PWF".
Método de Cullender Y Smith³.

CALCULADORA HP-41 CV

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
1	Cargar programa "PWF"	6 Tarjetas con "PWF".		
2	Inicializar programa.	XEQ "PWF"		HOLA*PWF*HOLA INSERTE DATOS S.G. (ADIM) ?
3	Introduzca S.G. del gas.	S.G. (ADIM)	R/S	PROF. (FT) ?
4	Introduzca profundidad del intervalo productor	L (pies)	R/S	TEMP. SUPERF. (G. RANK.) ?
5	Temperatura en la cabeza del pozo	T _s (°R)	R/S	TEMP. FONDO (G.RANK.) ?
6	Presión en la cabeza del pozo (fluyendo)	p _s (psia)	R/S	GASTO (MMSCFD)
7	Gasto de gas producido en millones de pies cúbicos por día.	Q (MM pie ³ /d)	R/S	DIAM. (PLG.) ?
8	Diámetro de la tubería de producción.	d (plg.)	R/S	TEMP.CRITICA (G. RANK.) ?
9	Temperatura crítica del gas.	T _c (°R)	R/S	PRES. CRITICA (PSIA) ?
10	Presión crítica del gas.	p _c (psia)	R/S	RUG. REL. (D/ε)

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
11	Recíproco de la rugo - sidad relativa.	(D/ξ) (adim)	R/S	VISC. (C.P)
12	Viscosidad del gas. Para realizar un nuevo cálculo es necesario - ejecutar "PWF".	μ (c.p.)	R/S	----->-----

LISTADO DE PROGRAMA "PWF"

CALCULADORA HP-41 CV

01*LBL "PWF"	46 PRX	91 "INICIALIZA COND"
02 *HOLA *PWF* HOLA"	47 ADV	92 FIX 1
03 AVIEW	48 *GASTO <MNSCFD>?"	93 .001
04 PSE	49 PRA	94 STO 19
05 CLX	50 PROMPT	95 .0001
06 ADV	51 STO 05	96 STO 12
07 "INSERTE DATOS "	52 PRX	97 RCL 04
08 AVIEW	53 ADV	98 STO 16
09 PSE	54 *DIAM. < PLG > ?"	99 STO 35
10 CLX	55 PRA	100 RCL 02
11 ADV	56 PROMPT	101 STO 17
12 " S.G. <ADIN> ? "	57 STO 06	102 RCL 02
13 PRA	58 PRX	103 RCL 03
14 PROMPT	59 ADV	104 +
15 STO 00	60 *TEMP. CRITICA "	105 2
16 PRX	61 AVIEW	106 /
17 ADV	62 PSE	107 STO 34
18 *PROF. < FT > ?"	63 " < G. RANK. > ?"	108 XEQ "FRIC"
19 PRA	64 PRA	109 "CALC. F2"
20 PROMPT	65 PROMPT	110 RCL 05
21 STO 01	66 STO 07	111 *12
22 PRX	67 PRX	112 *
23 ADV	68 ADV	113 2.6665
24 *TEM. SUPERF. "	69 *PRES. CRITICA "	114 *
25 AVIEW	70 AVIEW	115 PCL 06
26 PSE	71 PSE	116 5
27 " < G. RANK. > ?"	72 " < PSIA > ?"	117 Y1X
28 PRA	73 PRA	118 /
29 PROMPT	74 PROMPT	119 STO 11
30 STO 02	75 STO 08	120*LBL 02
31 PRX	76 PRX	121 XEQ "ZETA"
32 ADV	77 ADV	122 XEQ "IN"
33 *TEMP. FONDO "	78 *RUG. REL. <D/E>"	123 STO 31
34 AVIEW	79 PRA	124 STO 32
35 PSE	80 PROMPT	125 XEQ "PW"
36 " < G. RANK. > ?"	81 STO 09	126 STO 16
37 PRA	82 PRX	127 PCL 34
38 PROMPT	83 *VISC. <C.F.> ? "	128 STO 17
39 STO 03	84 PRA	129*LBL 04
40 PRX	85 PROMPT	130 XEQ "ZETA"
41 ADV	86 STO 10	131 XEQ "IN"
42 *P. SUP. <PSIA>?"	87 PRX	132 STO 32
43 PRA	88 ADV	133 XEQ "PW"
44 PROMPT	89 ADV	134 STO 33
45 STO 04	90 ADV	135 RCL 15

136 -
137 ABS
138 1
139 X<=Y?
140 GTO 05
141 FS? 00
142 GTO 06
143 SF 00
144 SF 12
145 "PSF ="
146 ARCL 04
147 AVIEW
148 ADV
149 ADV
150 CLA
151 "PHF ="
152 ARCL 33
153 AVIEW
154 ADV
155 ADV
156 CLA
157 CLX
158 RCL 33
159 STO 04
160 STO 16
161 RCL 03
162 STO 34
163 RCL 31
164 STO 36
165 RCL 32
166 STO 37
167 GTO 02
168+LBL 05
169 RCL 33
170 STO 16
171 GTO 04
172+LBL 06
173 RCL 36
174 RCL 37
175 4
176 *
177 +
178 RCL 32
179 +
180 RCL 00
181 RCL 01
182 *
183 112.5
184 *
185 /
186 1/X
187 RCL 35
188 -

189 STO 38
190 "PHF ="
191 ARCL X
192 AVIEW
193 ADV
194 ADV
195 ADV
196 ADV
197 ADV
198 CF 00
199 CF 12
200 BEEP
201 BEEP
202 STOP
203 END

01+LBL "PW"
02 RCL 01
03 2
04 /
05 RCL 00
06 *
07 37.5
08 *
09 RCL 31
10 RCL 32
11 +
12 /
13 RCL 04
14 +
15 RTN
16 *
17 END

01+LBL "IN"
02 RCL 16
03 RCL 17
04 RCL 15
05 *
06 /
07 STO 21
08 X↑2
09 .001
10 *
11 RCL 11
12 +
13 RCL 21
14 /
15 1/X
16 RTN
17 END

01+LBL "FRIC"
02 "CALC. REYNOLDS"
03 RCL 05
04 RCL 00
05 *
06 20011
07 *
08 RCL 06
09 RCL 10
10 *
11 /
12 STO 30
13 "1a. APROX. DE F"
14 RCL 09
15 LOG
16 4
17 *
18 2.28
19 +
20 X↑2
21 1/X
22 STO 11
23+LBL 02
24 "CALC. A(F)"
25 SORT
26 RCL 30
27 *
28 RCL 09
29 4.67
30 *
31 /
32 1/X
33 1
34 +
35 STO 21
36 LOG
37 4
38 *
39 CHS
40 2.28
41 +
42 RCL 09
43 LOG
44 4
45 *
46 +
47 RCL 11
48 SORT
49 1/X
50 -
51 STO 20
52 "CALC. A(F)"
53 RCL 09

54 4.67
55 *
56 RCL 11
57 1.5
58 YTX
59 RCL 30
60 *
61 /
62 .8686
63 *
64 RCL 21
65 /
66 RCL 11
67 1.5
68 YTX
69 2
70 *
71 1/X
72 +
73 "CALC. F(N+1)"
74 RCL 20
75 /
76 1/X
77 CHS
78 RCL 11
79 +
80 STO 21
81 RCL 11
82 -
83 ABS
84 RCL 12
85 X<>Y
86 X<>Y?
87 STO 03
88 RCL 21
89 STO 11
90 RTH
91 *LBL 03
92 RCL 21
93 STO 11
94 STO 02
95 END

91 *LBL "ZETA"
92 RCL 16
93 RCL 08
94 /
95 STO 14
96 RCL 07
97 RCL 17
98 /

09 STO 13
10 1
11 -
12 X12
13 -1.2
14 *
15 ETX
16 RCL 13
17 *
18 -.0612
19 *
20 STO 23
21 RCL 13
22 14.76
23 *
24 RCL 13
25 X12
26 9.76
27 *
28 -
29 RCL 13
30 3
31 YTX
32 4.58
33 *
34 +
35 STO 24
36 RCL 13
37 90.7
38 *
39 RCL 13
40 X12
41 242.2
42 *
43 -
44 RCL 13
45 3
46 YTX
47 42.4
48 *
49 +
50 STO 25
51 RCL 13
52 2.82
53 *
54 2.18
55 +
56 STO 26
57 RCL 13
58 29.25
59 *
60 RCL 13
61 X12

62 19.52
63 *
64 -
65 RCL 13
66 3
67 YTX
68 9.1
69 *
70 +
71 STO 27
72 *LBL 02
73 RCL 19
74 3
75 YTX
76 STO 28
77 RCL 19
78 *
79 STO 29
80 CHS
81 RCL 28
82 +
83 RCL 19
84 X12
85 +
86 RCL 19
87 +
88 RCL 19
89 1
90 -
91 CHS
92 3
93 YTX
94 /
95 RCL 23
96 RCL 14
97 *
98 +
99 RCL 19
100 X12
101 RCL 24
102 *
103 -
104 RCL 19
105 RCL 26
106 YTX
107 RCL 25
108 *
109 +
110 STO 18
111 RCL 29
112 RCL 28
113 4
114 *

115 -
116 RCL 19
117 X12
118 4
119 *
120 +
121 RCL 19
122 4
123 *
124 +
125 1
126 +
127 RCL 19
128 1
129 -
130 CHS
131 4
132 Y1X
133 /
134 STO 20
135 RCL 13
136 2.82
137 *
138 1.18
139 +
140 STO 21
141 RCL 19
142 RCL 21
143 Y1X
144 RCL 25
145 *
146 RCL 26
147 *
148 RCL 20
149 -
150 CHS
151 STO 22
152 RCL 18
153 /
154 1/X
155 RCL 19
156 -
157 CHS
158 STO 20
159 RCL 19
160 -
161 ABS
162 RCL 12
163 X>Y?
164 GTD 03
165 RCL 20
166 STO 19
167 GTD 02

168 LBL 03
169 RCL 23
170 RCL 14
171 *
172 CHS
173 RCL 20
174 /
175 STO 15
176 RTN
177 .END.

Programa Para Calcular La Presión De Fondo Fluyendo
Método De Cullender Y Smith.⁵

CALCULADORA TI-59

Este programa determina la presión de fondo fluyendo de un pozo de gas, mediante el procedimiento propuesto por Cullender Y Smith⁵. Para la ejecución del programa es necesario disponer de los siguientes datos: presión de fondo fluyendo, gasto de gas producido a condiciones de superficie, temperaturas tanto en la cabeza del pozo como en el fondo, el S.G. del gas, la profundidad del horizonte productor, el diámetro de la tubería de producción y su rugosidad relativa.

El programa supone un gradiente lineal de temperaturas entre la de fondo y la de la cabeza del pozo. Cuando el programa se ejecuta, este se detiene imprimiendo las pseudo-condiciones reducidas, para que sea determinado el factor Z de la gráfica III.2 e introducido en el cálculo.

Si el impresor térmico no está conectado a la calculadora, el programa mostrará las pseudo condiciones en la pantalla así como el valor final de la presión calculado.

Este programa contiene 635 líneas de programación, por lo que se hace necesario modificar la partición de memoria inicial de la calculadora, asignando para ello la dimensión 639.39, antes de que sean leídas las tarjetas conteniendo el programa.

Instrucciones Para El Uso Del Programa "PWF".
Método De Cullender y Smith⁵.

CALCULADORA TI-59

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
1	Modifique partición	4	Op 17	639.39
2	Cargue programa en memoria.	2 tarjetas por lados 1,2 3 y 4.		0
3	Inicializar programa.		A	0
4	Introducir el S.G. del gas.	S.G.	R/S	S.G.
5	Introducir la profundidad del horizonte - productor	L (pies)	R/S	L
6	Introducir la temperatura superficial.	T _s (°R)	R/S	T _s
7	Introducir la temperatura de fondo.	T _f (°R)	R/S	T _f
8	Introducir la presión en la cabeza.	p _s (psia)	R/S	p _s
9	Introducir el gasto de gas producido.	Q (Millones de pies cúbicos/día.)	R/S	Q
10	Introducir el diámetro de la tubería de producción.	d (plg.)	R/S	d
11	Introducir la temperatura crítica del gas.	T _c (°R)	R/S	T _c

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
12	Introducir la presión crítica del gas.	P_c (°R)	R/S	P_c
13	Introducir el recíproco de la rugosidad relativa.	(D/ϵ) (adim)	R/S	(D/ϵ)
14	Introducir viscosidad media del gas.	μ (cp)	R/S	μ
15	Ejecutar programa.		B	-
16	Cuando se interrumpa el programa, introducir Z_i con p_r y T_r calculados.	Z_i	R/S	-
17	Repetir paso 16 hasta final.			

LISTADO DE PROGRAMA "PWF"

CALCULADORA TI-59

000	76	LBL	043	01	01	086	00	00
001	11	A	044	69	DP	087	98	ADV
002	43	RCL	045	02	02	088	43	RCL
003	13	13	046	43	RCL	089	09	09
004	69	DP	047	18	18	090	69	DP
005	01	01	048	69	DP	091	02	02
006	43	RCL	049	03	03	092	43	RCL
007	14	14	050	69	DP	093	18	18
008	69	DP	051	05	05	094	69	DP
009	02	02	052	43	RCL	095	03	03
010	43	RCL	053	06	06	096	69	DP
011	02	02	054	69	DP	097	05	05
012	69	DP	055	04	04	098	43	RCL
013	03	03	056	25	CLR	099	08	08
014	43	RCL	057	91	R/S	100	69	DP
015	03	03	058	42	STD	101	04	04
016	69	DP	059	01	01	102	25	CLR
017	04	04	060	69	DP	103	91	R/S
018	69	DP	061	06	06	104	42	STD
019	05	05	062	69	DP	105	03	03
020	69	DP	063	00	00	106	69	DP
021	00	00	064	98	ADV	107	06	06
022	98	ADV	065	43	RCL	108	69	DP
023	98	ADV	066	07	07	109	00	00
024	43	RCL	067	69	DP	110	98	ADV
025	00	00	068	02	02	111	43	RCL
026	69	DP	069	43	RCL	112	10	10
027	02	02	070	18	18	113	69	DP
028	43	RCL	071	69	DP	114	02	02
029	18	18	072	03	03	115	43	RCL
030	69	DP	073	69	DP	116	18	18
031	03	03	074	05	05	117	69	DP
032	69	DP	075	43	RCL	118	03	03
033	05	05	076	08	08	119	69	DP
034	69	DP	077	69	DP	120	05	05
035	00	00	078	04	04	121	43	RCL
036	25	CLR	079	25	CLR	122	16	16
037	91	R/S	080	91	R/S	123	69	DP
038	42	STD	081	42	STD	124	04	04
039	00	00	082	02	02	125	25	CLR
040	99	FRT	083	69	DP	126	91	R/S
041	98	ADV	084	06	06	127	42	STD
042	43	RCL	085	69	DP	128	04	04

129	69	DP	180	43	RCL	231	18	18
130	06	06	181	21	21	232	69	DP
131	69	DP	182	69	DP	233	03	03
132	00	00	183	02	02	234	69	DP
133	98	ADV	184	43	RCL	235	05	05
134	43	RCL	185	18	18	236	25	CLR
135	19	19	186	69	DP	237	91	R/S
136	69	DP	187	03	03	238	42	STD
137	02	02	188	69	DP	239	09	09
138	43	RCL	189	05	05	240	99	PRT
139	18	18	190	43	RCL	241	69	DP
140	69	DP	191	08	08	242	00	00
141	03	03	192	69	DP	243	98	ADV
142	69	DP	193	04	04	244	43	RCL
143	05	05	194	25	CLR	245	24	24
144	43	RCL	195	91	R/S	246	69	DP
145	05	05	196	42	STD	247	02	02
146	69	DP	197	07	07	248	43	RCL
147	04	04	198	69	DP	249	18	18
148	25	CLR	199	06	06	250	69	DP
149	91	R/S	200	69	DP	251	03	03
150	42	STD	201	00	00	252	69	DP
151	05	05	202	98	ADV	253	05	05
152	69	DP	203	43	RCL	254	43	RCL
153	06	06	204	22	22	255	25	25
154	69	DP	205	69	DP	256	69	DP
155	00	00	206	02	02	257	04	04
156	98	ADV	207	43	RCL	258	25	CLR
157	43	RCL	208	18	18	259	91	R/S
158	20	20	209	69	DP	260	42	STD
159	69	DP	210	03	03	261	10	10
160	02	02	211	69	DP	262	69	DP
161	43	RCL	212	05	05	263	06	06
162	18	18	213	43	RCL	264	69	DP
163	69	DP	214	16	16	265	00	00
164	03	03	215	69	DP	266	98	ADV
165	69	DP	216	04	04	267	98	ADV
166	05	05	217	25	CLR	268	98	ADV
167	43	RCL	218	91	R/S	269	98	ADV
168	26	26	219	42	STD	270	98	ADV
169	69	DP	220	08	08	271	91	R/S
170	04	04	221	69	DP	272	76	LBL
171	25	CLR	222	06	06	273	12	B
172	91	R/S	223	69	DP	274	71	SBR
173	42	STD	224	00	00	275	95	=
174	06	06	225	98	ADV	276	43	RCL
175	69	DP	226	43	RCL	277	00	00
176	06	06	227	23	23	278	65	X
177	69	DP	228	69	DP	279	43	RCL
178	00	00	229	02	02	280	33	33
179	98	ADV	230	43	RCL	281	65	X

282 43 RCL
283 01 01
284 55 ÷
285 02 2
286 95 =
287 42 STO
288 00 00
289 43 RCL
290 03 03
291 75 -
292 43 RCL
293 02 02
294 95 =
295 55 ÷
296 02 2
297 95 =
298 42 STO
299 34 34
300 43 RCL
301 02 02
302 42 STO
303 20 20
304 43 RCL
305 04 04
306 42 STO
307 19 19
308 42 STO
309 32 32
310 00 0
311 42 STO
312 31 31
313 42 STO
314 09 09
315 01 1
316 32 X!T
317 71 SBR
318 55 ÷
319 71 SBR
320 85 +
321 43 RCL
322 31 31
323 85 +
324 01 1
325 95 =
326 42 STO
327 31 31
328 67 EQ
329 13 C
330 71 SBR
331 45 YX
332 42 STO

333 25 25
334 75 -
335 43 RCL
336 32 32
337 95 =
338 50 I×I
339 22 INV
340 77 GE
341 14 D
342 43 RCL
343 25 25
344 42 STO
345 32 32
346 61 GTD
347 03 03
348 17 17
349 76 LBL
350 13 C
351 43 RCL
352 24 24
353 42 STO
354 23 23
355 71 SBR
356 45 YX
357 42 STO
358 32 32
359 43 RCL
360 20 20
361 85 +
362 43 RCL
363 34 34
364 95 =
365 42 STO
366 20 20
367 71 SBR
368 55 ÷
369 71 SBR
370 85 +
371 61 GTD
372 03 03
373 30 30
374 76 LBL
375 14 D
376 43 RCL
377 09 09
378 85 +
379 01 1
380 95 =
381 42 STO
382 09 09
383 98 ADV

384 22 INV
385 67 EQ
386 15 E
387 43 RCL
388 25 25
389 42 STO
390 32 32
391 42 STO
392 19 19
393 00 0
394 42 STO
395 31 31
396 61 GTD
397 03 03
398 21 21
399 76 LBL
400 15 E
401 98 ADV
402 98 ADV
403 69 DP
404 00 00
405 43 RCL
406 27 27
407 69 DP
408 02 02
409 69 DP
410 05 05
411 69 DP
412 00 00
413 43 RCL
414 16 16
415 69 DP
416 04 04
417 43 RCL
418 04 04
419 69 DP
420 06 06
421 98 ADV
422 69 DP
423 00 00
424 43 RCL
425 28 28
426 69 DP
427 02 02
428 69 DP
429 05 05
430 69 DP
431 00 00
432 43 RCL
433 16 16
434 69 DP

435	04	04
436	43	RCL
437	19	19
438	69	DP
439	06	06
440	69	DP
441	00	00
442	98	ADV
443	98	ADV
444	43	RCL
445	17	17
446	69	DP
447	02	02
448	69	DP
449	05	05
450	69	DP
451	00	00
452	43	RCL
453	16	16
454	69	DP
455	04	04
456	43	RCL
457	25	25
458	69	DP
459	06	06
460	98	ADV
461	98	ADV
462	98	ADV
463	91	R/S
464	76	LBL
465	55	÷
466	43	RCL
467	29	29
468	69	DP
469	01	01
470	69	DP
471	05	05
472	43	RCL
473	32	32
474	55	÷
475	43	RCL
476	08	08
477	95	=
478	69	DP
479	06	06
480	43	RCL
481	30	30
482	69	DP
483	01	01
484	69	DP
485	05	05

486	43	RCL
487	20	20
488	55	÷
489	43	RCL
490	07	07
491	95	=
492	69	DP
493	06	06
494	43	RCL
495	13	13
496	69	DP
497	01	01
498	43	RCL
499	14	14
500	69	DP
501	02	02
502	43	RCL
503	15	15
504	69	DP
505	03	03
506	69	DP
507	05	05
508	69	DP
509	00	00
510	25	CLR
511	98	ADV
512	91	R/S
513	42	STD
514	22	22
515	99	PRT
516	98	ADV
517	92	RTN
518	76	LBL
519	45	YX
520	43	RCL
521	00	00
522	55	÷
523	53	(
524	43	RCL
525	23	23
526	85	+
527	43	RCL
528	24	24
529	54)
530	95	=
531	85	+
532	43	RCL
533	19	19
534	95	=
535	92	RTN
536	76	LBL

537	65	+
538	43	RCL
539	32	32
540	55	÷
541	53	(
542	43	RCL
543	20	20
544	65	x
545	43	RCL
546	22	22
547	54)
548	95	=
549	42	STD
550	25	25
551	55	÷
552	53	(
553	43	RCL
554	21	21
555	85	+
556	53	(
557	43	RCL
558	25	25
559	33	X²
560	65	x
561	43	RCL
562	11	11
563	54)
564	54)
565	95	=
566	42	STD
567	24	24
568	92	RTN
569	76	LBL
570	95	=
571	43	RCL
572	39	39
573	65	x
574	43	RCL
575	00	00
576	65	x
577	43	RCL
578	05	05
579	55	÷
580	53	(
581	43	RCL
582	10	10
583	65	x
584	43	RCL
585	06	06
586	54)
587	95	=

588	45	YX
589	43	RCL
590	37	37
591	95	=
592	55	=
593	43	RCL
594	36	36
595	95	=
596	35	1/X
597	85	+
598	53	(
599	43	RCL
600	35	35
601	65	x
602	43	RCL
603	09	09
604	54)
605	35	1/X
606	95	=
607	28	LOG
608	65	x
609	02	2
610	94	+/-
611	95	=
612	35	1/X
613	33	X ²
614	65	x
615	43	RCL
616	05	05
617	33	X ²
618	65	x
619	43	RCL
620	38	38
621	55	÷
622	53	(
623	53	(
624	43	RCL
625	06	06
626	45	YX
627	05	5
628	54)
629	65	x
630	04	4
631	54)
632	95	=
633	42	STD
634	21	21
635	92	RTN

Registros utilizados en el programa "PWF".

36402240.	00
3335322140.	01
1300161337.	02
3236000000.	03
0.	04
3030152116.	05
21403700.	06
3740364133.	07
65350000.	08
3740213231.	09
3340364133.	10
0.001.	11
0.0001	12
24313735.	13
3216413615.	14
1300466471.	15
33362413.	16
33432164.	17
64000071.	18
2213363732.	19
1624133040.	20
3740153524.	21
3340153524.	22
5516637356.	23
4224361540.	24
15403300.	25
33272200.	26
33403664.	27
33403064.	28
333564.	29
373564.	30
0.	31
0.	32
37.5	33
0.	34
3.7	35
5.2016	36
0.89	37
2.6665	38
20011.	39

ANEXO B-3

DESCRIPCION DEL PROGRAMA "PFON".

CALCULADORA HP-41 CV

Este programa es útil para la determinación de las caídas de presión en tuberías verticales, cuando fluye gas natural - cuya presión reducida es mayor que 10. Se utiliza el método propuesto por Messer, Raghavan y Ramey Jr.⁷, el cual utiliza la técnica de aproximaciones sucesivas para resolver la integración que se presenta en la ecuación de flujo (ec. 9)

Los datos necesarios para la utilización de este programa son los siguientes: Gasto de gas producido, presión en la cabeza (fluyendo) del pozo, temperatura medida tanto en el fondo como en la cabeza del pozo, la viscosidad del gas medida a presión y temperatura promedio, el valor de la presión y temperatura crítica del gas. Además se requieren datos sobre el pozo, tales como, profundidad del intervalo productor, diámetro y rugosidad relativa de la tubería de producción.

Es necesario conectar a la calculadora el impresor térmico para obtener los resultados impresos.

Se deben de tener 50 registros de almacenamiento de datos disponibles para la utilización de este programa.

Instrucciones Para El Uso Del Programa "PFON".
Método De Messer, Raghavan Y Ramey⁷.

CALCULADORA HP-41 CV

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
1	Cargar programa "PFON"	6 tarjetas con "PFON".		
2	Inicializar programa.	XEQ "PFON"	R/S	INSERTE DATOS S.G. (ADIM) ?
3	Introducir S.G. del gas.	S.G.	R/S	PROF. (FT) ?
4	Introducir la profundidad del horizonte productor.	L (pies)	R/S	TEMP. SUP. (G. RANK.) ?
5	Temperatura en la cabeza del pozo.	T_s (°R).	R/S	TEMP. FONDO (G.RANK.) ?
6	Temperatura del fondo del pozo.	T_f (°R)	R/S	PRES. SUP. (PSIA) ?
7	Introducir la presión en la cabeza del pozo.	p_s (psia)	R/S	GASTO (MSCFD)
8	Introducir el gasto de gas producido.	Q (Millones de pies cúbicos/ día.).	R/S	DIAM. (PLG) ?
9	Diámetro de la tubería de producción.	d (plg.)	R/S	TEMP. CRITICA (G. RANK.) ?
10	Temperatura crítica del gas.	T_c (°R)	R/S	PRES. CRITICA (G. RANK.) ?

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
11	Presión crítica del gas producido.	p_c (psia)	R/S	RUG.REL. (D/ε)?
12	Introducir el recíproco de la rugosidad relativa de la tubería de producción.	(D/ε) (adim)	R/S	VISC. (C.P.) ?
13	Introducir la viscosidad del gas medida a las condiciones de p y T medias.	μ (c.p.)	R/S	---->---
	Para realizar otro cálculo es necesario repetir los pasos del 2 al 13.			

LISTADO DE PROGRAMA "PFON"

CALCULADORA HP-41 CV

01*LBL "PFON"	46 PROMPT	91 ADV
02 *PROGRAMA PARA*	47 STO 18	92 *VISC. <C.P.> ? "
03 *EL CALCULO DE*	48 PRX	93 PRA
04 *LA PRESION DE*	49 ADV	94 PROMPT
05 *FONDO FLUYENDO"	50 *P. SUP. <PSIA>?"	95 STO 25
06 " "	51 PRA	96 PRX
07 " "	52 PROMPT	97 ADV
08 *MESSER, RANEY	53 STO 19	98 ADV
09 " "	54 PRX	99 ADV
10 *AGOSTO 1982"	55 ADV	100 *RESULTADOS :"
11 " "	56 *GASTO <MNSCFD>?"	101 PRA
12 " "	57 PRA	102 ADV
13 *INICIO"	58 PROMPT	103 ADV
14 CLA	59 STO 20	104 *COND. INIT."
15 ADV	60 PRX	105 .2
16 *INSERTE DATOS "	61 ADV	106 STO 08
17 AVIEW	62 *DIAM. < PLG > ?"	107 .0001
18 PSE	63 PRA	108 STO 11
19 ADV	64 PROMPT	109 20
20 * S.G. <ADIK> ? "	65 STO 21	110 STO 26
21 PRA	66 PRX	111 *CALCULA F'
22 PROMPT	67 ADV	112 RCL 20
23 STO 15	68 *TEMP. CRITICA "	113 RCL 15
24 PRX	69 AVIEW	114 *
25 ADV	70 PSE	115 20011
26 *PROF. < FT > ?"	71 * < G. RANK. > ?"	116 *
27 PRA	72 PRA	117 RCL 25
28 PROMPT	73 PROMPT	118 RCL 21
29 STO 16	74 STO 22	119 *
30 PRX	75 PRX	120 /
31 ADV	76 ADV	121 STO 70
32 *TEK. SUPERF. "	77 *PRES. CRITICA "	122 RCL 24
33 AVIEW	78 AVIEW	123 LOG
34 PSE	79 PSE	124 4
35 * < G. RANK. > ?"	80 * < PSIA > ?"	125 *
36 PRA	81 PRA	126 2.28
37 PROMPT	82 PROMPT	127 +
38 STO 17	83 STO 23	128 X12
39 PRX	84 PRX	129 1/Y
40 ADV	85 ADV	130 STO 12
41 *TEMP. FONDO "	86 *RUG. REL. <D/E>"	131*LBL 05
42 AVIEW	87 PRA	132 SORT
43 PSE	88 PROMPT	133 RCL 30
44 * < G. RANK. > ?"	89 STO 24	134 *
45 PRA	90 PRX	135 RCL 24

136 4.67
137 *
138 /
139 1/X
140 1
141 +
142 STO 31
143 LOG
144 4
145 *
146 CHS
147 2.28
148 +
149 RCL 24
150 LOG
151 4
152 *
153 +
154 RCL 12
155 SQRT
156 1/X
157 -
158 STO 32
159 RCL 24
160 4.67
161 *
162 RCL 12
163 1.5
164 Y↑X
165 RCL 36
166 *
167 /
168 .8686
169 *
170 RCL 31
171 /
172 RCL 12
173 1.5
174 Y↑X
175 2
176 *
177 1/X
178 +
179 RCL 32
180 /
181 1/X
182 CHS
183 RCL 12
184 +
185 STO 31
186 RCL 12
187 -
188 ABS

189 RCL 11
190 X<>Y
191 X↑Y?
192 GT0 06
193 RCL 31
194 STO 12
195 GT0 07
196+LBL 06
197 RCL 31
198 STO 12
199 GT0 05
200+LBL 07
201 "CALCULA TEMP"
202 RCL 17
203 RCL 18
204 +
205 2
206 /
207 STO 13
208 "CALCULA B"
209 X↑2
210 RCL 38
211 X↑2
212 *
213 RCL 12
214 *
215 667
216 *
217 RCL 23
218 X↑2
219 RCL 21
220 5
221 Y↑X
222 *
223 /
224 STO 00
225 "CALCULA CONST."
226 RCL 15
227 RCL 16
228 *
229 .01875
230 *
231 RCL 13
232 /
233 STO 14
234 "CALCULA TR"
235 RCL 13
236 RCL 22
237 /
238 STO 27
239 "OP, MAY?"
240 RCL 26
241 RCL 00

242 X↑Y?
243 GT0 10
244 " E "
245 RCL 00
246 -.00262
247 *
248 STO 03
249 .18011
250 +
251 RCL 27
252 X↑2
253 *
254 RCL 00
255 -.01517
256 *
257 1.21216
258 +
259 RCL 27
260 *
261 -
262 RCL 00
263 -.00552
264 *
265 .28026
266 +
267 -
268 STO 04
269 " F "
270 RCL 00
271 -.00043
272 *
273 .02246
274 +
275 RCL 27
276 X↑2
277 *
278 -.00226
279 RCL 00
280 *
281 .12792
282 +
283 RCL 27
284 *
285 -
286 RCL 00
287 -.00274
288 *
289 .21463
290 +
291 +
292 STO 05
293 " G "
294 RCL 03

295 .17584
296 -
297 RCL 27
298 X12
299 *
300 CHS
301 RCL 00
302 -.01474
303 *
304 1.08235
305 +
306 RCL 27
307 *
308 +
309 RCL 00
310 -.00771
311 *
312 .81075
313 +
314 -
315 STO 00
316 GTD 20
317+LBL 10
318 TONE 1
319 " H "
320 -.00155-
321 RCL 00
322 *
323 .297336
324 +
325 RCL 27
326 X12
327 *
328 RCL 00
329 .009678
330 *
331 1.664290
332 -
333 RCL 27
334 *
335 +
336 RCL 00
337 .001963
338 *
339 .429648
340 -
341 -
342 STO 04
343 " I "
344 RCL 00
345 -.000171
346 *
347 .019112

348 +
349 RCL 08
350 LN
351 RCL 06
352 *
353 +
354 RCL 07
355 -
356 STO 09
357 RCL 06
358 RCL 08
359 /
360 RCL 05
361 +
362 RCL 09
363 /
364 1/X
365 RCL 08
366 -
367 CHS
368 STO 10
369 RCL 08
370 -
371 ABS
372 RCL 11
373 X<>Y
374 X<=Y?
375 GTD 02
376 RCL 10
377 STO 08
378 PSE
379 TONE 8
380 GTD 01
381+LBL 02
382 RCL 10
383 RCL 23
384 *
385 STO 28
386 "PNF=" "
387 ACA
388 RCL 28
389 ACX
390 " PSIA"
391 ACA
392 ADV
393 ADV
394 ADV
395 " GRACIAS"
396 PRA
397 ADV
398 ADV
399 ADV
400 ADV

348 +
349 RCL 27
350 X12
351 *
352 .000941
353 RCL 00
354 *
355 .107041
356 -
357 RCL 27
358 *
359 STO 03
360 +
361 RCL 00
362 .001259
363 *
364 .188162
365 -
366 -
367 STO 05
368 " J "
369 RCL 00
370 .001435
371 *
372 .212136
373 -
374 RCL 27
375 X12
376 *
377 RCL 05
378 +
379 RCL 00
380 .006320
381 *
382 1.00389
383 -
384 +
385 STO 06
386+LBL 20
387 "CALCULA PR"
388 RCL 19
389 RCL 23
390 /
391 STO 02
392 "CALCULA LA INTG"
393 LN
394 RCL 06
395 *
396 RCL 05
397 RCL 02
398 *
399 +
400 RCL 04

401 +
402 STO 01
403 RCL 14
404 +
405 STO 07
406*LBL 01
407 RCL 04
408 RCL 08
409 RCL 05
410 *
411 +
412 RCL 08
413 LN
414 RCL 08
415 *
416 +
417 RCL 07
418 -
419 STO 09
420 RCL 06
421 RCL 08
422 /
423 RCL 05
424 +
425 RCL 09
426 /
427 1/1
428 RCL 08
429 -
430 CHS
431 STO 10
432 RCL 08
433 -
434 ABS
435 RCL 11
436 X<>Y
437 X<=Y?
438 GTO 02
439 RCL 10
440 STO 08
441 PSE
442 TONE 8
443 GTO 01
444*LBL 02
445 RCL 10
446 RCL 23
447 *
448 STO 28
449 "PMF=" *
450 ACP
451 RCL 28
452 ACX
453 " PSIA"

454 ACP
455 ADV
456 ADV
457 ADV
458 " GRACIAS"
459 PRA
460 ADV
461 ADV
462 ADV
463 ADV
464 ADV
465 ADV
466 STOP
467 .END.

Programa Para La Determinación De La Presión De Fondo Fluyendo Para Pozos De Alta Presión. Método De Messer, Raghavan Y Ramey⁷.

CALCULADORA TI-59

Este programa determina la presión de fondo fluyendo en un pozo de gas, cuya presión reducida es mayor a 10. La técnica empleada es la propuesta por Messer, Raghavan y Ramey⁷.

Los datos necesarios para alimentar el programa son los siguientes: El gasto de gas producido, la profundidad del -- horizonte productor, la temperatura y presión crítica, la -- temperatura y la presión medidas en la cabeza del pozo, bajo condiciones de flujo, el diámetro interno de la tubería de -- producción y su rugosidad relativa, el S.G. del gas y su viscosidad medida a condiciones promedio de presión y temperatura.

No se hace necesaria la modificación de la partición inicial de la memoria de la máquina ni el uso del impresor térmico en la utilización de este programa.

Instrucciones Para El Uso Del Programa "PFON".
Método De Messer, Raghavan Y Ramey Jr.⁷

CALCULADORA TI-59

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
1	Cargar programa - " PFON ".	2 Tarjetas - conteniendo - " PFON ".		0
2	Inicializar programa.		A	0
3	Introduzca S.G. del gas.	S.G. (adim.)	R/S	S.G.
4	Introduzca profundidad del horizonte produc- tor.	L (pies).	R/S	L
5	Introduzca temperatura medida en la cabeza - del pozo.	T_s (°R)	R/S	T_s
6	Introduzca Temperatura del horizonte produc- tor.	T_f (°R)	R/S	T_f
7	Introduzca presión en la cabeza del pozo.	P_s (psia)	R/S	P_s
8	Introduzca el gasto de gas producido.	Q (Millones de pies cú- bicos/día.)	R/S	Q
9	Introduzca diámetro de la tubería de pro- ducción.	d (plg.)	R/S	d
10	Introduzca temperatura crítica del gas.	T_c (°R)	R/S	T_c

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
11	Introduzca la presión crítica del gas.	P_c (psia)	R/S	P_c
12	Introduzca el recíproco de la rugosidad relativa.	(D/ϵ) (adim)	R/S	(D/ϵ)
13	Introduzca viscosidad del gas, medida a p y T promedio.	μ (c.p)	R/S	μ
14	Ejecute el programa.		B	---

LISTADO DE PROGRAMA "PFON"

CALCULADORA TI-59

000	76	LBL	043	43	RCL	086	85	+
001	11	A	044	52	52	087	53	(
002	91	R/S	045	95	=	088	43	RCL
003	42	STD	046	55	÷	089	42	42
004	49	49	047	02	2	090	65	x
005	91	R/S	048	95	=	091	43	RCL
006	42	STD	049	42	STD	092	45	45
007	50	50	050	58	58	093	54)
008	91	R/S	051	55	÷	094	85	.
009	42	STD	052	43	RCL	095	53	(
010	51	51	053	56	56	096	43	RCL
011	91	R/S	054	95	=	097	42	42
012	42	STD	055	42	STD	098	23	LNx
013	52	52	056	41	41	099	65	x
014	91	R/S	057	43	RCL	100	43	RCL
015	42	STD	058	53	53	101	46	46
016	53	53	059	55	÷	102	54)
017	91	R/S	060	43	RCL	103	95	=
018	42	STD	061	57	57	104	85	+
019	54	54	062	95	=	105	43	RCL
020	91	R/S	063	42	STD	106	59	59
021	42	STD	064	42	42	107	75	-
022	55	55	065	71	SBR	108	43	RCL
023	91	R/S	066	85	+	109	44	44
024	42	STD	067	71	SBR	110	95	=
025	56	56	068	65	x	111	42	STD
026	91	R/S	069	02	2	112	47	47
027	42	STD	070	00	0	113	93	.
028	57	57	071	32	X↑T	114	02	2
029	91	R/S	072	43	RCL	115	42	STD
030	42	STD	073	40	40	116	42	42
031	58	58	074	77	GE	117	76	LBL
032	91	R/S	075	19	D°	118	16	A°
033	42	STD	076	61	GTD	119	43	RCL
034	59	59	077	10	E°	120	47	47
035	91	R/S	078	76	LBL	121	75	-
036	76	LBL	079	18	C°	122	53	(
037	12	B	080	43	RCL	123	43	RCL
038	71	SBR	081	38	38	124	46	46
039	95	=	082	32	X↑T	125	65	x
040	43	RCL	083	25	CLR	126	43	RCL
041	51	51	084	43	RCL	127	42	42
042	85	+	085	44	44	128	23	LNx

129	54	)	180	92	RTN	231	43	RCL
130	95	=	181	76	LBL	232	43	43
131	55	÷	182	95	=	233	65	X
132	43	RCL	183	43	RCL	234	43	RCL
133	45	45	184	34	34	235	33	33
134	95	=	185	65	X	236	65	X
135	42	STD	186	43	RCL	237	43	RCL
136	48	48	187	54	54	238	54	54
137	75	-	188	65	X	239	33	X ²
138	43	RCL	189	43	RCL	240	65	X
139	42	42	190	49	49	241	43	RCL
140	95	=	191	55	÷	242	58	58
141	50	I×I	192	53	(	243	33	X ²
142	22	INV	193	43	RCL	244	55	÷
143	77	GE	194	59	59	245	53	(
144	17	B'	195	65	X	246	53	(
145	43	RCL	196	43	RCL	247	43	RCL
146	48	48	197	55	55	248	55	55
147	42	STD	198	54	)	249	45	YX
148	42	42	199	95	=	250	05	5
149	66	PAU	200	45	YX	251	54)
150	61	GTO	201	43	RCL	252	65	X
151	16	A'	202	36	36	253	43	RCL
152	76	LBL	203	95	=	254	57	57
153	17	B'	204	55	÷	255	33	X ²
154	43	RCL	205	43	RCL	256	54)
155	48	48	206	35	35	257	95	=
156	65	X	207	95	=	258	42	STD
157	43	RCL	208	35	1/X	259	40	40
158	57	57	209	85	+	260	92	RTN
159	95	=	210	53	(	261	76	LBL
160	66	PAU	211	43	RCL	262	10	E'
161	66	PAU	212	37	37	263	43	RCL
162	66	PAU	213	65	X	264	00	00
163	91	R/S	214	43	RCL	265	65	X
164	76	LBL	215	58	58	266	43	RCL
165	65	X	216	54	)	267	40	40
166	43	RCL	217	35	1/X	268	95	=
167	39	39	218	95	=	269	42	STD
168	65	X	219	28	LDG	270	47	47
169	43	RCL	220	65	X	271	85	+
170	49	49	221	02	2	272	43	RCL
171	65	X	222	95	=	273	01	01
172	43	RCL	223	94	+/-	274	95	=
173	50	50	224	35	1/X	275	65	X
174	55	÷	225	33	X ²	276	43	RCL
175	43	RCL	226	42	STD	277	41	41
176	58	58	227	43	43	278	33	X ²
177	95	=	228	92	RTN	279	42	STD
178	42	STD	229	76	LBL	280	48	48
179	59	59	230	85	+	281	75	-

282	53	(	333	09	09	384	65	x
283	53	(	334	54	)	385	43	RCL
284	43	RCL	335	65	x	386	40	40
285	02	02	336	43	RCL	387	85	+
286	65	x	337	41	41	388	43	RCL
287	43	RCL	338	54	)	389	16	16
288	40	40	339	85	+	390	54)
289	85	+	340	53	(	391	95	=
290	43	RCL	341	43	RCL	392	42	STD
291	03	03	342	10	10	393	46	46
292	54	)	343	65	x	394	61	GTD
293	65	x	344	43	RCL	395	18	C'
294	43	RCL	345	40	40	396	76	LBL
295	41	41	346	85	+	397	19	D'
296	54	)	347	43	RCL	398	43	RCL
297	75	-	348	11	11	399	17	17
298	53	(	349	54	)	400	65	x
299	43	RCL	350	95	=	401	43	RCL
300	04	04	351	42	STD	402	40	40
301	65	x	352	45	45	403	85	+
302	43	RCL	353	43	RCL	404	43	RCL
303	40	40	354	47	47	405	18	18
304	85	+	355	85	+	406	95	=
305	43	RCL	356	43	RCL	407	65	x
306	05	05	357	12	12	408	43	RCL
307	54	)	358	95	=	409	41	41
308	95	=	359	65	x	410	33	X ²
309	42	STD	360	43	RCL	411	42	STD
310	44	44	361	48	48	412	48	48
311	43	RCL	362	95	=	413	95	=
312	06	06	363	94	+/-	414	85	+
313	65	x	364	85	+	415	53	(
314	43	RCL	365	53	(	416	53	(
315	40	40	366	53	(	417	43	RCL
316	85	+	367	43	RCL	418	19	19
317	43	RCL	368	13	13	419	65	x
318	07	07	369	65	x	420	43	RCL
319	95	=	370	43	RCL	421	40	40
320	65	x	371	40	40	422	75	-
321	43	RCL	372	85	+	423	43	RCL
322	48	48	373	43	RCL	424	20	20
323	75	-	374	14	14	425	54)
324	53	(	375	54	)	426	65	x
325	53	(	376	65	x	427	43	RCL
326	43	RCL	377	43	RCL	428	41	41
327	08	08	378	41	41	429	54)
328	65	x	379	54	)	430	75	-
329	43	RCL	380	75	-	431	53	(
330	40	40	381	53	(	432	43	RCL
331	85	+	382	43	RCL	433	21	21
332	43	RCL	383	15	15	434	65	x

435	43	RCL
436	40	40
437	75	-
438	43	RCL
439	22	22
440	54)
441	95	=
442	42	STD
443	44	44
444	43	RCL
445	23	23
446	65	X
447	43	RCL
448	40	40
449	85	+
450	43	RCL
451	24	24
452	95	=
453	65	X
454	43	RCL
455	48	48
456	95	=
457	85	+
458	53	(
459	53	(
460	43	RCL
461	25	25
462	65	X
463	43	RCL
464	40	40
465	75	-
466	43	RCL
467	26	26
468	54)
469	65	X
470	43	RCL
471	41	41
472	54)
473	42	STD
474	00	00

Registros utilizados en el programa "PFON".

-0.00262	00
0.18011	01
-0.01517	02
1.21216	03
-0.00552	04
0.28026	05
-0.00043	06
0.02246	07
-0.00226	08
0.12792	09
-0.00274	10
0.21463	11
0.17584	12
-0.01474	13
1.08235	14
-0.00771	15
0.81075	16
-0.001594	17
0.297336	18
0.009678	19
1.66429	20
0.001963	21
0.429648	22
-0.000171	23
0.019112	24
0.000941	25
0.107041	26
0.001259	27
0.188162	28
0.001435	29
0.212139	30
0.00632	31
1.00389	32
667.	33
20011.	34
5.2016	35
0.89	36
3.7	37
0.0001	38
0.01875	39

ANEXO B-4

DESCRIPCION DEL PROGRAMA "PREFON".

Este programa fue escrito en lenguaje FORTRAN y ejecutado en una minicomputadora Apple-II, para la determinación de las caídas de presión en un pozo de gas natural.

El programa resuelve la ecuación de flujo (2) desarrollada por Cullender y Smith⁵ mediante el método propuesto por -- Khalid Aziz¹¹ de utilizar un método numérico de tercer orden⁶ para resolver la integración que se presenta.

Los datos necesarios para la ejecución del programa "PREFON" son los siguientes: a) datos de producción: gasto de gas producido, presión y temperatura en la cabeza del pozobajo -- condiciones de flujo, b) datos del pozo: profundidad del horizonte productor, diámetro interno de la tubería de producción y su rugosidad relativa, temperatura media del horizonte productor, c) datos del gas: S.G., viscosidad, temperatura y presión crítica, d) número de intervalos en que se desea dividir la línea de flujo.

Una vez cargado el programa en la memoria de la máquina -- al ejecutarse, los datos necesarios se pedirán en la pantalla en forma consecutiva. El formato de entrada de datos es -- F15.5, exepcto el número de intervalos a considerar (N) que -- tendrá un formato 14.

Los resultados son impresos en la siguiente forma: profundidad, temperatura de fondo, presión de fondo fluyendo y la viscosidad del gas.

LISTADO DE PROGRAMA "PREFON".

PROGRAM PREFON

FACULTAD DE INGENIERIA. U.N.A.M.

PROGRAMA PARA CALCULAR LA CAIDA DE PRESION EN UNA TUBERIA
VERTICAL. CASO DE POZO DE GAS FLUYENDO.
METODO : KHALID AZIZ.
JULIO. 1982. H.G.P.

T E S I S

```
COMMON /AAA/ TOL,REY,ER
DIMENSION P(4),Z(4),MHU(4),FR(4),Y(4),FF(4),T(4)
REAL MHU
DATA A,B,C,D/.125,.375,.675,.125/
DATA F1,Y3,DELF,LL/0.001,.001,70.,0/
OPEN(6,FILE='PRINTER:')
TOL=1.0E-7

CALL LEE(SG,PROF,TEMPS,TEMPF,PRESS,Q,DIA,TC,PC,ER,N)
P(1)=PRESS
T(1)=TEMPS
TT=TEMPS
P(4)=PRESS+DELF
CONST=(SG*PROF/N)*1000./53.34
DELT=(TEMPF-TEMPS)/(4.*N)
DO 100 I=1,N

    DO 200 J=1,500

        IF(J.EQ.1)CALL PARTEN(T,TT,DELT)
        DELF=(P(4)-P(1))/3.

        DO 300 K=1,4
            P(K)=P(1)+(K-1.)*DELF
            CALL ZETA(Y3,K,F,T,TC,PC,Z)
            CALL VIS (K,SG,P,T,Z,MHU)
            REY=20011.*SG*Q/(MHU(K)*DIA)
            CALL FRICC(F1)
            FF(K)=F1*(Q**2)*2.566/DIA**3
        CONTINUE
```



```
DO 400 L=1,4
  CALL YES(L,P,T,Z,FF,Y)
400  CONTINUE

  FHI=CONST-(P(4)-P(1))*(A*Y(1)+B*Y(2)+
    D*Y(4))
  DFHI=(P(4)/(T(4)*Z(4)))/(FF(4)+((P(4)/
    (T(4)*Z(4)))**2)/1000.)
  PN=P(4)+FHI/DFHI
  IF(ABS(PN-P(4)),LT.TOL)GOTO 99
  IF(J.EQ.500)WRITE(*,'(A#)')'N O C O N V E R G E'
  P(4)=PN
200  CONTINUE

  TT=T(1)
  P(1)=P(4)
99  CALL SCRIB(LL,N,I,SG,PROF,TEMPS,TEMPF,PRESS,Q,DIA,
    TC,PC,ER,P,T,Z,MHU)
100 CONTINUE
  END
```

CALCULO DEL FACTOR DE FRICCION

```
SUBROUTINE FRICC(F1)
COMMON /AAA/TOL,REY,ER
A=-.0*ALOG10(1./ER)+2.28-4.0*ALOG10(1.+4.5**/
  (ER*REY*F1**.5))
F2=(1./A)**2.
IF(ABS(F1-F2),LT.TOL)RETURN
CALL FRICC(F2)
RETURN
END
```

CALCULO DEL FACTOR DE COMPRESIBILIDAD

```
SUBROUTINE ZETA(Y3,K,P,T,TC,PC,Z)
COMMON /AAA/ TOL,REY,ER
DIMENSION T(4),P(4),Z(4)
PR=P(K)/PC
TRI=TC/T(K)
A=-0.06125*TRI*EXP(-1.2*(1.-TRI)**2)
C=14.76*TRI-9.76*TRI**2+4.58*TRI**3
D=90.7*TRI-242.2*TRI**2+42.4*TRI**3
X=2.18+2.82*TRI
1 B=(Y3+Y3**2+Y3**3-Y3**4)/(1.-Y3)**3
F=A*PR+B-C*Y3**2-D*Y3**X
W=29.25*TRI-19.52*TRI**2+9.10*TRI**3
DFDY=(1.+4.*Y3+4.*Y3**2-4*Y3**3+Y3**4)/(1.-Y3)**4-
  W*Y3+X*D*Y3**(1.18+2.82*TRI)
```

```
Y1=Y3-F/DFDY
IF (ABS(Y1-Y3),LT.TOL)GOTO 2
Y3=Y1
GOTO 1
```

```
2 A=-1.2*(1,-TRI)**2
Z(K)=0.06125*PR*TRI*EXP(A)/Y1
RETURN
END
```

CALCULO DE LA VISCOSIDAD

```
SUBROUTINE VIS(K,SG,P,T,Z,MHU)
DIMENSION P(4),Z(4),MHU(4),T(4)
REAL K1,M,MHU
RHO=0.016052121*2.707*SG+P(K)/(Z(K)*T(K))
M=28.964*SG
K1=((9.4+0.02*M)*T(K)**1.5)/(209.+19.*M+T(K))
X=3.5+986./T(K)+0.01*M
Y=2.4-0.2*X
MHU(K)=K1*EXP(X*RHO**Y)/10000.
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE YES(L,P,T,Z,FF,Y)
DIMENSION P(4),Z(4),FF(4),T(4),Y(4)
Y(L)=(P(L)/(T(L)*Z(L)))/(FF(L)+
((P(L)/(T(L)*Z(L)))*2/1000.))
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE PARTEM(T,TT,DELT)
DIMENSION T(4)
DO 100 I=1,4
TT=TT+(I-1)*DELT
T(I)=TT
100 CONTINUE
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE SCRIB(LL,N,I,SG,PROF,TEMPS,TEMPF,PRESS,D,
DIA,TC,PC,ER,P,T,Z,MHU)
DIMENSION P(4),T(4),Z(4),MHU(4)
REAL MHU
```

```
LL=LL+1
IF(LL.NE.1)GOTO 1
WRITE(6,900)
WRITE(6,1000) SG
WRITE(6,1100) PROF
WRITE(6,1200) TEMPS
WRITE(6,1300) TEMPF
WRITE(6,1400) PRESS
```

```
WRITE(6,1500) Q
WRITE(6,1600) DIA
WRITE(6,1700) TC
WRITE(6,1800) PC
WRITE(6,1900) ER
WRITE(6,2000) N
WRITE(6,2100)
WRITE(6,2150)
```

```
1 DELX=PROF/N
  DELX=DELX*I
  WRITE(6,2200) 1,DELX,P(4),T(4),MHU(4)
```

```
900 FORMAT(20X,'D A T O S D E P O Z O ',/)
1000 FORMAT(15X,'1. SG =',F15.5)
1100 FORMAT(15X,'2. PROF =',F15.5,'FT')
1200 FORMAT(15X,'3. TEMPS=',F15.5,'RANK')
1300 FORMAT(15X,'4. TEMPF=',F15.5,'RANK')
1400 FORMAT(15X,'5. PRESS=',F15.5,'PSIA')
1500 FORMAT(15X,'6. Q =',F15.5,'MMSCFD')
1600 FORMAT(15X,'7. DIA =',F15.5,'IN')
1700 FORMAT(15X,'8. TC =',F15.5,'RANK')
1800 FORMAT(15X,'9. PC =',F15.5,'PSIA')
1900 FORMAT(15X,'10.ER =',F15.5)
2000 FORMAT(15X,'11.N =',I4,'/')
2100 FORMAT(40X,'R E S U L T A D O S')
2150 FORMAT(25X,'PROF<FT>',7X,'PRES<PSIA>',5X,'TEMP<R>',
           9X,'VIS<CP>')
2200 FORMAT(3X,'INTERVALO -->',I2,5E15.5)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE LEE(SG, PROF, TEMPS, TEMPF, PRESS, Q, DIA,
              TC, PC, ER, N)
```

```
WRITE(*, '(A#)') 'GRAVEDAD ESPECIFICA ==> ?'
READ (*,100)SG
WRITE(*, '(A#)') 'PROFUNDIDAD DEL INTERVALO PRODUCTOR
<FT> ==> ?'
READ (*,100)PROF
WRITE(*, '(A#)') 'TEMPERATURA EN LA CABEZA DEL POZO
<RANK> ==> ?'
READ (*,100)TEMPS
WRITE(*, '(A#)') 'TEMPERATURA DE FONDO <RANK> ==> ?'
READ (*,100)TEMPF
WRITE(*, '(A#)') 'PRESION DE CABEZA FLUYENDO
(Psia) ==> ?'
READ (*,100)PRESS
WRITE(*, '(A#)') 'GASTO PRODUCIDO < MMSCFD > ==> ?'
READ (*,100)Q
WRITE(*, '(A#)') 'DIAMETRO INTERNO DE LA T.P.
<PLG.> ==> ?'
```

```
READ (*,100)DIA
WRITE(*,'(A$)')'TEMPERATURA CRITICA DEL GAS
      <RANK> ==> ?'
READ (*,100)TC
WRITE(*,'(A$)')'PRESION CRITICA DEL GAS
      <PSIA> ==> ?'
READ (*,100)PC
WRITE(*,'(A$)')'RUGOSIDAD RELATIVA DE LA T.P.
      ==> ?'
READ (*,100)ER
WRITE(*,'(A$)')'INTRODUCIR NUM. DE INTER. DESEADOS
      ==> ?'
WRITE(*,300)
READ (*,200)N
100  FORMAT(F11.5)
200  FORMAT(I3)
300  FORMAT(//)
RETURN
END
```

ANEXO B-5

DESCRIPCION DEL PROGRAMA "VAPOR".

CALCULADORA HP-41 CV

Este programa determina la presión de fondo fluyendo en un pozo de vapor en una sola fase. Se utiliza para ello el método propuesto por G. Hiriart²⁰.

Se hace necesario determinar primero el volumen específico del vapor para las condiciones existentes a boca de pozo. Esto se puede realizar mediante cualquier tabla de vapor que se disponga o bien mediante alguna ecuación de estado que se conosca.

Los datos necesarios para alimentar al programa son:

a) Datos de producción: Gasto másico de vapor producido, presión y volumen específico del vapor en superficie, entalpía del vapor.

b) Datos del pozo: Profundidad total, número de diferentes diámetros con que se cuenta, diámetros interiores de las tuberías utilizadas y su rugosidad absoluta.

El programa está diseñado para determinar presiones de fondo a diferentes intervalos de profundidad, de tal forma -- que se obtiene un perfil de presiones calculadas versus profundidad. Las unidades de las variables utilizadas son las - mismas que las reportadas en geotermia y están claramente especificadas en el programa.

Es indispensable disponer de 41 registros de almacena miento (size 041) y tener conectado el impresor térmico durante la ejecución de programa.

Instrucciones Para El Uso Del Programa "VAPOR".
Método propuesto por G. Hiriart²⁰.

CALCULADORA HP-41 CV

PASO	INSTRUCCIONES	INTRODUCIR	PULSAR	PANTALLA
1	Cargar programa VAPOR	6 Tarjetas con programa.	-	-
2	Inicia programa		XEQ "VAPOR"	INSERTE DATOS
3	Introduzca presión abs. en la cabeza del pozo.	p (kg/cm^2)	R/S	Gasto másico de vapor (T/h)
4	Introduzca gasto másico de vapor producido.	\dot{m} (Ton/hr)	R/S	Entalpía del vapor (KJ/KG)?
5	Introduzca la entalpía del vapor a cond. sup.	h (KJ/Kg)	R/S	Número de diam. diferentes.?
6	Introduzca número de cambios de diámetro que se tenga en el pozo.	ND	R/S	Profundidad (m) ?
7	Introduzca la prof. del primer diámetro que se tenga. (generalmente=0).	L_i (m)	R/S	Diámetro (plg)
8	Introduzca el diámetro interno de la tubería	D_i (plg.)	R/S	Rug. Abs. (plg)
9	Introduzca la rugosidad absoluta de la tubería a la prof. que se trate	RA (plg)	R/S	
10	Repita pasos 7,8 y 9 hasta ND veces.			Prof. total de pozo (m) ?
11	Introduzca la profundidad total del pozo	L_t (m)	R/S	Número de inter deseado ?
12	Introducir la cantidad de intervalos deseados	N	R/S	----->

LISTADO DE PROGRAMA "VAPOR"

CALCULADORA HP-41 CV

01+LBL "VAPOR"	46 ADV	91 PRX
02 "CAIDA DEPRESION"	47 "VOL.ESPECIF. DE"	92 .0254
03 "EN POZOS DE"	48 AVIEW	93 *
04 "VAPOR.METODO DE"	49 PSE	94 STO IND 17
05 "C.V.L. SEP.1984"	50 "VAPOR(K3/KG)?"	95 ADV
06 "	51 PRA	96 1
07 "HOLA*VAPOR*HOLA"	52 PROMPT	97 ST+ 14
08 AVIEW	53 STO 12	98 ST+ 16
09 PSE	54 PRX	99 ST+ 17
10 CLX	55 ADV	100 ISG 15
11 ADV	56 26	101 GTO 01
12 "INSERTE DATOS"	57 STO 14	102 "PROF. TOTAL DEL"
13 AVIEW	58 26	103 AVIEW
14 PSE	59 STO 16	104 PSE
15 ADV	60 31	105 "POZO (M)?"
16 "PRESION SUPERF."	61 STO 17	106 PRA
17 AVIEW	62 "NUMERO DE DIAH."	107 PROMPT
18 PSE	63 AVIEW	108 STO 16
19 "(KG/CM2)?"	64 PSE	109 PRX
20 PRA	65 "DIFERENTES ?"	110 ADV
21 PROMPT	66 PRA	111 "NUMERO DE INTER"
22 PRX	67 PROMPT	112 AVIEW
23 98866.5	68 PRA	113 PSE
24 *	69 ADV	114 "DESEADOS ?"
25 STO 11	70 STO 13	115 PRA
26 ADV	71 1000	116 PROMPT
27 "GASTO BASICO DE"	72 /	117 STO 19
28 AVIEW	73 STO 15	118 PRX
29 PSE	74+LBL 01	119 ADV
30 "VAPOR (TON/HR)?"	75 "PROFUNDIDAD(M)?"	120 ADV
31 PRA	76 PRA	121 ADV
32 PROMPT	77 PROMPT	122 "INICIA CONDICIO"
33 PRX	78 STO IND 14	123 FIX 2
34 3.6	79 PRX	124 RCL 18
35 /	80 ADV	125 /
36 STO 08	81 "DIAMETRO(PLG)?"	126 1/X
37 ADV	82 PRA	127 STO 10
38 "ENTALPIA DEL"	83 PROMPT	128 STO 01
39 AVIEW	84 PRX	129 STO 00
40 PSE	85 .0254	130 21
41 "VAPOR (KJ/KG)?"	86 *	131 STO 14
42 PRA	87 STO IND 16	132 26
43 PROMPT	88 "FUG.ABS. (PLG)?"	133 STO 16
44 STO 07	89 PRA	134 31
45 PRX	90 PROMPT	135 STO 17

136 RCL 19
137 1
138 -
139 1000
140 /
141 STO 19
142 XEQ "AREA"
143 XEQ "TEMP"
144 XEQ "VIS"
145 XEQ "FRI"
146 RCL 11
147 RCL 12
148 *
149 STO 04
150 ADV
151 ADV
152 ADV
153 SF 10
154 "RESULTADOS"
155 ADV
156 PRBUF
157 CF 10
158 ADV
159 ADV
160 ADV
161 "PROFUNDIDAD"
162 ACA
163 4
164 SKPCHR
165 "PRESION"
166 ACA
167 PRBUF
168 " (MTS) "
169 ACA
170 5
171 SKPCHR
172 "(KG/CM2)"
173 ACA
174 PRBUF
175 ADV
176 ADV
177 3
178 SKPCHR
179 RCL 20
180 ACX
181 7
182 SKPCHR
183 RCL 11
184 98866.5
185 /
186 ADV
187 PRBUF
188 XEQ "GARA"

189 XEQ "BETA"
190 LBL 02
191 RCL 01
192 RCL IND 14
193 X=Y?
194 XEQ "CANBIO"
195 RCL 02
196 RCL 00
197 *
198 E1X
199 RCL 11
200 X12
201 RCL 03
202 *
203 1
204 +
205 *
206 1
207 -
208 RCL 03
209 /
210 SORT
211 98866.5
212 /
213 STO 36
214 1
215 SKPCHR
216 RCL 01
217 ACX
218 7
219 SKPCHR
220 RCL 36
221 ACX
222 PRBUF
223 RCL 10
224 ST+ 01
225 ST+ 00
226 ISG 19
227 GTO 02
228 BEEP
229 BEEP
230 ADV
231 ADV
232 ADV
233 ADV
234 ADV
235 ADV
236 STOP
237 LBL "ARER"
238 RCL IND 16
239 X12
240 FI
241 *

242 4
243 /
244 STO 06
245 RTN
246 LBL "TEMP"
247 RCL 11
248 1 E6
249 /
250 STO 37
251 47.9921
252 *
253 374.669
254 -
255 RCL 37
256 X12
257 .633686
258 *
259 -
260 RCL 07
261 X12
262 7.39386 E-5
263 *
264 -
265 RCL 37
266 X12
267 RCL 07
268 X12
269 *
270 3.3372 E6
271 /
272 1/X
273 -
274 RCL 37
275 3
276 Y1X
277 .0357154
278 -
279 1
280 +
281 RCL 07
282 3
283 Y1
284 RCL 37
285 *
286 1.1725 E-5
287 *
288 -
289 RCL 07
290 4
291 Y1X
292 2.26861 E15
293 /
294 1/X

295 -
296 STO 40
297 RTN
298+LBL "VIS"
299 RCL 40
300 .407 E-7
301 *
302 88.0 E-7
303 +
304 STO 38
305 RTN
306+LBL "FRI"
307 RCL 08
308 RCL IND 16
309 *
310 RCL 06
311 RCL 38
312 *
313 /
314 STO 39
315 RCL IND 16
316 RCL IND 17
317 /
318 STO 09
319 .001
320 STO 05
321+LBL 04
322 RCL 05
323 SORT
324 RCL 38
325 *
326 4.67
327 *
328 /
329 1/X
330 1
331 +
332 LOG
333 4
334 *
335 CHS
336 2.28
337 +
338 RCL 29
339 LOG
340 4
341 *
342 +
343 1/X
344 X12
345 STO 37
346 RCL 05
347 -

348 ABS
349 .0001
350 X<=Y?
351 GTO 03
352 RCL 37
353 4
354 *
355 STO 05
356 FSE
357 RTN
358+LBL 03
359 RCL 37
360 STO 05
361 GTO 04
362 RTN
363+LBL "CAMBIO"
364 1
365 ST+ 14
366 ST+ 16
367 ST+ 17
368 XEQ "AREA"
369 XEQ "VIS"
370 XEQ "FRI"
371 XEQ "GAMA"
372 RCL 36
373 98866.5
374 *
375 STO 11
376 RCL 10
377 STO 06
378 RTN
379+LBL "GAMA"
380 RCL IND 16
381 19.62
382 *
383 RCL 08
384 RCL 06
385 /
386 X12
387 RCL 05
388 *
389 RCL 04
390 X12
391 *
392 /
393 STO 03
394 RTN
395+LBL "BETA"
396 19.62
397 RCL 04
398 /
399 STO 03
400 RTN

Programa Para Calcular La Presión De Fondo Fluyendo.
Método De G. Hiriart²⁰.

CALCULADORA TI - 59

Este programa fue escrito con la finalidad de resolver la ecuación que se presenta en el método presentado por G. Hiriart . Fué diseñado para operar en la calculadora TI-59 con su partición de memoria normal. Se hace necesario tener conectado el impresor térmico a la calculadora durante la ejecución del programa para que así, los resultados obtenidos sean escritos en forma secuencial.

Los datos necesarios para alimentar el programa son:

- a) presión manométrica en la cabeza del pozo, Kg/cm^2 .
- b) gasto de vapor producido, Ton/hr.
- c) volumen específico del vapor, M^3/Kg .
- d) número de diámetros diferentes existentes en el pozo.
- e) diámetros existentes (en orden descendente), plg.
- f) profundidad a la que ocurre los cambios de diámetro, (en orden descendente), m.
- g) profundidad máxima a la que se desea el cálculo.
- h) número de intervalos en los que se desea dividir el pozo.

Los resultados son impresos en el siguiente orden:

profundidad	(m)
presión	(Kg/cm^2)
.	.
.	.
.	.

LISTADO DE PROGRAMA "VAPOR"

CALCULADORA TI-59

000	76	LBL	043	72	ST*	086	00	00
001	11	A	044	10	10	087	65	x
002	01	1	045	01	1	088	43	RCL
003	05	5	046	44	SUM	089	02	02
004	42	STD	047	10	10	090	95	=
005	10	10	048	97	DSZ	091	42	STD
006	01	1	049	03	03	092	12	12
007	08	8	050	16	A*	093	43	RCL
008	42	STD	051	76	LBL	094	06	06
009	11	11	052	17	B*	095	55	÷
010	25	CLR	053	91	R/S	096	43	RCL
011	91	R/S	054	72	ST*	097	07	07
012	65	x	055	11	11	098	95	=
013	43	RCL	056	01	1	099	42	STD
014	31	31	057	44	SUM	100	13	13
015	95	=	058	11	11	101	73	RC*
016	42	STD	059	97	DSZ	102	11	11
017	00	00	060	04	04	103	32	X/T
018	91	R/S	061	17	B*	104	71	SBR
019	55	÷	062	01	1	105	75	-
020	43	RCL	063	05	5	106	71	SBR
021	32	32	064	42	STD	107	85	+
022	95	=	065	10	10	108	71	SBR
023	42	STD	066	01	1	109	65	x
024	01	01	067	08	8	110	43	RCL
025	91	R/S	068	42	STD	111	00	00
026	42	STD	069	11	11	112	42	STD
027	02	02	070	25	CLR	113	24	24
028	91	R/S	071	91	R/S	114	76	LBL
029	42	STD	072	42	STD	115	12	B
030	04	04	073	05	05	116	71	SBR
031	85	+	074	91	R/S	117	95	=
032	01	1	075	42	STD	118	43	RCL
033	95	=	076	06	06	119	13	13
034	42	STD	077	91	R/S	120	44	SUM
035	03	03	078	42	STD	121	09	09
036	76	LBL	079	07	07	122	44	SUM
037	16	A*	080	00	0	123	08	08
038	91	R/S	081	42	STD	124	43	RCL
039	65	x	082	08	08	125	00	00
040	43	RCL	083	42	STD	126	33	X²
041	33	33	084	09	09	127	65	x
042	95	=	085	43	RCL	128	43	RCL

129	23	23	180	76	LBL	231	10	10
130	85	+	181	65	x	232	43	RCL
131	01	1	182	53	(	233	24	24
132	95	=	183	43	RCL	234	42	STD
133	65	x	184	34	34	235	00	00
134	53	(	185	55	÷	236	73	RC*
135	43	RCL	186	43	RCL	237	11	11
136	08	08	187	12	12	238	32	X:T
137	65	x	188	54	)	239	71	SBR
138	43	RCL	189	42	STD	240	75	-
139	22	22	190	22	22	241	71	SBR
140	54	)	191	92	RTN	242	85	+
141	22	INV	192	76	LBL	243	97	DSZ
142	23	LNX	193	85	+	244	07	07
143	75	-	194	53	(	245	12	B
144	01	1	195	43	RCL	246	71	SBR
145	95	=	196	34	34	247	95	=
146	55	÷	197	65	x	248	98	ADV
147	43	RCL	198	73	RC*	249	98	ADV
148	23	23	199	10	10	250	98	ADV
149	95	=	200	55	÷	251	91	R/S
150	34	FX	201	53	(	252	76	LBL
151	42	STD	202	53	(	253	95	=
152	24	24	203	43	RCL	254	25	CLR
153	43	RCL	204	01	01	255	69	DP
154	09	09	205	55	÷	256	00	00
155	77	GE	206	43	RCL	257	43	RCL
156	13	C	207	21	21	258	35	35
157	97	DSZ	208	54	)	259	69	DP
158	07	07	209	33	X²	260	04	04
159	12	B	210	65	x	261	43	RCL
160	71	SBR	211	43	RCL	262	09	09
161	95	=	212	05	05	263	69	DP
162	98	ADV	213	65	x	264	06	06
163	98	ADV	214	43	RCL	265	43	RCL
164	98	ADV	215	12	12	266	36	36
165	91	R/S	216	33	X²	267	69	DP
166	76	LBL	217	54	)	268	04	04
167	75	-	218	54	)	269	53	(
168	53	(	219	42	STD	270	43	RCL
169	73	RC*	220	23	23	271	24	24
170	10	10	221	92	RTN	272	55	÷
171	33	X²	222	76	LBL	273	43	RCL
172	65	x	223	13	C	274	31	31
173	89	π	224	00	0	275	54)
174	55	÷	225	42	STD	276	69	DP
175	04	4	226	08	08	277	06	06
176	54	)	227	01	1	278	43	RCL
177	42	STD	228	44	SUM	279	07	07
178	21	21	229	11	11	280	66	PAU
179	92	RTN	230	44	SUM	281	98	ADV

ANEXO B-6

DESCRIPCION DEL PROGRAMA "FLUJO"

Este programa fué escrito en lenguaje Fortran y habilitado en una minicomputadora APPLE-II, para resolver la ecuación de flujo de vapor a través de una tubería vertical.

Se utiliza el algoritmo propuesto por Kalid Aziz¹¹ para el problema del flujo de gas en tuberías.

Las propiedades termodinámicas del vapor se calculan mediante la subrutina "prop" que resuelven los polinomios presentados en el Anexo C-6. El factor de fricción se calcula con la ecuación de Colebrook² mediante el método iterativo de Newton-Raphson¹² en la subrutina "fricc".

Los datos necesarios para la ejecución del programa y sus formatos de entrada son:

Letrero: (Nombre y fecha del pozo), formato alfanumérico
presión en la cabeza del pozo (Kg/cm^2), F11.5
gasto de vapor producido (Ton/hr), F11.5
número de diámetros diferentes que tiene el pozo , I3
profundidad a la que inicia cada diámetro diferente (m), F11.5
diámetro de la tubería a cada profundidad (plg), F11.5
rugosidad absoluta de las tuberías (plg), F11.5
número de intervalos en que se desea dividir el pozo, F11.5
profundidad total que tiene el pozo, o bien la profundidad del horizonte productor (m), F11.5

Todos estos parámetros son leídos por pantalla durante la ejecución del programa.

LISTADO DE PROGRAMA "FLUJO"

PROGRAM FLUJO

C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
PROGRAMA PARA DETERMINAR LAS CAIDAS DE
PRESION EN LOS POZOS DE VAPOR SECO SATURADO
O VAPOR SOBRECALENTADO. ADEMAS DETERMINA
LOS CAMBIOS DE LOS PARAMETROS TERMODINAMICOS
DEL VAPOR AL OCURRIR EL FLUJO.

METODO AMPLIADO DE AZIZ.

HECTOR GUTIERREZ PUENTE

FACULTAD DE INGENIERIA. UNAM.

TESIS. NOVIEMBRE 1984.

CHARACTER*25 ITIT

COMMON /AAA/TOL,REY,ER

COMMON /XXX/LL,PROFD,P,PRESS,DELX,W,

, ENTH,ENTH1,ND,DIA,PROF,N,T,DENS,
, VEL,RA

DIMENSION P(4),MHU(4),Y(4),T(4),PROFT(10)

DIMENSION PROFD(10),BETA(4),DIA(5)

DIMENSION Z(4),RA(5)

REAL MHU,LAM,MM

DATA A,B,C,D/.125,.375,.375,.125/

DATA Y3/.001/

OPEN (6,FILE='PRINTER:')

LL=0

TOL=1.00

R=8314.3

PHI=3.141593

MM=18.016

DELP=480000.

C LECTURA DE DATOS

WRITE(*,'(A\$)')'NOMBRE Y FECHA DEL POZO ==>?'

READ (*,'(A25)')ITIT

WRITE(*,'(A\$)')'PRES. EN CABEZA (KG/CM2)==>?'

READ(*,100)PRESS

PRESS=PRESS*98066.5

WRITE(*,'(A\$)')'GASTO DE VAPOR (TON/HR)==>?'

READ(*,100) W

W=W*1000./3600.

```
WRITE(*, '(A$)') 'ENTALPIA VAPOR (KJ/KG)===>?'  
READ(*, 100) ENTH  
WRITE(*, '(A$)') 'NUMERO DE DIAM. DIFERENTES ===>?'  
READ(*, 110) ND
```

```
DO 20 I=1, ND+1
```

```
    WRITE(*, '(A$)') 'PROFUNDIDAD(I) (MT)===>?'  
    READ(*, 100) PROFD(I)  
    WRITE(*, '(A$)') 'DIAMETRO(I) (PLG.) ===>?'  
    READ(*, 100) DIA(I)  
    DIA(I)=DIA(I)*.0254  
    WRITE(*, '(A$)') 'RUG. ABSOLUTA(I) (PLG)===>?'  
    READ(*, 100) RA(I)  
    RA(I)=RA(I)*.0254
```

```
20 CONTINUE
```

```
WRITE(*, '(A$)') 'NUMERO DE INTERVALOS ===>?'  
READ(*, 110) N  
WRITE(*, '(A$)') 'PROF. TOTAL DEL POZO ===>?'  
READ(*, 100) PROF
```

```
C INICIALIZA CONDICIONES
```

```
P(1)=PRESS  
M=1  
K=1  
I=1  
ER=RA(M)/DIA(M)  
AREA=PHI*DIA(M)**2/4.0  
CALL PROP(P, T, K, ENTH, ENTH1, DENS)  
VEL=W/(DENS*AREA)  
CALL SCRIB(I, ITIT)  
CONS=2.16687E-3*PROF/N  
LAM=(8.0*R*R)/(MM*PHI)**2
```

```
C CALCULA LA CAIDA DE PRESION
```

```
DO 101 I=1, N
```

```
    DELX=PROF/N  
    DELX=DELX*I  
    IF(DELX.LT.PROFD(M+1))GOTO 27  
    M=M+1  
    AREA=PHI*DIA(M)**2/4.  
    ER=RA(M)/DIA(M)  
27 P(4)=P(1)+DELP
```

```
DO 200 J=1,500

WRITE(*,28)J
28  FORMAT(/,'***** J=',I2,'*****',/)

IF(J,EQ.50)P(4)=P(4)+150000.
IF(J,EQ.65)P(4)=P(4)+180000.
DELP=(P(4)-P(1))/3.0

DO 300 K=1,4

P(K)=P(1)+(K-1)*DELP
CALL PROP(P,T,K,ENTH,ENTH1,DENS)
Z(K)=P(K)*MM/(R*(T(K)+273.15)*DENS)
MHU(K)=0.407E-7*T(K)+80.4E-7
REY=(4.0*W)/(PHI*MHU(K)*DIA(M))
TOL=.001
CALL FRICC(F1)
TOL=1.0
BETA(K)=(LAM*F1*W**2)/DIA(M)**5

300  CONTINUE

DO 400 L=1,4

CALL YES(L,P,T,Z,BETA,Y)
400  CONTINUE

FHI=CONS-(P(4)-P(1))*(A*Y(1)+B*Y(2)+C*Y(3)+
D*Y(4))
DFHI=(P(4)/(T(4)*Z(4)))/(BETA(4)+((P(4)/
(T(4)*Z(4)))**2)*9.81)
PN=P(4)+FHI/DFHI

IF (ABS(PN-P(4)).LT.TOL) GOTO 99
IF (J.EQ.150) WRITE(*,'(A#)')'NO CONVERGE '
IF (J.EQ.150) WRITE(*,'(A#)')'PARA J=150 '
IF (J.GE.150) STOP
P(4)=PN

200  CONTINUE

99  P(1)=P(4)
T(1)=T(4)
K=1
CALL PROP(P,T,K,ENTH,ENTH1,DENS)
VEL=W/(DENS*AREA)
CALL SCRIB(I,ITIT)

101 CONTINUE

100 FORMAT(F11.5)
110 FORMAT(I3)
END
```



```
FUNCTION T12(P, ENTH)
DATA C28, C29, C30/374.669, 47.9921, 6.33606E-1/
DATA C31, C32, C33/7.39386E-5, 3.3372E6, 3.57154E-2/
DATA C34, C35/1.1725E-9, 2.26861E15/
```

```
P=P/1.E6
H=ENTH
```

```
T12=-C28+C29*P-C30*P*P+C31*H*H-C32/(H*H*P*P)
+C33/(P**3)-C34*(H**3)*P-C35/(H**4)
P=P*1.E6
RETURN
END
```

C CALCULA EL COEFICIENTE DE FRICCION

```
SUBROUTINE FRICC(F1)
```

```
COMMON /AAA/TOL, REY, ER
CONTA=0.0
```

```
F1=(1./((4.*ALOG10(1./ER)+2.28)**2)
1 A=4.0*ALOG10(1./ER)+2.28-4.0*ALOG10(1.+4.67/
.(ER*REY*F1**0.5))-(1./SQRT(F1))
A2=(.8686/(1.+(4.67/(ER*REY*SQRT(F1)))))*(4.67
./((ER*REY*F1**1.5))+1./(2.*F1**1.5))
F2=F1-A/A2
IF (ABS(F1-F2).LT.TOL) GOTO 3
F1=F2
CONTA=CONTA+1.0
IF (CONTA.GE.100) GOTO 2
GOTO 1
3 F1=4*F2
TOL=1.0
RETURN
```

```
2 WRITE(*, '(A#)') 'NO CONVERGE FRICC EN CONTA=100'
STOP
END
```

```
SUBROUTINE YES(L, P, T, Z, BETA, Y)
```

```
DIMENSION P(4), Z(4), T(4), BETA(4), Y(4)
```

```
Y(L)=(P(L)/(T(L)*Z(L)))/(BETA(L)+(((P(L)/
(T(L)*Z(L))**2)*9.81))
```

```
RETURN
END
```

SUBROUTINE SCRIB (I, ITIT)

CHARACTER*25 ITIT

COMMON/XXX/LL, PROFD, P, PRESS, DELX,
W, ENTH, ENTH1, ND, DIA, PROF, N, T,
DENS, VEL, RA
COMMON/AAA/TOL, REY, ER

DIMENSION P(4), T(4), DIA(5), PROFT(10)
DIMENSION PROFD(10), RA(5)

LL=LL+1
IF(LL.NE.1) GOTO 1
PROFD(1)=0.0
P(1)=PRESS
DELX=0.0
I=0

WRITE(6, 900)
WRITE(6, 910) ITIT
WRITE(6, 1000) PRESS/98066.5
WRITE(6, 1100) T(1)
WRITE(6, 1200) W*3.6
WRITE(6, 1300) ENTH
WRITE(6, 1400)

DO 50 J=1, ND+1

WRITE(6, 1500) PROFD(J), DIA(J)/.0254,
RA(J)/.0254
50 CONTINUE

WRITE(6, 1800) PROF
WRITE(6, 1900) N
WRITE(6, 2000)
WRITE(6, 2100)
WRITE(6, 2200) I, DELX, P(1)/98066.5, T(1),
ENTH, DENS, VEL, ENTH1
GOTO 2

1 WRITE(6, 2200) I, DELX, P(1)/98066.5, T(1),
ENTH, DENS, VEL, ENTH1

900 FORMAT(////, 43X, '*****',
/, 43X, '*', IX, 'DATOS DE ENTRADA DEL POZO',
IX, '*', /, 43X, '*****',
, **, //)

910 FORMAT(43X, A25, //)

1000 FORMAT(40X, 'PRESION EN LA CABEZA DEL POZO=',
F7.3, 2X, '<KG/CM2>')


```
ELSE IF(ENTH.EQ.ENT2) THEN
T(K)=TEMP2
RETURN
END IF
J=0
10 TEMP3=TEMP1+(ENTH-ENT1)*(TEMP2-TEMP1)
, / (ENT2-ENT1)
CALL PTVAP (P(K),TEMP3,ENT3,DENS)
IF(ABS(ENTH-ENT3).LT.1.)THEN
T(K)=TEMP3
ENTH1=ENT3
RETURN
ELSE IF((ENTH-ENT1)*(ENTH-ENT3).LT.0.)THEN
TEMP2=TEMP3
ELSE
TEMP1=TEMP3
END IF

J=J+1
IF (J,LE.90) GOTO 10
WRITE(*, '(A)') 'DESPUES DE 90 ITERACIONES'
WRITE(*, '(A)') 'NO LOCALIZA LA TEMPERATURA'
WRITE(*, '(//)')
STOP
END
```

```
IF(VL.LT.,1603)GOTO 51
R=G+C*3.724201124E5*F
U=R*KK/(G-C)+KK-L-R
HL=835.41753-B+A/.0862139787+.04355685*
(I+E-G+C+U)
ENTH1=HL*2.32599791
VOL=0.06234493*VL
DENS=1./VOL
```

```
P=AP/1.450E-4
T=(AT-32.)/1.8
```

```
RETURN
51 WRITE(*,10)AP,AT,VL
10 FORMAT(//,2X,'FUERA DE RANGO SBR.PRPR',//
.2X,'P=',F12.2,'T=',F6.2,'VL=',F15.10,//)
```

```
STOP
END
```

ANEXO B-7

Descripción Del Programa "MONOFAS"

Este programa está escrito en lenguaje Fortran y adaptado a una minicomputadora Apple-II. Para determinar la predicción del estado termodinámico del vapor dentro de un pozo Geotérmico. Es usado el algoritmo propuesto por F. Garibay³⁵ con este objeto, el cuál utiliza la técnica numérica de Runge-Kuta de 4º orden⁶ para resolver el sistema de ecuaciones que se presenta.

Las variables de entrada son leídas directamente por pantalla con los siguientes formatos:

- Presión en la cabeza del pozo F15.7
- Entalpía del vapor producido (KJ/Kg) F15.7
- Velocidad del vapor en la superficie (m/s) F15.7
- Profundidad del pozo (m) F15.7
- Rugosidad absoluta de la tubería de producción (m) ..
.. F15.7
- Número de secciones de diámetro constante I2.
- Profundidad a la que ocurre el cambio de diámetro (m)
.... F15.7
- Número de intervalos en que se desea dividir el pozo
.... I.4.

Los resultados obtenidos son impresos de la siguiente forma:

Profundidad (mts)	Diámetro (mts)	Presión (bar)	Entalpía (KJ/Kg)	Velocidad (Kg/m.s)	Visc. (°C)
.
.
.

LISTADO DE PROGRAMA "MONOFAS"

PROGRAM MONFAS

C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
PROGRAMA PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA
DE FLUJO MONOFASICO EN POZOS GEOTERMICOS

UTILIZANDO EL ALGORITMO DE RUNGE-KUTTA
PARA LA SOLUCION DE LAS ECUACIONES DIFS,
DE TRANSFERENCIA DE MASA, MOMENTO Y CALOR

SEPTIEMBRE 1984

PROGRAMADO POR: F. G. BONALES

DIMENSION B(10),C(10),D(10)
COMMON/SHARE1/A1,A2,A3,A4,B,C,D,N,M,RUGO
OPEN(6,FILE='PRINTER:')

C
CONDICIONES INICIALES

G=9.81
CALL DATOS
PRES=A1
ENTALP=A2
VEL=A3
DIAM=D(1)
PROFUN=0.

PRES=PRES/100000.
ENTALP=ENTALP/1000.
CALL PHVAP(PRES,ENTALP,TEMP,VOLESP)
DEN=1./VOLESP
PRES=PRES*100000.
ENTALP=ENTALP*1000.

VISCO=VIS(TEMP)
REYNOL=DIAM*DEN*VEL/VISCO
FM=FMK(REYNOL,DIAM,RUGO)
K=0
CALL PRINT(PROFUN,DIAM,PRES,ENTALP,DEN,VEL,REYNOL,
1 VISCO,TEMP,FM,K)

DZK=A4/REAL(M)

DO 500 K=1,M

PROFUN=REAL(K)*DZK

DO 600 I=1,N

IF(PROFUN.LE.C(I))GOTO 700
600 CONTINUE

700 IF(DIAM.EQ.D(I)) GOTO 800

C CAMBIO DE DIAMETRO

VEL2=VEL*DIAM*DIAM/(D(I)*D(I))
PRES2=PRES+DEN*VEL2*VEL2*D(I)*D(I)/(DIAM*DIAM)
1 *(1.-D(I)*D(I)/(DIAM*DIAM))
ENTALP=ENTALP

PRES=PRES/100000.
ENTALP=ENTALP/1000.
CALL PHVAP(PRES,ENTALP,TEMP,VOLESP)
PRES=PRES*100000.
ENTALP=ENTALP*1000.

DEN2=1./VOLESP
VEL=VEL*(DEN/DEN2)*DIAM*DIAM/(D(I)*D(I))
PRES=PRES+DEN2*VEL*VEL*D(I)*D(I)/(DIAM*DIAM)
1 *(1.-D(I)*D(I)/(DIAM*DIAM))

PRES=PRES/100000.
ENTALP=ENTALP/1000.
CALL PHVAP(PRES,ENTALP,TEMP,VOLESP)
PRES=PRES*100000.
ENTALP=ENTALP*1000.

DEN=1./VOLESP
DIAM=D(I)
GOTO 1000

800 DIAM=D(I)

C INICIO DEL CALCULO PARA EL RUNGE-KUTTA

K1F1=DZK*F1(DEN,VEL,PRES,ENTALP,FM,DIAM,G)
K1F2=DZK*F2(DEN,VEL,PRES,ENTALP,FM,DIAM,G)
K1F3=DZK*F3(DEN,VEL,PRES,ENTALP,FM,DIAM,G)
K1F4=DZK*F4(DEN,VEL,PRES,ENTALP,FM,DIAM,G)

K2F1=DZK*F1(DEN+K1F1/2.,VEL+K1F2/2.,PRES+K1F3/2.,
1 ENTALP+K1F4/2.,FM,DIAM,G)
K2F2=DZK*F2(DEN+K1F1/2.,VEL+K1F2/2.,PRES+K1F3/2.,
1 ENTALP+K1F4/2.,FM,DIAM,G)

K2F3=DZK*F3(DEN+K1F1/2.,VEL+K1F2/2.,PRES+K1F3/2.,
1 ENTALP+K1F4/2.,FM,DIAM,G)
K2F4=DZK*F4(DEN+K1F1/2.,VEL+K1F2/2.,PRES+K1F3/2.,
1 ENTALP+K1F4/2.,FM,DIAM,G)

K3F1=DZK*F1(DEN+K2F1/2.,VEL+K2F2/2.,PRES+K2F3/2.,
1 ENTALP+K2F4/2.,FM,DIAM,G)
K3F2=DZK*F2(DEN+K2F1/2.,VEL+K2F2/2.,PRES+K2F3/2.,
1 ENTALP+K2F4/2.,FM,DIAM,G)
K3F3=DZK*F3(DEN+K2F1/2.,VEL+K2F2/2.,PRES+K2F3/2.,
1 ENTALP+K2F4/2.,FM,DIAM,G)
K3F4=DZK*F4(DEN+K2F1/2.,VEL+K2F2/2.,PRES+K2F3/2.,
1 ENTALP+K2F4/2.,FM,DIAM,G)

K4F1=DZK*F1(DEN+K3F1,VEL+K3F2,PRES+K3F3,
1 ENTALP+K3F4,FM,DIAM,G)
K4F2=DZK*F2(DEN+K3F1,VEL+K3F2,PRES+K3F3,
1 ENTALP+K3F4,FM,DIAM,G)
K4F3=DZK*F3(DEN+K3F1,VEL+K3F2,PRES+K3F3,
1 ENTALP+K3F4,FM,DIAM,G)
K4F4=DZK*F4(DEN+K3F1,VEL+K3F2,PRES+K3F3,
1 ENTALP+K3F4,FM,DIAM,G)

PRES=PRES+(1./6.)*(K1F3+2.*K2F3+2.*K3F3+K4F3)
ENTALP=ENTALP+(1./6.)*(K1F4+2.*K2F4+2.*K3F4+K4F4)

PRES=PRES/100000.
ENTALP=ENTALP/1000.
CALL PHVAP(PRES,ENTALP,TEMP,VOLESP)
PRES=PRES*100000.
ENTALP=ENTALP*1000.

DEN2=1./VOLESP
VEL2=VEL*DEN/DEN2
DEN=DEN2
VEL=VEL2

1000 VISCO=VIS(TEMP)
REYNOL=DIAM*DEN*VEL/VISCO
FM=FMK(REYNOL,DIAM,RUGO)
CALL PRINT(PROFUN,DIAM,PRES,ENTALP,DEN
1 ,VEL,REYNOL,VISCO,TEMP,FM,K)
500 CONTINUE
END

SUBROUTINE DATOS

C
C
C
C
C

SUBPROGRAMA PARA LA INTRODUCCION
DE DATOS (CONDICIONES INICIALES)
PARA EL PROGRAMA PRINCIPAL

CHARACTER*2 TEST
CHARACTER*10 POZO
DIMENSION B(10),C(10),D(10)
COMMON/SHARE1/A1,A2,A3,A4,B,C,D,N,M,RUGO

C
C
C

INTRODUCCION DE DATOS

```
5 WRITE(*,10)
10 FORMAT(/,10X,'INTRODUCCION DE DATOS',/)
WRITE(*,'(A)')'NOMBRE DEL POZO =====>
READ(*,'(A)')POZO
WRITE(*,'(A)')'PRESION <BARS> =====>(F15.7)
READ(*,20)A1
WRITE(*,'(A)')'ENTALPIA <KJ/KG> =====>(F15.7)
READ(*,20)A2
WRITE(*,'(A)')'VELOCIDAD <MTS/SEG> =====>(F15.7)
READ(*,20)A3
WRITE(*,'(A)')'PROFUNDIDAD TOTAL <MTS> ==>(F15.7)
READ(*,20)A4
WRITE(*,'(A)')'RUGOSIDAD ABSOLUTA <MTS> =>(F15.7)
READ(*,20)RUGO
WRITE(*,'(A)')'NUMERO DE SECCIONES DE DIAMETRO'
WRITE(*,'(A)')'CONSTANTE =====>(I2)
READ(*,25) N
25 FORMAT(BN,I2)
DO 35 I=1,N
WRITE(*,45) I
45 FORMAT(2X,'SECCION # ',I2)
WRITE(*,'(A)')'PROFUNDIDAD INICIAL <MTS> ==>(F15.7)
READ(*,20) B(I)
WRITE(*,'(A)')'PROFUNDIDAD FINAL <MTS> =====>(F15.7)
READ(*,20) C(I)
WRITE(*,'(A)')'DIAMETRO <MTS> =====>(F15.7)
READ(*,20) D(I)
35 CONTINUE
WRITE(*,'(A)')'NUMERO DE DIVISIONES DEL INTERVALO'
WRITE(*,'(A)')'DE SIMULACION =====>(I4)
READ(*,'(BN,I4)')M
20 FORMAT(F15.7)
*****
*VERIFICACION DE DATOS: REPETICION POR ECO*
*****
WRITE(*,30)
30 FORMAT(/,10X,'VERIFICACION DE DATOS',/)
WRITE(*,'(A)')'NOMBRE DEL POZO =====>
```

C
C
C

```
WRITE(*, '(A)') POZO
WRITE(*, '(A$)') 'PRESION =====> '
WRITE(*, 40) A1
WRITE(*, '(A$)') 'ENTALPIA =====> '
WRITE(*, 40) A2
WRITE(*, '(A$)') 'VELOCIDAD =====> '
WRITE(*, 40) A3
WRITE(*, '(A$)') 'PROFUNDIDAD TOTAL ==> '
WRITE(*, 40) A4
WRITE(*, '(A$)') 'RUGOSIDAD ABSOLUTA => '
WRITE(*, 40) RUGO
DO 55 I=1, N
WRITE(*, 145) I
145 FORMAT(2X, 'SECCION # ', I2)
WRITE(*, '(A$)') 'PROFUNDIDAD INICIAL==> '
WRITE(*, 40) B(I)
WRITE(*, '(A$)') 'PROFUNDIDAD FINAL ===> '
WRITE(*, 40) C(I)
WRITE(*, '(A$)') 'DIAMETRO =====> '
WRITE(*, 40) D(I)
55 CONTINUE
WRITE(*, '(A)') 'NUMERO DE DIVISIONES DEL INTERVALO'
WRITE(*, '(A$)') ' DE SIMULACION =====> '
WRITE(*, '(I4)') M
40 FORMAT(2X, F15.7)
WRITE(*, '(A$)') 'DATOS CORRECTOS ? ==> (SI/NO): '
READ(*, 50) TEST
50 FORMAT(A2)
IF(TEST.EQ.'NO') GOTO 5
C *****
C *IMPRESION DE LOS DATOS: CONDICIONES INICIALES*
C *****
WRITE(6, 90)
90 FORMAT(/, 45X, 'CONDICIONES INICIALES: '//////)
WRITE(6, '(30X, A$)') 'NOMBRE DEL POZO =====> '
WRITE(6, '(A)') POZO
WRITE(6, '(30X, A$)') 'PRESION (BARS) =====> '
WRITE(6, 80) A1
WRITE(6, '(30X, A$)') 'ENTALPIA (KJ/KG) =====> '
WRITE(6, 80) A2
WRITE(6, '(30X, A$)') 'VELOCIDAD (MTS/SEG) =====> '
WRITE(6, 80) A3
WRITE(6, '(30X, A$)') 'PROFUNDIDAD TOTAL (MTS) ==> '
WRITE(6, 80) A4
WRITE(6, '(30X, A$)') 'RUGOSIDAD ABS. (MTS) =====> '
WRITE(6, 80) RUGO
DO 95 I=1, N
WRITE(6, 155) I
155 FORMAT(32X, 'SECCION # ', I2)
WRITE(6, '(30X, A$)') 'PROFUNDIDAD INICIAL (MTS) ==> '
WRITE(6, 80) B(I)
WRITE(6, '(30X, A$)') 'PROFUNDIDAD FINAL (MTS) ===> '

```

```
WRITE(6,80) C(1)
WRITE(6,'(30X,A$)') 'DIAMETRO (MTS) =====>'
WRITE(6,80) D(1)
95 CONTINUE
WRITE(6,'(30X,A)') 'NUMERO DE DIVISIONES DEL INTERVALO'
WRITE(6,'(30X,A$)') 'DE SIMULACION =====>'
WRITE(6,'(14)')M
WRITE(6,'(//////////)')
80 FORMAT(2X,F15.7)
A1=A1*100000.
A2=A2*1000.
RETURN
END
```

SUBROUTINE PRINT(PROFUN, DIAM, PRES, ENTALP, DEN, VEL, REYNOL, VISC(1, TEMP, FM, K)

C SUBPROGRAMA PARA IMPRIMIR RESULTADOS
C OBTENIDOS EN EL PROGRAMA PRINCIPAL.
C PARA CADA INCREMENTO DE ALTURA

```
IF(K.GE.1)GOTO 100
WRITE(6,'(A)') 'PROFUNDIDAD DIAMETRO PRESION ENTALPIA
1 DENSIDAD VELOCIDAD # REYNOLD VISCOSIDAD TEMPERATUR
1 F. DE MOODY'
WRITE(6,'(A)') ' <MTS> <MTS> <BARS> <KJ/KG>
1 <KG/M3> <MTS/SEG> <...> <?> <C>
1 <...>
WRITE(6,'(//)')
100 WRITE(6,20)PROFUN, DIAM, PRES/100000., ENTALP/1000., DEN, VEL, REYI
1 , VISCO, TEMP, FM
20 FORMAT(F11.1,3X,F8.3,3X,F7.1,3X,F8.1,3X,F8.2,3X,F9.2,3X,
1 F9.0,3X,E10.4,3X,F11.2,3X,E11.5)
RETURN
END
```

FUNCTION F1(DEN, VEL, PRES, ENTALP, FM, DIAM, G)

C SUBPROGRAMA QUE EVALUA LA PRIMERA ECUACION DIFERENCIAL

DDP=DFP(PRES, ENTALP)
DDH=DFH(PRES, ENTALP)

F1=((DEN*G/(VEL*VEL)+FM*DEN/(2.*DIAM))*DDP+G/(VEL*VEL)*DDH)
1 / (1./ (VEL*VEL)-DDP-DDH/DEN)

RETURN
END

FUNCTION F2(DEN, VEL, PRES, ENTALP, FM, DIAM, G)

C SUBPROGRAMA QUE EVALUA LA SEGUNDA ECUACION DIFERENCIAL

DDP=DFP(PRES, ENTALP)

DDH=DFH(PRES, ENTALP)

F2=((G/VEL+FM*VEL/(2.*DIAM))*DDP+G/(DEN*VEL)*DDH)
1/(DDH/DEN+DDP-1./(VEL*VEL))

RETURN

END

FUNCTION F3(DEN, VEL, PRES, ENTALP, FM, DIAM, G)

C SUBPROGRAMA QUE EVALUA LA TERCERA ECUACION DIFERENCIAL

DVZ=F2(DEN, VEL, PRES, ENTALP, FM, DIAM, G)

F3=-DEN*VEL*DVZ+DEN*G+FM/(2.*DIAM)*DEN*VEL*VEL

RETURN

END

FUNCTION F4(DEN, VEL, PRES, ENTALP, FM, DIAM, G)

C SUBPROGRAMA QUE EVALUA LA CUARTA ECUACION DIFERENCIAL

DVZ=F2(DEN, VEL, PRES, ENTALP, FM, DIAM, G)

F4=G-VEL*DVZ

RETURN

END

FUNCTION DFP(PK1, HK1)

C SUBPROGRAMA QUE EVALUA LA DERIVADA PARCIAL

C DE LA DENSIDAD RESPECTO A LA PRESION

DATA C19, C20, C21, C22/4.38441E-05, 1.79088E-11, 3.69276E-29
1, 5.17644E-25/

DFP=C19-C20*HK1+4.*C21*(PK1**3.)+C22*(HK1**3.)

RETURN

END

FUNCTION DFH(PK1, HK1)

C SUBPROGRAMA QUE EVALUA LA DERIVADA PARCIAL

C DE LA DENSIDAD RESPECTO A LA ENTALPIA

DATA C20,C22/1.79088E-11,5.17644E-25/

DFH=-C20*PK1+3.*C22*(HK1*HK1)*PK1

RETURN
END

FUNCTION FMK(REYNOL,DIAM,RUGO)

C SUBPROGRAMA QUE EVALUA EL FACTOR DE MOODY

```
ASPREL=RUGO/DIAM
K=0
TOL=.00001
YN1=0.1
10 A=ASPREL/3.7+2.51/(REYNOL*YN1)
   B=1.+2.1586/(REYNOL*A)
   YN2=YN1*(1.+(1.+.86*YN1*ALOG(A))/B)
   IF (ABS(YN2-YN1),LE.TOL)GOTO 20
   YN1=YN2
   K=K+1
   IF(K,LE,100)GOTO 10
   WRITE(*,'(A)')'DESPUES DE 100 ITERACIONES EL FACTOR DE MOODY
   WRITE(*,'(A)')'NO CONVERGE'
   STOP
20 FMK=YN2*YN2
   RETURN
   END
```

FUNCTION VIS(T1)

C SUBPROGRAMA QUE EVALUA LA VISCOSIDAD
C EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

DATA C36,C37/0.407E-07,80.4E-07/

VIS=C36*T1+C37

RETURN
END

SUBROUTINE PHVAP(P,H,T,V)

C SUBPROGRAMA QUE EVALUA : TEMPERATURA Y VOLUMEN ESP.
C EN FUNCION DE LA PRESION Y ENTALPIA
C PARA VAPOR SOBRECALENTADO

C CALCULO DEL INTERVALO DONDE SE LOCALIZA T

```
I=1
1 TEMP1=T12(P,H)-FLOAT(I)
  TEMP2=T12(P,H)+FLOAT(I)

  CALL PTVAP(P,TEMP1,H1,V)
  CALL PTVAP(P,TEMP2,H2,V)

  IF((H-H1)*(H-H2).GT.0.)THEN
    I=I+1

    IF(I,LE,100) GOTO 1
    WRITE(*, '(A)') 'DESPUES DE 100 INTENTOS'
    WRITE(*, '(A)') 'NO SE ENCUENTRA EL INTERVALO PARA LA'
    WRITE(*, '(A)') 'TEMPERATURA'
    STOP

  ELSE IF(H.EQ.H1) THEN
    T=TEMP1
    RETURN

  ELSE IF(H.EQ.H2) THEN
    T=TEMP2
    RETURN

  END IF

  J=1
10 TEMP3=TEMP1+(H-H1)*(TEMP2-TEMP1)/(H2-H1)
   CALL PTVAP(P,TEMP3,H3,V)

   IF(ABS(H-H3).LT..1)THEN
     T=TEMP3
     RETURN

   ELSE IF((H-H1)*(H-H3).LT.0.) THEN
     TEMP2=TEMP3

   ELSE
     TEMP1=TEMP3

   END IF

  J=J+1
  IF(J,LE,100) GOTO 10
```

```
WRITE(*, '(A)') 'DESPUES DE 100 ITERACIONES'  
WRITE(*, '(A)') 'NO SE LOCALIZA A LA TEMPERATURA'  
WRITE(*, '(//)')
```

```
WRITE(*, '(A$)') 'ENTALPIA INICIAL (BARS) = '  
WRITE(*, '(F10.3)') H  
WRITE(*, '(A$)') 'ENTALPIA CALCULADA (BARS) = '  
WRITE(*, '(F10.3)') H3  
WRITE(*, '(A$)') 'TEMPERATURA CALCULADA ( C ) = '  
WRITE(*, '(F10.3)') TEMP3
```

```
STOP  
END
```

```
FUNCTION T12(P,H)
```

```
SUBPROGRAMA AUXILIAR DEL SUBPROGRAMA PHVAP  
PARA ENCONTRAR EL INTERVALO DE TEMPERATURAS  
EVALUA LA TEMPERATURA EN FUNCION DE LA PRESION Y ENTALPIA
```

```
DATA C28,C29,C30,C31,C32,C33,C34,C35/374.669,4.79921E-05  
1 ,6.33606E-13,7.39386E-11,3.3372E24,3.57154 E16,1.1725E-24  
1 ,2.26861E27/
```

```
PK1=P*100000.  
HK1=H*1000.
```

```
T12=-C28+C29*PK1-C30*PK1*PK1+C31*HK1*HK1-C32/(HK1*HK1*PK1*PK  
1 +C33/(PK1**3.)-C34*(HK1**3.)*PK1-C35/(HK1**4.)
```

```
RETURN  
END
```


A N E X O C

ANEXO C-1

Determinación Del Factor De Fricción Mediante La Ecuación De Colebrook²

El número de Reynolds¹ se calcula de:

$$Re = \frac{20\,011 \text{ S.G. } Q}{\mu d} \quad (C-1.1)$$

en donde:

S.G. = Gravedad específica del gas

Q = Gasto volumétrico de gas, MMpies³/día -
a condiciones estandar

μ = viscosidad del gas producido, cp.

d = diámetro de la tubería de producción, plg.

La ecuación de Colebrook² para el factor de fricción es,

$$A(f) = 4.0 \log \left(\frac{d}{\xi} \right) + 2.28 - 4.0 \log \left(1 + \frac{4.67(d/\xi)}{Re \sqrt{f}} \right)$$
$$-\frac{1}{\sqrt{f}} \quad (C-1.2)$$

en donde:

f = factor de fricción

ξ = Rugosidad absoluta de la tubería de producción -
en plg.

La ecuación anterior se resuelve por el método iterativo-

de Newton Raphson¹², para el cual:

$$f^{(n+1)} = f^{(n)} - \frac{A(f)}{A'(f)} \quad (C-1.3)$$

donde:

$$A'(f) = \frac{0.8686}{1 + \frac{4.67 (d/\xi)}{\text{Re } f}} \frac{4.67 (d/\xi)}{\text{Re } (f)^{3/2}} + \frac{1}{2(f)^{3/2}} \quad (C-1.4)$$

La primera estimación de f es:

$$f^{(0)} = \frac{1}{[4 \log (d/\xi) + 2.28]^2} \quad (C-1.5)$$

Con este valor se calculan A(f) y A'(f) de las ecuaciones (C-1.2) y (C-1.4) y se sustituyen en (C-1.3) para obtener f⁽ⁿ⁺¹⁾. Con este nuevo valor se vuelve a calcular A(f) y A'(f) y se determina el siguiente valor de f⁽ⁿ⁺¹⁾. Esto se realiza hasta que:

$$|f^{(n+1)} - f^{(n)}| < \text{tolerancia}$$

Generalmente utilizando un valor de 0.0001 como tolerancia se obtienen resultados aceptables.

ANEXO C-2

Cálculo De La Viscosidad Del Gas Natural Mediante El Método Propuesto Por Lee, González y Eakin³.

La expresión que determina la viscosidad de gas es:

$$\mu = [K_e (x \rho^Y)] / 10\,000 \quad (C-2.1)$$

donde:

$$K_e = \frac{ (7.77 + 0.0063 M) T^{1.5} }{ 122.4 + 12.9 M + T } \quad (C-2.2)$$

$$x = 2.57 + \frac{ 1\,914.5 }{ T } + 0.0095 M \quad (C-2.3)$$

$$Y = 1.11 + 0.04 x \quad (C-2.4)$$

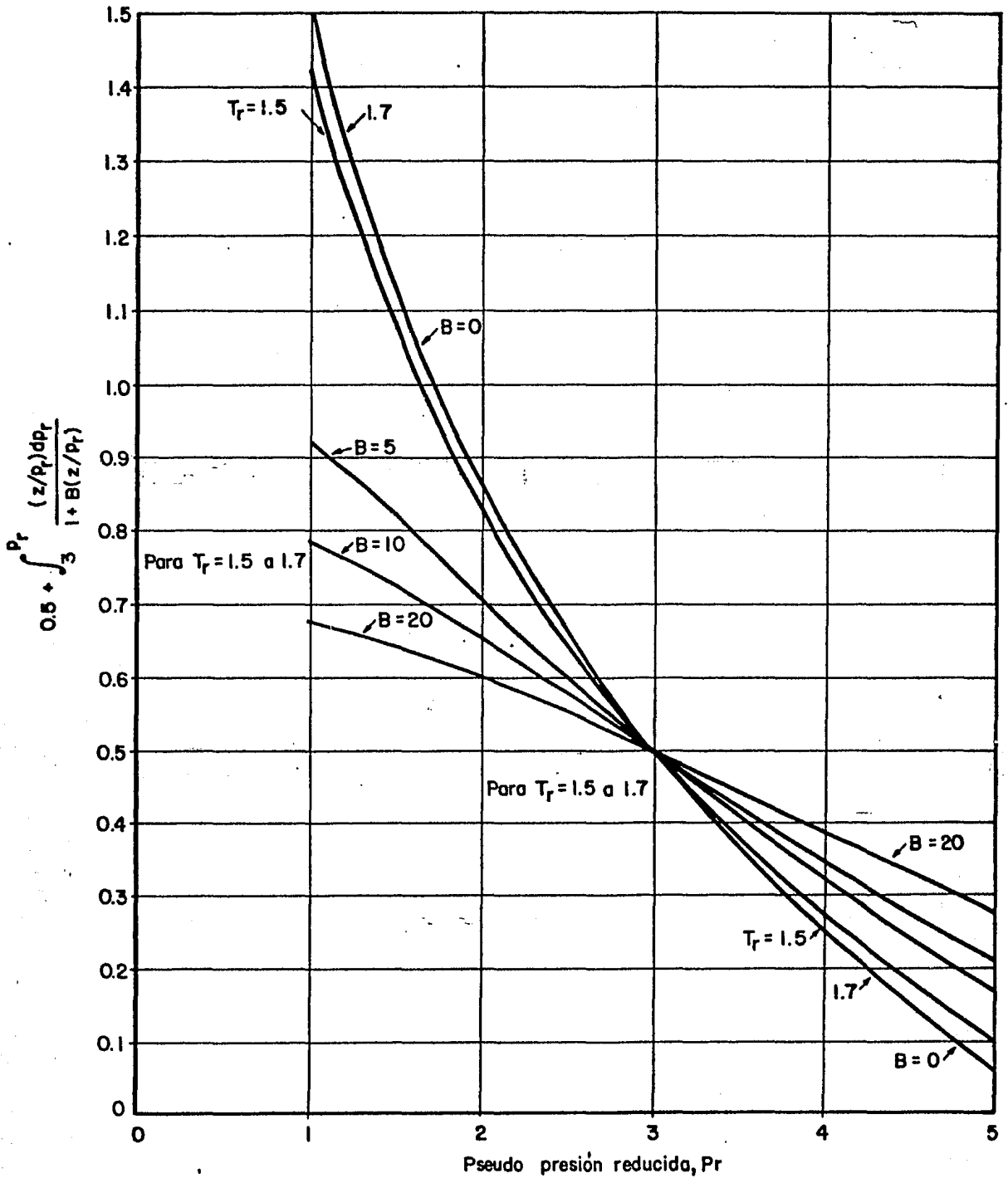
$$\rho = \frac{ 4.3453 \times 10^{-2} (S.G.) p }{ Z T } \quad (C-2.5)$$

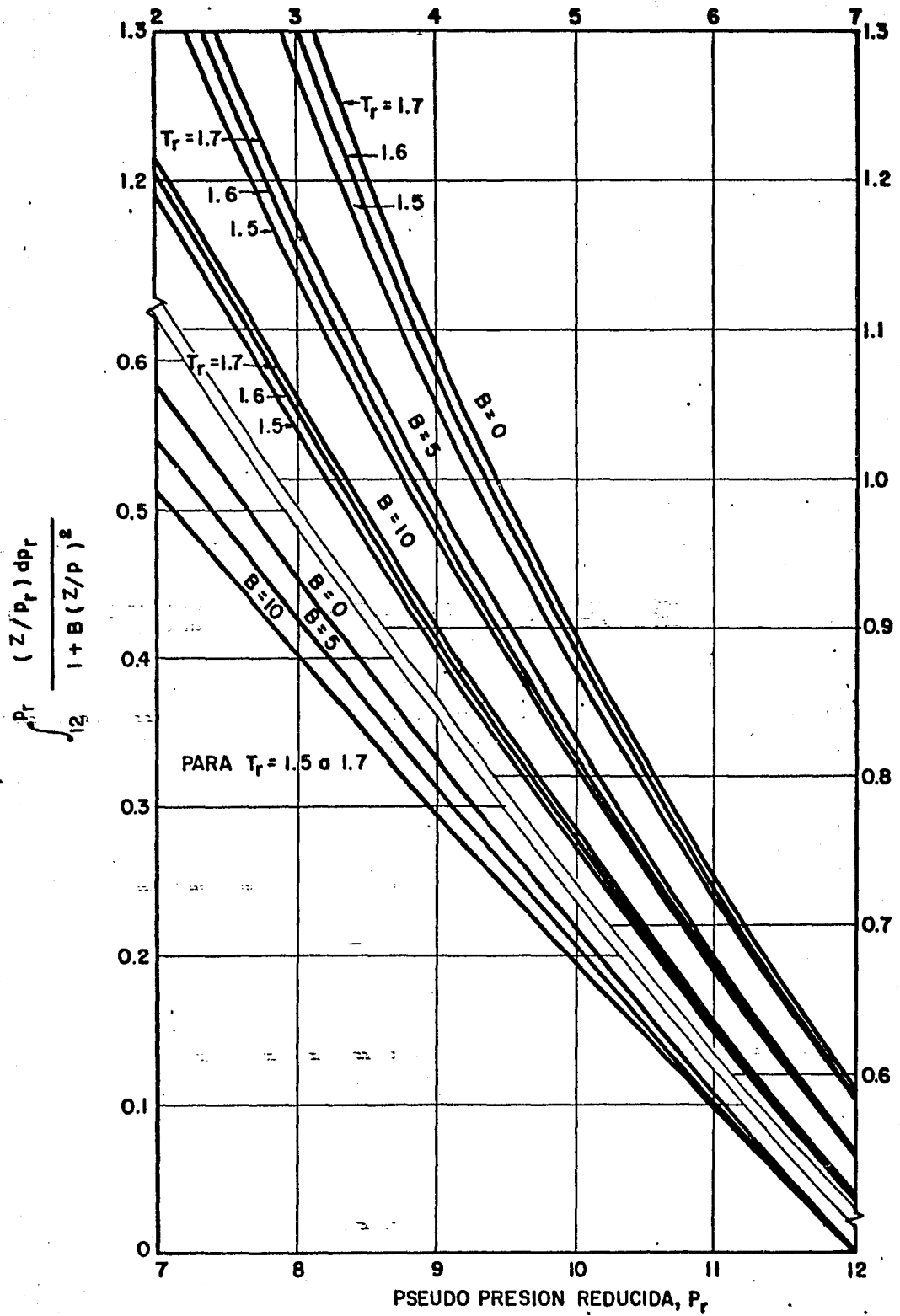
M = peso molecular del gas

La viscosidad del gas en la ec.(C-2.1) se obtiene en centipoises cuando la presión se introduce en psia y la temperatura en °R en la ec.(C-2.5). El peso molecular, M, está en lbm/mol.

ANEXO C-3

Valores De La Integral De Sukkar Y Cornell ⁹.





ANEXO C-4

Corrección De Las Propiedades Pseudo Críticas De Un Gas⁹.

La presión crítica del gas es:

$$p = \sum_{i=1}^n (y_i p_{ci})$$

La temperatura crítica del gas es:

$$T = \sum_{i=1}^n (y_i T_{ci})$$

en donde:

y_i = fracción en por ciento del componente

p_{ci} = presión crítica del componente

T_{ci} = Temperatura crítica del componente

Con los contenidos de contaminantes (en por ciento), se determina mediante la fig.(C.4.1) el valor de ϵ

La temperatura pseudocrítica corregido es:

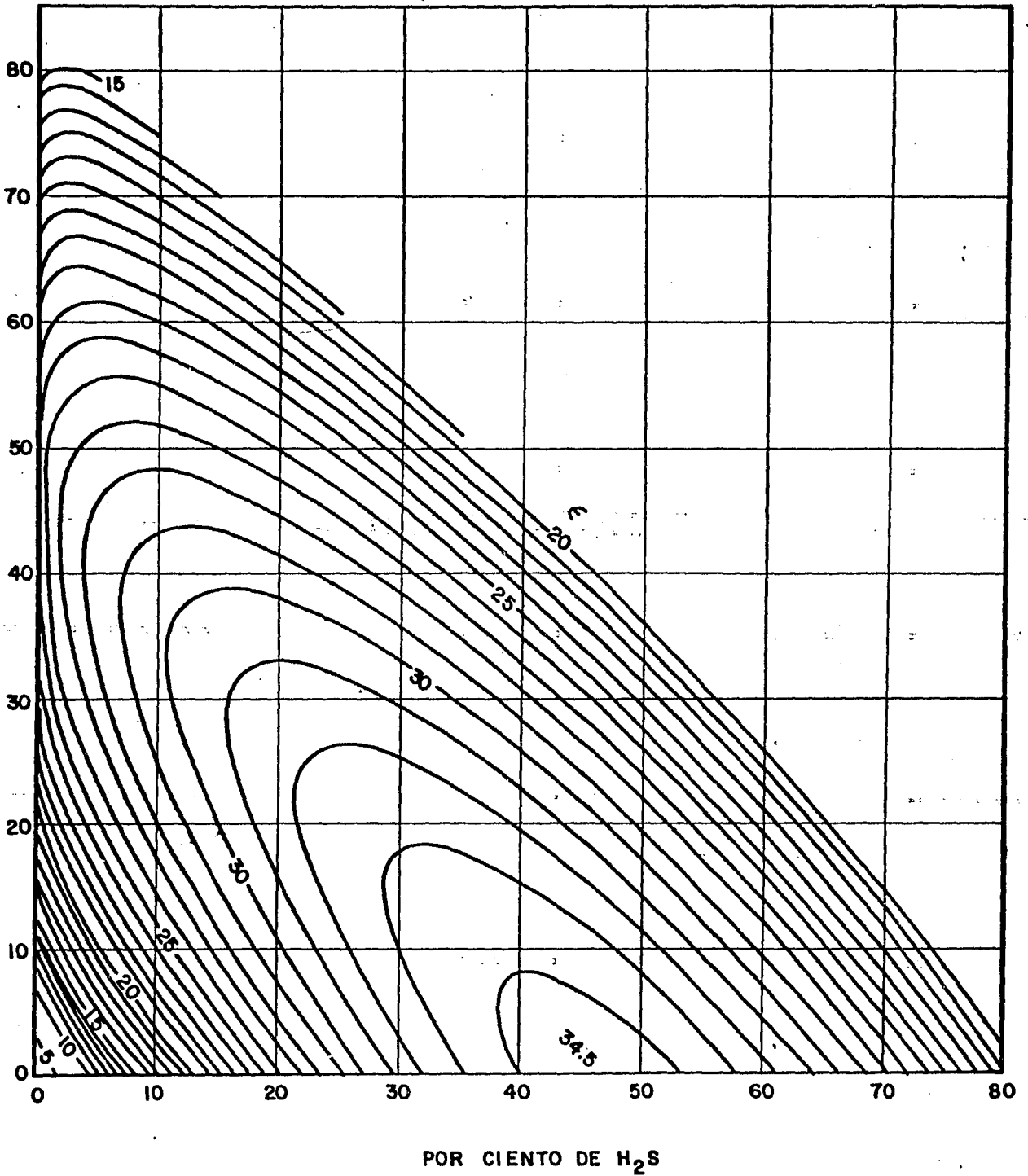
$$T_c' = T_c - \epsilon$$

La presión pseudocrítica del gas, ya corregida es:

$$p_c' = p_c \left(\frac{T_c'}{T_c + y_{H_2S} (1 - y_{H_2S}) \epsilon} \right)$$

Entonces, las propiedades pseudoreducidas son:

$$p = \frac{p}{p_c'} \quad y \quad T = \frac{T}{T_c'}$$



- Fig. (C.4.1). - Factor de ajuste de la pseudo temperatura reducida, ϵ °F.

ANEXO C-5

Cálculo del factor de compresibilidad de un gas real¹³

Yarborough¹³ y Hall propusieron una ecuación de estado -- para determinar el factor de compresibilidad Z, en función de sus pseudo propiedades reducidas. Esta ecuación es:

$$\begin{aligned} & -0.06125 p_r t \exp[-1.2(1-t)^2] + \frac{y + y^2 + y^3 - y^4}{(1-y)^3} \\ & - (14.76 t - 9.67 t^2 + 4.58 t^3) y^2 + (90.7 t - 242.2 t^2 \\ & + 42.4 t^3) y (2.18 + 2.82 t) = 0 \end{aligned} \quad (C-5.1)$$

donde:

$$p_r = \text{presión reducida del gas} = \frac{p}{p_c}$$

$t = 1/t_r =$ recíproco de la temperatura reducida

$$= \frac{T_c}{T}$$

$y =$ variable que depende de T_r y p_r

La ec.(C-5.1) puede ser escrita como:

$$F^{(n)} = a p_r + b - cy^2 + ey^x = 0 \quad (C-5.2)$$

donde:

$$a = -0.06125 t \exp[-1.2 (1-t)^2]$$

$$b = \frac{y + y^2 + y^3 - y^4}{(1-y)^3}$$

$$c = (14.76 t - 9.76 t^2 + 4.58 t^3)$$

$$e = (90.7 t - 242.2 t^2 + 42.4 t^3)$$

$$x = 2.18 + 2.82 t$$

Esta ecuación puede resolverse por el método de Newton - Raphson¹² para valores de y.

Haciendo $y^{(0)} = 0.001$

El siguiente valor de y será:

$$y^{(n+1)} = y^n - \frac{F(n)}{\frac{dF(n)}{dy}} \tag{C-5.3}$$

donde:

$$\begin{aligned} \frac{dF^n}{dy} = & \frac{1 + 4y + 4y^2 - 4y^3 + y^4}{(1-y)} - (29.5 t - 19.52 t^2 \\ & + 9.10 t^3) y + (2.18 + 2.82 t) (90.7 t - 242.2 t^2 \\ & + 42.4 t^3) y^{(1.18 + 2.82 t)} \end{aligned} \tag{C-5.4}$$

y el valor buscado de la variable y será cuando;

$$\left| y^{(n+1)} - y^{(n)} \right| \leq \text{tolerancia}$$

con una tolerancia de 0.0001 se han obtenido buenos resultados

con el valor de y , calculado anteriormente, se sustituye en la siguiente expresión:

$$Z = \frac{0.06125 \text{ pr } t \exp[-1.2 (1-t)^2]}{y}$$

(C-5.5)

y se obtiene el valor de Z deseado.

ANEXO C-6

Determinación de las Propiedades Termodinámicas Del Vapor.

James W. Mercer y Charles R. Faust²¹ propusieron en su trabajo las siguientes relaciones para las determinación de las propiedades termodinámicas del vapor:

Entalpía del vapor;

$$h = 2822.82 - 39.952/p + 2.54342/p^2 - 0.938879 p^2$$

Temperatura del vapor;

$$T = -374.669 + 47.9921p - 0.633606p^2 + 7.39386E-5 h^2 - 3.3372E6/(h^2 p^2) + 0.0357154/p^3 - 1.1725E-9 h^3 p - 2.26861E15/h^4.$$

$$\rho = -2.26162E-5 + 0.0438441p - 1.79088E-5 ph + 3.69276E-8 p^4 + 5.17644E-13 h^3 p$$

en donde:

p = presión a la que existe el vapor, MPa.

T = temperatura a la que existe el vapor, °C.

h = entalpía específica del vapor, KJ/KG.

ρ = volumen específico del vapor, M³/KG.

ANEXO C-7

Validación De La Suposición De $pv=cte.$ Y Entalpía Con $pv=cte.$

Esta validación se efectúa tomando de algunas tablas de vapor²² diversos valores de presión y volumen específico manteniendo la entalpía constante. En el segundo caso se mantiene constante el producto de la presión y el volumen específico y se determina la entalpía. En ambos casos se realizó para vapor saturado y sobrecalentado.

Para el primer caso, $h= 2776.2$ KJ/KG

p (bar)	pv	
10	1.94	
15	1.96	
20	1.97	
25	1.97	
30	1.97	
35	1.96	Máxima diferencia= 1.3%

Para el segundo caso, $pv= 1.943$ ($\frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{KG}}$)

p (bar)	h (KJ/KG)	
10	2776.2	
15	2757.8	
20	2751.9	
25	2750.6	
30	2751.8	
35	2756.2	Máxima diferencia= 0.7%