

01174

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA



“OPTIMIZACION DE LA PRODUCCION
DE POZOS DE GAS”

T E S I S
Q U E P R E S E N T A :
JOSE MANUEL GARCIA ORTEGA
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA
(P E T R O L E R A)

185740

DIRIGIDA POR:
DR. RODOLFO GABRIEL CAMACHO VELAZQUEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F.



2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

INDICE

AGRADECIMIENTOS

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMEN

CAPITULO 1. INTRODUCCION

CAPITULO 2. MODELOS PARA YACIMIENTO DE GAS, TUBERÍAS

Y ESTRANGULADORES.

2.1 Modelos de Yacimiento	4
2.1.1 Balance de materia	4
2.1.2 Ecuaciones para el Yacimiento	7
2.2 Ecuaciones para las tuberías	8
2.2.1 Modelos para tuberías verticales e inclinadas con flujo de gas	9
2.2.1.1 Método exponencial	13
2.2.1.2 Método de Sukkar	14

2.2.2 Flujo Horizontal	15
2.2.2.1 Procedimientos no Iterativos	15
2.3 Ecuaciones para el estrangulador	16
CAPITULO 3. OPTIMIZACION DE SISTEMAS DE PRODUCCION DE GAS.	
3.1 Algoritmo de optimización	19
3.2 Función objetivo	20
3.3 Sistema yacimiento-produccion	22
3.4 Proceso de optimización	24
CAPITULO 4. RESULTADOS.	
4.1 Gas seco	25
4.2 Gráficas	34
4.3 Presencia de condensado en la línea de descarga	40
CAPITULO 5 . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	
	43
NOMENCLATURA	45
REFERENCIAS	48

APÉNDICE A. Algoritmos de optimización no lineal

A.1 Introducción	51
A.2 Optimización con y sin restricciones	53
A.3 Propiedades de los algoritmos	56
A.4. Algoritmos de optimización	59
A.4.1 Modelos cuadráticos	60
A.4.1.1 Método de Newton	62
A.4.1.2 Método de pasos Descendentes	64
A.4.2 Métodos cuasi-Newton	65
A.4.3 Estrategias de búsqueda directa	67
A.4.3.1 Método de Gill	68
A.4.3.2 Método COMPLEX	69

APÉNDICE B. Modelos Mecanístico de Xiao.

B.1 Introducción	76
B.2. Transición Estratificado - No estratificado	76
B.3 Transición Intermitente - Anular	77
B.4 Transición Intermitente - Burbujas Dispersas	77
B.5 Transición Estratificado Suave - Estratificado con Ondas	78
B.6 Flujo Estratificado	79
B.7 Flujo Intermitente	79
B.8 Flujo Anular	80

APÉNDICE C. Programa de Manejo de Condensado.	82
---	----

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A Dios por que sin Él nada se logra.

A mí esposa Lupita por se mí más grande apoyo, por todo el amor que me tiene, gracias por estar siempre a mí lado y por el impulso para la culminación de este sueño.

A mis hijos Montserrat y José Manuel porque todo lo que hago es siempre pensando en ellos.

A mis padres José Manuel y Dolores por darme la vida y con ello la oportunidad de superarme.

A mis hermanos Ligia, Rossana y Bernardo.

A mí abuelito Manuel (q.e.p.d.) por todo lo que fue para mí.

A mí tío Ariel (q.e.p.d.) por su amor y apoyo incondicional.

Un agradecimiento especial a mi amigo y maestro doctor Rodolfo Camacho Velázquez por todo el tiempo que dedico a la realización de este trabajo y su apoyo durante toda la maestría.

A los doctores Fernando Samaniego Verduzco, Jesús Rivera Rodríguez, Luis Macías Chapa y el ingeniero Horacio Zuñiga Puente por la revisión y su valiosa aportación para mejorar este trabajo.

A la Facultad de Ingeniería.

A mi muy querida Universidad.

A Petróleos Mexicanos.

RESUMEN

Se presenta el análisis de optimización para un pozo considerando dos funciones objetivo, gas producido acumulado y valor presente neto, se muestra el resultado para cada una de ellas, así como, la comparación entre ellas. Como parte complementaria se presenta el análisis de las caídas de presión en la línea de descarga, en caso de existir condensado y para el caso de que sea gas seco. Para la optimización se utilizó el método COMPLEX y para el análisis de las caídas de presión el modelo mecánico de Xiao para el flujo multifásico, y la ecuación de Pandhandle para el flujo de gas.

1.- INTRODUCCIÓN

El comportamiento de la producción de un pozo es función de varias variables:

$$Q = f(P_{yac}, D_{tp}, D_{est}, D_{idd}, \dots) \quad (1.1)$$

Una modificación en cualquiera de estas variables causa un cambio en el comportamiento del pozo. Cuando se diseña un pozo nuevo, o cuando se analiza uno ya existente, es necesario encontrar la combinación de valores que permitan optimizar el comportamiento del pozo.

Una práctica común es usar el análisis nodal como un método de “optimización” para decidir el mejor diámetro de tubería, presión en la cabeza del pozo, diámetro del estrangulador, etc. El problema con esta práctica es que el análisis nodal no es realmente un proceso de optimización, sino un método restrictivo de optimizar, debido a la forma en la cual funciona, que es dar valores a una variable de decisión y a partir de ahí obtener un resultado. Este procedimiento se repite muchas veces, después las respuestas se comparan y se toma una decisión con base en la colección de resultados obtenidos. Esto significa que la decisión se toma analizando el comportamiento del sistema yacimiento producción en regiones particulares. Por esta razón, es posible considerar el análisis nodal como un procedimiento incompleto de optimización.

Matemáticamente es posible definir el procedimiento de optimización como el encontrar los dos valores extremos de una función. Dada una función de n variables:

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.2)$$

un procedimiento de optimización permite encontrar la combinación de estas variables para obtener los extremos de la función, valores máximo y mínimo. Cuando los valores de las variables son restringidas a un cierto rango, se debe utilizar un procedimiento de optimización restringido.

En este trabajo el modelo del yacimiento se acopla con el modelo de tuberías verticales y estos modelos a su vez se acopla con el algoritmo de optimización. El yacimiento es tratado como un tanque, suponiendo flujo pseudoestacionario. Las correlaciones más utilizadas en la industria son incluidas; en el capítulo 2 se presentan los detalles apropiados.

En el capítulo 3 se discuten las técnicas y la implementación de los algoritmos de optimización. Se utilizan dos funciones objetivo: La producción acumulada (G_p) y el valor presente neto (VPN). Se utilizan dos variables de decisión pero como se verá más adelante la técnica utilizada no restringe el número de variables a utilizar. En el capítulo 4 se presenta el análisis del condensado. En

los capítulos 5 y 6 se presentan los resultados con las conclusiones y las recomendaciones del caso.

En el Apéndice *A* se discuten las técnicas y la implementación de los algoritmos de optimización. En el Apéndice *B* se presenta una explicación del modelo meánístico de Xiao para el cálculo de caídas de presión en la línea de descarga. Por último en el Apéndice *C* se presenta el programa de cómputo usado para el calculo de gradientes y caídas de presión con presencia de condensado en la línea.

2. MODELOS PARA UN YACIMIENTO DE GAS, TUBERÍAS Y ESTRANGULADORES

2.1. Modelo del Yacimiento

En un balance de materia básico, el modelo considera al yacimiento como un "tanque", haciendo simplificaciones adicionales como son:

- El yacimiento es homogéneo, isotrópico, horizontal, cilíndrico y de espesor constante.
- El yacimiento se representa por medio de una sola celda.
- El yacimiento está saturado con gas y una fase de agua congénita inmóvil.
- Durante un paso de tiempo, la producción ocurre bajo un estado pseudoestacionario, a un gasto constante.
- Presión capilar, efectos de gravedad y fuerzas de conificación despreciables.

2.1.1 Balance de Materia

El modelo usa el concepto de volumen constante. Considera V_i el volumen inicial de hidrocarburos a la presión inicial, p_i y supone que a una presión subsecuente p , el volumen G_p de gas ha sido producido en la superficie.

$$\text{Volumen inicial de gas en el yacimiento} = GB_{gi} \quad (2.1)$$

$$\text{Volumen de gas en el yacimiento al tiempo } t = (G - G_p)B_g \quad (2.2)$$

Cambio en el volumen de gas en el yacimiento en $t =$ Volumen inicial de gas -
volumen de gas en el yacimiento en t .

$$0 = GB_{gi} - (G - G_p)B_g \quad (2.3)$$

$$0 = GB_{gi} - GB_g + G_p B_g \quad (2.4)$$

$$G(B_g - B_{gi}) = G_p B_g \quad (2.5)$$

Reacomodando términos:

$$G_p B_g = G(B_g - B_{gi}) \quad (2.6)$$

Si consideramos entrada y producción de agua:

$$G_p B_g + W_p B_w = G(B_g - B_{gi}) + W_e \quad (2.7)$$

Otra forma de la ecuación de balance se obtiene utilizando la definición de B_g ,

$$B_g = \frac{P_b z T}{T_b P} \quad (2.8)$$

Si $T = \text{constante}$, entonces

$$G\left(\frac{z}{P}\right) - G\left(\frac{z_i}{P_i}\right) = G_p\left(\frac{z}{P}\right) \quad (2.9)$$

$$\left(\frac{z}{P}\right)(G - G_p) = G\left(\frac{z_i}{P_i}\right) \quad (2.10)$$

$$\frac{P}{z} = \frac{P_i}{z_i} - \frac{G_p P_i}{G z_i} \quad (2.11)$$

La figura 2.1 ilustra una gráfica típica de la ecuación (2.14),

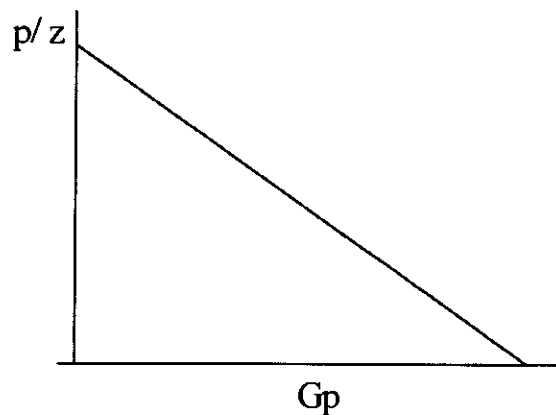


Fig. 2.1 Gráfica del Balance de Materia

2.1.2 Ecuaciones para el yacimiento

Considerando la ley de Darcy:

$$q = \frac{3.9644 \times 10^{-2} khT_b z_b r}{TP_b z \mu} \quad (2.12)$$

Es posible obtener la ecuación de flujo pseudoestacionario:

$$q = \frac{19.87 \times 10^{-6} khT_b (\bar{P}_R^2 - \bar{P}_{wf}^2)}{TP_b \bar{\mu} z \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s + Dq - \frac{3}{4} \right)} \quad (2.13)$$

O considerando la ecuación de Al-Hussainy, Ramey y Crawford (1966) en términos de pseudopresiones,

$$q = \frac{19.87 \times 10^{-6} khT_b (\psi(p_e) - \psi(p_{wf}))}{TP_b \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s + Dq - \frac{3}{4} \right)} \quad (2.14)$$

$$\psi(p) = 2 \int_{p^0}^p \frac{p}{\mu(p)z(p)} dp \quad (2.15)$$

2.2 Ecuaciones para las tuberías.

La caída de presión en una tubería en una distancia, L, de un fluido en una sola fase puede ser obtenida mediante la solución de un balance de energía mecánica, el cual en forma diferencial es:

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{udu}{g_c} + \frac{g}{g_c} dZ + \frac{2f_f u^2 dL}{g_c d} + dW_s = 0 \quad (2.16)$$

Si no existe algún mecanismo en la tubería que realice un trabajo (bombas, compresor, turbinas, etc.), la ecuación para una tubería se puede expresar como:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{g}{g_c} \rho \Delta Z + \frac{\rho}{2g_c} \Delta u^2 + \frac{2f_f \rho u^2 L}{g_c d} \quad (2.17)$$

donde el fluido se mueve de la posición 1 a la posición 2. Los tres términos de la derecha son, la energía potencial, la energía cinética, y las caídas de presión a lo largo de la tubería debido a la fricción, respectivamente, ó:

$$\Delta p = \Delta p_{PE} + \Delta p_{KE} + \Delta p_f \quad (2.18)$$

2.2.1 Modelos para tuberías verticales e inclinadas con flujo de gas.

Considerando que no hay cambios en la energía cinética, el balance de energía se puede expresar como:

$$\Delta p = \Delta p_{PE} + \Delta p_f \quad (2.19)$$

Ver también la Figura 2.2 donde se puede observar que:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = L \text{sen}\theta \quad (2.20)$$

entonces

$$dz = dL \text{sen}\theta \quad (2.21)$$

Así,

$$\Delta p_{PE} = \frac{g}{g_c} \rho L \text{sen}\theta \quad (2.22)$$

Usando la ecuación del balance de energía en términos diferenciales queda:

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{g}{g_c} dz + \frac{2f_f u^2 dL}{g_c d} = 0 \quad (2.23)$$

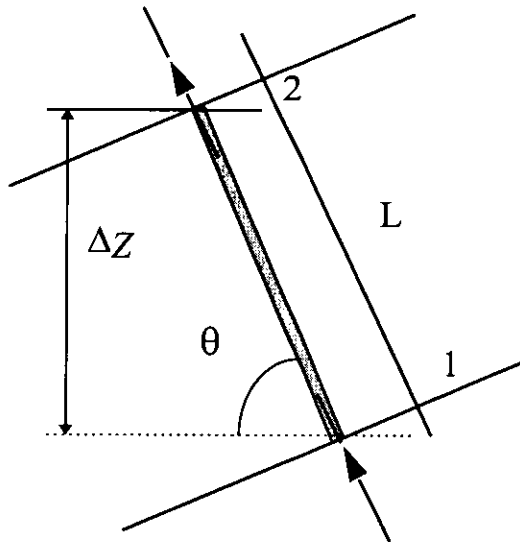


Figura 2.2 Flujo a través de una tubería inclinada

Combinando las ecuaciones anteriores llegamos a:

$$\frac{dp}{\rho} + \left(\frac{g}{g_c} \text{sen}\theta + \frac{2f_f u^2}{g_c d} \right) dL = 0 \quad (2.24)$$

De la ley de los gases reales, la densidad del gas se puede expresar como:

$$\rho = \frac{MW}{zRT} \quad (2.25)$$

En términos de la densidad específica del gas:

$$\rho = \frac{28.97\gamma_g P}{zRT} \quad (2.26)$$

La velocidad puede escribirse en términos del flujo volumétrico, a condiciones estándar, como:

$$u = \frac{4}{\pi d^2} qz \left(\frac{T}{T_b} \right) \left(\frac{P_b}{P} \right) \quad (2.27)$$

Sustituyendo 2.26 y 2.27 en 2.24 llegamos finalmente a:

$$\frac{zRT}{28.97\gamma_g P} dp + \left\{ \frac{g}{g_c} \text{sen}\theta + \frac{f_f}{\pi^2 g_c d^5} \left[\left(\frac{T}{T_b} \right) \left(\frac{P_b}{P} \right) qz \right]^2 \right\} dL \quad (2.28)$$

Esta ecuación contiene tres variables que son función de la posición: el factor de compresibilidad, z , la temperatura, y la presión. Por lo que para la solución rigurosa de

la ecuación tendríamos que sustituir los términos de presión, temperatura y factor de compresibilidad, por una ecuación de estado, lo cual requeriría de integración numérica.

Alternativamente, por sencillez, se pueden suponer valores promedio del factor de compresibilidad y temperatura para cada segmento de tubería a considerar. Si la temperatura varía linealmente entre el punto 1 y 2, el promedio puede ser estimado por:

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2.29)$$

O por medio de una variación logarítmica de la temperatura, (Bradley, 1987)

$$T_{lm} = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} \quad (2.30)$$

Para obtener un valor promedio del factor de compresibilidad, se puede usar el valor promedio de temperatura y una presión conocida, p_1 , una vez obtenido el valor de p_2 , se checa el valor encontrado con el valor de la presión media. Si el resultado difiere más de una tolerancia establecida, se repite el cálculo hasta que la tolerancia se cumpla.

2.2.1.1 Método Exponencial o Método de Temperatura y Factor de Compresibilidad Medios⁴.

Usando valores promedio de temperatura y factor de compresibilidad, e integrando la ecuación (2.28) llegamos a:

$$p_2^2 = e^S p_1^2 + \frac{32f_f}{\pi^2 d^5 g_c \text{sen}\theta} \left(\frac{q p_b \overline{zT}}{T_b} \right)^2 (e^S - 1) \quad (2.31)$$

donde S es definida como:

$$S = - \frac{(2)(28.97)\gamma_g \left(\frac{g}{g_c} \right) L \text{sen}\theta}{Rz\overline{T}} \quad (2.32)$$

El factor de fricción puede ser calculado con el Número de Reynolds y el factor de rugosidad, el promedio está dado por :

$$N_{Re} = \frac{4(28.97)\gamma_g q p_b}{\pi d R \mu \overline{T}} \quad (2.33)$$

Usando factores de conversión y unidades de campo las ecuaciones (2.31) y (2.33), se pueden expresar como:

$$p_2^2 = e^S p_1^2 + 2.685 \times 10^{-3} \frac{f_f (q \overline{zT})^2}{d^5 \text{sen}\theta} (e^S - 1) \quad (2.34)$$

donde:

$$S = \frac{-0.0375\gamma_g L \text{sen}\theta}{zT} \quad (2.35)$$

En las ecuaciones (2.33) a (2.35): q_{sc} (MSCF/d), p (psi), L (pie), T (°R), d (pg) .

2.2.1.2 Método de Sukkar y Cornell¹

Este método considera una temperatura promedio, pero incluye una variación del factor de compresibilidad con respecto a la presión. Escribiendo la ecuación 2.28 en forma pseudoreducida:

$$\int_{p_{pr2}}^{p_{pr1}} \frac{\frac{z}{p_{pr}} dp_{pr}}{1 + \frac{Bz^2}{p_{pr}^2}} = \frac{0.01875\gamma_g L}{T} \quad (2.36)$$

donde:

$$B = \frac{666.63 f q_{sc}^2}{d^5 p_{2pc}^2 \cos\theta} \quad (2.37)$$

2.2.2 Flujo Horizontal

Suponiendo flujo horizontal, estado adiabático estacionario e isotérmico, considerando cambios insignificantes en la energía cinética y las definiciones de densidad del gas (2.25) y de la velocidad (2.27):

$$\frac{dp}{dx} = \frac{fpu^2}{2g d} = \left(\frac{pM}{zRT}\right) \left(\frac{fu^2}{2g d}\right) \quad (2.38)$$

Usando una temperatura promedio y un factor de compresibilidad promedio, e integrando la ecuación 2.38 de 0 a L, y considerando las presiones p_1 (L=0) a p_2 (x=L),

$$q = 5.635382 \times 10^{-3} \left(\frac{T_b}{p_b}\right) \left[\frac{(p_1^2 - p_2^2)d^5}{\gamma_g f L z T}\right]^{0.5} \quad (2.39)$$

Con las mismas unidades mencionadas en la sección 2.2.1.1

La solución de la ecuación 2.39 se obtiene por medio de procedimientos iterativos debido a que f y z dependen de la presión y el gasto.

2.2.2.1 Procedimientos No Iterativos.

En la literatura técnica se han presentado varias ecuaciones de flujo para calcular el flujo en tuberías; una de ellas, de uso muy común en la industria petrolera para este tipo de problemas, ya sea en su forma original o con ligeras modificaciones, es la de Panhandle ⁷:

$$q = K_1 \left(\frac{T_b}{P_b} \right)^{K_2} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{T_f L z} \right)^{K_3} \left(\frac{1}{\gamma_g} \right)^{K_4} d^{K_5} \quad (2.40)$$

donde:

Panhandle A ($d < 16$ pg)

$$K_1 = 435.8700, K_2 = 1.0788, K_3 = 0.4606, K_4 = 2.2682, K_5 = 0.5394$$

Panhandle B ($d > 16$ pg)

$$K_1 = 737.000, K_2 = 1.102, K_3 = 0.961, K_4 = 2.530, K_5 = 0.5100$$

2.3 Ecuaciones para el Estrangulador

Generalmente se utiliza en todos los pozos alguna forma de restricción del flujo. Típicamente, es utilizado un estrangulador superficial localizado en la cabeza del pozo. Existen en general dos tipos de estranguladores; estranguladores positivos y estranguladores ajustables.

Algunas de las razones para el uso de estranguladores en los pozos son:

- Proteger el yacimiento y el equipo superficial de fluctuaciones de presión.
- Prevenir la conificación de agua.
- Proporcionar la caída de presión necesaria en el yacimiento para evitar daños a la formación y entrada de arena al pozo.
- Producir el yacimiento al gasto más eficiente.

Cuando un fluido compresible pasa a través de una restricción, la expansión del fluido es un factor importante en la ecuación. Para un flujo isoentrópico de un gas ideal a través de un estrangulador, el gasto es relacionado con (p_1 / p_2) por Szilas⁴ como:

$$q_g = \frac{\pi}{4} D_2^2 p_1 \frac{T_{sc}}{p_{sc}} C_d \sqrt{\left(\frac{2g_c R}{28.97\gamma_g T_1} \right) \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (2.41)$$

En unidades de campo:

$$q_g = 3.505 D_{64}^2 \frac{P_1}{P_{sc}} C_d \sqrt{\left(\frac{1}{\gamma_g T_1}\right) \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right) \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]} \quad (2.42)$$

donde:

- q_{sc} (MSCF/d)
- p_1 presión antes del estrangulador (psia)
- p_2 presión después del estrangulador (psia)
- T (°R)
- D_{64} (64 avos de pulgada)
- γ Relación de calores específicos (adim)
- C_d Coeficiente de flujo del estrangulador (adim)

Las ecuaciones 2.41 y 2.42 son utilizadas cuando existe flujo crítico; para los efectos de este trabajo consideraremos que siempre nos encontraremos en flujo crítico.

Se considera que existe flujo crítico si:

$$\frac{p_2}{p_1} \leq 0.5 \quad (2.43)$$

CAPITULO 3. OPTIMIZACION DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE GAS.

3.1 Algoritmo de Optimización.

Se acoplaron tres elementos para el análisis de la optimización :

- a) El yacimiento y el sistema de producción.
- b) El algoritmo de optimización no lineal con restricciones.
- c) La función objetivo.

Un procedimiento general es:

- 1.- Fijar la suposición inicial para las variables de decisión, fijar las restricciones necesarias, y posibles restricciones implícitas.
- 2.- Determinar los valores de las variables de decisión del modelo de optimización no lineal.
- 3.- Usando estos valores de las variables de decisión, el modelo de producción inicia con sus cálculos del sistema.
- 4.- Basado en los resultados de los cálculos, el programa genera valores para la función objetivo.

5.- Usando los valores de la función objetivo, el modelo de optimización no lineal decide nuevas estimaciones para las variables de decisión, y acorde al criterio de convergencia, el modelo chequea y de ser necesario regresa al paso 3.

En este trabajo se utiliza el procedimiento de optimización de búsqueda directa, el algoritmo desarrollado por Box²⁰.

Se probaron diversos valores para el algoritmo, determinando un buen comportamiento de éste para :

- El número de vértices en el polígono, $k = n+1$, donde n es el número de variables de decisión.
- Los valores de convergencia $\beta=0.1$ y $\gamma= 5$.
- El valor usado para el coeficiente de reflexión es 1.3 tal como lo recomienda Box²⁰.

3.2 Función Objetivo.

En este estudio como primera función objetivo se utilizó el gas producido acumulado, la cual se describe en el Capítulo 2. Como segunda función objetivo se introducen variables económicas y la función objetivo es el valor presente neto (VPN); entonces la función objetivo queda:

$$VP = \frac{FI_T}{(1+q)^{T-\frac{1}{2}}} \quad (3.1)$$

donde:

q = Gasto de gas (MPCD)

FI_T = Precio del gas x gas producido (Mdlls x MPCD)

Si se supone que el precio del gas se incrementa con el tiempo, entonces se introduce el término de la inflación i :

$$VP = \sum_{T=1}^n \frac{FI_T}{\left(\frac{1+q}{1+i}\right)^{T-\frac{1}{2}}} \quad (3.2)$$

Es posible modificar la ecuación 3.2, para calcular el valor presente neto (VPN) :

$$VPN_v = \sum_{T=1}^n \frac{FI_T - Cost_T}{\left(\frac{1+q}{1+i}\right)^{T-\frac{1}{2}}} \quad (3.3)$$

$Cost_T$ = costos; mantenimiento, operación, impuestos, etc. (Mdlls)

3.3 Sistema Yacimiento - Producción y Ejemplo.

Para reproducir el comportamiento del yacimiento se utilizó una ecuación de balance de materia, acoplada con una ecuación de flujo radial en estado pseudoestacionario.

Para la tubería vertical se utilizó el método exponencial; se utiliza la ecuación de flujo a través de un orificio para el estrangulador y finalmente la ecuación de Pandhandle para la tubería horizontal:

Ejemplo:

$$\gamma_g = 0.65$$

$$k = 100.0 \text{ md.}$$

$$h = 100.0 \text{ pie.}$$

$$A = 1000.0 \text{ Acre.}$$

$$\varnothing = 0.22$$

$$S_w = 0.35$$

$$p_i = 3500.0 \text{ psia}$$

$$p_b = 14.7 \text{ psia}$$

$$T_b = 60.0 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$S = -3.0$$

$$D = 10^{-3} \text{ (MSCF/d)}^{-1}$$

$$T_r = 150.0 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{if} = 100.0 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$i = 0.04$$

$$\text{costo} = 1\,200\,000 \text{ dlls}$$

$$\text{precio} = 3 \text{ dlls / MPC}$$

Restricciones:

- Explícitas:

$$1.0 \leq d_{tp} \leq 8.0 \text{ (pg)}$$

$$50 \leq P_{wh} \leq 800 \text{ (psi)}$$

- Implícitas:

$$P_{wfaban} = 700 \text{ psi}$$

$$q_{\text{producido}} \leq q_{\text{deseado}}$$

3.4 Proceso de Optimización

Se probaron dos procesos de optimización, en el primero se obtuvo el diámetro óptimo manteniendo la presión en la cabeza del pozo constante durante todo el tiempo; en el segundo proceso se mantuvieron variables la presión en la cabeza del pozo y el diámetro de la tubería de producción. En ambos casos los rangos de la tubería y la presión en la cabeza del pozo fueron restringidos en los rangos anteriormente establecidos. Es importante hacer notar que los primeros resultados de este trabajo fueron validados con la tesis de Fuentes Nucamendi¹.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 Gas Seco

1.- Se hace la primera prueba, optimizando el diámetro de la tubería de producción, manteniendo la presión en la cabeza del pozo constante (500 psi). Se considera además que el pozo produce el máximo gasto que es capaz de aportar.

El resultado que se obtiene es el esperado ya que al fluir el pozo sin ninguna restricción de gasto, el diámetro mayor es por el que se va a obtener mayor producción acumulada. Además se considera que nunca se le cambiará la tubería al pozo en toda su vida productiva, es decir:

diámetro (pg)	pwh (psi)	Gpt (MMpc)
8	500	125 465

Tabla 4.1 Prueba No. 1

2.- La prueba número 2, se hace suponiendo que existe una restricción en el gasto y que no se cambiará la tubería en toda la vida productiva del pozo, mediante el procedimiento siguiente:

I.- Calcular el gasto que es posible que aporte el pozo.

II.- Si el gasto obtenido en I es mayor que el se desea obtener, este punto se desecha y se prueba con un nuevo diámetro.

III.- Si el gasto es menor, se continua con los cálculos.

IV.- Se calcula el valor de la función objetivo.

V.- Se compara con criterios de convergencia, si cumple se detiene el proceso, si no cumple se prueba un nuevo diámetro y se regresa al paso II.

diámetro (pg)	P_{wh} (psi)	G_{pt} (MMpc)
4.47	500	123 205

Tabla 4.2 Prueba No. 2

3.- Para la tercera prueba se realiza el mismo procedimiento, pero ahora se supone que se hará un cambio de tubería en la vida productiva del pozo, los resultados se presentan en la Tabla 4.3:

p_{wh} (psi)	500
Tiempo	diámetro (pg)
Años (1-10)	2.7992
Años (11-20)	7.9999
G_{pt} (MMpc)	123 688

Tabla 4.3 Prueba No. 3

Se observa que en los primeros años el pozo se comporta mejor con un diámetro pequeño, pero al pasar el tiempo y depresionarse el pozo se obtiene la tubería de mayor diámetro ya que intenta salir la mayoría del gas que todavía se encuentra en el yacimiento. Además se observa un incremento de gas acumulado con respecto al punto anterior.

4.- En la cuarta prueba se lleva acabo el mismo procedimiento, pero ahora se hace la suposición que se harán tres cambios de tubería en la vida productiva del pozo; presentando los resultados en la Tabla 4.4:

P_{wh} (psi)	500
Tiempo	diámetro (pg)
Años (1-5)	2.7992
Años (6-10)	2.7992
Años (11-15)	7.9999
Años (15-20)	7.9999
G_{pt} (mmpc)	124 520

Tabla 4.4 Prueba No. 4

Se observa que al igual que en la prueba anterior, en los primeros años el pozo se comporta mejor con un diámetro pequeño, pero al pasar el tiempo y depresionarse el pozo la tubería de mayor diámetro es la más adecuada; también es de hacerse notar que después de 10 años, para todos los casos, el pozo ya se encuentra depresionado y por lo tanto se favorece la tubería de mayor diámetro. Además se observa un incremento de gas acumulado con respecto al punto anterior.

De los resultados anteriores se observa que mientras más cambios de diámetro se realicen en el pozo, se obtiene mayor recuperación, aunque para tomar la determinación de que esto es lo más apropiado se debe realizar un estudio económico.

5.- La quinta prueba se hace considerando que la presión en la cabeza del pozo y el diámetro de la tubería de producción son variables. Como primera parte sólo se tomará en cuenta la producción acumulada como función objetivo, y en la segunda parte se cambiará la función objetivo a valor presente neto.

a) Considerando el gas producido acumulado como función objetivo, tomando en cuenta que existe un gasto máximo al cual se produce el pozo, que no habrá cambios de tubería en toda la vida del pozo, y las restricciones descritas en el inciso anterior, se tiene como resultado la Tabla 4.5:

p_{wh} (psi)	270
diámetro (pg)	2.76
G_{pt} (MMpc)	127 495
VPN (MMdls)	907

Tabla 4.5 Prueba No. 5 a

b) Si ahora se considera que el pozo tendrá cambios en la tubería de producción cada 10 años, y se mantienen las mismas restricciones se obtiene como resultado la

Tabla 4.6:

Tiempo	diámetro (pg)	P _{wh} (psi)
Años (1-10)	2.76	270
Años (11-20)	2.6	246
Gpt(MMpc)	128 648	
VPN (MMdls)	884.4	

Tabla 4.6 Prueba No. 5 b

c) Si ahora se considera que el pozo tendrá cambios en la tubería de producción cada 5 años y se mantienen las mismas restricciones se tiene como resultado la Tabla 4.7:

Tiempo	diámetro (pg)	P _{wh} (psi)
Años (1-5)	2.76	270
Años (6-10)	7.99	50
Años (11-15)	7.99	50
Gpt (MMpc)	126 379	
VPN (MMdls)	753 .9	

Tabla 4.7 Prueba No. 5 c

d) Si ahora se considera que el pozo tendrá cambios en la tubería de producción cada 3 años y se mantienen las mismas restricciones se tiene como resultado la Tabla 4.8:

Tiempo	diámetro (pg)	P _{wh} (psi)
Años (1-3)	2.76	270
Años (4-6)	7.99	50
Años (7-9)	7.99	218
Años (10-12)	2.86	311
Años (13-15)	2.86	295
Años (16-18)	7.48	50
Gpt (MMpc)	127 035	
VPN (MMdls)	574 .9	

Tabla 4.8 Prueba 5 d

Ahora considerando el valor presente neto como la función objetivo, tomando en cuenta que existe un gasto máximo al cual se produce el pozo, se tienen como resultados:

e) Considerando que no habrá cambios de tubería en toda la vida del pozo y las restricciones descritas en el inciso anterior, se obtiene la Tabla 4.9:

Presión (psi)	50
diámetro (pg)	1.82
Gpt (MMpc)	111 211
VPN (MMdils)	1 156

Tabla 4.9 Prueba 5 e

f) Si ahora se considera que el pozo tendrá cambios en la tubería de producción cada 10 años, por lo que el pozo se revalúa, y se mantienen las mismas restricciones, se obtiene la Tabla 4.10:

Tiempo	diámetro (pg)	P _{wh} (psi)
Años (1-10)	2.76	270
Años (11-20)	2.6	246
Gpt (MMpc)	128 648	
VPN (MMdils)	884.4	

Tabla 4.10 Prueba 5 f

g) Si ahora se considera que el pozo tendrá cambios en la tubería de producción cada 5 años y se mantienen las mismas restricciones se obtiene la Tabla 4.11:

Tiempo	diámetro (pg)	P _{wh} (psi)
Años (1-5)	2.76	270
Años (6-10)	7.99	50
Años (11-15)	7.99	50
Gpt (MMpc)	126 359	
VPN (MMdlls)	753.9	

Tabla 4.11 Prueba 5 g

h) Considerando que el pozo tendrá cambios en la tubería de producción cada 3 años y que se mantienen las mismas restricciones se obtiene la Tabla 4.12:

Tiempo	diámetro (pg)	P _{wh} (psi)
Años (1-3)	2.76	270
Años (4-6)	7.99	50
Años (7-9)	7.99	218
Años (10-12)	2.78	311
Años (13-15)	3.00	283
Años (16-18)	2.79	203
Gpt (MMpc)	122 790	
VPN (MMdlls)	588.13	

Tabla 4.12 Prueba 5 h

De los resultados obtenidos es posible observar que si solamente se explota toda su vida productiva al pozo por una tubería, al no volver a invertir en él, no existen costos adicionales y es lo que más reditúa.

Además se recomienda explotar el pozo a diámetros pequeños con el fin de aumentar su vida productiva y por lo tanto, las ganancias; es importante hacer notar que esta práctica siempre ha sido la más recomendable, pero que lamentablemente en la realidad nunca se lleva a cabo.

Así se demuestra técnicamente que la explotación de algunos yacimientos en la actualidad es inadecuada, ya que en el presente se explotan llevando los pozos a su límite, ya que éstos se terminan con tuberías de producción de diámetro grande sin realizar ningún análisis de rentabilidad, por lo que los pozos en pocos años se agotan o se invaden de líquidos, sin haber logrado recuperar todo lo que de ellos se hubiera podido esperar.

4.2 Gráficas

En las Figuras 5.1 y 5.2 se muestra el comportamiento de la optimización en el caso de que la función objetivo sea VPN; estos resultados graficos se obtuvieron con los puntos obtenidos con el optimizador, además de darle algunos puntos más. La Figura 5.2 es la misma gráfica que la Figura 5.1, pero rotada en 100°.

Se trata del caso cuando se supone que el cambio de tubería se hará cada 10 años, y que el pozo ha producido durante 10 años. En la gráfica se puede observar que el valor máximo se encuentra entre 3 y 4 pg de diámetro y 400 a 500 psi de p_{wh} , asimismo se puede observar que los valores mínimos se encuentran a diámetros pequeños y presiones grandes.

En las Figuras 5.3 y 5.4 se muestra el comportamiento de la optimización en el caso de que la función objetivo sea Gpt, se graficaron con los puntos obtenidos con el optimizador, además de darle algunos puntos más. La Figura 5.4 es la misma gráfica que la Figura 5.3, pero rotada en 100°.

Se trata del caso cuando se supone que el cambio de tubería se hará cada 10 años, y que el pozo ya ha producido por 10 años. En la gráfica es posible observar que el valor máximo se encuentra entre 2 y 3 pg de diámetro y 200 a 300 psi de p_{wh} ; asimismo los valores mínimos se encuentran en los extremos de los valores de diámetro y presiones .

La diferencia entre las Figuras 5.1 y 5.3 es que las funciones objetivo son diferentes, pero es el mismo caso, cambio cada 10 años, después de producir el pozo durante 10 años, se puede observar de la comparación de ambas que, si el pozo se explota a un diámetro un poco mayor se recuperara más dinero y que si se explota a un diámetro menor se podrá recuperar más gas.

Es conveniente hacer la observación que la gráfica solamente se muestra como un respaldo, ya que al usar el optimizador el uso de ésta se hace innecesario, además de que el método converge rápidamente. Para graficar es necesario correr el programa con diferentes valores coordenados y se pierde la rapidez ganada con el uso del método COMPLEX.

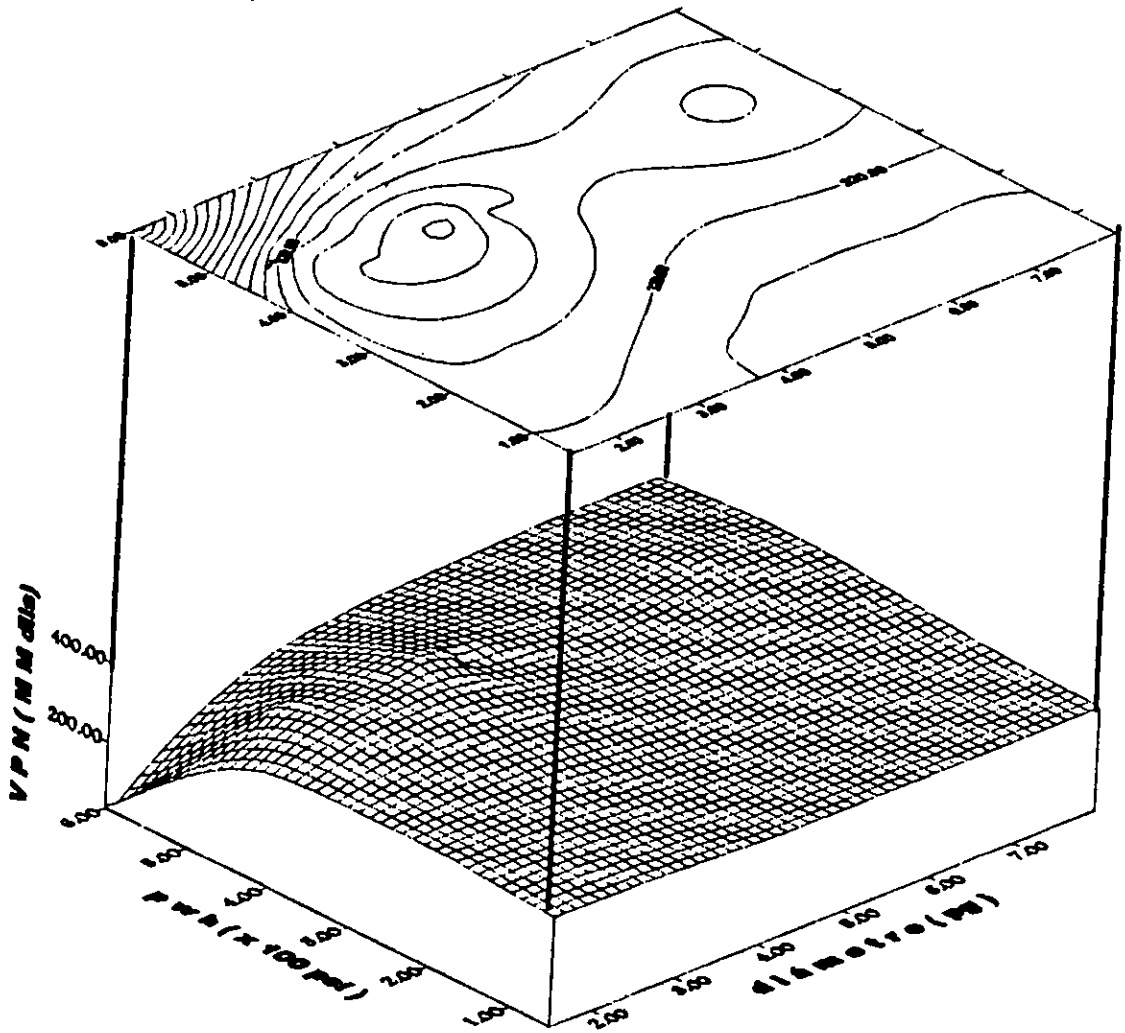


Figura 5.1 Gráfica pwh Vs. d (VPN)
Caso: cambio cada 10 años

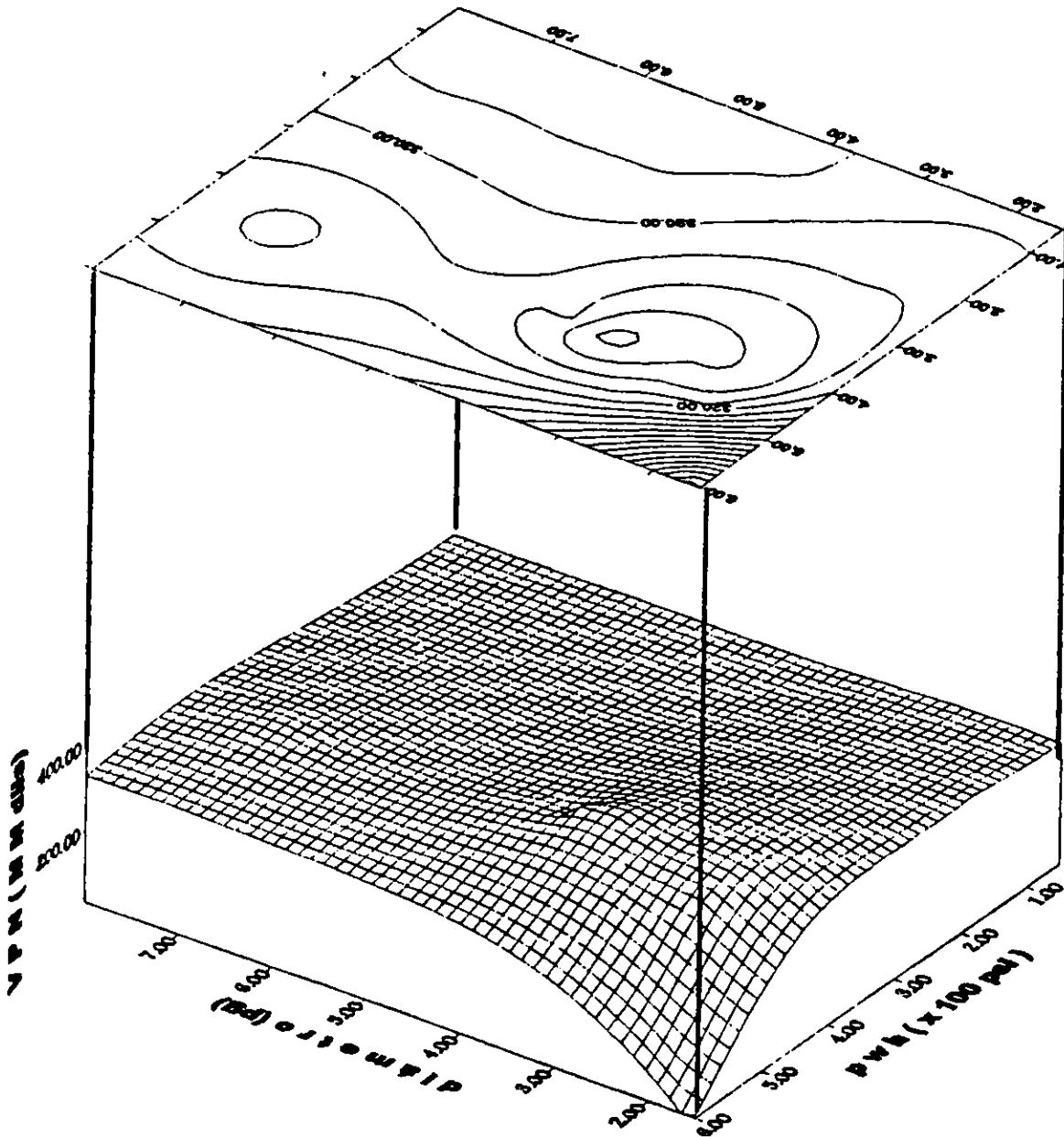


Figura 5.2 Gráfica pwh Vs. d (VPN)
Caso: cambio cada 10 años

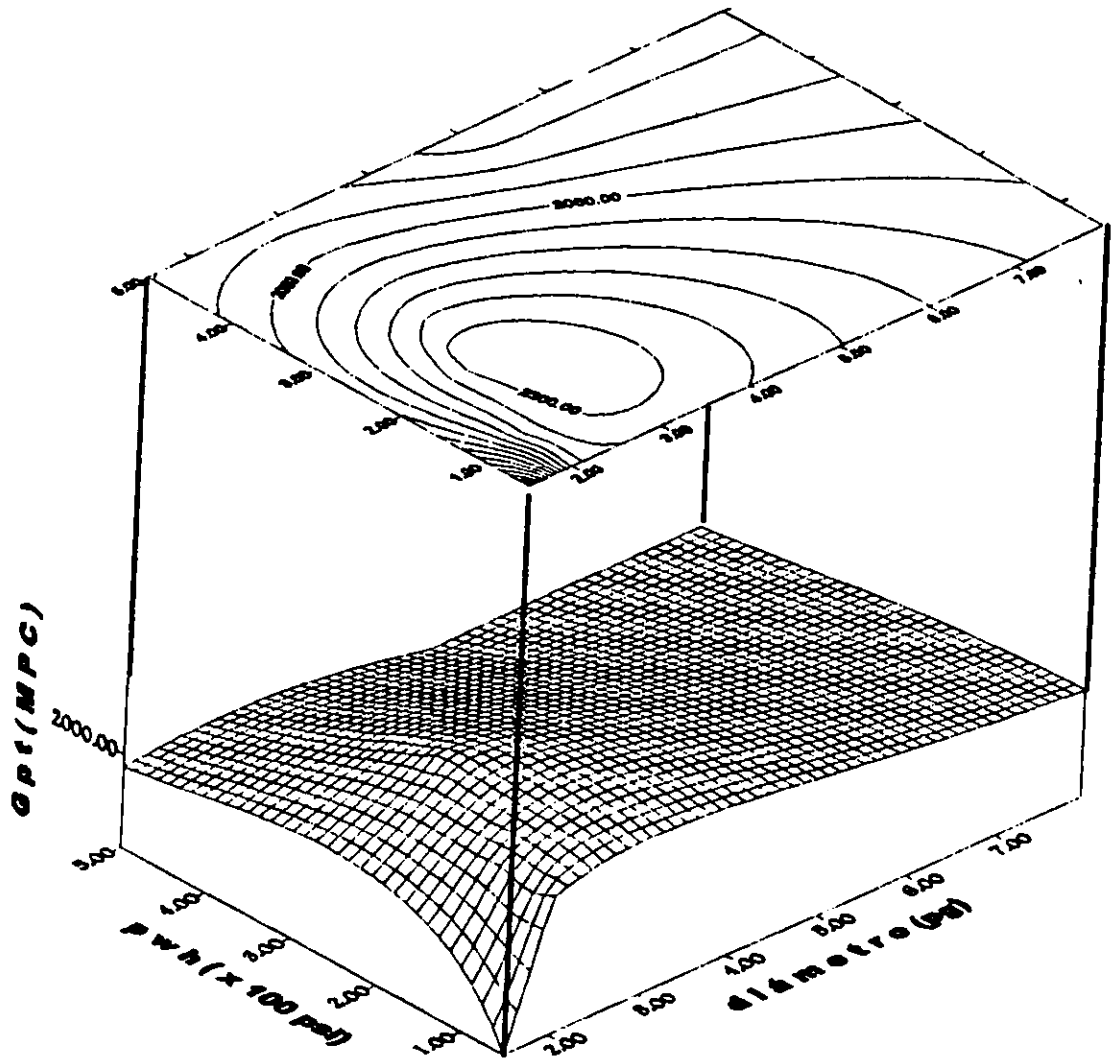


Figura 5.3 Gráfica pwh VS. d (Gpt)
Caso: cambio cada 10 años

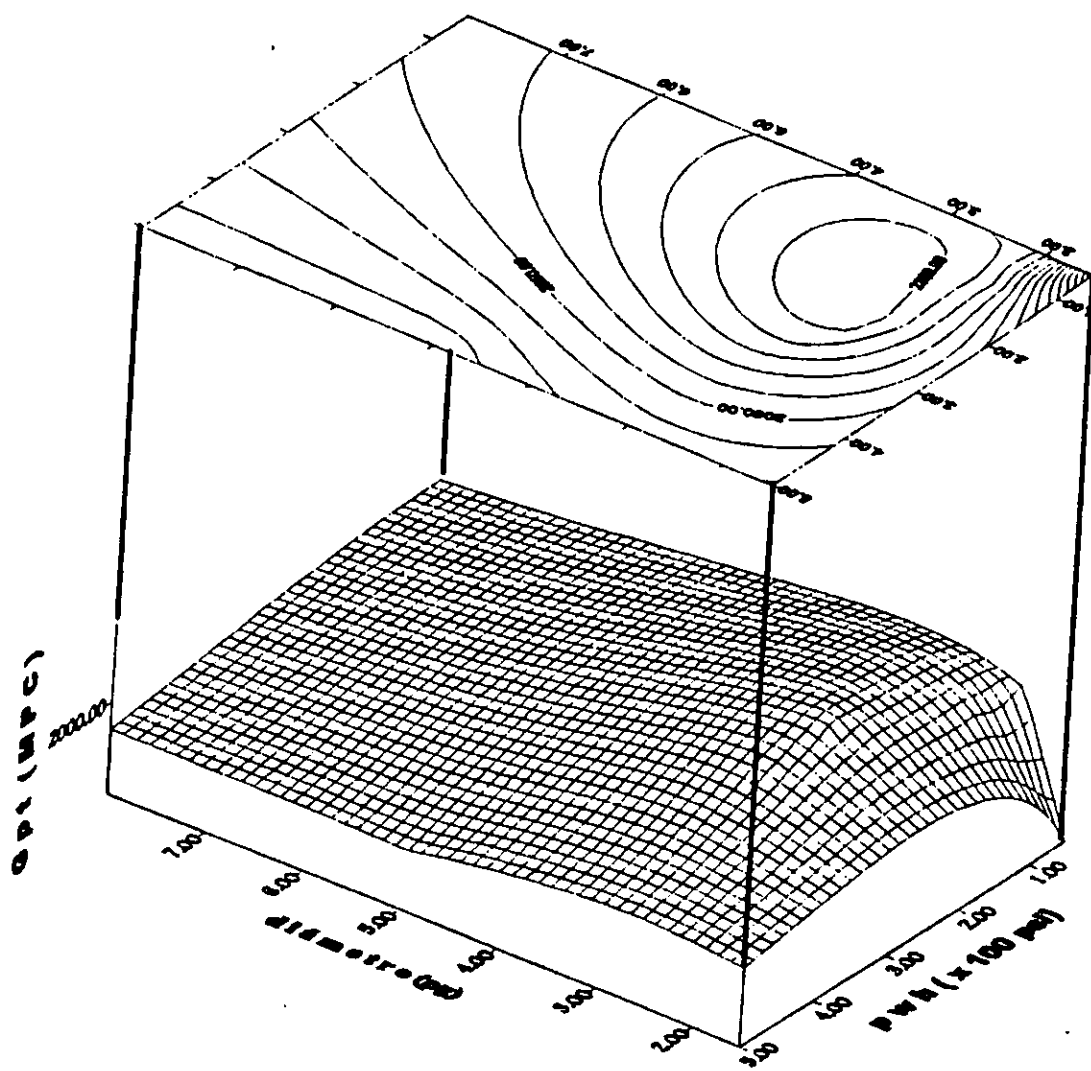


Figura 5.4 Gráfica pwh Vs. d (Gpt)
Caso; cambio cada 10 años

4.3 Presencia de condensado en la línea de descarga.

Con la finalidad de probar el programa de cómputo elaborado para evaluar la importancia de considerar la presencia de condensado en la línea de descarga , se corrió un ejemplo con los siguientes datos:

$$\gamma_o = 0.75$$

$$\gamma_g = 0.65$$

$$\text{inclinación de tubería} = 5^\circ$$

$$\text{rugosidad de la tubería} = 0.0006$$

Se suponen como diámetros para la línea de descarga 4 y 6 pulgadas por ser los más comunes, y presiones de línea de 150 y 25 psi para obtener flujo crítico, de acuerdo a las presiones de cabeza promedio obtenidas con el optimizador.

1. En el primer problema se considera que se tendría una línea de descarga de 4 pulgadas y una presión en la línea de 150 psi, además consideramos como primer gasto 12000 Mpcd de gas, y como último gasto 1000 Mpcd de gas, que son los gastos que tenemos con el optimizador para el primer problema de VPN. Con estos gastos se obtienen los resultados siguientes:

Para el caso de 12000 Mpcd se obtiene un gradiente de presión de 0.394 psi/pie y un patrón de flujo de burbujas dispersas. Con un gasto de 1000 mpcd se tiene 0.597 psi/pie de gradiente de presión y flujo estratificado suave. Además se calcula la frontera entre los dos patrones de flujo a un gasto de 2486 Mpcd.

2. En el segundo problema se considera una línea de descarga de 4 pulgadas y presión en la línea de 25 psi, igualmente se considera como primer gasto 12 000 Mcpd de gas, y como ultimo gasto 1 000 Mcpd de gas, que son los gastos que se tienen con

el optimizador para el primer problema de VPN. Con estos gastos se obtienen los resultados siguientes:

Para el caso de 12 000 mpcd se obtiene un gradiente de presión de 0.2237 psi/pie y un patrón de flujo de burbujas dispersas, observándose que el patrón de flujo siempre es el mismo , y que el gradiente de presión igualmente se mantiene, debido a que la baja presión en la línea de descarga favorece la presencia de condensado y aún a bajos gastos el condensado se encuentra a mayor proporción que el gas.

3. En el tercer problema se considera una línea de descarga de 6 pulgadas y una presión en la línea de 150 psi, además se considera como primer gasto 12 000 Mcpd de gas, y como ultimo gasto 1 000 Mcpd de gas. Con estos gastos se obtienen los resultados siguientes:

Para el caso de 12 000 Mcpd se obtiene un gradiente de presión de 0.394 psi/pie y un patrón de flujo de burbujas dispersas, y para un gasto de 1 000 Mcpd se obtiene 0.5077 psi/pie de gradiente de presión y flujo estratificado suave. Además se calcula la frontera entre los dos patrones de flujo a un gasto de 10 609 mpcd.

4. En el cuarto problema se considera una línea de descarga de 6 pulgadas y presión en la línea de 25 psi, además se considera como primer gasto 12 000 Mcpd de gas, y como ultimo gasto 1 000 Mcpd de gas. Con estos gastos se obtienen los siguientes resultados:

Para el caso de 12 000 Mcpd se obtiene un gradiente de presión de 0.2237 psi/pie y patrón de flujo de burbujas dispersas. Para este problema se observa que el patrón de flujo y el gradiente de presión se mantiene, debido a que la baja presión en la línea de descarga favorece la presencia de condensado y aún a bajos gastos el condensado se encuentra a mayor proporción que el gas.

Los resultados se presentan en la Tabla 4.13

Gasto (Mpcd)	Presión en la línea (psi)	Diámetro de línea (pulgada)	Tipo de Fluido	Gradiente (psi/pie)
12 000	150	6	Gas	5.0e-8
12 000	150	6	Gas y Condensado	3.9e-1
12 000	25	6	Gas	2.9e-7
12 000	25	6	Gas y Condensado	2.2e-1
12 000	150	4	Gas	2.7e-6
12 000	150	4	Gas y Condensado	3.9e-1
12 000	25	4	Gas	1.6e-5
12 000	25	4	Gas y Condensado	2.2e-1
1 000	150	6	Gas	4.8e-10
1 000	150	6	Gas y Condensado	5.1e-1
1 000	25	6	Gas	1.4e-6
1 000	25	6	Gas y Condensado	2.2e-1
1 000	150	4	Gas	2.6e-9
1 000	150	4	Gas y Condensado	2.2e-1
1 000	25	4	Gas	2.0e-8
1 000	25	4	Gas y Condensado	2.2e-1

Tabla 4.13 Comparación de Gradiente de Presión

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La técnica de optimización no lineal puede ser fácilmente adaptada a sistemas de producción de gas.
2. El número de variables de decisión implícitas e explícitas pueden ser implementadas de manera rápida y sencilla en la optimización no lineal.
3. El método COMPLEX converge rápidamente y su implementación es relativamente fácil. El problema más recurrente que se presenta, es que si no se da una buena aproximación como dato inicial, el programa tarda en converger o no converge.
4. Es sencillo y rápido cambiar las funciones objetivo, por lo que se probaron dos funciones objetivo, pero se pueden probar otras según el criterio del que maneje el programa.
5. Se demuestra con fundamentos técnicos que el explotar un pozo a grandes gastos iniciales no siempre es lo más rentable.
6. El método COMPLEX crea una figura geométrica que es de al menos $n + 1$ vértices a partir de las n variables con las que se va a trabajar, por lo que se observó que se comporta adecuadamente con figuras de este valor, esto se explica ampliamente en el Apéndice A.

7. Con el fin de completar este trabajo se recomendaría en un futuro considerar la presencia de condensado desde la tubería de producción, ya que el colgamiento de líquidos es un gran problema que se tiene en pozos de gas y condensado. Para los fines de este trabajo el pozo considerado es de gas seco.
8. Para tener mejores datos del comportamiento de la línea de descarga, es necesario en pozos de gas y condensado considerar la presencia de condensado también en la línea de descarga ya que como se observa en la Tabla 4.13 las caídas de presión son mayores que si sólo se considera la presencia de gas.

NOMENCLATURA

A	Área, acres
B_g	Factor de volumen de gas, $\text{pie}^3 / \text{pie sc}$
B_w	Factor de volumen de agua, $\text{bbl yac} / \text{bbl sc}$
Cd	Coefficiente de descarga, adimensional
D	Término de flujo no-darcy, $(\text{bbl sc} / \text{d})^{-1}$
d	Diámetro, pulgadas
F	Función objetivo, MMPC ó MMdls
f	Factor de fricción, adimensional
g_c	Constante de gravedad, pie / s^2
g	Factor de gravedad, pie / s^2
G	Volumen de Gas, pies^3
G	Matriz Hessiana
G_p	Volumen de gas producido acumulado, pies^3
h	Espesor, pies
I	Matriz identidad
i	interés, adimensional
k	Permeabilidad, mD
L	Longitud, pies
M	Masa, lb
p	Presión, psi

q	Gasto, Mpcd
R	Constante Universal de los gases, psi pie ³ / lb-mole °R
Rs	Relación de solubilidad, pie ³ / bbl
r	Radio, pulgadas
r _e	Radio de drene, pulgadas
r _w	Radio del pozo, pulgadas
s	Factor de daño, adimensional
S _{wi}	Saturación inicial de agua, fracción
T	Temperatura, °R
u	Velocidad, pie / s
VPN	Valor presente neto, MMdls
V	Volumen, pies ³
W _p	Volumen de agua producida, pies ³
W _e	Volumen de entrada de agua, pies ³
Z	Elevación Vertical, pies
z	Factor de compresibilidad, adimensional

Subíndices

b	condiciones base
g	gas
i	condiciones iniciales
r	yacimiento

sc	condiciones estándar
w	agua
wf	fondo fluyendo
wh	condiciones en la cabeza del pozo

Letras Griegas

α	Coefficiente de reflexión
γ	Parámetro de convergencia del método COMPLEX
θ	Ángulo de inclinación
μ	Viscosidad, cp
ρ	Densidad, lb/ft ³
ϕ	Porosidad, fracción
$\psi(p)$	Pseudopresiones, psi
σ	Tensión interfacial, N/m

R

1. F

Pe

2. Ca

Pet

3. Cra

Hall

4. Econ

Saddle

5. McCa

6. Minam

Experim

1994.

7. O'Dell, P

pp 419 - 4

8. Iko

York (1984)

9. Sarica C., Shoham O. y Brill, J. P., *Transient Analysis of Point Arguello Gas Pipeline Behaviour*, SPE 21731 (1991)

10. McFarland, J. W. , Lasdon L. y Loose V. *Development Planning and Management of Petroleum Reservoirs Using Tank Models and Nonlinear Programming*
11. Legn Lasdon , Coffman, P. E., McDonald R., McFarland J. W. y Sepehrnoori K., *Optimal Hydrocarbon Reservoir Production Policies*, Operations Research, Vol. 34, No. 1 January-February 1986.
12. Fujii H., y Horne R. *Multivariate Optimization of Networked Production Systems*, SPE Production & Facilities, August 1995, pp 165 - 171.
13. Perez G. y Kelkar B. *A Simplified Method to Predict over-all Production Performance*, The Journal of Canadian Petroleum Technology, January-February 1990, Vol. 29, No. 1, pp 78-85.
14. Barnea D., y Taitel Y., *Transient-Formulation Modes and Stability of Steady-State Annular Flow*, Chemical Engineering Science, Vol. 44, No. 2 pp. 325-332, 1989.
15. Taitel Y. y Dukler A.E. *A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow*, AIChE Journal (Vol. 22 No.1 pp 47 - 55)
16. Taitel Y. , Shoham O. y Brill J. P. *Simplified Transient Solution and Simulation of Two-Phase Flow in Pipelines*, AIChE, Vol. 44, No. 6 pp 1353 - 1359 (1989)
17. Xiao, Shoham y Brill, *A Comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Pipelines*, SPE 20631, Fall Meeting (1990).
18. Dukler y Hubbard, *A Model for Gas - Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes*, Ind. Eng. Chem. Fundam. Vol. 14 No. 4, 1975.

19. Shum Y. y Konopnicki D., *Application of the Complex Method for Constrained Optimization to Oilfield Problems*, SPE 5666.
20. Ahmed, *Hydrocarbon Phase Behavior*, Gulf Publishing Company 1989.
21. Solórzano Luzbel, *Criterios de Rentabilidad Económica para la Administración de Administración de Empresas Petroleras de Exploración y Producción*, Fotolitográfica ARGO, S.A. 1996
22. Frank Ayres, Jr. *Matemáticas Financieras*, McGraw-Hill, 1991

APÉNDICE A

ALGORITMOS DE OPTIMIZACION NO LINEAL

A.1 Introducción.

La palabra óptimo, significa “mayor”, es sinónimo con “más” o “máximo” en el caso de maximización, y con “menos” o “mínimo” en caso de minimización.

Existen numerosos problemas donde se pueden encontrar soluciones óptimas. Es trivial la optimización de un problema que depende de una sola variable. Cuando se trata de optimizar un problema con múltiples variables el problema se complica.

Las matemáticas son una herramienta adecuada para resolver los problemas de optimización, sin importar el número de variables independientes involucradas. La optimización numérica encuentra los valores extremos del modelo matemático. El modelo matemático usa una función objetivo la cual depende de variables múltiples de decisión y retorna un valor de esta función como salida. La optimización encuentra los valores máximos y mínimos de la función objetivo.

El problema de optimización matemáticamente puede ser expresado como sigue. La función objetivo, F , está dada por :

$$F(x) = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{A.1})$$

la cual depende de n variables independientes:

$$\tilde{x} = \{x_i; i = 1(\dots)n\} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (\text{A.2})$$

Las variables pueden ser escalares o funciones de uno o más parámetros. Si el programa de optimización solo calcula mínimos, entonces el máximo de la función puede obtenerse como:

$$\text{Max}\{F(x)\} = \text{Min}\{-F(x)\} \quad (\text{A.3})$$

Otro punto importante acerca de la optimización es la definición de optimización estática o dinámica. La optimización estática considera que el proceso de optimización es independiente del tiempo, y cuando se obtiene el valor extremo de la función, éste permanece fijo con el tiempo. Por otra parte la optimización dinámica

considera que la solución varía con el tiempo, en este caso la respuesta se convierte en un proceso continuo.

A.2 Optimización con y sin restricciones.

Cuando se aplica un proceso de optimización se utilizan algunas restricciones con el fin de prevenir resultados físicamente imposibles, económicamente no aceptables o inseguros. Con estas restricciones es posible definir el conjunto \mathfrak{J} .

Considerando un punto x^* en particular del conjunto \mathfrak{J} , tal que el valor de la función objetivo es menor que para cualquier otro punto del conjunto:

$$F(x^*) < F(x) \quad (\text{A.4})$$

para toda $x \neq x^*$ en \mathfrak{J} . Si se busca el valor mínimo de la función, la ecuación (A.4) se puede escribir como:

$$F^* \equiv \min_{x \in \mathfrak{J}} (F(x)) \quad (\text{A.5})$$

máximo:

$$F^* \equiv \max_{x \in \mathcal{S}} (F(x)) \quad (\text{A.6})$$

Para un problema general, denominamos F^* al valor óptimo de la función y x^* el punto óptimo se puede escribir:

$$F^* \equiv \text{opt}_{x \in \mathcal{S}} (F(x)) \quad (\text{A.7})$$

Los puntos x^* satisfacen no sólo las restricciones, sino también la condición de convergencia adicional:

$$0 < \|x - x^*\| < \varepsilon \quad (\text{A.8})$$

donde:

$$\|x - x^*\| \equiv \left[\sum_{j=1}^n (x_j - x_j^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.9})$$

Considerando el espacio de solución \mathcal{S} y las definiciones de Gill² (1981):

Definición A. En el punto x^* se tiene un mínimo local fuerte, de una optimización no lineal con restricciones, si existe una $\delta > 0$ tal que:

- A1. $F(x)$ es definida en $\mathcal{N}(x^*, \delta)$
- A2. $F(x^*) < F(x)$ para toda $x^* \in \mathcal{J}$.
- A3. Ambas x y $x^* \in \mathcal{J}$.

Definición B. En el punto x^* se tiene un mínimo local débil, de una optimización no lineal con restricciones, si existe una $\delta > 0$ tal que:

- B1. $F(x)$ es definida en $\mathcal{N}(x^*, \delta)$
- B2. $F(x^*) < F(x)$ para toda $x^* \in \mathcal{J}$.
- B3. x^* no es un mínimo local fuerte.
- B4. Ambas x y $x^* \in \mathcal{J}$.

Definición C. Optimización mínima sin restricciones para una función F . Si F es dos veces diferenciable continuamente, y existe un mínimo local de F en el punto x^* , las siguientes dos condiciones deben cumplirse:

- C1. $F'(x^*) = 0$
- C2. $F''(x^*) \geq 0$

Considerando n dimensiones y expansión en series de Taylor alrededor de x^* :

$$F(x^* + \varepsilon p) = F(x^*) + \varepsilon p^T g(x^*) + \frac{1}{2} \varepsilon^2 p^T G(x^* + \varepsilon \theta p) p + \dots \quad (\text{A.10})$$

donde:

g , gradiente del vector

G , matriz Hessiana

θ , $0 \leq \theta \leq 1$.

ε , escalar

p , n -vector

Definición D. La minimización sin restricciones en n dimensiones. Las condiciones necesarias para que x^* sea un mínimo local son:

$$D1. \|g(x^*)\| = 0$$

D2. $G(X)$ es matriz positivamente definida.

Es necesario hacer notar que la desaparición de las primeras derivadas es importante pero no es una condición suficiente para que un punto sea un mínimo local. Nótese que cualquier punto donde el gradiente desaparece es llamado punto estacionario.

A.3 Propiedades de los Algoritmos de Optimización.

El comportamiento típico para que un algoritmo sea considerado aceptable es:

- a. cada iteración $x^{(k)}$ se mueva firmemente hacia el espacio de solución (\mathcal{N}) de un mínimo local.
- b. converge rápidamente para el punto x^* .
- c. el proceso se completa cuando el criterio de convergencia dado por el usuario es satisfecho.

Una condición de convergencia es que el gradiente del vector $\nabla F(x^{(k)}) = \{g(x^k)\}$ tienda a cero, lo cual corresponde al criterio de convergencia para un punto estacionario, pero no es una condición suficiente. Esto se debe a la definición del término de error:

$$h^k = x^k - x^* \quad (\text{A.12})$$

Es posible definir diferentes tipos de convergencia, tales como:

- Convergencia local:

$$h^k \rightarrow 0 \quad (\text{A.13})$$

Esta indica la velocidad de convergencia del método en la vecindad de x^* .

- Convergencia lineal de orden p :

$$\frac{\|h^{k+1}\|}{\|h^k\|} \rightarrow a \quad (\text{A.14})$$

donde:

$a > 0$; para efectos prácticos se puede considerar que cuando a es menor que $\frac{1}{4}$ el valor de convergencia puede ser aceptable².

Los casos más importantes son $p = 1$ (convergencia lineal) y $p = 2$ (convergencia cuadrática).

- Convergencia superlineal:

$$\frac{\|h^{k+1}\|}{\|h^k\|} \rightarrow 0 \quad (\text{A.15})$$

La diferencia entre la convergencia lineal de orden 1 y la convergencia superlineal, es que la convergencia lineal de orden 1 tiende a un número que no necesariamente es cero y la convergencia superlineal si tiende a cero.

Se hace notar que la existencia de convergencia en cualquier algoritmo no es garantía de buen comportamiento de éste en la práctica, porque es necesario considerar otros problemas inherentes al equipo de cómputo.

A.4 Algoritmos de Optimización.

Los métodos de optimización se basan normalmente en modelos que son una aproximación conveniente de la función objetivo. Existen muchos modelos disponibles, pero los más comúnmente utilizados por su capacidad son los modelos cuadráticos y los modelos de prototipos. Un ejemplo clásico de estos últimos es el algoritmo de la línea recta, el cual sigue el procedimiento siguiente:

- a) determina la dirección de búsqueda $s^{(k)}$.
- b) encuentra $\alpha(k)$ que minimiza $F(x^{(k)} + \alpha s^{(k)})$ con respecto a α .
- c) fijar $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha s^{(k)}$

El procedimiento finaliza su búsqueda cuando encuentra un vector s que satisface la restricción:

$$F(x^{(k+1)}) < F(x^{(k)}) \tag{A.16}$$

Los modelos consideran diferentes maneras para escoger $s^{(k)}$ basados en la información que tienen disponible.

A.4.1 Modelos Cuadráticos.

En el modelo cuadrático, en un punto sus primeras y segundas derivadas son iguales a las primeras y segundas derivadas de la función objetivo. Por consiguiente, en un punto dado, la función objetivo y el modelo cuadrático son idénticos en valor, pendiente y curvatura. El modelo cuadrático es resuelto para un punto estacionario donde el gradiente tiende a cero. Si el modelo cuadrático es una buena aproximación de la función objetivo, entonces el punto estacionario del modelo cuadrático puede estar cerca del punto estacionario de la función objetivo. El punto estacionario de la función objetivo es tomado como una nueva estimación de la función objetivo y el proceso se repite hasta que se alcanza la convergencia.

Definiendo una aproximación cuadrática $Q(x)$ de la función objetivo $F(x)$:

$$F(x) \approx Q(\tilde{x}) \equiv c^T \tilde{x} + \frac{1}{2} \tilde{x}^T G \tilde{x} \quad (\text{A.17})$$

Expandiendo en series de Taylor:

$$Q(\tilde{x}_k + \tilde{p}_k) = F(\tilde{x}_k) + \tilde{g}_k^T \tilde{p}_k + \frac{1}{2} \tilde{p}_k^T G_k \tilde{p}_k \quad (\text{A.18})$$

donde:

\tilde{g} , es el gradiente \tilde{x}

\tilde{p} es el vector de desplazamiento de \tilde{x} .

G es la matriz Hessiana de \tilde{x} , definida por:

$$\tilde{g} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x_1} \\ \frac{\partial F}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{A.19})$$

$$\tilde{p} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial x_1 x_1} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial x_1 x_n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial x_n x_1} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial x_n x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

Algunas propiedades de las funciones cuadráticas son (Fletcher¹):

1.- Una función cuadrática es una de las funciones más simples para la determinación de mínimos.

2.- Una función expandida alrededor de un punto mínimo se aproxima apropiadamente por medio de una función cuadrática, la cual converge rápidamente. 3.- La información de una función cuadrática es mejor que la de una función lineal.

4.- Los métodos basados en modelos cuadráticos pueden ser resueltos bajo una transformación lineal.

A.4.1.1 Método de Newton.

El método de Newton es una de las técnicas más comunes para la optimización no lineal. Si el método de Newton es alimentado con una buena aproximación inicial de la solución, se alcanza la convergencia del método.

Considerando un modelo cuadrático como el descrito en la ecuación A.18, que es obtenido de la expansión de $F(x)$ por medio de la serie de Taylor truncada alrededor de $x^{(k)}$, entonces $Q(x + p)$ representa el resultado de la aproximación cuadrática para la iteración k .

El método requiere que las primeras y segundas derivadas de F estén disponibles en cualquier punto y que $Q(x + p)$ tenga solamente un mínimo. Si $G^{(k)}$ es positivamente definida, el método se comporta adecuadamente.

Las iteraciones son obtenidas usando la definición D previamente establecida, con ayuda de los pasos siguientes:

- 1.- Resolver $G^{(k)} p = -g^{(k)}$ para $p = p^{(k)}$.
- 2.- fijar $x^{(k+1)} = x^{(k)} + p^{(k)}$.

El paso 1 incluye la solución de sistemas de ecuaciones lineales de $n \times n$. Por lo que es más conveniente resolverlo por medio de factorización $G=LDL^T$, este procedimiento permite que la condición positivamente definida sea corroborada.

Esto requiere $\frac{1}{6}n^3 + O(n^2)$ multiplicaciones por iteración. Si las expresiones analíticas de las derivadas son muy complicadas, se necesitará usar aproximaciones por diferencias finitas; en el caso de n variables de decisión, $\frac{n^2 + n}{2}$ se requieren segundas derivadas parciales para la matriz Hessiana, y n primeras derivadas para el gradiente.

Si el método de Newton se usa adecuadamente es posible esperar una convergencia rápida. Algunos comentarios finales acerca del método son:

- Una buena aproximación inicial resulta en una convergencia rápida, y una aproximación inicial mala puede resultar en divergencia.
- La matriz Hessiana se sujeta a inestabilidad numérica durante la solución matricial.
- Si las derivadas analíticas no están disponibles, es necesario la construcción del gradiente y de la matriz Hessiana por medio de aproximaciones en diferencias finitas.

A.4.1.2 Método de Pasos Descendentes.

El método de pasos descendentes es quizás el que tiene la implementación más fáciles. El método simplemente reemplaza la matriz Hessiana con la matriz identidad, I , multiplicada por el escalar, μ :

$$G \leftarrow -I\mu \quad (3.22)$$

Esto ocasiona que el vector buscado sea directamente proporcional al gradiente del vector. Este método es considerado como poco eficiente. Generalmente requiere cientos de iteraciones para localizar el valor mínimo.

A.4.2 Métodos Cuasi - Newton.

Como ya se mencionó anteriormente, el método de Newton converge cuadráticamente cuando cuenta con una buena estimación inicial, pero la principal desventaja de este método es que para cada iteración es necesario construir la matriz Hessiana y resolverla y esto es muy tardado, particularmente cuando se construye la matriz por medio de diferencias finitas.

Los métodos cuasi - Newton son como los métodos de Newton con búsqueda lineal, excepto que $G^{(k+1)}$ se aproxima por medio de una matriz simétrica positivamente definida $G^{(k)}$, la cual se corrige o actualiza en cada iteración. La estructura básica de cada iteración k puede ser:

1. fijar $p^{(k)} = - G^{(k)} g^{(k)}$.
2. búsqueda lineal en $p^{(k)}$ dando $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha^{(k)} p^{(k)}$.
3. actualizar $G^{(k)}$ dando $G^{(k+1)}$.

La matriz inicial $G^{(1)}$ puede ser cualquier matriz positivamente definida, pero en ausencia de una mejor estimación la matriz identidad I es frecuentemente utilizada.

La actualización de la fórmula en el paso (3) es la esencia del método y la mayoría de las veces llamada condición cuasi-Newton es:

$$G^{(k+1)}\gamma^{(k)} = p^{(k)} \quad (\text{A.23})$$

donde:

$$\gamma = g^{(k+1)} + g^{(k)} = G^{(k)}p^{(k)} + O\|p^{(k)}\| \quad (\text{A.24})$$

O representa el término de error.

Diferentes autores han sugerido fórmulas las cuales utilizan menos evaluaciones que el método de Newton para la solución del problema, como:

1.- Broyden, Fletcher, Goldfarb y Shano (1970), presentan una fórmula conocida como BFGS:

$$G_{BFGS}^{(K+1)} = G + \left(1 + \frac{\gamma^T G \gamma}{p^T \lambda}\right) \frac{pp^T}{p^T \gamma} - \left(\frac{p\gamma^T G + G\gamma p^T}{p^T \gamma}\right) \quad (\text{A.25})$$

2.- Otra fórmula utilizada es la de Davison(1959) y Fletcher-Powell(1963), que es conocida como DFP,

$$G_{DFP}^{(K+1)} = G + \frac{pp^T}{p^T \gamma} - \frac{G\gamma\gamma^T G}{\gamma^T G \gamma} \quad (\text{A.26})$$

Las ventajas de los métodos cuasi - Newton son que:

- a) Solo se requieren las primeras derivadas.
- b) $H^{(k)}$ es positivamente definida.

A.4.3 Estrategias de Búsqueda Directa.

Todos los métodos mencionados son alguna variante del Método de Newton. Estos métodos requieren funciones suaves, continuas y que sean dos veces diferenciables.

Existen complicaciones si estos métodos se utilizan con funciones no suaves. Afortunadamente, existen procedimientos alternativos que no requieren derivadas, estos son llamados métodos de búsqueda directa o métodos de comparación.

Ellos no requieren más que el valor de la función evaluada en diferentes puntos y son igualmente aplicables a funciones suaves y funciones no suaves. El concepto de métodos directos de búsqueda es fácil de entender pero en ocasiones difíciles de implementar. El riesgo de este método es que la convergencia no siempre existe. La principal atracción de este método es su sencillez.

A.4.3.1 Método de Gill².

El algoritmo desarrollado por Gill es un buen ejemplo de los algoritmos de comparación. El problema consiste de n variables de decisión, creando entonces un polígono de $n + 1$ puntos.

La función objetivo se evalúa en cada punto del polígono, compara el valor de cada uno de los puntos y se crea un nuevo punto a partir del resultado de mayor valor y del centroide de la figura, la creación de este punto se hace mediante un parámetro α llamado coeficiente de reflexión. (Gill recomienda usar un valor de 1.0 para este coeficiente con el fin de reflejar el punto a la misma distancia del centroide, aunque el valor de este parámetro queda a elección del usuario del programa).

Se considera que un buen punto es aquel que al ser evaluado nos da un resultado menor al que previamente se tenía y un mal punto es aquel que da un resultado mayor al que se había obtenido.

Si el punto reflejado es un buen punto entonces el polígono se mueve en esa dirección, si el punto es un mal punto entonces el polígono no se mueve en esa dirección. El mínimo de la función , se encuentra cuando los movimientos del polígono se presentan dentro de los límites fijados por un criterio de convergencia.

Para un problema de n variables, el polígono consiste de $n + 1$ puntos, $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{n+1}$. La función objetivo se evalúa para cada punto y los valores de la función F_1, F_2, \dots, F_{n+1} , son arreglados como $F_{n+1} \geq F_n \geq \dots \geq F_2 \geq F_1$. El

máximo valor de la función F_{n+1} y su correspondiente punto \tilde{x}_{n+1} se eliminan del esquema. El centroide de los puntos restantes es:

$$\tilde{c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \tilde{x}_j \quad (\text{A.27})$$

El centroide es usado para generar el siguiente punto de reflexión para ser ensayado,

$$\tilde{x}_r = \tilde{c} + \alpha(\tilde{c} - \tilde{x}_{n+1}) \quad (\text{A.28})$$

donde α es el coeficiente de reflexión.

A.4.3.2 Método COMPLEX (1965)

Existe un grupo de métodos de búsqueda directa llamados estrategias simplex. La idea original es de Spendley, Hest y Himsworth (1962) y después modificado por Nelder-Mead (1965), Box (1965), Ward (1969) y Dambrauskas(1970, 1972). La idea básica es la aplicación de un punto definido, un polígono de $n + 1$ vértices y la función objetivo que es evaluada en cada vértice.

El método COMPLEX fue propuesto por M. J. Box como una modificación del método secuencial simplex que es usado para resolver problemas sin restricciones para funciones objetivo no lineales. En el método COMPLEX, puede

ser fácilmente usarse restricciones no lineales implícitas, además de no ser necesarias las derivadas de la función objetivo.

El método sugerido por Box es el siguiente:

$$\text{A. Maximizar} \quad F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{A.29})$$

$$\text{Sujeto a} \quad G_k \leq x_k \leq H_k \quad (\text{A.30})$$

$$k = 1, 2, \dots, m$$

B. Se genera Un polígono de $n + 1$ vértices usando puntos factibles y adicionalmente se generan $k - 1$ puntos adicionales de números aleatorios,

$$x_{i,j} = G_i + r_{i,j}(H_i - G_i) \quad (\text{A.31})$$

donde $r_{i,j}$ son números aleatorios entre 0 y 1.

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, k-1.$$

C. Si las restricciones explícitas son violadas, el vértice se mueve una distancia pequeña δ dentro del límite. Si una de las restricciones implícitas es violada, el vértice se mueve de acuerdo a la posición media entre el centroide y la posición anterior.

$$x_{i,j}^{nuevo} = \frac{(x_{i,j}^{viejo} + \tilde{x}_{i,c})}{2}, i = 1, \dots, n \quad (A.32)$$

donde las coordenadas del centroide de los puntos restantes quedan definidas por:

$$x_{i,c} = \frac{1}{k-1} \left[\sum_{j=1}^k x_{i,j} - x_{i,j}^{viejo} \right], i = 1, \dots, n \quad (A.33)$$

La función objetivo se evalúa en cada vértice. El vértice con el valor menor de la función es reemplazado por:

$$x_{i,j}^{nuevo} = \alpha (\tilde{x}_{i,c} - x_{i,j}^{viejo}) + \tilde{x}_{i,c}; i = 1, 2, \dots, n \quad (A.34)$$

La dirección y la distancia de movimiento y localización del nuevo punto es la característica y distinción de cada técnica. En el método sugerido por Box, la función objetivo se evalúa en cada punto para determinar el punto de menor valor de la función. Este punto se desecha y se reemplaza en el COMPLEX por un punto que está α veces del centroide de los puntos remanentes (figura A.1). Este nuevo punto es colineal con el punto desechado y el centroide de los puntos remanentes.

Con base en pruebas en diferentes problemas Box sugiere un valor para el coeficiente de reflexión de 1.3.

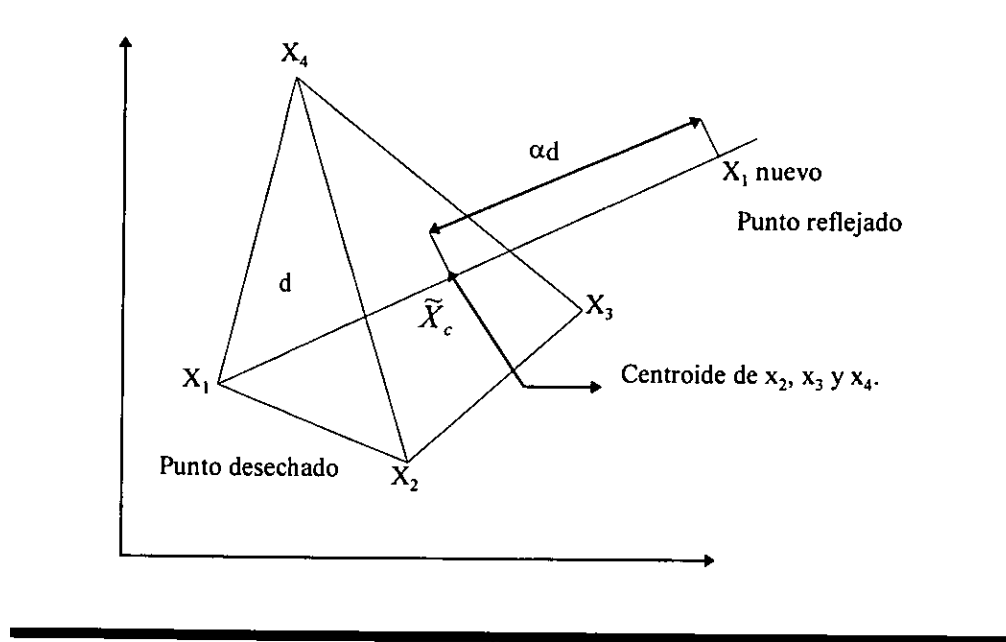


Figura A.1 Reflexión de un punto en el programa COMPLEX

D. Si un vértice se repite en varios ensayos con el menor valor de la función objetivo, este es movido la mitad de la distancia del centroide de los demás vértices.

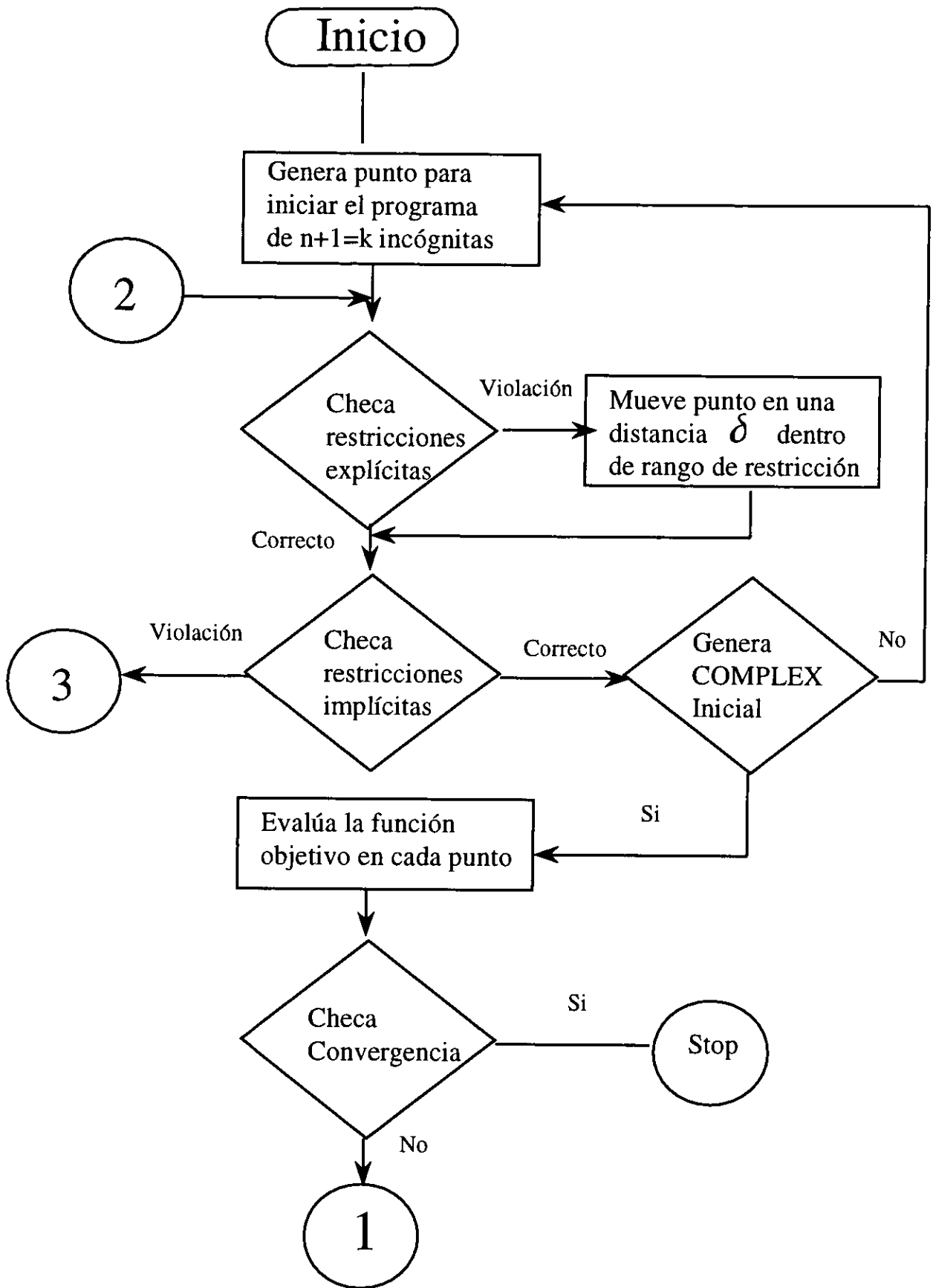
E. Se checa el nuevo vértice en la forma mencionada previamente, ajustándose si se ha violado alguna de las restricciones.

F. La convergencia se alcanza cuando el valor de la función objetivo en cada punto se repite en γ iteraciones.

La Figura A.2 muestra el diagrama de flujo de este método.

Para la elaboración de este trabajo se utilizó el algoritmo COMPLEX propuesto por Box , ya que su utilidad está ampliamente probada en la solución de problemas no lineales de ingeniería petrolera, además de que presenta gran facilidad de uso, debido a que como se mencionó anteriormente, es un método sencillo para:

- Cambiar funciones objetivo.
- Cambiar valores de restricciones.
- Introducir o eliminar variables implícitas.



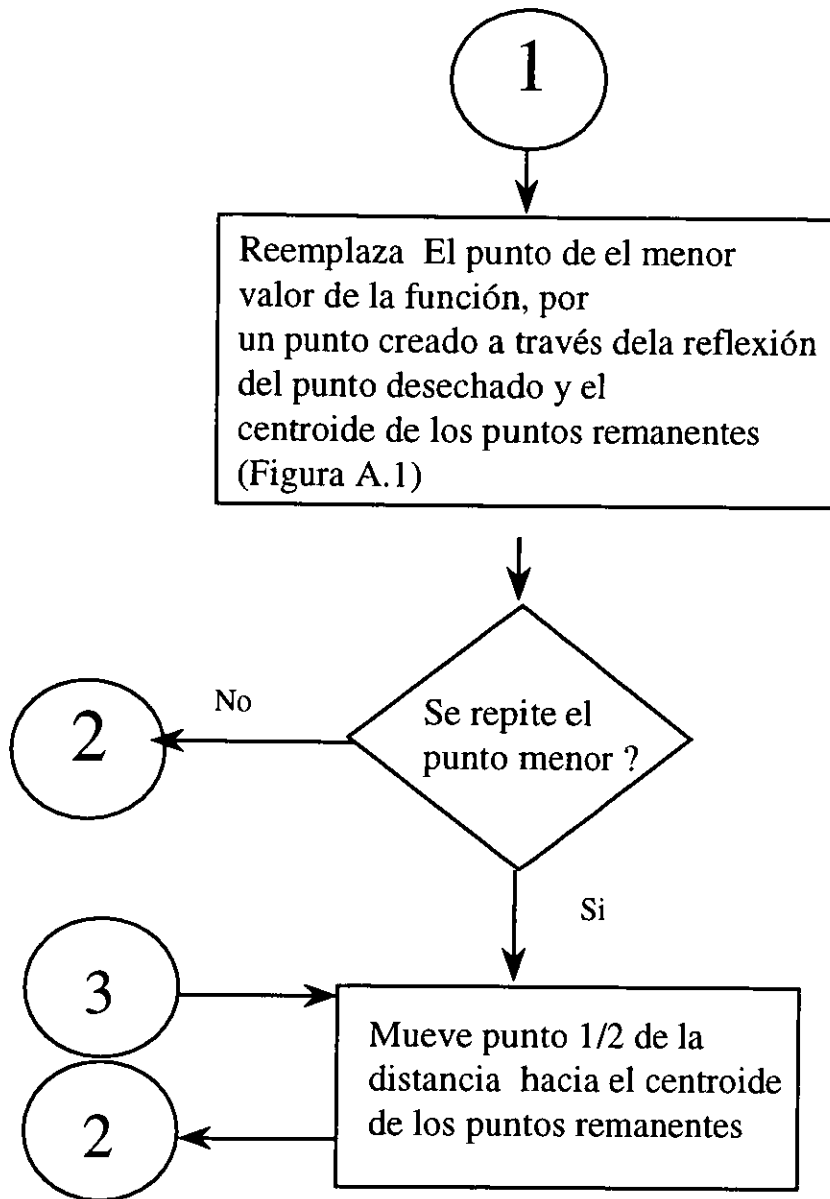


Figura A.2

APENDICE B

Modelo Mecánico de Xiao.⁽¹⁷⁾

B.1 Introducción.

Xiao presenta un modelo mecánico completo para flujo bifásico (gas y líquido) en tuberías horizontales y cercanas a horizontales. El modelo es capaz de detectar los patrones de flujo existentes y además predecir las características de flujo, el colgamiento de líquido y caída de presión, para flujo estratificado, intermitente, anular y flujo de burbujas dispersas. El modelo propuesto por los autores produce el menor error promedio absoluto con la desviación estándar.

B.2 Transición Estratificado – No Estratificado.

Usando el mecanismo de una onda Taitel y Dukler establecen el siguiente criterio de transición:

$$v_G > \left(1 - \frac{h_L}{D}\right) \left[\frac{(\rho_L - \rho_G)g \cos\alpha A_G}{\rho_G \left(\frac{dA_L}{dh_L}\right)} \right]^{0.5} \quad (\text{B.1})$$

B.3 Transición Intermitente – Anular.

Taitel y Dukler tomaron en cuenta la fracción de vacío en el bache de líquido, de tal forma que la transición queda dada por:

$$\frac{h_L}{D} < 0.35 \quad (\text{B.2})$$

B.4 Transición Intermitente – Burbujas Dispersas.

El mecanismo gobernante es el proceso turbulento que rompe las burbujas y prevee la unión de ellas. Es usado nuevamente el criterio de Taitel y Dukler. Cuando la fuerza turbulenta es lo suficientemente alta para vencer la fuerza de flotación, el gas no permanece en la parte superior de la tubería y el flujo de burbujas dispersas ocurre. El criterio de transición es:

$$v_L > \left[\frac{4A_G}{S_i} \frac{g \cos\alpha}{f_L} \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_L}\right) \right]^{0.5} \quad (\text{B.3})$$

B.5 Transición Estratificado Suave – Estratificado con ondas.

Las ondas pueden desarrollarse debido ya sea al esfuerzo cortante interfacial o inestabilidad debida a la acción de la gravedad. De acuerdo a Taitel y Dukler el criterio es:

$$v_G > \left[\frac{4\mu_L g \cos\alpha}{s\rho_G \rho_L v_L} \right]^{0.5} \quad (\text{B.4})$$

donde s es un coeficiente de ajuste, con valores de 0.01 y 0.6.

Para flujo estratificado descendente, basados en el trabajo de Barnea y coautores, el criterio de transición está dado por:

$$\frac{v_L}{\sqrt{gh_L}} > 1.5 \quad (\text{B.5})$$

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

Para el cálculo de las caídas de presión, se presentan modelos individuales para cada patrón de flujo.

B.6 Flujo Estratificado.

En el flujo estratificado, debido a la acción de la gravedad, el líquido fluye en el fondo de la tubería mientras el gas lo hace en la parte superior. Este tipo de flujo es uno de los más dominantes en flujo bifásico en tuberías.

Para el cálculo de gradiente de presión, se utilizan las ecuaciones de momento eliminando el esfuerzo interfacial:

$$-\left(\frac{dp}{dx}\right) = \frac{\tau_{wl} + \tau_{wg} S_G}{A} + \left(\frac{A_L}{A} \rho_L + \frac{A_G}{A} \rho_G\right) g \operatorname{sen} \alpha \quad (\text{B.6})$$

El primer término representa el gradiente de presión por fricción y el segundo el gradiente de presión por gravedad, el gradiente por aceleración ha sido ignorado.

B.7 Flujo Intermitente.

Este tipo de flujo es caracterizado por flujo alternado de líquido y gas. Tapones o baches de líquido, que llenan completamente la sección transversal de la tubería, se encuentran separados por burbujas de gas, las cuales contienen una capa de líquido estratificado fluyendo en el fondo de la tubería.

El gradiente de presión promedio es calculado de un balance de fuerzas sobre la unidad de bache:

$$-\left(\frac{dp}{dx}\right) = \rho_u g \text{sen}\alpha + \frac{1}{L_u} \left[\frac{\tau_s \pi D}{A} L_s + \frac{\tau_f S_f}{A} + \frac{\tau_G S_G}{A} L_f \right] \quad (\text{B.7})$$

donde ρ_u = densidad del fluido promedio de la unidad de bache.

B.8 Flujo Anular.

La fase líquida existe en dos formas: una película fluyendo a lo largo de la pared de la tubería, y gotas atrapadas en el núcleo gaseoso.

De las ecuaciones de momento se obtiene el gradiente de presión como sigue:

$$-\left(\frac{dp}{dx}\right) = \frac{\tau_{wl} S_L}{A} + \left(\frac{A_f}{A} \rho_L + \frac{A_c}{A} \rho_c \right) g \text{sen}\alpha \quad (\text{B.8})$$

B.9 Flujo de Burbujas Dispersas.

Debido a la existencia de resbalamiento entre las fases el modelo pseudo-monofásico con propiedades promedio es adecuado para este patrón de flujo.

El cálculo del gradiente de presión se lleva a cabo en el caso de flujo monofásico con la densidad y velocidad promedio de la mezcla:

APÉNDICE C

PROGRAMA DEL MODELO MECANÍSTICO DE XIAO,
PARA EL CÁLCULO DE CAÍDAS DE PRESIÓN, CONSIDERANDO
LA PRESENCIA DE CONDENSADO EN LA LÍNEA DE
DESCARGA.

bug
arge

EL SIGUIENTE PROGRAMA ES UNA ADAPTACIÓN DEL PROGRAMA ORIGINAL DEL M.I. JOSE GONZALEZ G. , LO USAREMOS PARA EL CALCULO DE CAIDAS DE PRESION Y CALCULOS DEL COLGAMIENTO DE LIQUIDO, EL USO DEL PROGRAMA Y SU MODIFICACION FUE AUTORIZADO POR EL DR. RODOLFO CAMACHO V. LA CUAL EMPEZO A REALIZARSE EN EL MES DE JULIO DE 1997. EN EL PROGRAMA SE UTILIZA EL MODELO MECANISTICO DE XIAO.

```
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
REAL*8 cx(7), cy(7), w(7), tb(7), si(7), rho(7)
REAL*8 ac(7), bc(7), alfa(7)
INTEGER FLU(5)
```

```
COMMON /UNO/ a,b,c
COMMON /VARIAEN/VLS,VGS,VISL,VISG,ROL,ROG
COMMON /VARIAEP/D,G,AALFA
```

```
EXTERNAL FUNC
EXTERNAL HLDP
EXTERNAL funcd
```

```
aALFA=aALFA*3.1416/180.
```

ESTE MODELO CALCULA PRTRONES DE FLUJO ASI COMO LAS CAIDAS TOTALES INCLUYENDO TODOS LOS PATRONES DE FLUJO. EL PRESENTE MODELO SIRVE PARA DETERMINAR EL PATRON DE FLUJO UTILIZANDO MODELOS MECANISTICOS TOMANDO ANGULO DE INCLINACION TAITEL Y DUCLER TOMANDO LOS VALORES DE UNA TABLA DE PVT

TODAS LAS UNIDADES UTILIZADAS ESTAN EN MKS, PJ PASCALES, D MTS., GASTOL GASTOG, EN M3/SEG, SIGMA EN N/MTS., DP DIAMETRO DE LA PERF. EN MTS ROSC & RGSC ESTAN EN LBM/PIE3, ABAJO CAMBIO A KGR/MTS 3

```
write(6,*) 'dldd, qg, qo, Ti, Tf, epsilon'
READ(5,*) Dldd, Qg, Qo, Ti, Tf, EPSILON
```

```
write(6,*) 'G, aALFA, numden, pldd'
READ(5,*) G, aALFA, numden, pldd
```

```
D = dldd
TM = (Ti + Tf) / 2.0d0
```

PROGRAMA PARA CALCULO DE DENSIDADES

```
xacc = 0.0001d0
```

```
WRITE(*,*) 'NOMBRE DE ARCHIVO DE DATOS'
READ(*, '(a)') archentra
```

```

OPEN( 1, FILE = 'manuel.dat' )

WRITE(*,*) 'LEYENDO NUMERO DE COMPONENTES, PRESION Y TEMPERATURA'
READ(1,*) nc, p, t

DO I=1,nc
    WRITE(*,200) i
    FORMAT( ' VALORES X, Y, W, si, rho PARA COMPONENTE ', I2 )
    READ(1,*) cx(i), cy(i), w(i), tb(i), si(i), rho(i)
ENDDO

    coef1 = 0.45724d0
    coef2 = 0.07780d0

suma = 0.0
sumalfa = 0.0

DO I=1,nc
    CALCULO DE TEMPERATURA Y PRESION CRITICAS
    CALL tpcritica( tb(i), rho(i), tc, pc )
    CALL tpcritica2( tb(i), rho(i), tc, pc )

    ac(i) = coef1*(10.73**2)*(tc**2)/pc
    bc(i) = coef2*10.73*tc/pc

    wa = ((3.0/7.0)*dlog10( pc/14.7 )/(tc/tb(i)-1.0)) - 1.0
    m = 0.3746 + 1.5423*wa - 0.2699*wa**2
    tr = t/tc
    alfa(i) = (1.0 + m*( 1.0-dSQRT( tr ) ) )**2
    IF ( i.EQ.7) THEN
        tc = 1159.67
        pc = 285.0
        wa = 0.52
        w(i) = 215.0
        ac(i) = 0.45724*(10.73**2)*(tc**2)/pc
        tr = t/tc
        alfa(i) = (1.0 + m*( 1.0-dSQRT( tr ) ) )**2
        m = 0.3746 + 1.5423*wa - 0.2699*wa**2
    ENDIF
    suma = suma + ac(i)
    sumalfa = sumalfa + alfa(i)
ENDDO

saalfa = 0.0
DO i=1,nc
    DO j=1,nc
        palfa = cy(i)*cy(j)*dSQRT( ac(i)*ac(j)*alfa(i)*alfa(j))
        saalfa = saalfa + palfa
    ENDDO
ENDDO

sbm = 0.0
swcy = 0.0
DO i=1,nc
    sbm = sbm + cy(i)*bc(i)
    swcy = swcy + cy(i)*w(i)
ENDDO

aa = saalfa*p/(10.73*t)**2
bb = sbm*p/(10.73*t)

```

```
a = bb - 1.0
b = aa - 3.0*bb**2 - 2.0*bb
c = -(aa*bb - bb**2 - bb**3)
```

```
WRITE(*,*) 'VALORES DE INTERVALO [X1,X2]'
READ(*,*) x1,x2
x1 = 0.0
x2 = 1.5
```

```
CALCULA UNA RAIZ PARA EL POLINOMIO DE TERCER GRADO
r1 = rtnewt( funcd, x1, x2, xacc )
```

```
CALCULA LAS OTRAS DOS RAICES EMPLEANDO LA ECUACION CUADRATICA
SE DEFINEN LOS VALORES DE a, b y c COMO a0, b0 y c0
ax^2+bx+c=0
```

```
a0 = 1.0
b0 = a+r1
c0 = r1**2 + a*r1 + b
CALL CUADRATICA( a0, b0, c0, r2, r3 )
```

```
ESCRIBE LAS RAICES
WRITE(*,100) r1, r2, r3
FORMAT( ' las raíces son ', 3F12.4 )
```

```
DETERMINA LA RAIZ MAYOR
```

```
rmayor = r1
IF( rmayor.LT.r2 ) rmayor = r2
IF( rmayor.LT.r3 ) rmayor = r3
```

```
WRITE(*,110) rmayor
FORMAT( ' raiz mayor ', F12.4 )
```

```
WRITE(*,120) rmenor
FORMAT( ' raiz menor ', F12.4 )
```

```
CALCULO DE DENSIDADES
rhov = p*swcy/(10.73*t*rmayor)
WRITE(*,130) rhov
FORMAT( ' densidad de vapor ', F8.3,' lb/ft3' )
```

```
CALCULO DE DENSIDADES CORREGIDAS
syc = 0.0
DO i=1, nc
    syc = syc + cy(i)* si(i)*bc(i)
ENDDO
```

```
rhovc = swcy/ ( rmayor*10.73*t/p - syc )
WRITE(*,135) rhovc
FORMAT( ' densidad de vapor corregida ', F8.3,' lb/ft3' )
```

```
*****
LIQUIDO
```

```
saalfa = 0.0
```

```

DO i=1,nc
  DO j=1,nc
    palfa = cx(i)*cx(j)*dsqrt( ac(i)*ac(j)*alfa(i)*alfa(j))
    saalfa = saalfa + palfa
  ENDDO
ENDDO

```

```

sbm = 0.0
swcx = 0.0
DO i=1,nc
  sbm = sbm + cx(i)*bc(i)
  swcx = swcx + cx(i)*w(i)
ENDDO

```

```

aa = saalfa*p/(10.73*t)**2
bb = sbm*p/(10.73*t)

```

```

a = bb - 1.0
b = aa - 3.0*bb**2 - 2.0*bb
c = -(aa*bb - bb**2 - bb**3)

```

```

CALCULA UNA RAIZ PARA EL POLINOMIO DE TERCER GRADO
r1 = rtnewt( funcd, x1, x2, xacc )

```

```

CALCULA LAS OTRAS DOS RAICES EMPLEANDO LA ECUACION CUADRATICA
SE DEFINEN LOS VALORES DE a, b y c COMO a0, b0 y c0
ax^2+bx+c=0

```

```

a0 = 1.0
b0 = a+r1
c0 = r1**2 + a*r1 + b
CALL CUADRATICA( a0, b0, c0, r2, r3 )

```

```

ESCRIBE LAS RAICES
WRITE(*,100) r1, r2, r3
FORMAT( ' las raices son ', 3F12.4 )

```

```

DETERMINA LA RAIZ MENOR

```

```

rmenor = r1
IF( r2 .ne. 0.0 ) THEN
  IF( r2.LT.rmenor ) rmenor = r2
ENDIF
IF( r3 .ne. 0.0 ) THEN
  IF( r3.LT.rmenor ) rmenor = r3
ENDIF

```

```

CALCULO DE DENSIDADES
rho1 = p*swcx/(10.73*t*rmenor)

```

```

WRITE(*,140) rho1
FORMAT( ' densidad de lãquido ', F8.3, ' lb/ft3' )

```

```

CALCULO DE DENSIDADES CORREGIDAS

```

```

sxc = 0.0
DO i=1, nc
  sxc = sxc + cx(i)* si(i)*bc(i)

```

ENDDO

rholec = swcx / (rmenor*10.73*t/p - sxc)
WRITE(*,145) rholec
FORMAT(' densidad de lÃquido corregida ', F8.3, ' lb/ft3')

rosc = rhol
rgsc = rhov

DENREL=ROSC/62.4
API=141.5/DENREL-131.5
DENREG=RGSC/29.0

CALL STAND1(P, TM, DENREL, DENREG, RS)

CALL STAND2(TM, DENREL, DENREG, RS, BO)

CALL VISCOIL(T, Rs, denrel, VISL)

CALL GASVIS(T, denreg, P, VISG)

CALL FVG(T, P, denreg, Bg)

QGMS = QG / (35.314 * 86400.0)

QOMS = QO / (86400.0 * 6.29)

RGA=qg/qo
GASTOL=qo*BO
GASTOG=qo*(RGA-RS)*BG

IF (RGA .LE. RS) WRITE(6,*) 'NO PUEDO CONTINUAR VALOR NEGATIVO'

CAMBIO DE DENSIDAD A CONDICIONES DE FLUJO

IF (NUMDEN.EQ.1) THEN
ROL=(ROSC+RGSC*RS)/BO
ROG=RGSC/BG
ELSE
ROL=(ROSC+0.01362*SGDG*RS)/BO
ROG=0.0764*SGFG/BG
ENDIF
WRITE(6,*) 'RHOL, RHGL', ROL, ROG

CALCULO DE TENSION SUPERFICIAL

TF=TM
PJ=pldd

PRESIGMA=PJ*1.450377E-4
WRITE(6,*) 'PRESIGMA, API, ROL, BO'
WRITE(6,*) PRESIGMA, API, ROL, BO
SIGMA=(42.4-.047*TF-.267*API)*EXP(-.0007*PRESIGMA)
SIGMA=SIGMA*1.E-3

IF (SIGMA .LE. 0.0) SIGMA=0.0

WRITE(6,*) 'SIGMA'

WRITE(6,*) SIGMA

CAMBIO DE UNIDADES A MKS DE DENSIDAD

ROL=ROL*1.601846E+1

ROG=ROG*1.601846E+1

A=3.1415926*D**2/4.0

EMPIEZA PROPIAMENTE EL CALCULO DE LOS PATRONES DE FLUJO

VLS=GASTOL/A

VGS=GASTOG/A

VM=VLS+VGS

HLG=RTBIS2 (HLDP, 1.D-5, 9.95D-1, 1.D-4)

WRITE(6,*) "HLG", HLG

CALL HLDAPATFL (HLG, D, VLS, VGS, VISL, VISG, ROL, ROG, G, aALFA, C, X, UGG, AGG,
&ULG, UL, UG, AL, AG, SL, SG, SI, DL, DG, CL, EN)

CALL VAADIMEN (X, ROG, ROL, VGS, VLS, D, G, aALFA, HLG, UGG, AGG, VISL, ULG, CL,
&DL, UL, EN, AG, SI, PATRON)

FLU(I) = PATRON

IF (FLU(I) .EQ. 1.0) THEN

WRITE(6,*) 'ESTAMOS EN ESTRATIFICADO CON ONDAS'

CALL ESTRATIF (ROL, ROG, UL, UG, AL, AG, SL, SG, SI, VISL, VISG, D, G,
&aALFA, A, HLG, EPSILON, DP, GASTOL, GASTOG, VARSUA, VARSUG, NXFRICC, DPDX
& , EL)

FRACVAC=AG/A

ELSE

IF (FLU(I) .EQ. 2.0) THEN

WRITE(6,*) 'ESTAMOS EN ESTRATIFICADO SUAVE'

CALL ESTRATIF (ROL, ROG, UL, UG, AL, AG, SL, SG, SI, VISL, VISG, D, G,
&aALFA, A, HLG, EPSILON, DP, GASTOL, GASTOG, VARSUA, VARSUG, NXFRICC, DPDX
& , EL)

FRACVAC=AG/A

ELSE

IF (FLU(I) .EQ. 3.0) THEN

WRITE(6,*) 'ESTAMOS EN FLUJO NO ESTRATIFICADO'

WRITE(6,*) 'EL VALOR DE UG ANTES , UL GASTOL, GASTOG, BO, BG'

WRITE(6,*) UG, UL, GASTOL, GASTOG, BO, BG

CALL ANULAR (ROL, ROG, VISL, VISG, D, GASTOL, GASTOG, SIGMA, G, aALFA
&, EPSILON, DP, VARSUA, VARSUG, NXFRICC, DPDX, EL, FRACVAC)

ELSE

IF (FLU(I) .EQ. 4.0) THEN

WRITE(6,*) 'EL VALOR DE UG ANTES , UL GASTOL, GASTOG, BO, BG'

WRITE(6,*) UG, UL, GASTOL, GASTOG, BO, BG

WRITE(6,*) 'ESTAMOS EN FLUJO DE BURBUJAS DISPERSAS'

CALL BURBUJA (ROL, ROG, VISL, VISG, D, GASTOL, GASTOG, G,
& EPSILON, SIGMA, aALFA, VARSUA, VARSUG, NXFRICC, DPDX, EL,
& FRACVAC)

ELSE

WRITE(6,*) 'ESTAMOS EN FLUJO BACHE'

WRITE(6,*) 'EL VALOR DE UG ANTES , UL GASTOL, GASTOG, BO, BG'

WRITE(6,*) UG, UL, GASTOL, GASTOG, BO, BG

CALL BACHE (ROL, ROG, VISL, VISG, D, SIGMA, GASTOL, GASTOG, G,
&aALFA, EPSILON, DP, VARSUA, VARSUG, NXFRICC, DPDX, EL, FRACVAC)

ENDIF

ENDIF

ENDIF
ENDIF

end

SUBROUTINE VAADIMEN(X, ROG, ROL, VGS, VLS, D, G, aALFA, HLG, UGG, AGG, VISL,
&ULG, CL, DL, UL, EN, AG, SI, PATRON)

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H, O-Z)

DALHLG=(1.0-X**2)**.5

WRITE(6, *) 'VOY BIEN 3'

FTD=(ROG/(ROL-ROG))**(.5)*VGS/((D*G*COS(aALFA))**.5)

C=1.0-HLG

F=FTD**2*(1.0/C**2*UGG**2*DALHLG/AGG)

WRITE(6, *) "EL VALOR DE F", F

XKTD=(FTD**2*(D*VLS/VISL/ROL))**.5

XKT=2.0/((.245*ULG**.5)*UGG)

FL=CL*(DL*UL/(VISL/ROL))**(-EN)

ULA=(4.0*AG*G*COS(aALFA)/(SI*FL))*(1-ROG/ROL)**.5

IF (F.LT.1.0) THEN

IF (XKTD .GE. XKT) THEN

PATRON=1.0

ELSE

PATRON=2.0

ENDIF

ELSE

IF (HLG .LT. 0.35) THEN

PATRON=3.0

ELSE

IF (UL .GE. ULA) THEN

PATRON=4.0

ELSE

PATRON=5.0

ENDIF

ENDIF

ENDIF

RETURN

END

SUBROUTINE HLDPATFL(HLG, D, VLS, VGS, VISL, VISG, ROL, ROG, G, aALFA, C, X,
&UGG, AGG, ULG, UL, UG, AL, AG, SL, SG, SI, DL, DG, CL, EN)

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H, O-Z)

X=2.0*HLG-1.0

SGG=DACOS(X)

SLG=3.1415926-DACOS(X)

SIG=(1.0-X**2)**.5

ALG=.25*(3.1415926-DACOS(X)+X*(1.0-X**2)**.5)

AGG=.25*3.1415926-ALG

ULG=3.1415926/(4.0*ALG)

UGG=3.1415926/(4.0*AGG)

SL=SLG*D

SG=SGG*D

SI=SIG*D

AL=ALG*D**2

AG=AGG*D**2

UL=ULG*VLS

UG=UGG*VGS

DL=4.0*AL/SL

DG=4.0*AG/(SG+SI)

REL=ROL*UL*DL/VISL

REG=ROG*UG*DG/VISG

```

WRITE(6,*)'VOY BIEN 1'
IF (REL .GE. 2000.0) THEN
  CL=4.6E-2
  EN=2.E-1
ELSE
  CL=16.
  EN=1.
ENDIF
IF (REG .GE. 2000.) THEN
  CG=4.6E-2
  EM=2.E-1
ELSE
  CG=16.
  EM=1.
ENDIF
WRITE(6,*)'VLS,VGS,',VLS,VGS,GASTOL,GASTOG
WRITE(6,*)VLS,VGS
XCUA1=(VLS*D*ROL/VISL)**(-EN)
XCUA2=(VGS*D*ROG/VISG)**(-EM)
XCUA=CL*XCUA1*ROL*VLS**2/(CG*XCUA2*ROG*VGS**2)
Y=(ROL-ROG)*G*SIN(aALFA)/(4.0*CG/D*XCUA2*ROG*VGS**2/2.0)
DLG=DL/D
DGG=DG/D
C1=(ULG*DLG)**(-EN)
C2=(UGG*DGG)**(-EM)
C=XCUA*(C1*ULG**2*SLG/ALG)-(C2*UGG**2*(SGG/AGG+SIG/ALG+SIG
&/AGG))-4.0*Y
RETURN
END

```

```

FUNCTION HLDP(HLG)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON /VARIAEN/VLS,VGS,VISL,VISG,ROL,ROG
COMMON /VARIAEP/D,G,aALFA
X=2.0*HLG-1.0
WRITE(6,*)"ORALE YA ENTRE"
SGG=DACOS(X)
SLG=3.1415926-DACOS(X)
SIG=(1.0-X**2)**(.5)
ALG=.25*(3.1415926-DACOS(X)+X*(1.0-X**2)**(.5))
AGG=.25*3.1415926-ALG
ULG=3.1415926/(4.0*ALG)
UGG=3.1415926/(4.0*AGG)
SL=SLG*D
SG=SGG*D
SI=SIG*D
AL=ALG*D**2
AG=AGG*D**2
UL=ULG*VLS
UG=UGG*VGS
DL=4.0*AL/SL
DG=4.0*AG/(SG+SI)
REL=ROL*UL*DL/VISL
REG=ROG*UG*DG/VISG
WRITE(6,*)'VOY BIEN 1'
IF (REL .GE. 2000.0) THEN
  CL=4.6E-2
  EN=2.E-1
ELSE
  CL=16.

```



```

EN=1.
ENDIF
IF (REG .GE. 2000.) THEN
  CG=4.6E-2
  EM=2.E-1
ELSE
  CG=16.
  EM=1.
ENDIF
WRITE(6,*) 'VLS, VGS, ', VLS, VGS, GASTOL, GASTOG
WRITE(6,*) VLS, VGS
XCUA1=(VLS*D*ROL/VISL)**(-EN)
XCUA2=(VGS*D*ROG/VISG)**(-EM)
XCUA=CL*XCUA1*ROL*VLS**2/(CG*XCUA2*ROG*VGS**2)
Y=(ROL-ROG)*G*SIN(aALFA)/(4.0*CG/D*XCUA2*ROG*VGS**2/2.0)
DLG=DL/D
DGG=DG/D
C1=(ULG*DLG)**(-EN)
C2=(UGG*DGG)**(-EM)
HLDP=XCUA*(C1*ULG**2*SLG/ALG)-(C2*UGG**2*(SGG/AGG+SIG/ALG+SIG
&/AGG))-4.0*Y
END

```

```

SUBROUTINE BACHE (ROL, ROG, VISL, VISG, D, SIGMA, GASTOL, GASTOG, G
&, aALFA, EPSILON, DP, VARSUA, VARSUG, NXFRICC, DPDX, EL, FRACVAC)
STE PROGRAMA SIRVE PARA CALCULAR TODOS LOS ELEMENTOS DEL FLUJO BACHE
UTILIZANDO EL MODELO MECANISTICO CORRESPONDIENTE
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H, O-Z)

```

```

WRITE(6,*) 'LOS VLORES ROL, ROG, VISL, VISG, GASTOL, GASTG, D'
WRITE(6,*) ROL, ROG, VISL, VISG, GASTOL, GASTOG, D
PI=3.1415926
A=3.1415926*D**2/4.
VLS=GASTOL/A
VGS=GASTOG/A
WRITE(6,*) 'A'
WRITE(6,*) A
VS=VLS+VGS
XHLAI=1.0E-3
C=2*XHLAI-1.0
C=1.0-2*XHLAI
SI=D*(1.-(C)**2)**(.5)
SG=D*DACOS(C)
SF=D*3.1415926-SG
AG=2.5e-1*D*(SF+C*SI)
AF=2.5e-1*D*(SG+C*SI)
DG=4.0*AG/(SI+SG)
AFT=AF/D**2
AGIT=AG/D**2
UFT=.25*PI/AFT
UGIT=.25*PI/AGIT
UGIN=UGIT*VGS
WRITE(6,*) 'SF, SG, AG, AF, DG, AFT, AGIT, UFT, UGIT, UFT, UGIT, UGIN'
WRITE(6,*) SF, SG, AG, AF, DG, AFT, AGIT, UFT, UGIT, UFT, UGIT, UGIN
SFT=SF/D
SGIT=SG/D
SIIT=SI/D
DLIT=4*AFT/SFT
DLI=DLIT*D

```

```

WRITE(6,*)'SFT,SGIT,SIIT,DLIT,DLI'
WRITE(6,*)SFT,SGIT,SIIT,DLIT,DLI
DGIT=4.*AGIT/(SGIT+SIIT)
DGI=DGIT*D
TETAIR=2.*DACOS(C)
EF=(TETAIR-SIN(TETAIR))/2./PI
ES=1./(1.+((VLS+VGS)/8.66)**1.39)
WRITE(6,*)'HATA AQUI VOY BIEN 1'
IF(ES.GE.1.)ES=1.
IF(ES.LE.48)ES=.48
RHOS=ES*ROL+(1.-ES)*ROG
XMUS=ES*VISL+(1.-ES)*VISG
WRITE(6,*)'MUS,ES,VISL,VISG'
WRITE(6,*)XMUS,ES,VISL,VISG
RES=RHOS*(VLS+VGS)*D/XMUS
WRITE(6,*)'HATA AQUI VOY BIEN 2'
IF(RES.LT.2000.0)THEN
CUL=2.0
ELSE
CUL=1.2
ENDIF
VT=CUL*VS+3.5e-1*(G*D)**(.5)*SIN(aALFA)+5.4e-1*(G*D)**(.5)*COS
&(aALFA)
IF(SIGMA.LE.0.0)WRITE(6,*)'LA ESTOY REGANDO EN BACHE SIGMA=0'
VB=2.5e-1*LOG(SIGMA*G*(ROL-ROG)/(ROL)**2)
EN=1.e-1
VB1=EN*LOG(ES)
VB=1.2*VS+1.53*EXP(VB)*EXP(VB1)*SIN(aALFA)
VLI=(VLS+VGS-VB*(1.-ES))/ES
WRITE(6,*)'HATA AQUI VOY BIEN 3'
VF=VT-((VT-VLI)*ES/EF)
UGI=(VS-VF*EF)/(1.-EF)
REF=ROL*ABS(VF)*DLI/VISL
REG=ROG*ABS(UGI)*DGI/VISG
WRITE(6,*)'REF,REG,UGI,VF'
WRITE(6,*)REF,REG,UGI,VF
IF(NXFRICC.EQ.1)THEN
CALL FANING(EPSILON,REF,FF)
CALL FANING(EPSILON,REG,FGI)
ENDIF
IF(NXFRICC.EQ.2)THEN
CALL SUASHEIM(EPSILON,REF,D,DP,FF)
CALL SUASHEIM(EPSILON,REG,D,DP,FGI)
ENDIF
IF(NXFRICC.EQ.3)THEN
CALL ASHEIM(EPSILON,REF,D,GASTOL,VARSLA,FF)
CALL ASHEIM(EPSILON,REG,D,GASTOG,VARSLUG,FGI)
ENDIF
WRITE(6,*)'FF,FGI'
WRITE(6,*)FF,FGI
FI=1.42E-2
TF=FF*ROL*ABS(VF)*VF/2.0
TWG=FGI*ROG*ABS(UGI)*UGI/2.0
TI=FI*ROG*ABS(UGI-VF)*(UGI-VF)/2.0
R=TF*SF/AF-TWG*(SG/AG+TI/TWG*(SI/AF+SI/AG))+(ROL-ROG)*G*SIN(aALFA)
IF(R.GT.0.0)BAND=1.
IF(R.LT.0.0)BAND=-1.
IF(R.EQ.0.0)GO TO 1000
SUM=1.0E-3
XHLAI=XHLAI+SUM

```

```

C=2.*XHLAI-1.0
C      = 1.0 - 2.*XHLAI
AYUD = R
SI     = D*(1.-(C)**2)**(.5)
SG     = D*DACOS(C)
SF     = D*3.1415926-SG
AG     = 2.5E-1*D*(SF+C*SI)
AF     = 2.5E-1*D*(SG+C*SI)
DG     = 4.0*AG/(SI+SG)
AFT    = AF/D**2.
AGIT   = AG/D**2.
UFT    = 0.25*PI/AFT
UGIT   = 0.25*PI/AGIT
UGIN   = UGIT*VGS
SFT    = SF/D
SGIT   = SG/D
SIIT   = SI/D
DLIT   = 4.*AFT/SFT
DLI    = DLIT*D
DGIT   = 4.*AGIT/(SGIT+SIIT)
DGI    = DGIT*D
TETAIR=2.*DACOS(C)
EF     = (TETAIR-SIN(TETAIR))/2./PI
ES     = 1./(1.+((VLS+VGS)/8.66)**1.39)
IF( ES .GE. 1.0 )ES = 1.00
IF( ES .LE. 0.48)ES = 0.48
RHOS   = ES*ROL+(1.-ES)*ROG
XMUS   = ES*VISL+(1.-ES)*VISG
RES    = RHOS*(VLS+VGS)*D/XMUS
IF( RES .LT. 2000.0 )THEN
    CUL = 2.0
ELSE
    CUL = 1.2
END IF
VT=CUL*VS+3.5e-1*(G*D)**(.5)*SIN(aALFA)+5.4e-1*(G*D)**(.5)*COS
&(aALFA)
VB=2.5e-1*LOG(SIGMA*G*(ROL-ROG)/(ROL)**2)
EN=1.e-1
VB1=EN*LOG(ES)
VB=1.2*VS+1.53*EXP(VB)*EXP(VB1)*SIN(aALFA)
VLI=(VLS+VGS-VB*(1.-ES))/ES
VF=VT-((VT-VLI)*ES/EF)
UGI=(VLS+VGS-VF*EF)/(1.-EF)
REF=ROL*ABS(VF)*DLI/VISL
REG=ROG*ABS(UGI)*DGI/VISG
WRITE(6,*)'REF,REG,UGI,VF',REF,REG,UGI,VF
IF (NXFRICC.EQ.1) THEN
    CALL FANING (EPSILON,REF,FF)
    CALL FANING (EPSILON,REG,FGI)
ENDIF
IF (NXFRICC.EQ.2) THEN
    CALL SUASHEIM (EPSILON,REF,D,DP,FF)
    CALL SUASHEIM (EPSILON,REG,D,DP,FGI)
ENDIF
IF (NXFRICC.EQ.3) THEN
    CALL ASHEIM(EPSILON,REF,D,GASTOL,VARSLA,FF)
    CALL ASHEIM(EPSILON,REG,D,GASTOG,VARSLA,FGI)
ENDIF
WRITE(6,*)'FF,FGI'

```

WRITE(6,*)FF,FGI

FI=1.42e-2

TF=FF*ROL*ABS(VF)*VF/2.0

TWG=FGI*ROG*ABS(UGI)*UGI/2.0

TI=FI*ROG*ABS(UGI-VF)*(UGI-VF)/2.0

R=TF*SF/AF-TWG*(SG/AG+TI/TWG*(SI/AF+SI/AG))+(ROL-ROG)*G
&*SIN(aALFA)

IF(R .GT. 0.0)BAND1=1.0

IF(R .LT. 0.0)BAND1=-1.0

IF(R .EQ. 0.0)GO TO 1000

IF(BAND1 .EQ. BAND)THEN

WRITE(6,*)EF,R

GO TO 100

ELSE

DIFCA=R-AYUD

IF((DIFCA .GE. 10.0E+4) .OR. (DIFCA.LE.-10.0E+4))THEN

BAND=BAND1

WRITE(6,*)EF,R

GOTO 100

ENDIF

ENDIF

00 EL=(VT*ES+VB*(1.-ES)-VGS)/VT

ROU=EL*ROL+(1.-EL)*ROG

WRITE(6,*)'EL VALOR DE RES',RES

IF (NXFRICC.EQ.1) THEN

CALL FANING (EPSILON,RES,FS)

ENDIF

IF (NXFRICC.EQ.2) THEN

CALL SUASHEIM (EPSILON,RES,D,DP,FS)

ENDIF

GASTOTAL=GASTOL+GASTOG

VARAUTO=VARAUA+VARAUG

IF (NXFRICC.EQ.3) THEN

CALL ASHEIM (EPSILON,RES,D,GASTOTAL,VARAUTO,FS)

ENDIF

TS=FS*RHOS*(VS)**2/2.

IF (D.LT.3.81E-2) then

SL=32.0*D

ELSE

SL=1.e-1*LOG(LOG(D)+3.67)

SL=exp(-26.6+28.5*exp(SL))

ENDIF

OLNUN=(SL*(VLI*ES-VF*EF))/(VLS-VF*EF)

FL=OLNUN-SL

DPDX=-ROU*G*SIN(aALFA)+1.0/OLNUN*((TS*3.1415926*D*SL/A)+((TF*SF
& +TWG*SG)*FL/A))

FRACVAC=AG/A

RETURN

END

SUBROUTINE ESTRATIF(ROL,ROG,UL,UG,AL,AG,SL,SG,SI,VISL,VISG,D,G,
&aALFA,A,HLG,EPSILON,DP,GASTOL,GASTOG,VARAUA,VARAUG,NXFRICC,DPDX
&,EL)

ESTE PROGRAMA SIRVE PARA CALCULAR LA CAIDA DE PRESION EN FLUJO ESTRATIFICAD
UTILIZANDO EL MODELO MECANISTICO CORRESPONDIENTE

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

READ(5,*)PJ,ROL,ROG,VISL,VISG,D,GASTOL,GASTOG,SIGMA,EPSILON,DP

READ(5,*)G,aALFA

write(6,*)'ROL,ROG,VISL,VISG,D,GASTOL,GASTOG,SIGMA,EPSILON,DP'

```

write(6,*)ROL,ROG,VISL,VISG,D,GASTOL,GASTOG,SIGMA,EPSILON,DP
DL=4.0*AL/SL
DG=4.0*AG/(SG+SI)
REL=ROL*UL*DL/VISL
REG=ROG*UG*DG/VISG
IF (NXFRICC.EQ.1) THEN
CALL FANING (EPSILON,REL,FWL)
CALL FANING (EPSILON,REG,FWG)
ENDIF
IF (NXFRICC.EQ.2) THEN
CALL SUASHEIM (EPSILON,REL,D,DP,FWL)
CALL SUASHEIM (EPSILON,REG,D,DP,FWG)
ENDIF
IF (NXFRICC.EQ.3) THEN
CALL ASHEIM(EPSILON,REL,D,GASTOL,VARVUA,FWL)
CALL ASHEIM(EPSILON,REG,D,GASTOG,VARVUG,FWG)
ENDIF
TWL=FWL*ROL*UL**2/2.0
TWG=FWG*ROG*UG**2/2.0
DPDX=(TWL*SL+TWG*SG)/A-(AL/A*ROL+AG/A*ROG)*G*SIN(aALFA)
WRITE(6,*)'DPDX'
WRITE(6,*)DPDX
TETA=2.0*DACOS(1.0-2.0*HLG)
EL=(TETA-SIN(TETA))/(2.0*3.1415926)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE ANULAR(ROL,ROG,VISL,VISG,D,GASTOL,GASTOG,SIGMA,G,
&aALFA,EPSILON,DP,VARVUA,VARVUG,NXFRICC,DPDX,EL,FRACVAC)
EL PRESENTE MODELO SIRVE PARA CALCULAR CAIDAS DE PRESION Y COLGAMIENTO
PARA FLUJO ANULAR UTILIZANDO EL MODELO MECANISTICO CORRESPONDIENTE
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

```

```

A=3.1415926*D**2/4.0
VLS=GASTOL/A
VGS=GASTOG/A
VM=VLS+VGS
IF (SIGMA.LE.0.0) THEN
FE=1.0
ELSE
XA=10000.0*(ROG/ROL)**(.5)*VGS*VISG/SIGMA
WRITE(6,*)XA,ROG,ROL,VGS,VISG,SIGMA
FE=1.0-EXP(-1.25E-1*(XA-1.5))
ENDIF
EC=VLS*FE/(VGS+VLS*FE)
ROC=EC*ROL+(1.0-EC)*ROG
IF (FE.GT..999) FE=.999
IF (FE.LT.0.9995) THEN
IF (FE.LT.0.95) THEN
DELTAD=1.0E-3
DELTA=DELTAD*D
SI=3.1415926*(D-2.0*DELTA)
SL=D*3.1415926
AC=3.1415926/4.0*(D-2.0*DELTA)**2.0
AF=3.1415926/4.0*D**2-3.1415926/4.0*(D-2.0*DELTA)**2
VF=VLS*(1.0-FE)/(4.0*DELTAD*(1.0-DELTAD))
VC=(VGS+VLS*FE)/(1.0-2.0*DELTAD)**2
DL=4.0*DELTA*(D-DELTA)/D
DC=D-2.0*DELTA
VISC=EC*VISL+(1.0-EC)*VISG
REC=ROC*VC*DC/VISC

```

```

CALL FANING (EPSILON,REC,FC)
FI=FC*(1.0+2250.0*DELTAD/(ROC*(VC-VF)**2*DELTA/SIGMA))
TAOI=FI*ROC*(VC-VF)**2/2.0
REL=ROL*VF*DL/VISL
IF (NXFRICC.EQ.1) THEN
CALL FANING(EPSILON,REL,FF)
ENDIF
IF (NXFRICC.EQ.2) THEN
CALL SUASHEIM (EPSILON,REL,D,DP,FF)
ENDIF
IF (NXFRICC.EQ.3) THEN
CALL ASHEIM(EPSILON,REL,D,GASTOL,VAR SUA,FF)
ENDIF
TWL=FF*ROL*VF**2/2.0
C=TWL*SL/AF-TAOI*SI*(1.0/AF+1.0/AC)+(ROL-ROC)*G*SIN(aALFA)
IF (C.GT.0.0) BAND=1.0
IF (C.LT.0.0) BAND=-1.0
IF (C.EQ.0.0) GOTO 300
00 IF (ABS(C).LT.500.0) THEN
SUMA=1.0E-5
ELSE
SUMA=1.0E-4
ENDIF
DELTAD = DELTAD+SUMA
DELTA = DELTAD*D
AYUD = C
SI = 3.1415926*(D-2.0*DELTA)
SL = D*3.1415926
AC = 3.1415926/4.0*(D-2.0*DELTA)**2.0
AF = 3.1415926/4.0*D**2-3.1415926/4.0*(D-2.0*DELTA)**2.0
VF = VLS*(1.0-FE)/(4.0*DELTAD*(1.0-DELTAD))
VC = (VGS+VLS*FE)/(1.0-2.0*DELTAD)**2.0
DL = 4.0*DELTA*(D-DELTA)/D
DC = D-2.0*DELTA
VISC = EC*VISL+(1.0-EC)*VISG
ROC = EC*ROL+(1.0-EC)*ROG
REC = ROC*VC*DC/VISC
CALL FANING(EPSILON,REC,FC)
FI=FC*(1.0+2250.0*DELTAD/(ROC*(VC-VF)**2*DELTA/SIGMA))
TAOI=FI*ROC*(VC-VF)**2/2.0
REL=ROL*VF*DL/VISL
IF (NXFRICC.EQ.1) THEN
CALL FANING(EPSILON,REL,FF)
ENDIF
IF (NXFRICC.EQ.2) THEN
CALL SUASHEIM (EPSILON,REL,D,DP,FF)
ENDIF
IF (NXFRICC.EQ.3) THEN
CALL ASHEIM (EPSILON,REL,D,GASTOL,VAR SUA,FF)
ENDIF
TWL=FF*ROL*VF**2/2.0
C=TWL*SL/AF-TAOI*SI*(1.0/AF+1.0/AC)+(ROL-ROC)*G*SIN(aALFA)
IF (C.GT.0.0) BAND1=1.0
IF (C.LT.0.0) BAND1=-1.0
IF (C.EQ.0.0) GOTO 300
IF (BAND1.EQ.BAND) THEN
WRITE(6,*)DELTAD,C
GOTO 100
ELSE
DIFCA=C-AYUD

```

```

IF ((DIFCA .GE. 10.e4) .OR. (DIFCA.LE. -10.E4)) THEN
  BAND=BAND1
  WRITE (6, *) DELTAD, C
  GOTO 100
ENDIF
ENDIF
300 WRITE (6, *) 'EL VALOR FINAL DE DELTAD Y C ES'
  WRITE (6, *) DELTAD
00 DPDX=TWL*SL/A - (AF/A*ROL+AC/A*ROC) *G*SIN(aALFA)
  EL=1.0 - (1.0-2.0*DELTAD) **2*VGS/(VGS+VLS*FE)
  FRACVAC=AC/A
  GOTO 1
  ELSE
  DELTAD=0.0
  DELTA=0.0
  SI=3.1415926*D
  AC=3.1415926/4.0*(D-2.0*DELTA) **2
  VF=0.0
  WRITE (6, *) 'VOY BIEN'
  VC=(VGS+VLS*FE)/(1.0-2.0*DELTAD) **2
  DC=D-2.0*DELTA
  VISC=EC*VISL+(1.0-EC)*VISG
  ROC=EC*ROL+(1.0-EC)*ROG
  REC=ROC*VC*DC/VISC
  WRITE (6, *) REC, ROC, VC, DC
  IF (NXFRICC.EQ.3) THEN
  CALL ASHEIM(EPSILON, REC, D, GASTOG, VARSUG, FC)
  ENDIF
  IF (NXFRICC.EQ.1) THEN
  CALL FANING(EPSILON, REC, FC)
  ENDIF
  IF (NXFRICC.EQ.2) THEN
  CALL SUASHEIM(EPSILON, REC, D, DP, FC)
  ENDIF
  FI=FC
  TAOI=FI*ROC*(VC-VF) **2/2.0
  DPDX=TAOI*SI/A-AC/A*ROC*G*SIN(aALFA)
  FRACVAC=1.0
  ENDIF
1 RETURN
END

```

```

SUBROUTINE FANING(EPSILON, RE, F)
STE PROGRAMA SIRVE PARA CALCULAR EL FACTOR DE FRICCION DEL MODELO MECANISTICO
RECUERDA QUE EL METODO PROPUESTO POR SU & ASHEIM UTILIZA MOODY MIENTRAS
QUE EL MODELO MECANISTICO UTILIZA FANING, PARA PASAR DE FANINIG A EL
MECANISTICO SOLO MULTIPLICA POR CUATRO Y OARA REGREASR AL MODELO MEC.
LO DIVIDDE ENTRE CUATRO, EL LOGARTIMO UTILIZADO ES BASE 10
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
  IF (RE .GT. 2000.0) THEN
  I=1
  F=16.0/RE
00 CAL=3.48-4*LOG(2.0*EPSILON+9.35/(RE*F**(.5)))/2.302581
  F1=(1.0/CAL) ** (2.0)
  IF (ABS(F-F1) .LT. 1.0E-5) THEN
  GOTO 20
  ELSE
  WRITE(6, *) 'EL VALOR DE LOS FACTORES DE FRICCION SON'
  WRITE(6, *) F, F1

```

```

I=I+1
F=F1
IF(I.LT.20) THEN
  GOTO 100
ELSE
  WRITE(6,*)'NO ALCANCE LA CONVERG,EN FACT FRC. SUB FANINNG'
  GOTO 20
ENDIF
ENDIF
WRITE(6,*)'EL VALOR DE LOS FACTORES DE FRICCION SON'
WRITE(6,*)F,F1
20 RETURN
ELSE
F=16.0/RE
RETURN
ENDIF
END
SUBROUTINE SUASHEIM(EPSILON,RE,D,DP,FMR)
ESTE PROGRAMA SIRVE PARA CALCULAR EL FACTOR DE FRICCION DEL MODELO MECANISTIC
ECUERDA QUE EL METODO PROPUESTO POR SU & ASHEIM UTILIZA MOODY MIENTRAS
UE EL MODELO MECANISTICO UTILIZA FANING, PARA PASAR DE FANING A EL
ECANISTICO SOLO MULTIPLICA POR CUATRO Y OARA REGREASR AL MODELO MEC.
OLO DIVIDDE ENTRE CUATRO, EL LOGARTIMO UTILIZADO ES BASE 10
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
  COMMON/AJOS/AJOSE,DELTAUJ,REJOSE
  COMMON /DISP/ DISPAROS
  EXTERNAL JOSE
  IF (RE .GT. 2000.0) THEN
    F=16.0/RE
    I=1
00 CAL=3.48-4.0*LOG(2.0*EPSILON+9.35/(RE*F**(.5)))/2.302581
    F1=(1.0/CAL)**2
    IF (ABS(F-F1).LT.1.0E-5) THEN
      GOTO 20
    ELSE
      WRITE(6,*)'EL VALOR DE LOS FACTORES DE FRICCION SON'
      WRITE(6,*)F,F1
      I=I+1
      F=F1
      IF (I.LT.20) THEN
        GOTO 100
      ELSE
        WRITE(6,*)'NO ALCANCE CONV EN FACT FRICC, SUASHEIM FANIN'
        GOTO 20
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF
  WRITE(6,*)'EL VALOR DE LOS FACTORES DE FRICCION SON'
  WRITE(6,*)F,F1
  ELSE
    F=16.0/RE
  ENDIF
00 F=4.0*F
  A=(8.0/F)**(.5)+3.75
  B=-2.5*LOG(RE/2.0*(F/8.0)**(.5))
  A=A+B
  AJOSE=A
  DELTAU=7.0*DP/D
  DELTAUJ=DELTAU
  REJOSE=RE

```



```

FMR=RTBIS1(0.01D0,20.0D0,.00001D0)
FMR=FMR/4.0
WRITE(6,*)'EL VALOR DEL FACTOR DE FRICCION CORREGIDO ES'
WRITE(6,*)FMR
RETURN
END
SUBROUTINE BURBUJA(ROL,ROG,VISL,VISG,D,GASTOL,GASTOG,G,EPSILON,
&SIGMA,aALFA,VAR SUA,VAR SUG,NXFRICC,DPDX,EL,FRACVAC)
ESTE PROGRAMA SIRVE PARA CALCULAR POR MEDIO DEL MODELO MECANISTICO
ORRESPONDIENTE LAS CAIDAS DE PRESION PARA REGIMEN BURBUJ
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
A=3.1415926*D**2.0/4.0
VLS=GASTOL/A
VGS=GASTOG/A
VM=VLS+VGS
UG=1.2*VM
EL=1.0-VGS/UG
IF (.NOT.(aALFA.EQ.0.0)) CALL CALBUR(VM,SIGMA,ROL,ROG,aALFA,VGS,G,
&EL,UG)
ROM=EL*ROL+(1.0-EL)*ROG
VISM=EL*VISL+(1.0-EL)*VISG
REM=ROM*VM*D/VISM
IF (NXFRICC.EQ.1) THEN
CALL FANING (EPSILON,REM,FM)
ENDIF
IF (NXFRICC.EQ.2) THEN
CALL SUASHEIM (EPSILON,REM,D,DP,FM)
ENDIF
GASTOTAL=GASTOL+GASTOG
VAR SUTO=VAR SUA+VAR SUG
IF (NXFRICC.EQ.3) THEN
CALL ASHEIM (EPSILON,REM,D,GASTOTAL,VAR SUTO,FM)
ENDIF
DPDX=2.0*FM*ROM*VM**2.0/D-ROM*G*SIN(aALFA)
FRACVAC=VGS/UG
RETURN
END
SUBROUTINE CALBUR(VM,SIGMA,ROL,ROG,aALFA,VSG,G,EL,UG)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DERFUGUG=-1.0
DERFELEL=-1.0
00 DERFUGEL=1.53*(SIGMA*(ROL-ROG)/ROL**2)**(0.25)*SIN(aALFA)*(0.1*EL
&**(-.09))
DERFELUG=VSG/UG**2
DETERMI=DERFUGUG*DERFELEL-DERFUGEL*DERFELUG
A11I=DERFELEL/DETERMI
A12I=-DERFUGEL/DETERMI
A21I=-DERFELUG/DETERMI
A22I=DERFUGUG/DETERMI
FUG=- (1.2*VM+1.53*(SIGMA*G*(ROL-ROG)/ROL**2)**(0.25)*EL**(0.1)*
&SIN(aALFA)-UG)
FEL=- (1.-VSG/UG)-EL
DELTAUG=A11I*FUG+A12I*FEL
DELTAEL=A21I*FUG+A22I*FEL
UG=UG+DELTAUG
EL=EL+DELTAEL
IF ((DELTAUG.GT.1.E-4).OR.(DELTAEL.GE.1.E-4)) GOTO100
WRITE(6,*)'EL VALOR DEL COLGAMIENTO ES',EL
RETURN
END

```

```

SI DECIDES UTILIZAR EL METODO DE BISECCION PARA EL CALCULO DE
EL COLGAMIENTO ACTIVA ESTA SUBROUTINA Y DESACTIVA LA DE ARRIBA.
SUBROUTINE CALBUR (VM, SIGMA, ROL, ROG, aALFA, VSG, G, EL, UG)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
EXTERNAL COLGA
EL=RTBIS (COLGA, 1.D-5, 9.95D-1, 1.D-4)
UG=1.2*VM+1.53*(SIGMA*G*(ROL-ROG)/ROL**2)**(0.25)*EL**(0.1)*
&SIN(aALFA)
WRITE(6,*) 'EL VALOR DE EL', EL
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE FICINTE1 (PJ, ROG, ROL, UL, SIGMA, D, VISL, VGS, FWG, HLG, REG, FI)
ESTA SUBROUTINA SIRVE PARA CALCULAR EL FACTOR DE FRICCION INTERFACIAL
DE AUERDO A LA TESIS DE XIAO, AUNQUE EL PROPONE SU PROPIA CORRELACIO
QUE APARECEC EN LA PARTE DE ABAJO

```

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
VSGT=5*(101325/PJ)**(.5)
XNWENU=ROG*UL**2*VISL**2/(ROL*SIGMA**2)
IF ((D.LE.0.127).AND.(VGS.LE.VSGT)) THEN
  FI=FWG
ELSE
  IF ((D.LE.0.127).AND.(VGS.GT.VSGT)) THEN
    FI=FWG*(1+15*(HLG)**(.5)*(VGS/VSGT-1))
  ELSE
    IF ((D.GT.0.127).AND.(XNWENU.LE.0.005)) THEN
      EI=34.0*SIGMA/(ROG*UL**2)
      CALL FANING (EI, REG, FI)
    ELSE
      EI=170.0*SIGMA*(XNWENU)**(0.3)/(ROG*UL**2)
      CALL FANING (EI, REG, FI)
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE FICINTE (ROL, G, SIGMA, UG, UL, D, VISL, FI)
ESTA SUBROUTINA SIRVE PARA CALCULAR EL FACTRO DE FRICCION INTYERFACILA
PROPUESTO PRO XIAO ES SU TESIS
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

```

```

RADICAL4=ROL/(G*SIGMA)
XNGV=UG*(RADICAL4)**(0.25)
XNLV=UL*(RADICAL4)**(0.25)
XND=D*(RADICAL4)**(0.5)
XNL=VISL*(G/(ROL*SIGMA**3.0))** (0.25)
GARABATO=XNGV** (0.230)*XNLV** (0.202)*XND** (-0.460)*XNL** (0.076)
FI=0.053*GARABATO
RETURN
END

```

```

FUNCTION JOSE (FMR)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON/ AJOS/AJOSE, DELTAUJ, REJOSE
A=AJOSE
DELTAU=DELTAUJ
RE=REJOSE
AUX1=.5*LOG (FMR/8.0)

```

```

AUX1=EXP(AUX1)
AUX1=RE/2.0*AUX1
AUX1=LOG(AUX1)*2.5
AUX1=AUX1+A-DELTAU-3.75
JOSE=SQRT(8./FMR)-AUX1
RETURN
END

```

```

FUNCTION RTBIS1(X1,X2,XACC)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER (JMAX=40)
EXTERNAL JOSE

```

```

WRITE(6,*)X1,X2,XACC,JMAX
FMID=JOSE(X2)
F=JOSE(X1)
WRITE(6,*)F,FMID
IF(F*FMID.GE.0.) WRITE(6,*) 'RAIZ PUEDE SER ENCONTRADA '
IF(F.LT.0.) THEN
    RTBIS1=X1
    DX=X2-X1
    WRITE(6,*) 'RTBIS1'
WRITE(6,*)RTBIS1
ELSE
    RTBIS1=X2
    DX=X1-X2
    WRITE(6,*) 'RTBIS1'
    WRITE(6,*)RTBIS1
ENDIF
DO 11 J=1,JMAX
WRITE(6,*)J,JMAX
WRITE(6,*)RTBIS1
DX=DX*.5
XMID=RTBIS1+DX
FMID=JOSE(XMID)
IF(FMID.LE.0.)RTBIS1=XMID
IF(ABS(DX).LT.XACC .OR. FMID.EQ.0.)RETURN
11 CONTINUE
WRITE(*,*) 'TOO MANY BISECTION'
END

```

```

SUBROUTINE ASHEIM(EPSILON,RE,D,GASTOSUA,GASPER,F)
ESTE PROGRAMA SIRVE PARA CALCULAR EL FACTOR DE FRICCION DEL MODELO MECANISTIC
ECUERDA QUE EL METODO PROPUESTO POR SU & ASHEIM UTILIZA MOODY MIENTRAS
UE EL MODELO MECANISTICO UTILIZA FANING, PARA PASAR DE FANING A EL
ECANISTICO SOLO MULTIPLICA POR CUATRO Y OARA REGREASR AL MODELO MEC.
OLO DIVIDE ENTRE CUATRO, EL LOGARTIMO UTILIZADO ES BASE 10
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON/AJOS/AJOSE,DELTAUJ,REJOSE
COMMON /DISP/ DISPAROS
IF (RE .GT. 2000.0) THEN
F=16.0/RE
I=1
00 CAL=3.48-4.0*LOG(2.0*EPSILON+9.35/(RE*F**(.5)))/2.302581
F1=(1.0/CAL)**2
IF (ABS(F-F1).LT.1.0E-5) THEN
GOTO 20
ELSE
WRITE(6,*) 'EL VALOR DE LOS FACTORES DE FRICCION SON'
WRITE(6,*)F,F1

```

```

I=I+1
F=F1
  IF (I.LT.20) THEN
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE(6,*) 'NO ALCANCE CONV EN FACT FRICC, SUASHEIM FANIN'
    GOTO 20
  ENDIF
ENDIF
WRITE(6,*) 'EL VALOR DE LOS FACTORES DE FRICCION SON'
  WRITE(6,*) F, F1
  ELSE
    F=16.0/RE
  ENDIF
20 F=4.0*F
  F=4.*D*GASPER/GASTOSUA+2.0*D*(GASPER/GASTOSUA)**2+F
  F=F/4.
  WRITE(6,*) F
RETURN
END
FUNCTION RTBIS2 (HLDP, X1, X2, XACC)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (JMAX=40)
EXTERNAL HLDP

  WRITE(6,*) X1, X2, XACC, JMAX
  FMID=HLDP(X2)
  F=HLDP(X1)
  WRITE(6,*) F, FMID
  IF (F*FMID.GE.0.) WRITE(6,*) 'RAIZ PUEDE SER ENCONTRADA '
  IF (F.LT.0.) THEN
    RTBIS2=X1
    DX=X2-X1
    WRITE(6,*) 'RTBIS2'
    WRITE(6,*) RTBIS2
  ELSE
    RTBIS2=X2
    DX=X1-X2
    WRITE(6,*) 'RTBIS2'
    WRITE(6,*) RTBIS2
  ENDIF
DO 11 J=1, JMAX
  WRITE(6,*) J, JMAX
  WRITE(6,*) RTBIS2
  DX=DX*.5
  XMID=RTBIS2+DX
  FMID=HLDP(XMID)
  IF (FMID.LE.0.) RTBIS2=XMID
  IF (ABS(DX).LT.XACC .OR. FMID.EQ.0.) RETURN
1 CONTINUE
WRITE(*,*) 'TOO MANY BISECTION'
RETURN
END

```

SUBROUTINA CALCULO DE RELACION GAS ACEITE

Rs

SUBROUTINE STAND1 (P, T, DENREL, DENREG, RS)

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

RHOV = DENREG
RHOL = DENREL
T = T + 460.0

RS1 = 0.0125d0 * rhol
RS2 = 0.00091d0 * T
RS3 = p / 18.0d0
RS4 = 10.0d0 ** rs1
RS5 = 10.0d0 ** rs2

RS = rhov * ((rs3 * (rs4 / rs5)) ** (1.0d0 / 0.83d0))

RETURN
END

SUBROUTINA CALCULO DE FACTOR DE VOLUMEN DE ACEITE
Bo

SUBROUTINE STAND2 (T, DENREL, DENREG, RS, BO)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

RHOV = DENREG
RHOL = DENREL
T = T + 460.0d0

F1 = (rhov / rhol) ** 0.5
F2 = (Rs * F1 + T) ** 1.175
Bo = 0.972d0 + 0.000147d0 * F2

RETURN
END

SUBROUTINA CALCULO DE VISCOSIDAD DEL CONDENSADO
MUO

SUBROUTINE VISCOIL(T, Rs, denrel, visoil)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

RHOL = DENREL
T = T + 460.0d0

A1 = 10.715d0 * ((Rs + 100.0d0) ** (-0.515))
B1 = 5.44d0 * ((Rs + 150.0d0) ** (-0.338))
Z1 = 3.0324d0 - 0.02023d0 * rhol
Y1 = 10.0d0 ** z1
X1 = Y1 * (T ** (-1.163))
vom = (10.0d0 ** x1) - 1.0d0
visoil = A1 * (vom ** b1)

RETURN
END

SUBROUTINA CALCULO DE FACTOR Z

SUBROUTINE ZFACHY(T,P,GAMAG,Z)

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

CALCULA TEMPERATURA Y PRESION CRITICAS, PRESION Y TEMPERATURA REDUCIDAS

TC = 169.0d0 + 314.0d0*GAMAG

PC = 708.75d0 - 57.5d0*GAMAG

TR = (T+460.0d0) / TC

PR = P / PC

SI TR ES MENOR QUE 1.01 SE CALCULA EL FACTOR Z CON UN VALOR DE TR IGUAL A 1.0

IF(TR.GT.1.01)GO TO 1

RT = 1.0d0

GO TO 2

1 RT = 1.0d0 / TR

CALCULA TERMINOS DEPENDIENTES DE LA TEMPERATURA

2 A = 0.06125d0 * RT * dEXP(-1.2d0 * (1.0d0 - RT)**2)

B = RT * (14.76d0 - 9.76d0 * RT + 4.58d0 * RT * RT)

C = RT * (90.7d0 - 242.2d0 * RT + 42.4d0 * RT * RT)

D = 2.18d0 + 2.82d0 * RT

CALCULA DENSIDAD REDUCIDA, Y. USANDO EL METODO DE NEWTHON RHAPSON

Y = 0.001d0

DO 4 J = 1,25

IF(Y.GT.1.0) Y = 0.6d0

F = - (A) * PR + (Y + Y * Y + Y ** 3 - Y ** 4) /

* (1.0 - Y) ** 3 - B * Y * Y + C * Y ** D

IF(ABS(F).LE.1E-4) GO TO 5

SI NO SE OBTIENE CONVERGENCIA EN 25 ITERACIONES, SE TOMARA COMO VALOR Z = 1.0

IF(J.LT.25) GO TO 3

Z = 1.0

RETURN

3 DFDY = (1.0d0 + 4.0d0 * Y + 4 * Y * Y - 4.0d0 * Y ** 3 + Y ** 4) /

* (1.0d0 - Y) ** 4 - 2.0d0 * B * Y + D * C * Y ** (D - 1.0d0)

Y = Y - F / DFDY

4 CONTINUE

CALCULA FACTOR Z

5 Z = A * PR / Y

RETURN

END

SUBROUTINA CALCULO DE VISCOCIDAD

SUBROUTINE GASVIS(T,GAMAG,P,GVIS)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

TABS = T + 460.0d0
W = GAMAG * 29.0d0
AK = (9.4d0 + 0.02d0 * W) * (TABS ** 1.5)/(209.0d0
* + 19.0d0 * W + TABS)

X = 3.5d0 + (986.0d0 / TABS) + 0.01d0 * W
Y = 2.4d0 - 0.2d0 * X

CALCULA DENSIDAD DEL GAS, GM / CC
CALL ZFACHY(T,P,GAMAG,Z)
RHOG = P * W / (10.72d0 * Z * TABS * 62.4d0)

CALCULA LA VISCOSIDAD DEL GAS
GVIS = AK * dEXP(X * RHOG ** Y) / 10000.0d0
RETURN
END

SUBROUTINA CALCULO FACTOR DE VOLUMEN DEL GAS

Bg

SUBROUTINE FVG(T,P,GAMAG,Bg)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
CALL ZFACHY(T,P,GAMAG,Z)
TABS = (T + 460.0)
Bg = (0.02829 * Z * TABS) / P
RETURN
END

** EN ESTA SUBROUTINA SE DA LA FUNCION Y SU DERIVADA

SUBROUTINE funcd(x, fn, df)
CALCULO DE f(x) y f'(x)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
REAL*8 x, fn, df
COMMON /UNO/ a,b,c
fn = x**3 + a*x**2 + b*x + c
df = 3.0*x**2 + 2.0*a*x + b
RETURN
END

* CALCULO DE RAICES USANDO NEWTON-RAPSHON

```

FUNCTION rtnewt( funcd, x1, x2, xacc )
INTEGER jmax
REAL*8 rtnewt, x1, x2, xacc
EXTERNAL funcd
PARAMETER( jmax=30 )
INTEGER j
REAL*8 df, dx, f
rtnewt = 0.5*(x1+x2)
DO j=1, jmax
    CALL funcd(rtnewt, f, df)
    dx= f/df
    rtnewt = rtnewt-dx
    IF( (x1-rtnewt)*(rtnewt-x2).LT.0.0 )
+        WRITE(*,*) 'rtnewt sali  fuera del intervalo'
    IF( abs(dx). LT. xacc ) RETURN
ENDDO
stop 'rtnewt excedi  el m ximo de iteraciones'
END

```

```

** CALCULO DE RAICES DE UNA ECUACION CUADRATICA
SUBROUTINE CUADRATICA( a, b, c, x1, x2 )
REAL*8 a,b,c
REAL*8 x1, x2

raiz = b**2 - 4.0*a*c
IF( raiz.LT.0.0 ) THEN
    WRITE(*,*) '**** DOS RAICES SON COMPLEJAS ***'
    X1=0.0
    X2=0.0
    RETURN
ENDIF
raiz =dSQRT( raiz )

x1 = (-b + raiz)/2.0*a
x2 = (-b - raiz)/2.0*a

RETURN
END

```

```

SUBROUTINE tpcritica( tb1, rho1, tc, pc )
REAL*8 tb1, rho1
REAL*8 tc, pc
tc = 24.2787*(tb1**0.58848)*(rho1**0.3596)
pc = 3.12281e9*(tb1**(-2.3125))*(rho1**2.3201)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE tpcritica2( tb1, rho1, tc, pc )
REAL*8 tb1, rho1
REAL*8 tc, pc
tc = 10.6443*(tb1**0.81067)*(rho1**0.53691)*
* dexp( -5.1747d-4*tb1 - 0.5444*rho1 + 3.5995d-4*tb1*rho1)
pc = 6.162e6*(tb1**(-0.4844))*(rho1**4.0846)*
* dexp( -4.7250d-3*tb1 - 4.8014*rho1 + 3.1939d-3*tb1*rho1 )
RETURN
END

```