



11474  
3  
201

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

MODELO MATEMATICO PARA EL DISEÑO Y CALCULO  
DE CONDICIONES OPTIMAS DE OPERACION EN  
SISTEMAS DE TUBERIAS

MIGUEL ANGEL MENDEZ GARCIA

T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER

EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA

( P E T R O L E R A )

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 1990

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

MODELO MATEMATICO PARA EL DISEÑO Y CALCULO DE CONDICIONES  
OPTIMAS DE OPERACION EN SISTEMAS DE TUBERIAS

I N D I C E

	Pag
RESUMEN	1
1 INTRODUCCION	2
2 TEORIA	7
2.1 Método de Stoner.	7
2.2 Método de Flanigan.	10
2.2.1 Variables de Estado y de Decisión.	11
2.2.2 Derivadas Restringidas.	15
2.2.3 Ecuación de Costo.	19
2.2.4 Solución de las Derivadas Restringidas.	23
3 PROGRAMA DE COMPUTO	28
PROCEDIMIENTOS	
3.1 Captura de Datos.	28
3.2 Procedimiento de Stoner.	29
3.3 Procedimiento de Flanigan.	31
3.4 Impresión de Resultados.	33
4 AJUSTE Y VALIDACION DEL PROGRAMA DE COMPUTO	34
4.1 Información de Campo.	34
4.2 Procedimiento de Cálculo.	40

<b>5</b>	<b>APLICACION DEL MODELO</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>69</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>72</b>
	<b>APENDICES</b>	
	<b>A: METODO DE STONER</b>	<b>74</b>
	<b>B: LISTADO DEL PROGRAMA</b>	<b>86</b>

## RESUMEN

Esta tesis presenta una modificación del trabajo propuesto por Flanigan<sup>1</sup>, el cual optimiza la recolección y el transporte de gas en régimen permanente a través de sistemas de tuberías mediante el método de derivadas restringidas.

La modificación consiste en plantear una nueva función objetivo que permita obtener resultados de costos más reales en el diseño de sistemas de redes de recolección o distribución, así como el empleo de esta técnica de optimización a sistemas de tuberías que manejan líquidos.

Finalmente se presenta la aplicación del procedimiento propuesto, a la optimización del sistema de gasoductos y oleoductos del Distrito Villahermosa de Petróleos Mexicanos en la Zona Sureste.

Referencias al final

## INTRODUCCION

Al operar o dimensionar un sistema de tuberías de recolección o distribución de gas o líquido, o la ampliación de uno existente, se tiene como objetivo disponer de capacidad suficiente para satisfacer necesidades actuales y futuras, manteniendo la presión dentro de ciertos límites y al menor costo posible. Este objetivo se satisface seleccionando apropiadamente los elementos que constituyen el sistema, tales como tuberías, bombas, compresoras, válvulas, etc.

En sistemas pequeños se puede hacer una selección óptima de los elementos que constituyen el sistema en forma empírica, debido a las pocas variables de decisión que intervienen, sin embargo, a medida que los sistemas se tornan más complejos, el número de variables que intervienen se incrementa, haciendo más complicado el problema de encontrar la alternativa óptima.

Cuando se considera la magnitud de las inversiones y costos de operación implicados en los sistemas que manejan gas o líquido, y que aún un cambio pequeño en el sistema o en sus condiciones de operación puede producir ahorros substanciales, se hace evidente la necesidad de contar con un modelo matemático confiable que permita llevar a cabo la optimización del sistema.

Dentro de la literatura se encontraron algunos métodos<sup>1-5</sup> orientados al análisis de sistemas que manejan gas en régimen permanente. Uno de estos métodos<sup>1</sup> se tomó como base para el desarrollo de este trabajo. Dicho método se basa en la solución de ecuaciones que simulan el flujo de gas en sistemas de recolección o distribución, al mismo tiempo que se optimiza una función costo, empleando para esto el concepto de *derivadas restringidas*.

Históricamente, el cálculo diferencial ha sido una herramienta esencial en los trabajos de optimización. Cuando se presentan ciertas condiciones, como son:

- 1.- El sistema se puede describir por un conjunto de ecuaciones analíticas continuas.
- 2.- El sistema no contiene restricciones.
- 3.- El sistema de ecuaciones es diferenciable.

el cálculo diferencial es una simple y poderosa herramienta, la aproximación clásica es obtener la primera derivada del sistema de ecuaciones con respecto a ciertas variables específicas. Estas derivadas se igualan a cero y las ecuaciones resultantes se resuelven para sus diferentes raíces. Se usa entonces la segunda derivada para evaluar si la raíz es máxima, mínima o un punto de inflexión. Una representación física de un sistema sin restricción es una simple colina. El cálculo diferencial nos guiará a la cima de la colina. Esto se ilustra en las Figs. 1 y 2.

Desafortunadamente, el rango de problemas reales a los cuales se puede aplicar este procedimiento es completamente limitado. Muchos de los problemas tienen al menos algunas restricciones; y muchos sistemas de interés son severamente restringidos. Algunos ejemplos de estas restricciones son:

- 1.- La presión no debe exceder de un cierto valor.
- 2.- La temperatura debe estar dentro de ciertos límites.
- 3.- Se imponen límites en los gastos.

Estas restricciones a un sistema se pueden ver como una serie de obstáculos en la colina que generalmente previene un explorador para alcanzar la cima. El óptimo o mínimo es el punto más alto que se puede

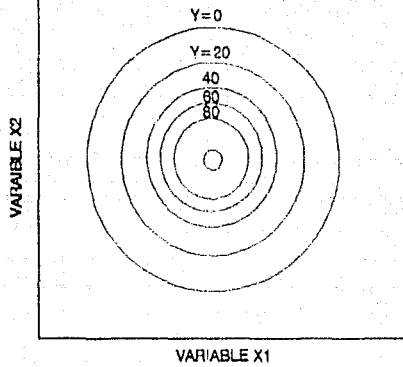


Fig.1 .- PROBLEMA DE OPTIMIZACION SIN RESTRICCIONES

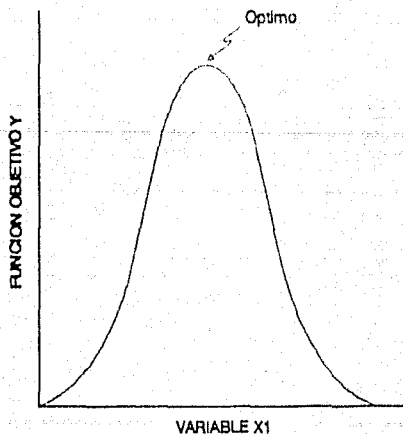


Fig.2 .- PERFIL DE UN PROBLEMA DE OPTIMIZACION SIN RESTRICCIONES



alcanzar en la colina sin tener que pasar a través de los obstáculos. Esto se ilustra en las Figs. 3 y 4.

"Hay muchos senderos que conducen a la cima de una montaña, sin embargo, la vista allí es siempre la misma. En otras palabras, hay muchos métodos de optimización, sin embargo, las matemáticas en el óptimo siempre son las mismas....."

Para este caso, el concepto de *derivadas restringidas* es muy útil.

A la fecha en la Industria Petrolera Mexicana, no se ha desarrollado ningún modelo de optimización ni ha sido implantado alguno de los ya existentes, por lo que no se cuenta con herramientas para el proceso de toma de decisiones con respecto a la selección de un sistema de transporte de gas o aceite que evalúe la red en su conjunto y determine la opción más conveniente desde el punto de vista económico. El método de *derivadas restringidas* es una poderosa y prometedora herramienta.

Es importante señalar que este método se programó en lenguaje TURBO-PASCAL para su uso en microcomputadoras PC o compatibles y se validó mediante su aplicación al análisis del sistema de recolección del Distrito Villahermosa de Petróleos Mexicanos.

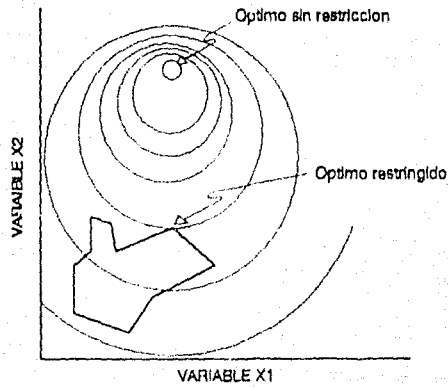


Fig.3 .- PROBLEMA DE OPTIMIZACION CON RESTRICCIONES

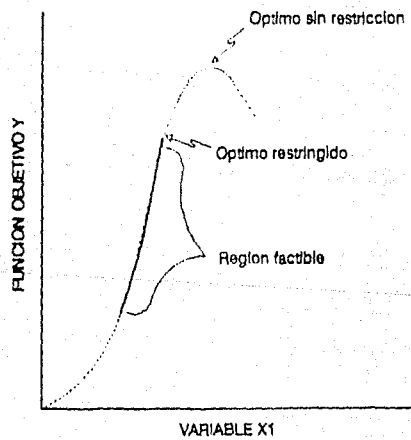


Fig.4 .- PERFIL DE UN PROBLEMA DE OPTIMIZACION CON RESTRICCIONES

# T E O R I A

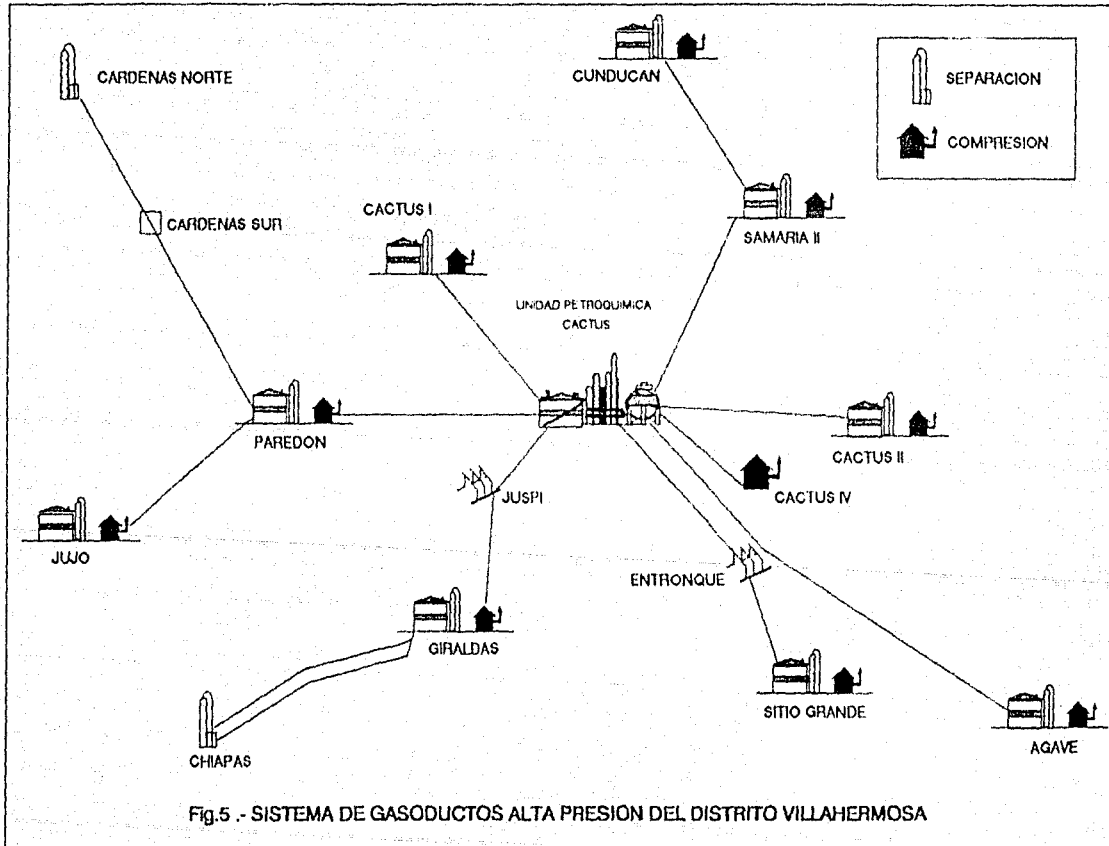
Antes de entrar al planteamiento de este modelo, es conveniente examinar el método propuesto por Stone,<sup>6,7</sup> ya que como se verá más adelante, este método desarrolla una cantidad substancial del trabajo requerido para evaluar las derivadas restringidas.

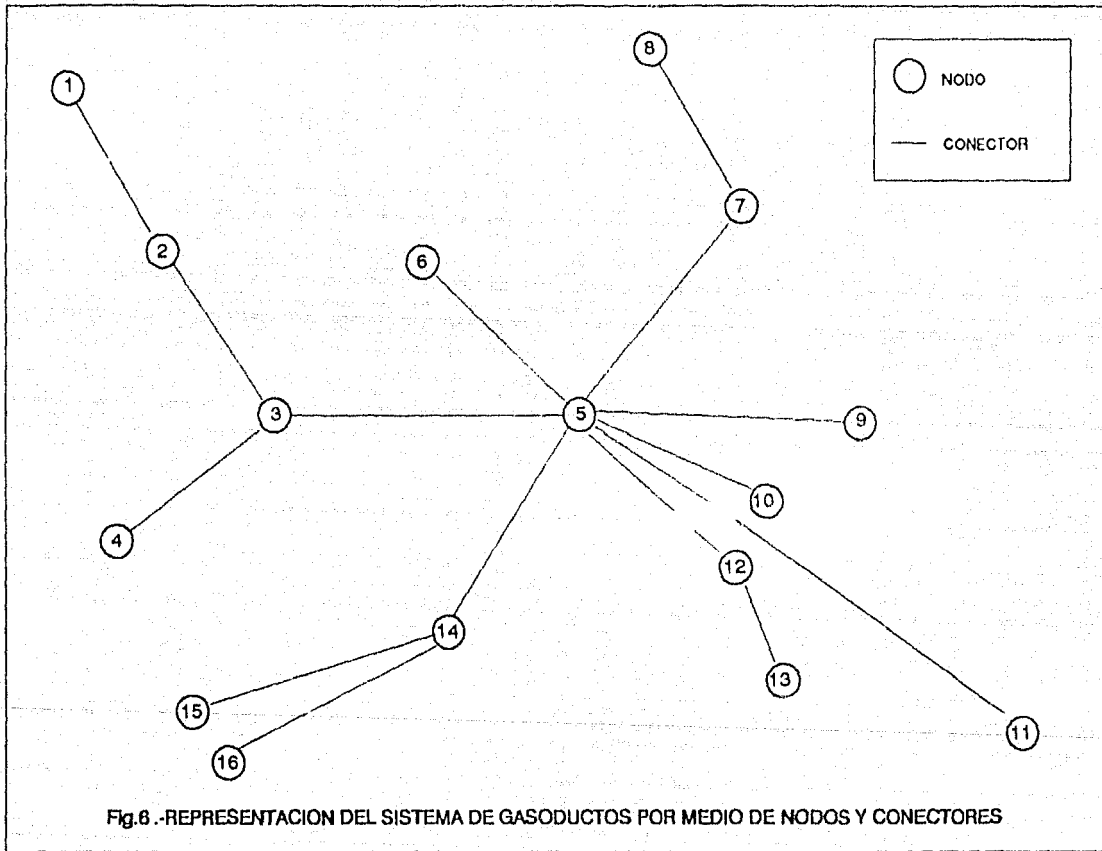
## METODO DE STONER

El planteamiento de un modelo matemático del fenómeno de flujo de gas o de líquido en un sistema de recolección o distribución, es factible cuando las condiciones de flujo en los elementos del sistema pueden ser descritas en términos de relaciones matemáticas. Además es preciso desarrollar las ecuaciones analíticas necesarias para definir rigurosamente los efectos de interacción entre los componentes.

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de un sistema de recolección de gas, en el cual el régimen de flujo es permanente. Cualquier red de este tipo puede ser descrito en términos de "nodos" y "conectores", como se muestra en la Fig. 6. Los nodos representan físicamente puntos en donde terminan los elementos del sistema, o en donde se entree o adiciona gas o líquido al sistema. Los conectores de los nodos representan elementos a través de los cuales hay intercambio de masa de un nodo a otro. Al conjunto de conectores se le denominará  $C$  y al conjunto de nodos  $N$ .

En un sistema pueden existir diferentes tipos de conectores (tuberías, bombas, compresoras, válvulas, etc.), sin embargo este trabajo contempla únicamente tuberías, bombas y compresoras. No obstante que los trabajos de Stoner y de Flanigan están enfocados





únicamente a sistemas de gas, en lo sucesivo se hará extensivo a sistemas que manejan líquidos. En el apéndice A al final de esta tesis, se presenta el planteamiento completo del método de Stoner.

## METODO DE FLANIGAN

En 1965, Wilde<sup>13</sup> desarrolló las matemáticas para representar un sistema restringido en términos de cálculo diferencial. Mas tarde este trabajo tuvo dos ampliaciones la primera por Wilde y Beightler<sup>14</sup> y la segunda por Beightler, Phillips y Wilde.<sup>15</sup> Se emplearon relaciones Jacobianas y estas relaciones son las que se conocen como *derivadas restringidas* (se puede pensar que son algo similar a la primera derivada en cálculo). Son gradientes que indican la dirección del óptimo. Estas derivadas restringidas pueden emplearse junto con criterios de optimización (tales como las condiciones de Kuhn-Tucker) para guiar una solución por ensayo y error a un problema de optimización. Para el caso especial donde existe la condición de igualdad en las restricciones, las condiciones de Kuhn-Tucker no se requieren debido a que cada derivada restringida en el óptimo llega a ser cero.

Las redes de tuberías son ejemplos de sistemas no lineales con la condición de igualdad en las restricciones. Las ecuaciones de flujo del sistema de tuberías representan las restricciones. La ecuación de costo del sistema representa la función objetivo ( $Y$ ), que en general depende de  $M$  variables independientes  $X_1, X_2, \dots, X_M$  y puede ser lineal o no lineal. Cuando se aplica el método de derivadas restringidas a este sistema, el resultado es un método de cálculo que se resuelve para un óptimo local.

En general para trabajos de optimización son muy útiles los

conceptos de variables de estado\* y variables de decisión. Para el método de derivadas restringidas, estos conceptos son una parte necesaria.

## VARIABLES DE ESTADO Y VARIABLES DE DECISION

Algunos de los métodos para resolver problemas de optimización con la condición de igualdad en las restricciones trabajan con los términos lineales de las expansiones de Taylor, no sólo de la función objetivo, sino también de cada una de las restricciones. Este enfoque conduce a la separación de las variables independientes en dos grupos llamados *VARIABLES DE ESTADO* Y *VARIABLES DE DECISION*. Entonces las ecuaciones lineales se resuelven mediante las diferenciales de estado como funciones lineales de las diferenciales de decisión. Sin embargo, la derivación aquí involucra desprestigiar las diferenciales de segundo orden en adelante.<sup>13</sup>

Sean  $N$  ecuaciones restringidas diferenciables de la forma

$$F_i(X_1, X_2, \dots, X_M) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

La región factible donde se puede localizar el óptimo consiste de todos los puntos  $X$  que satisfacen la Ec. 1. Ya que cada punto de esta región es un punto frontera, no hay puntos interiores, mucho menos un óptimo interior. En cada vecindad de un punto factible  $X$  hay puntos no factibles donde algunas de las diferenciales  $dF_i \neq 0$ , y puntos factibles donde todas las diferenciales  $dF_i = 0$ . Para los puntos en la vecindad factible, las diferenciales  $dX$  deben satisfacer, en una aproximación de primer orden, las  $N$  ecuaciones.

\* Las variables de estado pueden referirse también como "variables de solución"<sup>15</sup>

$$dF_t = \sum_{j=1}^M \left[ \frac{\partial F_t}{\partial X_j} \right] dX_j = 0 \quad (2)$$

Una expansión similar para la función objetivo dada por  $dY$  no es necesariamente cero,

$$dY = \sum_{j=1}^M \left[ \frac{\partial Y}{\partial X_j} \right] dX_j \quad (3)$$

Ya que en  $X$  las derivadas parciales se presume que son constantes conocidas, las Ecs. 2 y 3 constituyen  $N+1$  ecuaciones lineales en  $M+1$  incógnitas diferenciables:  $dY$  y las  $M$  componentes del vector diferencial factible  $dX$ . Suponiendo que las ecuaciones son linealmente independientes, si no lo son, entonces tomar el número más grande que forme un conjunto independiente y eliminar el resto. Estas reglas automáticamente descartan el caso donde haya más ecuaciones que incógnitas ( $N > M$ ), y el caso donde  $N = M$  no es de interés debido a que la única solución a la Ec. 2 debe ser  $dX = 0$ , es decir que no hay vecindad factible. Por lo tanto se supone desde ahora que  $N < M$ .

Rearreglando las Ecs. 2 y 3, colocando a la izquierda los términos que involucran  $dY$  y los primeros  $N$  componentes de  $dX$ .

$$-dY + \sum_{j=1}^N \left[ \frac{\partial Y}{\partial X_j} \right] dX_j = - \sum_{j=N+1}^M \left[ \frac{\partial Y}{\partial X_j} \right] dX_j \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N \left[ \frac{\partial F_t}{\partial X_j} \right] dX_j = - \sum_{j=N+1}^M \left[ \frac{\partial F_t}{\partial X_j} \right] dX_j \quad (5)$$



Realmente pudo haberse escogido cualquier  $N$  entre las  $M$  variables independientes; las primeras  $N$  se seleccionaron únicamente por conveniencia. Hay, sin embargo, una restricción; los miembros de las  $N$  ecuaciones de la izquierda de la Ec.5 deben ser linealmente independientes. El que las Ecs. en 2 sean independientes garantiza la existencia de un subconjunto independiente.

Para enfatizar la distinción entre las diferenciales al lado derecho y al lado izquierdo, se introducirá una nueva terminología y notación. Sean:

$$S_j = X_j \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

las *VARIABLES DE ESTADO* del problema. La diferencia:

$$P = M - N \quad (7)$$

se conoce como el *NUMERO DE GRADOS DE LIBERTAD*, y un nuevo conjunto de índices  $p = 1, 2, \dots, P$  está dado por:

$$p = j - N \quad ; \quad j = N+1, \dots, M \quad (8)$$

Las variables con estos índices se llaman *VARIABLES DE DECISION*  $dp$ .

$$dp = X_j \quad (9)$$

En esta terminología las Ecs. 4 y 5 llegan a ser:

$$-dY + \sum_{j=1}^N \left[ \frac{\partial Y}{\partial S_j} \right] dS_j = - \sum_{p=1}^P \left[ \frac{\partial Y}{\partial p} \right] dp \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^N \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial S_j} \end{pmatrix} dS_j = - \sum_{p=1}^P \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial d_p} \end{pmatrix} dd_p \quad (11)$$

$$l = 1, 2, \dots, N$$

En las ecuaciones 10 y 11 deben manejarse exactamente N variables de estado (incógnitas) y P variables de decisión. En situaciones complicadas, debe estar claro cuales son las variables de decisión. Sin embargo como éstas se eligen, cualquier especificación arbitraria de las diferenciales de decisión permite el cálculo de valores numéricos para los miembros de la derecha de las Ecs. 10 y 11. Entonces las Ecs. 11 pueden resolverse para los valores únicos de las diferenciales de estado  $dS$  el cual guarda el nuevo punto  $X + dX$  dentro de la región factible. El cambio resultante  $dY$  en la función objetivo, que se obtiene de la Ec. 10, se puede usar para ver si la perturbación fue un mejoramiento.

Las variables de decisión se pueden manipular libremente, mientras que las variables de estado ajustadas guardan el nuevo punto factible. Arbitrariamente el ajuste de más de P variables podría traer como consecuencia que se movieran un  $X + dX$  fuera de la región factible; la especificación de menos de P variables podría dejar demasiadas incógnitas, haciendo imposible localizar el nuevo punto. Ya que P es el número exacto de decisiones, este mide el número de "grados de libertad" en el sistema. Cada restricción adicional disminuye el número de grados de libertad, y por reducir el número de variables de decisión, realmente el problema de optimización se hace más fácil. La dimensión de la región factible no es el número total de "variables independientes", sino el número de *grados de libertad*.

## DERIVADAS RESTRINGIDAS

La dependencia de las variables de estado sobre las variables de decisión se hace aún más claro resolviendo las Ecs. 10 y 11, usando la regla de Cramer para determinantes. Esto conducirá al útil concepto de *DERIVADAS RESTRINGIDAS*. Antes de escribir la solución en forma explícita, se hacen necesarias algunas notaciones. Como primer punto se introducirá la notación matricial para describir el sistema de ecuaciones formado por las Ecs. 10 y 11.

$$\begin{bmatrix}
 -1 & \frac{\partial Y}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial Y}{\partial S_N} \\
 0 & \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 0 & \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 dY \\
 dS_1 \\
 \vdots \\
 dS_N
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 - \sum_{p=1}^P \left( \frac{\partial Y}{\partial d_p} \right) dd_p \\
 - \sum_{p=1}^P \left( \frac{\partial F_1}{\partial d_p} \right) dd_p \\
 \vdots \\
 - \sum_{p=1}^P \left( \frac{\partial F_N}{\partial d_p} \right) dd_p
 \end{bmatrix}
 \quad (12)$$

Con frecuencia es útil tener una fórmula para la solución de un sistema de ecuaciones y que pueda ser empleada para estudiar las propiedades de la solución sin tener que resolver el sistema. La fórmula se conoce como la Regla de Cramer. Resolviendo el sistema

anterior para  $dY$  empleando esta regla y tomando en cuenta el concepto de desarrollo de determinantes por cofactores se tiene:

$$\begin{array}{l}
 dY = \left[ \begin{array}{ccc}
 \sum_{p=1}^P \left( \frac{\partial Y}{\partial d_p} \right) dd_p & \frac{\partial Y}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial Y}{\partial S_N} \\
 \sum_{p=1}^P \left( \frac{\partial F_1}{\partial d_p} \right) dd_p & \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \sum_{p=1}^P \left( \frac{\partial F_N}{\partial d_p} \right) dd_p & \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N}
 \end{array} \right] \quad (13) \\
 \left[ \begin{array}{ccc}
 \frac{\partial Y}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial Y}{\partial S_N} \\
 \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\
 \vdots & \ddots & \vdots \\
 \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Dentro de las propiedades de los determinantes, existen dos que se pueden aplicar a la expresión anterior y en particular al numerador. Estas propiedades se enuncian a continuación:

- 1.- Si cada elemento de la  $k$ -ésima columna de una matriz  $A$  se expresa como la suma de  $p$ -términos, entonces  $\det A$  puede expresarse como la suma de los determinantes de  $p$  matrices, los elementos de cuyas  $k$ -ésimas columnas son respectivamente el primero, segundo, ...,  $p$ -ésimo términos de los elementos correspondientes de la  $k$ -ésima columna de  $A$ . Todas las demás columnas son iguales.

Como el enunciado de esta propiedad es algo compleja, se introducirá el siguiente ejemplo para demostrar que la idea involucrada es en realidad muy sencilla.

$$\begin{vmatrix} a_1 + b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 + b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 + b_3 & c_3 & d_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & c_3 & d_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_1 & c_1 & d_1 \\ b_2 & c_2 & d_2 \\ b_3 & c_3 & d_3 \end{vmatrix} \quad (14)$$

2.- Sea B una matriz cuadrada igual a A, excepto que todos los elementos de alguna columna de B son k veces los elementos correspondientes de la columna correspondiente de A. entonces  $\det B = k \det A$ . Un resultado correspondiente es válido para los renglones.

$$\begin{vmatrix} ka_{11} & a_{12} \\ ka_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = k \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = k(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) = k \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \quad (15)$$

Aplicando estas propiedades en 13, se tiene :

$$dY = \begin{matrix} dd_1 & \begin{vmatrix} \frac{\partial Y}{\partial d_1} & \frac{\partial Y}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial Y}{\partial S_N} \\ \frac{\partial F_1}{\partial d_1} & \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial d_1} & \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N} \end{vmatrix} \\ \vdots & \vdots \\ dd_p & \begin{vmatrix} \frac{\partial Y}{\partial d_p} & \frac{\partial Y}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial Y}{\partial S_N} \\ \frac{\partial F_1}{\partial d_p} & \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial d_p} & \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N} \end{vmatrix} \end{matrix} + \dots + \begin{matrix} \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N} \end{vmatrix} \end{matrix} \quad (16)$$

Ahora diferenciando esta expresión parcialmente con respecto a una variable de decisión  $d_p$  mientras las otras  $P-1$  variables de decisión se mantienen constantes, finalmente se tiene

$$\frac{\delta Y}{\delta d_p} = \begin{vmatrix} \frac{\partial Y}{\partial d_p} & \frac{\partial Y}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial Y}{\partial S_N} \\ \frac{\partial F_1}{\partial d_p} & \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial d_p} & \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N} \end{vmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N} \end{vmatrix}$$

donde el símbolo  $\delta Y/\delta d_p$  es la derivada restringida de la función costo con respecto a la variable de decisión  $p$ . Las líneas verticales representan el determinante de la matriz Jacobiana. Deberán existir un total de  $P$  expresiones similares para cada una de las variables de decisión. Estas expresiones toman en cuenta la interacción entre las variables de estado y las variables de decisión. Así, el valor numérico de cada relación de determinantes representa el cambio total en la función costo causado por un cambio en la variable de decisión. De esta manera, las características de la derivada restringida son algo similar a la primera derivada de una simple función.

## ECUACION DE COSTO

El diseño de un sistema de redes de distribución o recolección puede efectuarse minimizando el costo o inversión inicial, o minimizando el costo total de operación anual. La primera opción se utiliza para sistemas provisionales o de corta duración; la segunda para sistemas definitivos o planteados para permanecer largo tiempo en servicio. En ambos casos intervienen fundamentalmente dos aspectos: El costo de tubería y el costo de bombeo o compresión.

En el costo de tubería intervienen el costo del material (acero) y el costo de colocación. El costo de colocación suele presentarse con bastante detalle, de tal manera que incluya derecho de vía, desmonte, limpieza, topografía, ingeniería, supervisión, acarreo, descarga, alineación, colocación, soldadura, zanjado, pintura, recubrimiento, relleno, y otros conceptos similares. La experiencia señala que no siempre es posible contar, en el momento del diseño, con todos estos datos debidamente desglosados, sino más bien con dos cifras globales: una para el costo del material y otra para el costo de colocación, que incluyan los conceptos descritos arriba.

Un análisis detallado de la obtención de la función objetivo propuesta en este método para sistemas de gas fue presentado por Solorzano<sup>16</sup> con el fin de permitir un manejo realista y sencillo de la información. Siguiendo este análisis también se planteó la función objetivo para sistemas de redes que manejan líquidos. Dichas ecuaciones así como sus derivadas se presentan a continuación:

# E C U A C I O N D E C O S T O S

TIPO DE CONECTOR :

T U B E R I A

$$Y = 28.2 f L_{ij} \left[ \frac{P_i}{2 (SFET - P_i)} + \frac{P_i^2}{4 (SFET - P_i)^2} \right] (A d_{ij}^2 + B d_{ij}^3) + C L_{ij}$$

Donde:

- Y : Costo de la tubería, [\$/año].
- f : Factor de recuperación de capital para una serie de pagos iguales, [1/año].
- C : Costo fijo anual de operación y mantenimiento\*, [\$/año].
- A, B : Factores que dependen del diámetro de la tubería, sus unidades son [\$/ton] y [adim] respectivamente.
- S : Mínimo esfuerzo de ruptura de la tubería, [psi].
- F : Factor de diseño por tipo de construcción.
- E : Factor de diseño por tipo de unión longitudinal.
- T : Factor de diseño por deformación térmica.
- P<sub>i</sub> : Presión interna de diseño, [psi].
- d<sub>ij</sub> : Diámetro de la tubería ij, [Pg].
- L<sub>ij</sub> : Longitud de la tubería ij, [millas].

Cabe señalar que esta ecuación es válida también para tuberías que manejan líquidos sin embargo, el factor de diseño por deformación térmica (T) es igual a 1.

\* Suele representarse por una cantidad fija. En la práctica, puede resultar más fácil poder representar este costo como un porcentaje de la inversión inicial. Si este es el caso, deberá sumarse el porcentaje a la tasa de interés i, haciendo C igual a cero.



## C O M P R E S O R

$$Y = (g M + 87.6 Cf + H) HP$$

Donde:

Y : Costo de compresión, [\$/año].

g : Factor de recuperación de capital para una serie de pagos iguales, [1/año].

M : Costo inicial instalado de compresión, [\$/].

Cf : Valor de cada 1000 pie<sup>3</sup> de gas, [\$/1000 pie<sup>3</sup>].

H : Costo fijo anual de operación y mantenimiento\*, [\$/año]

HP : Potencia del compresor, [Hp].

## B O M B A

El costo de bombeo se obtiene de forma muy similar a la ecuación anterior, esto es

$$Y = (g M + 87.6 Cf + H) BHP$$

Donde:

BHP : Potencia al freno de la bomba, [Hp].

\* Nuevamente se aclara que "H" puede pasar a formar parte de "g" en caso necesario.

# DERIVADAS PARCIALES

TIPO DE CONECTOR :

TUBERIA

$$\frac{\partial Y}{\partial d_{ij}} = 28.2 f L_{ij} \left[ \frac{P_L}{2(SFET - P_L)} + \frac{P_L^2}{4(SFET - P_L)^2} \right] \left[ 2Ad_{ij}^2 + 3Bd_{ij}^3 \right]$$

$$\frac{\partial Y}{\partial L_{ij}} = 28.2 f \left[ \frac{P_L}{2(SFET - P_L)} + \frac{P_L^2}{4(SFET - P_L)^2} \right] \left[ Ad_{ij}^2 + Bd_{ij}^3 \right] + C$$

$$\frac{\partial Y}{\partial P_L} = 28.2 f L_{ij} \left[ \frac{SFET}{2(SFET - P_L)^2} + \frac{SFET \cdot P_L}{2(SFET - P_L)^3} \right] \left[ Ad_{ij}^2 + Bd_{ij}^3 \right]$$

BOMBA O COMPRESORA

$$\frac{\partial Y}{\partial HP} = \frac{\partial Y}{\partial BHP} = g M + 87.7 Cf + H$$

## SOLUCIÓN DE LAS DERIVADAS RESTRINGIDAS

El modelo empleado para representar un sistema de tuberías, es el método de solución presentado por Stoner.

Este método como se plantea en el apéndice A, efectúa un balance de materia al rededor de cada nodo en el sistema de tuberías. Como el sistema debe estar balanceado, estas ecuaciones de balance de materia vienen siendo las restricciones del sistema en un problema de optimización. Stoner usa el procedimiento de Newton-Raphson para resolver las ecuaciones de balance de materia. Parte del procedimiento en el método de Newton-Raphson es obtener la derivada de la ecuación en cada nodo (restricciones) con respecto a las incógnitas del sistema. Debido a que este sistema de incógnitas es en realidad el mismo que el formado por las variables de estado en el proceso de optimización, las ecuaciones simultáneas en Newton-Raphson expresadas en forma matricial son:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial S_N} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial S_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \vdots \\ \Delta S_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ \vdots \\ -F_N \end{bmatrix} \quad (13)$$

Un examen de esta expresión revela que el método de Stoner, como se dijo anteriormente, tiene ya desarrollado una cantidad sustancial del trabajo requerido para evaluar la derivada restringida en la Ec. 17, lo único que faltaría para completar el numerador de la derivada restringida, sería aumentar en un renglón y una columna esta Ec. 13.

El renglón de esta matriz aumentada se obtiene diferenciando la función objetivo (Y) con respecto a la variable de decisión p y con respecto a cada una de las variables de estado, mientras que la columna se obtiene diferenciando la ecuación de balance en cada nodo (restricciones) con respecto a la variable de decisión p.

Cada derivada restringida esencialmente proporciona el cambio en la función costo cuando la única variable de decisión es modificada. Esto es una simple forma de mover la variable de decisión en la dirección del óptimo. Sin embargo, cuando hay varias variables de decisión, se necesita una aproximación sistemática que determine la cantidad relativa a mover cada variable.

Un método simple y ampliamente usado para conseguir esto es la técnica de descenso rápido (Steepest Descent). Trabaja sobre el principio de que una variable que se aleja del óptimo tiene una pendiente o gradiente excesivo que una variable que se acerca al óptimo. Matemáticamente, el método se puede expresar por la siguiente ecuación :

$$\Delta d_p = - \eta \frac{\delta Y}{\delta d_p} \quad (19)$$

donde  $\Delta d_p$  es la corrección que se aplica a la variable de decisión  $d_p$  y  $\eta$  es una constante. Así el método aplicará una mayor corrección a las variables de decisión que tienen una mayor derivada restringida y que presumiblemente se alejan más del óptimo.

El método de descenso rápido muestra la dirección en la cual se mueve cada variable de decisión y también da las cantidades relativas a mover cada variable de decisión. Sin embargo, no determina como proceder en la dirección del gradiente. Para determinar esto es necesario establecer un valor de  $\eta$ . Este valor se establece dentro de las siguientes reglas:

- 1.- Se establece una corrección máxima ( $\Delta dp$ ) para cada conector. Por ejemplo puede ser 1  $\mu g$  de diámetro, 500 HP de compresión, etc.
- 2.- Ninguna de las variables de decisión debe tomar un valor negativo

Usando este criterio, se puede determinar el valor máximo de  $\eta$  mediante la Ec. 19. Es necesario entonces llevar a cabo una búsqueda unidimensional de 0 a  $\eta_{max}$  para determinar el mejor valor de  $\eta$  a emplear.

Quando la función costo  $Y$  se grafica Vs  $\eta$ , se obtiene una curva similar a la Fig. 7. Para definir esta curva, es necesario establecer cuatro puntos los cuales se obtienen al evaluar la función costo entre los límites 0 y  $\eta_{max}$  con los valores resultantes de las correcciones correspondientes que cada  $\eta$  establece en cada una de las variables de decisión. La curva formada por estos puntos es de gran importancia para determinar el valor de  $\eta_{opt}$  que minimiza el valor de  $Y$ . Este valor de  $\eta_{opt}$  así determinado, permanecerá constante en todo el transcurso del proceso de optimización.

Quando la gráfica de  $Y$  Vs  $\eta$  es similar a la Fig. 7A, indica que el  $\eta_{opt}$  cae dentro de la corrección máxima establecida ( $\Delta dp$ ). En este caso el óptimo algunas veces puede alcanzarse en un sólo paso de optimización. Sin embargo, cuando la curva es similar a la Fig. 7B, indica que el  $\eta_{opt}$  cae fuera de la corrección máxima establecida, asumiéndose para este caso que  $\eta_{opt} = \eta_{max}$  y por lo tanto se pueden llevar a cabo dos o más pasos de optimización.

Después que se determina el valor de  $\eta_{opt}$  y se obtienen las correcciones de las variables de decisión ( $\Delta dp$ ), se calculan los nuevos valores de las variables de decisión, se obtienen las derivadas restringidas para estos nuevos valores y se observa si se ha alcanzado el óptimo. El óptimo se obtiene cuando todas las derivadas restringidas son cero o caen bajo cierta tolerancia dada.

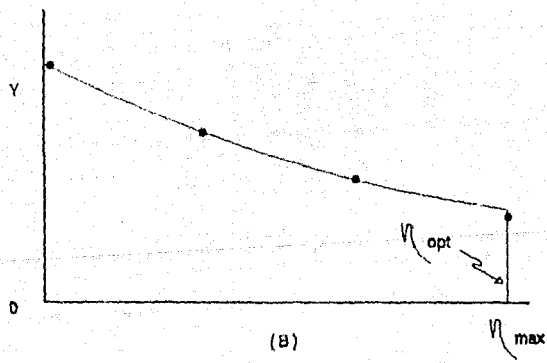
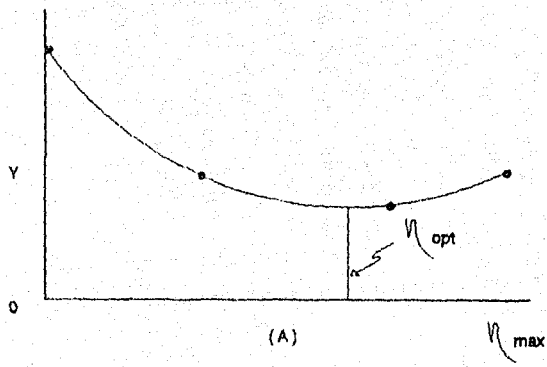


Fig.7 - CURVA PARA DETERMINAR EL VALOR OPTIMO DE  $n$

Durante el proceso de optimización es posible que la manipulación de las variables de decisión cause que una de las variables de estado sea menor de cero. Ya que es imposible tener una tubería con un diámetro negativo, el proceso de optimización se detiene. Es necesario entonces intercambiar la variable de estado afectada por una de las variables de decisión y continuar el procedimiento. Esto se hace necesario debido a que una variable de decisión puede tomar exactamente el valor de cero, mientras que es extremadamente difícil alcanzar esto con una variable de estado.

## PROGRAMA DE COMPUTO

El programa de cómputo que se lista en el apéndice B, creado para efectuar la ingeniería básica de diseño de tuberías que recolectan, transportan o distribuyen gas, aceite crudo, agua o cualquier fluido en una sola fase, así como para la determinación de las condiciones óptimas de operación desde un punto de vista económico, se programó en lenguaje *TURBO PASCAL* y está compuesto de los siguientes procedimientos principales:

### CAPTURA DE DATOS

Dependiendo del sistema en estudio ( gas o líquido ) se proporcionan al programa los siguientes parámetros:

Densidad relativa del gas o del aceite, viscosidad del aceite a condiciones de flujo, temperatura media de flujo, condiciones base de presión y temperatura, rugosidades, perfil del terreno, eficiencias, factores económicos y factores de diseño.

En este sistema, tanto en los nodos como en los conectores, con base en el criterio y la experiencia del usuario, se seleccionan las *variables de decisión* y de *estado* y se asignan valores a  $M = P + N$  variables (presiones, gastos, diámetros, longitudes y potencias):  $P$  variables pueden ser de decisión o bien una combinación con valores que necesariamente deben permanecer fijos en el sistema (la experiencia señala escoger esta segunda opción), las  $N$  variables restantes (incógnitas), se manejan inicialmente con valores supuestos.

Para obtener los valores de las  $N$  variables restantes que satisfacen el sistema de ecuaciones no lineales dentro de cierta tolerancia, el programa de cómputo emplea el siguiente procedimiento.



## PROCEDIMIENTO DE STONER

Este procedimiento se ilustra en el diagrama de bloques de la Fig. 8 y su secuencia de cálculo consiste en:

- 1.- Asignar valores supuestos a las incógnitas.
- 2.- Sustituir el valor supuesto de las incógnitas ( $S_j$ ) en el sistema de ecuaciones y obtener el valor de  $F_i$  para  $i = 1, 2, \dots, N$ .
- 3.- Probar si  $\max F_i$  es menor o igual que cierta tolerancia. Si esto ocurre, el problema está resuelto y los valores supuestos de las incógnitas son la solución del sistema. Si no, continuar con el siguiente paso.
- 4.- Calcular el valor de las derivadas parciales de  $F_i$  con respecto a todas las incógnitas.
- 5.- Resolver el siguiente sistema de ecuaciones para  $\Delta S_j$ .

$$\sum_{j=1}^N \frac{\partial F_i}{\partial S_j} \Delta S_j^{k+1} = -F_i$$

- 6.- Calcular el nuevo valor de las incógnitas de

$$S_j^{k+1} = S_j^k + \alpha \Delta S_j^{k+1}$$

- 7.- En el caso de que  $S_j < 0$  detener el programa e intercambiar la variable de estado afectada (incógnita) por cualquiera de las variables de decisión.
- 8.- Regresar al paso 2 y repetir el procedimiento.

Una vez balanceado el sistema, el problema es encontrar los valores de las variables de decisión que hacen tender a cero las derivadas restringidas dentro de cierta tolerancia para lo cual es necesario aplicar el siguiente procedimiento.

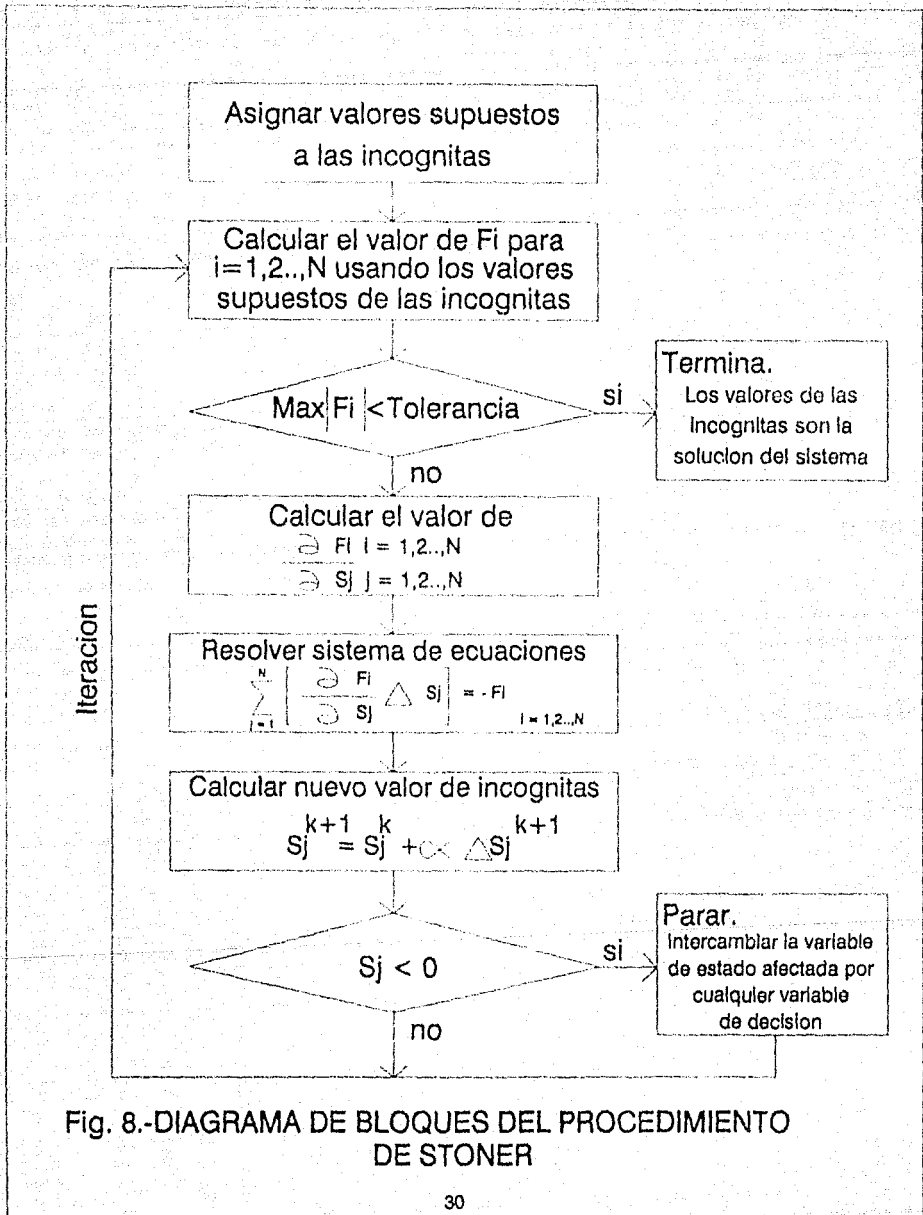


Fig. 8.-DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCEDIMIENTO DE STONER

## PROCEDIMIENTO DE FLANIGAN

Su diagrama de bloques se ilustra en la Fig. 9 y presenta la siguiente secuencia de cálculos:

- 1.- Calcular  $\frac{\delta Y}{\delta d_p}$   $P = 1, 2, \dots, P$
- 2.- Probar si  $\max \left| \frac{\delta Y}{\delta d_p} \right|$  es menor o igual que cierta tolerancia. Si esto ocurre, el problema está resuelto y los valores supuestos tanto de las variables de estado como de las variables de decisión son la solución del problema. Si no, continuar con el siguiente paso.
- 3.- Si aún no ha sido determinado el valor de  $\eta_{opt}$ , obtener éste con los pasos 4 y 5. De lo contrario continuar con el paso 6.
- 4.- Calcular un  $\eta_{max}$  con un  $\Delta d_p$  ya establecido y la  $\max \left| \frac{\delta Y}{\delta d_p} \right|$  calculada.

$$\eta = - \frac{\Delta d_p}{\frac{\delta Y}{\delta d_p}}$$

- 5.- Graficar  $Y$  vs  $\eta$  y determinar entre 0 y  $\eta_{max}$  el valor de  $\eta_{opt}$  que minimiza la función objetivo  $Y$ .
- 6.- Calcular la corrección para cada variable de decisión mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta d_p = - \eta_{opt} \frac{\delta Y}{\delta d_p}$$

- 7.- Calcular el nuevo valor de las variables de decisión.

$$d_p^{k+1} = d_p^k + \Delta d_p^{k+1}$$

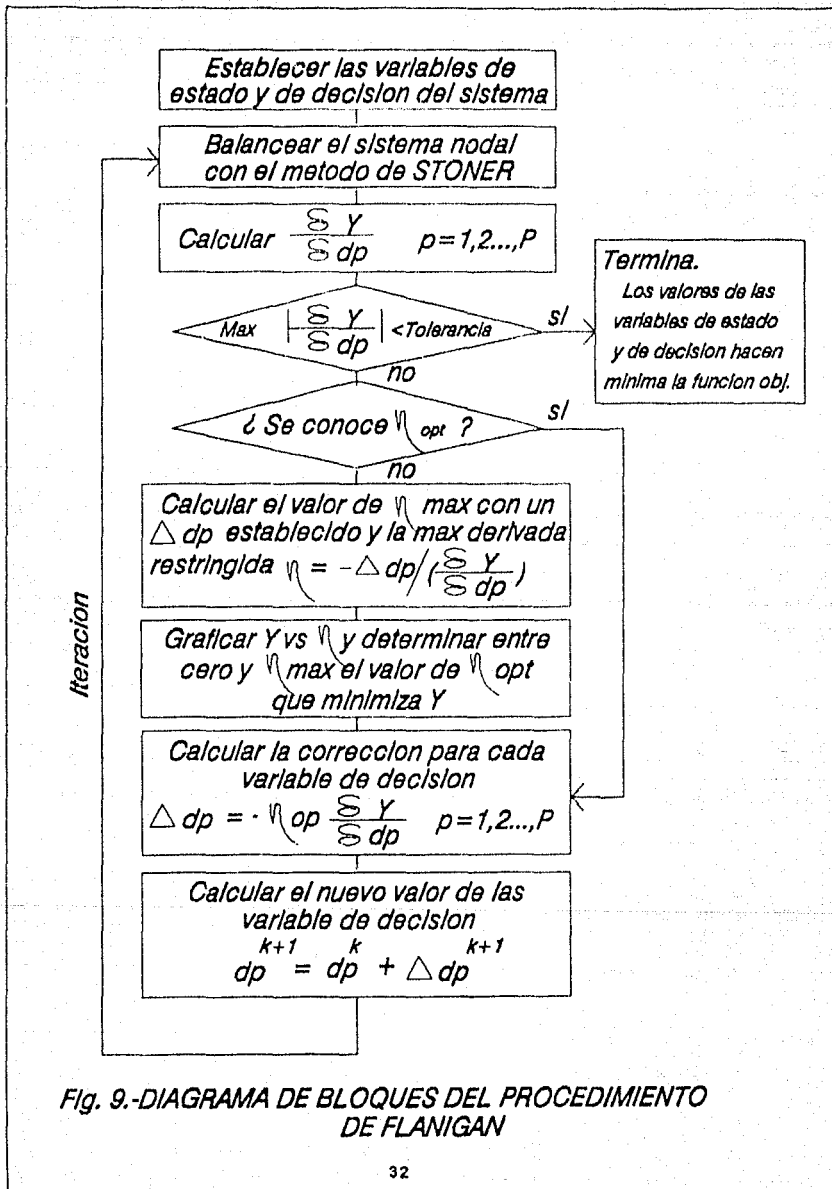


Fig. 9.-DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCEDIMIENTO DE FLANIGAN

B.- Balancear el sistema con el procedimiento de Stoner y repetir el procedimiento.

Cuando este procedimiento converge, el valor de la función costo que se obtiene constituye un óptimo local debido a las restricciones a que está sujeta y puede ser o no un óptimo global.

La experiencia dirá donde son susceptibles de ocurrir los óptimos locales. Por ejemplo, un sistema al que se le anexaron tuberías paralelas para incrementar su gasto no es un sistema óptimo, la eliminación de estas tuberías traerá como resultado la obtención de un óptimo local y además una disminución en el costo.

#### IMPRESION DE RESULTADOS

Finalmente cuando los dos procedimientos descritos anteriormente cumplen con la tolerancia señalada, se procede a la impresión de los resultados óptimos del sistema en estudio como son presiones, gastos, diámetros, potencias, etc.

## AJUSTE Y VALIDACION DEL PROGRAMA DE COMPUTO

Para llevar a cabo el ajuste y validación del programa de computo desarrollado se obtuvo la información de presiones y gastos para condiciones estables del sistema de distribución y recolección de aceite y gas del Distrito Villahermosa y se determinaron eficiencias de transporte de las tuberías. En la determinación de estas eficiencias es importante señalar dos aspectos:

### A: SISTEMAS NUEVOS

Cuando se desea diseñar un sistema nuevo, no existen datos medidos de presiones y gastos, por lo cual el factor de eficiencia del conector según la literatura<sup>17</sup> es de 0.9 a 0.92 en el caso de tuberías nuevas o en buen estado y flujo de una fase; sin embargo, debido a que la ecuación de flujo no comprende los aspectos de conexiones, válvulas, etc., se recomienda un factor de eficiencia de 0.8. Si el conector es una compresora se le asignan valores entre 0.7 a 0.82<sup>18</sup> y de 0.80 a 0.95 en el caso de bombas.

### B: SISTEMAS YA EXISTENTES

En estos sistemas se recomienda recopilar datos medidos de presiones y gastos, obtener para cada conector el factor de eficiencia correspondiente mediante su ecuación de flujo y utilizar estos factores de eficiencia para cálculos posteriores en el sistema.

## INFORMACION DE CAMPO

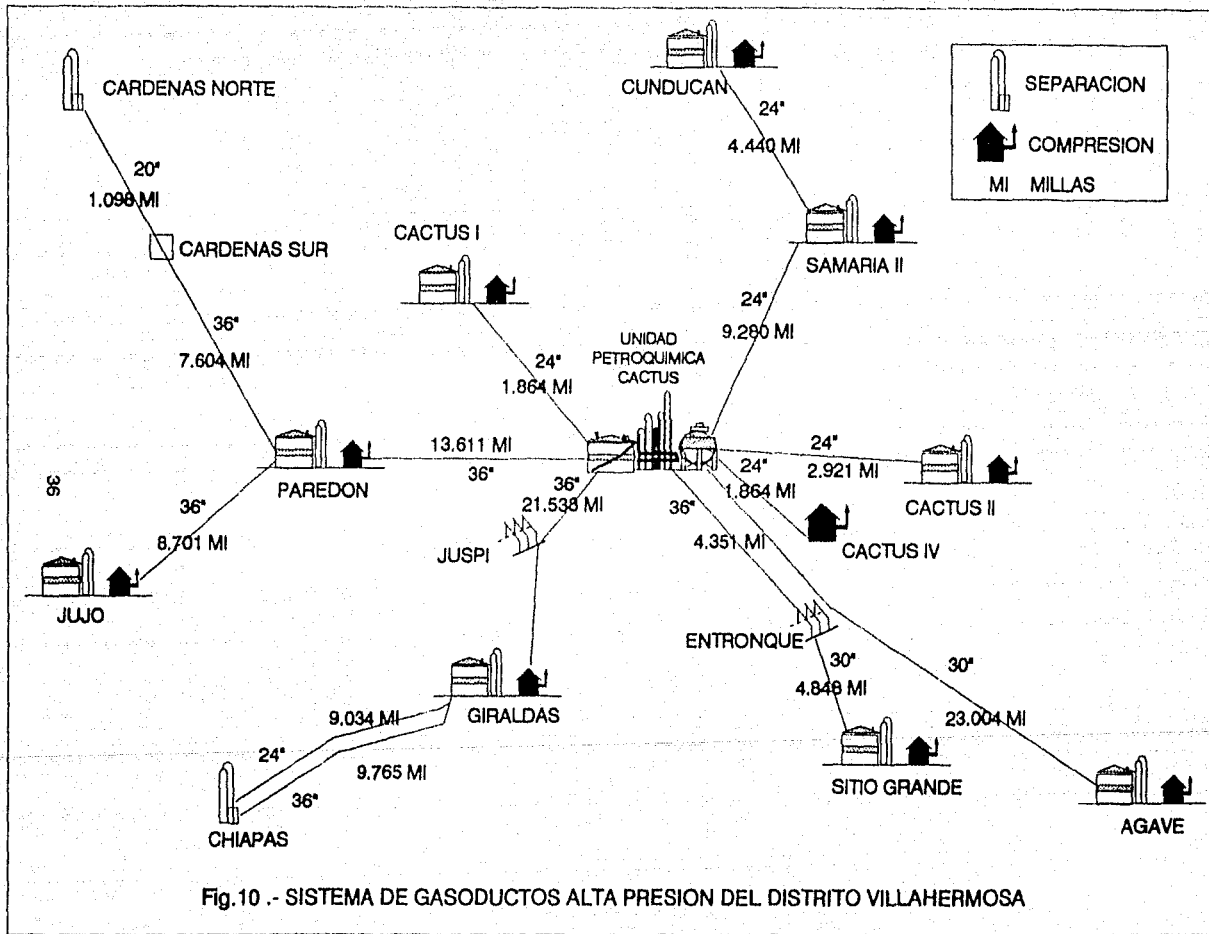
La información referente a la red de recolección y distribución de aceite y de gas del Distrito Villahermosa como longitudes,

diámetros y espesores de las tuberías, potencias y diagramas de flujo (Figs. 10 y 11), se obtuvieron del Depto. de Ingeniería de Producción de Petróleos Mexicanos en Villahermosa, Tab.

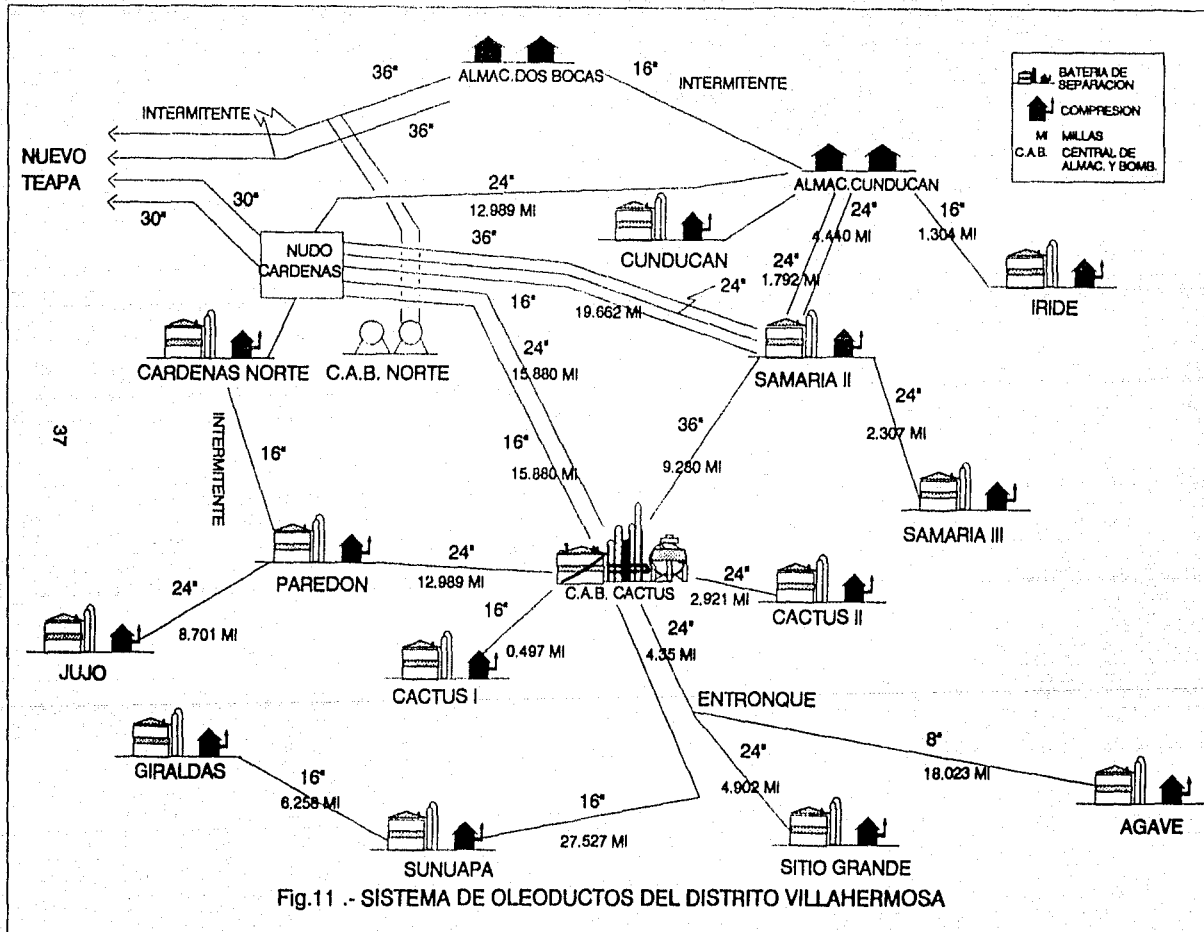
En vista de que para el cálculo de eficiencias en un sistema de transporte y recolección de aceite o gas se requiere información de flujo en régimen permanente, los gastos y presiones manejadas en la red (Figs. 12 y 13), se obtuvieron mediante la comunicación por radio en un lapso de 3 horas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que debido a la operación del sistema y/o a los cambios normales de las condiciones de flujo, al desear obtener información en estado aproximadamente permanente suelen presentarse algunas dificultades tales como operaciones de corridas de "diablo" donde existe la posibilidad de que éste se atore, debido al exceso de velocidad del mismo al pasar por una curva, a su mala selección, a algún deterioro en el diámetro de la tubería o por el aumento excesivo de la presión de descarga de las compresoras o bombas. La corrida de un "diablo" causa condiciones de flujo variable, si a esto se le adiciona que se atore, puede ocasionar un paro de compresoras o de bombas (dependiendo del sistema) por represionamiento de la tubería, causando condiciones más severas de flujo variable con la consecuente disminución del gasto en algunos puntos.

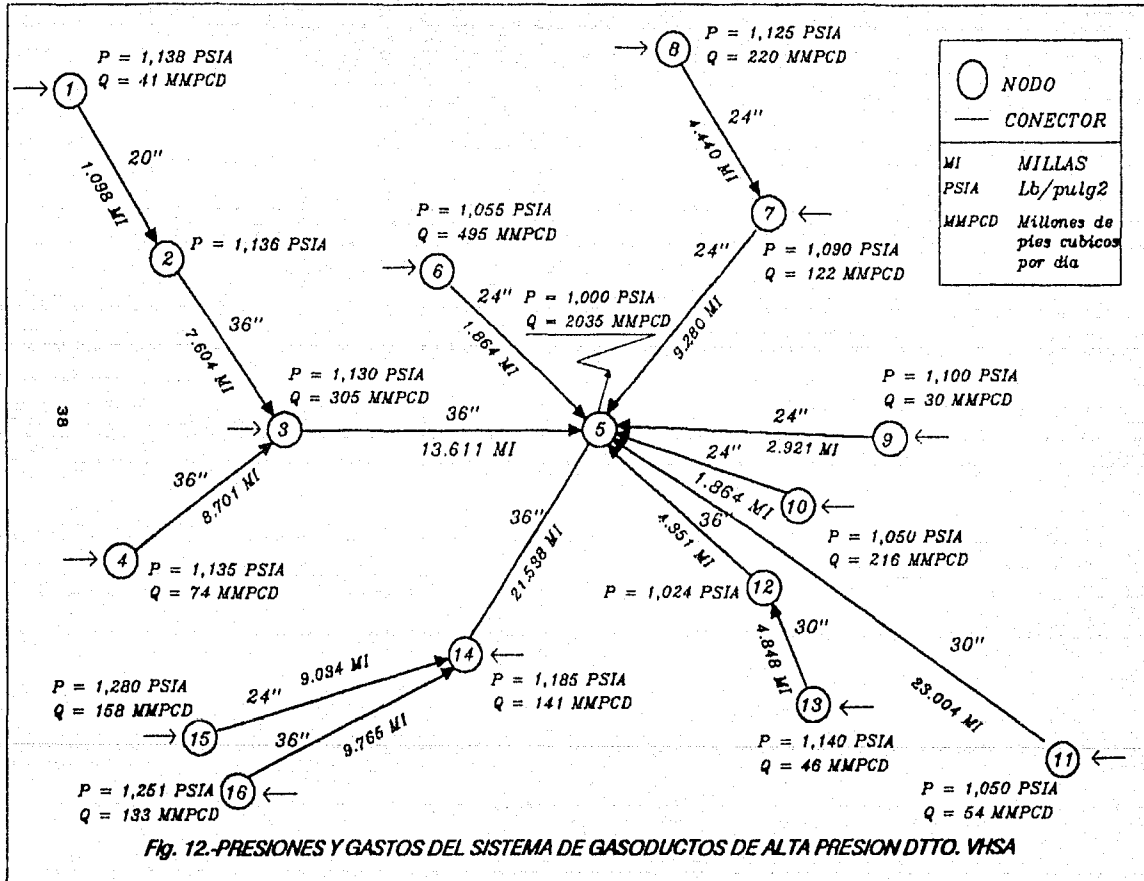
Por otro lado, para obtener información adecuada del sistema en estudio es indispensable contar con el equipo necesario para hacer las mediciones.

Otra dificultad muy común que suele presentarse al tratar de obtener información de flujo en régimen aproximadamente permanente, son las áreas y vías de acceso que cuando son muy extensas resulta difícil recorrerlas por brechas y derechos de vía que en algunas ocasiones, en tiempos de lluvia, se encuentran intransitables, por lo que al menos una estación de recolección o entronque, cuando esto sucede, queda fuera del control del personal.









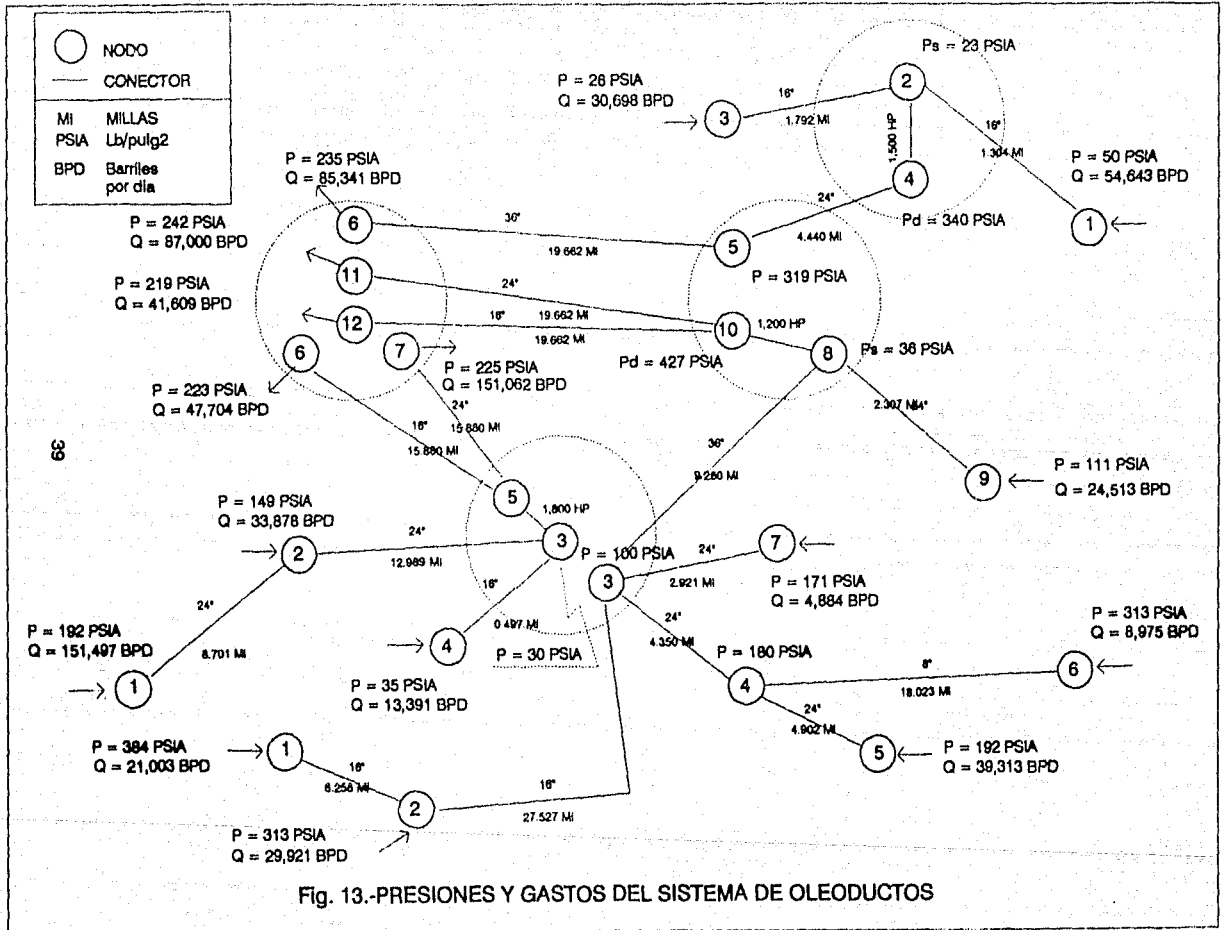


Fig. 13.-PRESIONES Y GASTOS DEL SISTEMA DE OLEODUCTOS

Todos estos factores se tienen que tomar en cuenta al iniciar la medición de un sistema con el fin de evitar una medición no representativa o incompleta.

#### PROCEDIMIENTO DE CALCULO

Utilizando las ecuaciones de *Weymouth* y *Panhandle* para sistemas de gas y la ecuación general de flujo de líquidos por tuberías, se calcularon las caídas de presión ( $\Delta P$ ) para cada tramo de tubería comparándose con las de los datos medidos.

Es conveniente tener presente cuando se selecciona la ecuación de flujo a emplear en sistemas de gas, el rango de diámetros apropiados en que dichas ecuaciones son más eficientes. Por ejemplo, la ecuación de *Weymouth* se prefiere para tuberías con diámetros pequeños ( $\leq 15$  Pg) mientras que la de *Panhandle* y la modificada de *Panhandle* son generalmente para tuberías de mayor diámetro ( $> 12$  Pg). En el caso de no contar con datos de rugosidad ( $\epsilon$ ) de los conectores en sistemas de líquidos, también hay que tener presente que para tuberías comerciales  $\epsilon$  varía de 0.0006 a 0.0008 pg, para tuberías de producción comúnmente se emplea un valor de 0.0006 pg y para líneas superficiales varía de 0.0006 a 0.00075 pg.

De los resultados obtenidos y mediante un análisis estadístico se observó, en el caso de redes de gas, que la ecuación de *Panhandle A* es la que en general mejor se ajustó a los datos medidos, por lo que se tomó ésta para representar el modelo físico.

El cálculo de las eficiencias se realizó con una sola medición de flujo aunque es recomendable efectuar varias mediciones dependiendo de la variabilidad del sistema y así obtener una eficiencia representativa de los conectores. Muchas veces se da el caso de

obtener eficiencias muy bajas; sin embargo, pueden ser debido a tramos con capacidades muy "sobradas" o que pueden tener una cantidad significativa de líquidos (sistemas de gas). Otra causa de la baja eficiencia puede ser alguna obstrucción, ya sea por incrustaciones o alguna válvula no abierta totalmente. Finalmente se pueden obtener eficiencias anormales porque el gasto medido no sea el real, debido a que el aparato medidor este descalibrado.

En las tablas I y II se presentan los resultados del cálculo de las eficiencias de transporte de las redes de gas y de líquido respectivamente. Con estos resultados se procedió a simular el comportamiento actual de la red, empleando para esto el programa de cómputo de esta tesis.

Asimismo del programa se obtuvo las presiones actuales del sistema Figs 14 y 15, teniendo como datos los gastos medidos en campo, las eficiencias calculadas en este trabajo y los diámetros, longitudes y potencias recopilados en el Dpto. de Ingeniería de Producción en Villahermosa, Tab.

# TABLA I

## EFICIENCIAS DE TRANSPORTE

(OAS)

C O N E C T O R	EFICIENCIA (%)
Card. Norte - Entr. Gasod. 36" Card. Sur	22.0
Card. Sur - Paredón	5.0
Jujo - Paredón	15.0
Paredón - U.P.Q.C.*	25.0
Cactus I - U.P.Q.C.	40.0
Samaria II - U.P.Q.C.	50.0
Cunduacan - Samaria II	32.0
Cactus II - U.P.Q.C.	2.5
Cactus IV - U.P.Q.C.	20.0
Agave - U.P.Q.C.	10.0
Entr.S.Gde. Agave - U.P.Q.C.	3.0
Sitio Grande - Entr.Agave U.P.Q.C.	3.0
Giraldas - U.P.Q.C.	23.0
Chiapas - Giraldas 24"	25.0
Chiapas - Giraldas 30"	10.0

\* Unidad Petroquímica de Cactus.

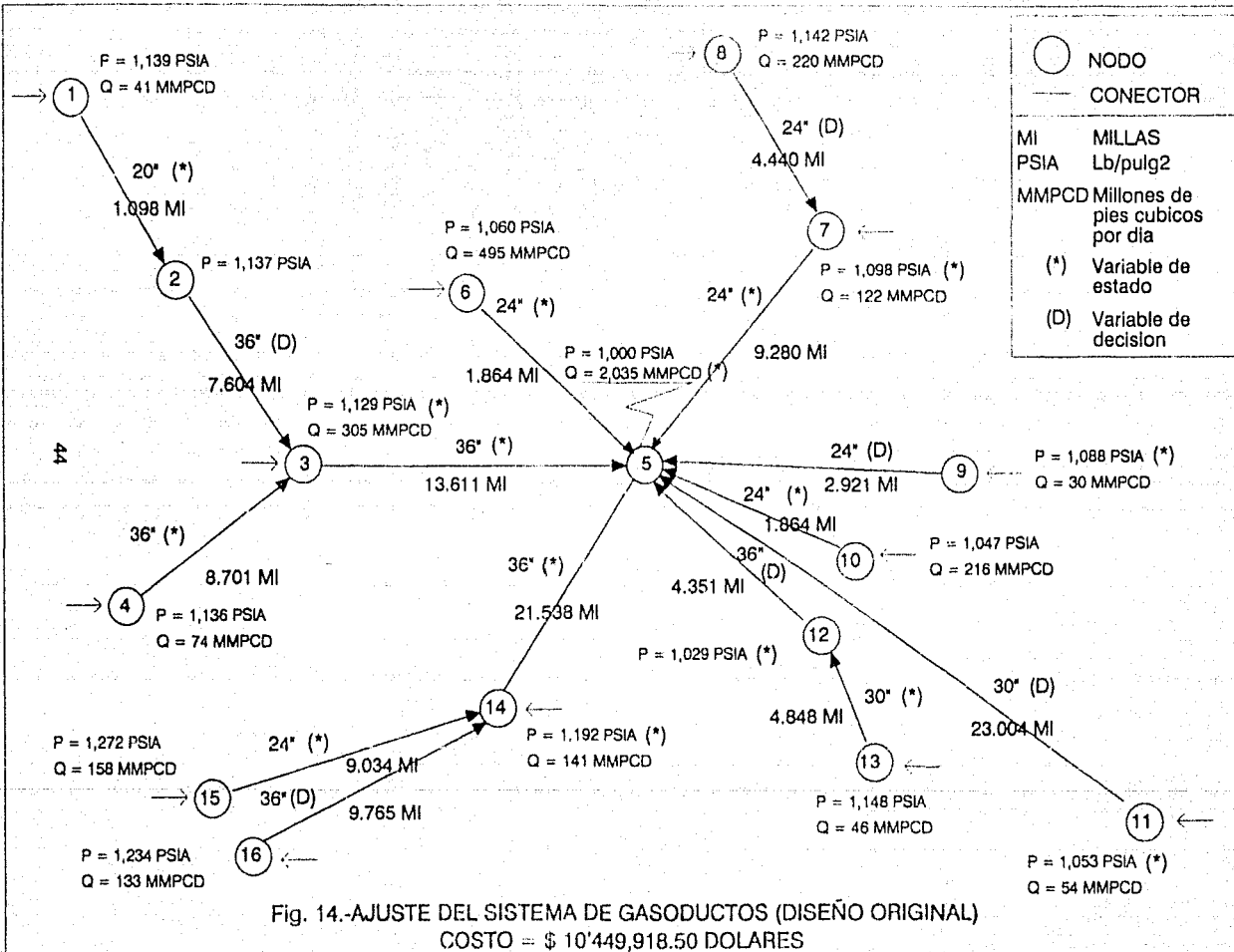
## TABLA II

### EFICIENCIAS DE TRANSPORTE

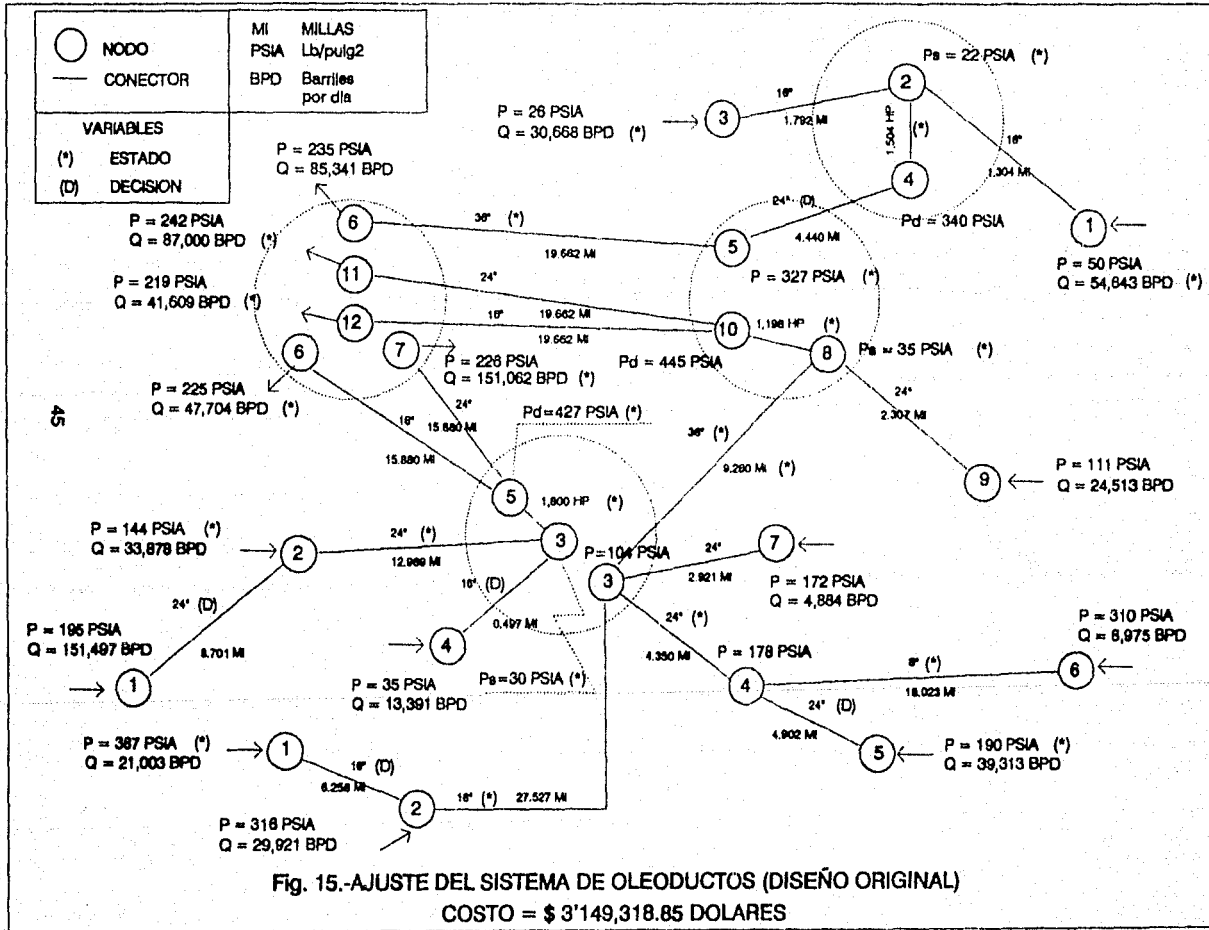
(ACFITE)

C O N E C T O R	EFICIENCIA (%)
Jujo - Paredón	79.45
Paredón - C.A.B.* Cactus	76.30
Cactus I - C.A.B. Cactus	18.00
C.A.B. Cactus - Trampas Cardenas 10"	49.60
C.A.B. Cactus - Trampas Cardenas 24"	52.00
Giraldas - Sunuapa	25.00
Sunuapa - C.A.B. Cactus	65.00
Entr.S.Gde. Agave - C.A.B. Cactus	16.00
Sitio Grande - Entr.Agave C.A.B. Cactus	35.50
Agave - Entr.S.Gde. C.A.B. Cactus	85.70
Cactus II - C.A.B. Cactus	1.80
C.A.B. Cactus - Samaria II	18.00
Samaria III - Samaria II	6.00
Samaria II - Trampas Cardenas 10"	44.70
Samaria II - Trampas Cardenas 24"	34.36
Iríde - C.A.B. Cunduacan	43.00
Cunduacan - C.A.B. Cunduacan	79.00
C.A.B. Cunduacan - Samaria II	64.50
Samaria II - Trampas Cardenas 30"	18.61

\* Central de Almacenamiento y Bombeo.







## APLICACION DEL MODELO

El sistema empleado para la validación del modelo, ilustrado en la Fig. 14, consistió en una red de 15 tuberías que recolectan la producción de los campos del Distrito Villahermosa. La producción de gas en el sistema se envía hacia un sólo punto ( Petroquímica de Cactus) y se encuentra representado en la figura por el nodo 5.

Uno de los objetivos que se puede plantear en este caso para mostrar el funcionamiento del modelo, es determinar que diámetros de tuberías y presiones óptimas satisfacen el manejo de este mismo volumen de gas y que ofrezcan condiciones más económicas.

El modelo requiere para esto que el número de incógnitas sea igual al número de nodos. Las variables de estado o incógnitas en la Fig. 14 fueron seleccionadas y designadas con un asterisco (\*), resolviéndose éstas al balancearse el sistema mediante el procedimiento de Stoner.

Los factores de diseño y económicos que determinan el costo de la tubería son los siguientes:

Mínimo Esfuerzo de Ruptura	=	60,000	[Psi]
Tipo de Construcción	=	0.72	[Adim]
Tipo de Unión Longitudinal	=	0.8	[Adim]
Tasa de Interés Anual	=	15	[%]
Vida Económica de la Tubería	=	15	[años]
Costo de Operación y Mantenimiento	=	0	[\$\$/año]

El costo anual de operación y mantenimiento suele representarse por una cantidad fija. En la práctica, puede resultar más fácil poder representar este costo como un porcentaje de la inversión inicial. Si éste es el caso, deberá sumarse el porcentaje a la tasa de interés, haciendo el costo de operación y mantenimiento igual a cero.

La función objetivo o función costo empleada es:

$$Y = 28.2 f L_{ij} \left[ \frac{P_i}{2 (SFET - P_i)} + \frac{P_i^2}{4 (SFET - P_i)^2} \right] (A d_{ij}^2 + B d_{ij}^3) + C L_{ij} \quad (20)$$

cuya nomenclatura se cita en la Tabla I.

La selección de las variables de estado y decisión es algo arbitrario; sin embargo la experiencia dirá como hacerlo. En este caso, todos los diámetros que no son incógnitas (variables de estado) se tomaron como variables de decisión y se designaron por la letra "D".

El primer paso (después de tener balanceado el sistema) en el procedimiento de optimización es calcular las derivadas restringidas definidas por la Ec. 17. Esta ecuación dará una derivada restringida por cada variable de decisión. Por simplicidad se tratará únicamente la derivada restringida de la primera variable de decisión ( $Dz-g$ ).

Primero se diferencia la función costo con respecto a las variables de decisión y con respecto a cada una de las variables de estado, y cada una de estas derivadas se evalúa con los valores supuestos de las variables de estado y de decisión.

$$\frac{\partial Y}{\partial d_i} = \frac{\partial Y}{\partial Dz-g} = 28.2 f Lz-g \left[ \frac{P_z}{2(SFET-P_z)} + \frac{P_z^2}{4(SFET-P_z)^2} \right] *$$

$$(2A d_{z-g} + 3B d_{z-g}^2) = 54154.47 \quad (21)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_1} = \frac{\partial Y}{\partial D_{1-2}} = 3561.24 \quad (22)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_2} = \frac{\partial Y}{\partial D_{4-9}} = 61309.00 \quad (23)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_3} = \frac{\partial Y}{\partial D_{9-5}} = 95325.56 \quad (24)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_4} = \frac{\partial Y}{\partial D_{6-5}} = 7230.26 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_5} = \frac{\partial Y}{\partial D_{7-5}} = 37339.92 \quad (26)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_6} = \frac{\partial Y}{\partial D_{10-5}} = 7136.45 \quad (27)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_7} = \frac{\partial Y}{\partial D_{13-12}} = 27400.88 \quad (28)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_8} = \frac{\partial Y}{\partial D_{14-5}} = 159669.40 \quad (29)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_9} = \frac{\partial Y}{\partial D_{15-14}} = 42427.00 \quad (30)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_{10}} = \frac{\partial Y}{\partial P_3} = 28.2 \text{ f l. s} \left[ \frac{\text{SFET}}{2(\text{SFET}-P_3)^2} + \frac{\text{SFET} \cdot P_3}{2(\text{SFET}-P_3)^3} \right] \cdot (Ad_3 - s^2 + Bd_3 - s^3) = 1347.06 \quad (31)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_{11}} = \frac{\partial Y}{\partial P_7} = 374.22 \quad (32)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_{12}} = \frac{\partial Y}{\partial P_9} = 117.68 \quad (33)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_{13}} = \frac{\partial Y}{\partial P_{11}} = 1528.21 \quad (34)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_{14}} = \frac{\partial Y}{\partial P_{12}} = 433.77 \quad (35)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_{15}} = \frac{\partial Y}{\partial P_{14}} = 2158.48 \quad (36)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial S_{16}} = \frac{\partial Y}{\partial Q_5} = 0 \quad (37)$$

Las restricciones (  $F_1$  hasta  $F_{16}$  ) son las ecuaciones de continuidad de cada nodo dentro del procedimiento Stoner. Para el nodo 3 esta ecuación es:

$$F_3 = - q_{2-3} - q_{4-3} + q_{3-5} - Q_3 \quad (38)$$

donde  $q_{ij}$  es el gasto en la sección de tubería entre los nodos  $i$  y  $j$  y  $Q_i$  es el gasto que se extrae o adiciona al sistema en el nodo  $i$ . La ecuación de flujo empleada fue la de Panhandle A por los resultados obtenidos en el capítulo anterior y en forma simple puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$q_{ij} = K D_{ij}^{2.0182} \left( \frac{1}{L_{ij}} \right)^{0.5394} \left[ \frac{P_i^2}{Z_i} - \frac{P_j^2}{Z_j} \right]^{0.5394} \quad (39)$$

$$\text{donde } K = 0.00043587 \left( \frac{1}{T_f} \right)^{0.5394} \left( \frac{T_s}{P_s} \right)^{1.0788} \left( \frac{1}{SG} \right)^{0.4000}$$

$F_3$  es el nodo aún no balanceado y será cero para un sistema balanceado.

Sustituyendo la Ec. 39 en 38, se obtiene:

$$\begin{aligned} F_3 = & - K D_{2-3}^{2.0182} \left( \frac{1}{L_{2-3}} \right)^{0.5394} \left[ \frac{P_2^2}{Z_2} - \frac{P_3^2}{Z_3} \right]^{0.5394} - \\ & K D_{4-3}^{2.0182} \left( \frac{1}{L_{4-3}} \right)^{0.5394} \left[ \frac{P_4^2}{Z_4} - \frac{P_3^2}{Z_3} \right]^{0.5394} + \\ & K D_{3-5}^{2.0182} \left( \frac{1}{L_{3-5}} \right)^{0.5394} \left[ \frac{P_3^2}{Z_3} - \frac{P_5^2}{Z_5} \right]^{0.5394} - Q_3 \end{aligned} \quad (40)$$

Esta ecuación restringida se diferencia con respecto a la primera variable de decisión y con respecto a cada una de las variables de estado que al evaluarla se tiene:

$$\frac{\partial F_3}{\partial d_1} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{2-3}} = -2.6182 K D_{2-3}^{1.0182} \left( \frac{1}{L_{2-3}} \right)^{0.5304} \left[ \frac{P_2^2}{Z_2} - \frac{P_3^2}{Z_3} \right]^{0.5304} = -3.10 \quad (41)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_1} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{1-2}} = 0 \quad (42)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_2} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{4-3}} = 2.6182 K D_{4-3}^{1.0182} \left( \frac{1}{L_{4-3}} \right)^{0.5304} \left[ \frac{P_4^2}{Z_4} - \frac{P_3^2}{Z_3} \right]^{0.5304} = -5.64 \quad (43)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_3} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{3-5}} = 31.99 \quad (44)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_4} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{6-5}} = 0 \quad (45)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_5} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{7-5}} = 0 \quad (46)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_6} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{10-5}} = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_7} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{13-12}} = 0 \quad (48)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_8} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{14-5}} = 0 \quad (49)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_9} = \frac{\partial F_3}{\partial D_{15-14}} = 0 \quad (50)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_3}{\partial S_{10}} = \frac{\partial F_3}{\partial P_3} &= -1.0788 K D_{2-9}^{2.6182} \frac{P_3}{Z_9} \left[ \frac{1}{L_{2-9}} \right]^{0.5394} \\
&\left[ \frac{P_2^2}{Z_2} - \frac{P_9^2}{Z_9} \right]^{0.5394} - 1.0788 K D_{4-9}^{2.6182} \\
&\frac{P_3}{Z_9} \left[ \frac{1}{L_{4-9}} \right]^{0.5394} \left[ \frac{P_4^2}{Z_4} - \frac{P_9^2}{Z_9} \right]^{0.5394} + \\
1.0788 K D_{9-5}^{2.6182} \frac{P_3}{Z_9} \left[ \frac{1}{L_{9-5}} \right]^{0.5394} \\
&\left[ \frac{P_9^2}{Z_9} - \frac{P_5^2}{Z_5} \right]^{0.5394} = 10.21 \quad (51)
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_{11}} = \frac{\partial F_3}{\partial P_7} = 0 \quad (52)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_{12}} = \frac{\partial F_3}{\partial P_0} = 0 \quad (53)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_{13}} = \frac{\partial F_3}{\partial P_{11}} = 0 \quad (54)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_{14}} = \frac{\partial F_3}{\partial P_{12}} = 0 \quad (55)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_{15}} = \frac{\partial F_3}{\partial P_{14}} = 0 \quad (56)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial S_{16}} = \frac{\partial F_3}{\partial Q_5} = 0 \quad (57)$$

Similarmente las ecuaciones de continuidad para los nodos restantes se formulan y diferencian con respecto a la primera variable de decisión y con respecto a cada una de las variables de estado. Cuando se completan los cálculos, los términos de la Ec. 17 pueden ser substituidos y la expresión evaluarse con los valores supuestos de las variables de estado y de decisión, Ec 58.

De una manera similar se calculan las derivadas restringidas de

64154.47	3551.24	51308.00	95325.55	7230.25	37329.92	7135.45	27402.86	152652.40	42427.00	1347.05	374.22	117.99	1526.21	433.77	2152.48	0
0	5.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.10	-5.53	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.73	0	0	0	0	0	0
-3.10	0	-5.54	31.50	0	0	0	0	0	0	10.21	0	0	0	0	0	0
0	0	5.54	0	0	0	0	0	0	0	-5.72	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-31.50	-55.35	-38.93	-24.59	0	-32.67	0	-1.75	-1.85	-0.18	-0.53	-0.81	-1.26	1
0	0	0	0	55.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	38.93	0	0	0	0	0	4.34	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.48	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18	0	0	0	0
0	0	0	0	0	00	24.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.53	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-4.17	0	0	0	0	0	0	0.99	0	0
0	0	0	0	0	0	0	4.17	0	0	0	0	0	0	-0.18	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	32.67	-17.98	0	0	0	0	0	3.49	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	17.98	0	0	0	0	0	-0.99	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.27	0

SY  
SDH

=120401.58

5.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.73	0	0	0	0	0	0
0	-5.54	31.50	0	0	0	0	0	0	0	10.21	0	0	0	0	0	0
0	5.54	0	0	0	0	0	0	0	0	-5.72	0	0	0	0	0	0
0	0	-31.50	-55.35	-38.93	-24.59	0	-32.67	0	-1.75	-1.85	-0.18	-0.53	-0.81	-1.26	1	0
0	0	0	55.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	38.93	0	0	0	0	0	4.34	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.48	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18	0	0	0	0
0	0	0	0	00	24.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.53	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-4.17	0	0	0	0	0	0	0.99	0	0
0	0	0	0	0	0	0	4.17	0	0	0	0	0	0	-0.18	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	32.67	-17.98	0	0	0	0	0	3.49	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	17.98	0	0	0	0	0	-0.99	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.27	0

.....(58)



las cinco variables de decisión restantes. Los resultados de estos cálculos son:

<i>Variables de Decisión</i>	<i>Derivada Restringida</i>
$Dz-3$	120401.58
$D8-7$	4358.52
$D9-5$	9422.45
$D11-5$	104622.91
$D12-5$	20861.43
$D16-14$	62051.01

El Valor de estas derivadas restringidas indica que ninguna de las variables de decisión esta cerca del óptimo. Además, el signo positivo de las derivadas restringidas indica que el valor de cada una de las variables de decisión debe ser disminuido. Para llevar a cabo esto, se selecciona una corrección máxima ( $\Delta dp$ ) de  $1/2"$  de diámetro. Ya que ninguna de las variables de decisión se aproxima a cero, no es necesario tomar precauciones para tratar de evitar que alguna de las variables adquiera un valor negativo.

Empleando el método de descenso rápido (Steepest Descent), la variable  $Dz-3$  tiene el mayor valor y por lo tanto debe tener la mayor corrección. Usando la Ec. 19 con una corrección máxima de  $1/2"$  para  $Dz-3$  se determina un valor de  $\eta_{max} = 4.1527692903E-06$ . Con este valor, el siguiente paso es determinar el valor de  $\eta_{opt}$  que lleve a la convergencia del método. Para esto es necesario evaluar la función costo entre cero y  $\eta_{max}$ .

Como el sistema ya está balanceado, las variables de estado permanecerán constantes y la variación de la función costo dependerá sólo de las correcciones que cada  $\eta$  establece en cada una de las variables de decisión;

$\eta$	Función Costo (Y)
	(\$)
0	10449918.50
1.3842564301E-06	10416221.30
2.7685128603E-06	10382718.40
4.1527692904E-06	10349409.40

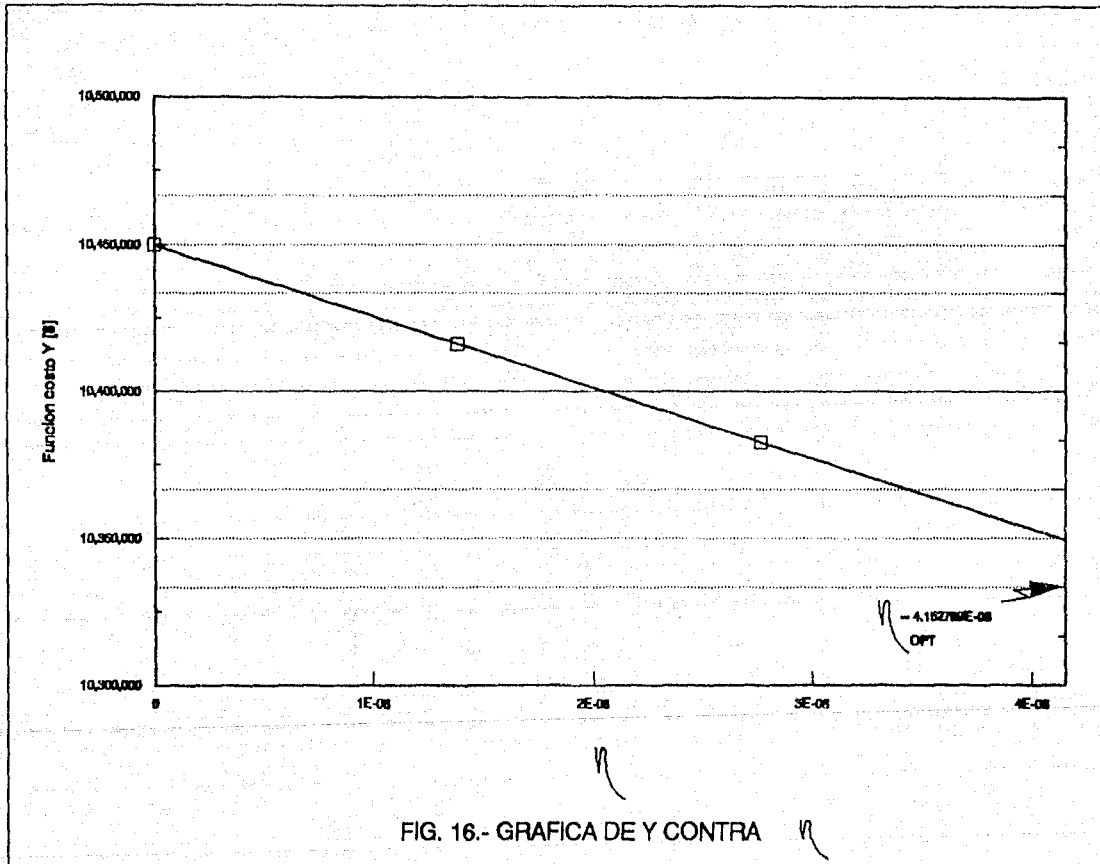
Llevando estos valores a una gráfica de Y vs  $\eta$ , se observa en la Fig 16 que el valor de  $\eta_{opt}$  corresponde a  $\eta_{max}$ , indicando con esto que se llevarán a cabo varios pasos de optimización para que el método llegue a la convergencia.

Después que se determina el valor de  $\eta_{opt}$ , se calculan las correcciones de las variables de decisión empleando para esto nuevamente la Ec 19. Estas correcciones son:

Variables de Decisión	Corrección (Pg)
Dz-3	0.49999
D8-7	0.01810
D9-5	0.03913
D11-5	0.43447
D12-5	0.08663
D16-14	0.25768

Con estas correcciones se calculan los nuevos valores de las variables de decisión y se obtienen las derivadas restringidas. Con el  $\eta_{opt}$  así determinado, el procedimiento se repite hasta que las derivadas restringidas caen dentro de la tolerancia deseada.

Las tablas III y IV muestran los datos que alimentan al programa de cómputo y las tablas V y VI los resultados.



Como se puede ver en la tabla VI los diámetros interiores calculados no son comerciales por lo que se hace necesario consultar algún catálogo sobre tuberías comerciales<sup>10</sup> y seleccionar el diámetro inmediato superior. Una vez conocidos los diámetros comerciales, éstos se proporcionan como datos al programa y se balancea nuevamente el sistema.

Los resultados del procedimiento de optimización se muestran en la Fig 17 y se complementa con las tablas VII y VIII donde se observan las diferencias entre el sistema inicial y el sistema optimizado. Un análisis similar para el caso de la red de oleoductos del Distrito Villahermosa lleva a los resultados de la Fig 18 y las tabla IX y X.

# TABLA III

## DATOS GENERALES

(Gas)

Temperatura Base	: 50 °F
Presión Base	: 14.7 PSIA
Densidad Relativa	: 0.797
Temperatura Media de Flujo	: 86 °F
Tolerancia	: 1 %
Corrección Máxima ( $\Delta dp$ )	: 0.5 Pg

## DATOS DE LOS NODOS

NODO NUM	PRESION (PSIA)	GASTO (MMPCD)
1	1139.48	- 41
2	1137.00	0
3	1129.41 *	- 305
4	1135.95	- 74
5	1000.00	2035 *
6	1060.44	- 495
7	1098.16 *	- 122
8	1142.12	- 220
9	1083.07 *	- 30
10	1047.30	- 216
11	1053.34 *	- 54
12	1029.34 *	0
13	1148.33	- 46
14	1191.69 *	- 141
15	1271.73	- 158
16	1234.29	- 133

\*: Variable de Estado (Incógnita).

El gasto negativo significa volumen que se adciona al sistema.

# TABLA IV

## DATOS DE LOS CONECTORES

NUM	NODO (INI)	NODO (FIN)	ELEMENTO	D. I. (Pg)	LONGITUD (MILLAS)	EFICIENCIA (%)
I	1	2	Tubería	18.750 *	1.098	22.0
II	2	3	Tubería	34.624 (D)	7.604	7.0
III	4	3	Tubería	34.376 *	8.701	15.0
IV	3	5	Tubería	34.376 *	13.611	22.5
V	6	5	Tubería	23.000 *	1.864	40.0
VI	7	5	Tubería	23.000 *	9.280	50.0
VII	8	7	Tubería	23.000 (D)	4.440	32.0
VIII	9	5	Tubería	23.000 (D)	2.921	2.5
IX	10	5	Tubería	23.000 *	1.864	20.0
X	11	5	Tubería	28.876 (D)	23.004	10.0
XI	12	5	Tubería	34.624 (D)	4.351	3.0
XII	13	12	Tubería	28.876 *	4.848	2.3
XIII	14	5	Tubería	34.624 *	21.338	23.0
XIV	15	14	Tubería	23.000 *	9.034	23.0
XV	16	14	Tubería	34.376 (D)	9.765	9.0

Costo del sistema original balanceado = \$ 10'449,918.50 [Dolares]

\* : Variable de Estado (Incógnita).

D : Variable de Decisión.

**TABLA V**  
**DATOS DE LOS NODOS**  
 (Resultado de la Optimización)

NODO NUM	PRESION (PSIA)	GASTO (MMPCD)
	1139.48	- 41
1	1137.00	0
2	1090.98 *	- 305
3	1135.95	- 74
4	1000.00	2035 *
5	1060.44	- 495
6	1092.64 *	- 122
7	1142.12	- 220
8	1613.31 *	- 30
9	1047.30	- 216
10	2127.56 *	- 54
11	1061.62 *	0
12	1148.33	- 46
13	1156.01 *	- 141
14	1271.73	- 158
15	1243.27	- 133
16		

\*: Variable de Estado (Incógnita).

# TABLA VI

## DATOS DE LOS CONECTORES

(Resultado de la Optimización)

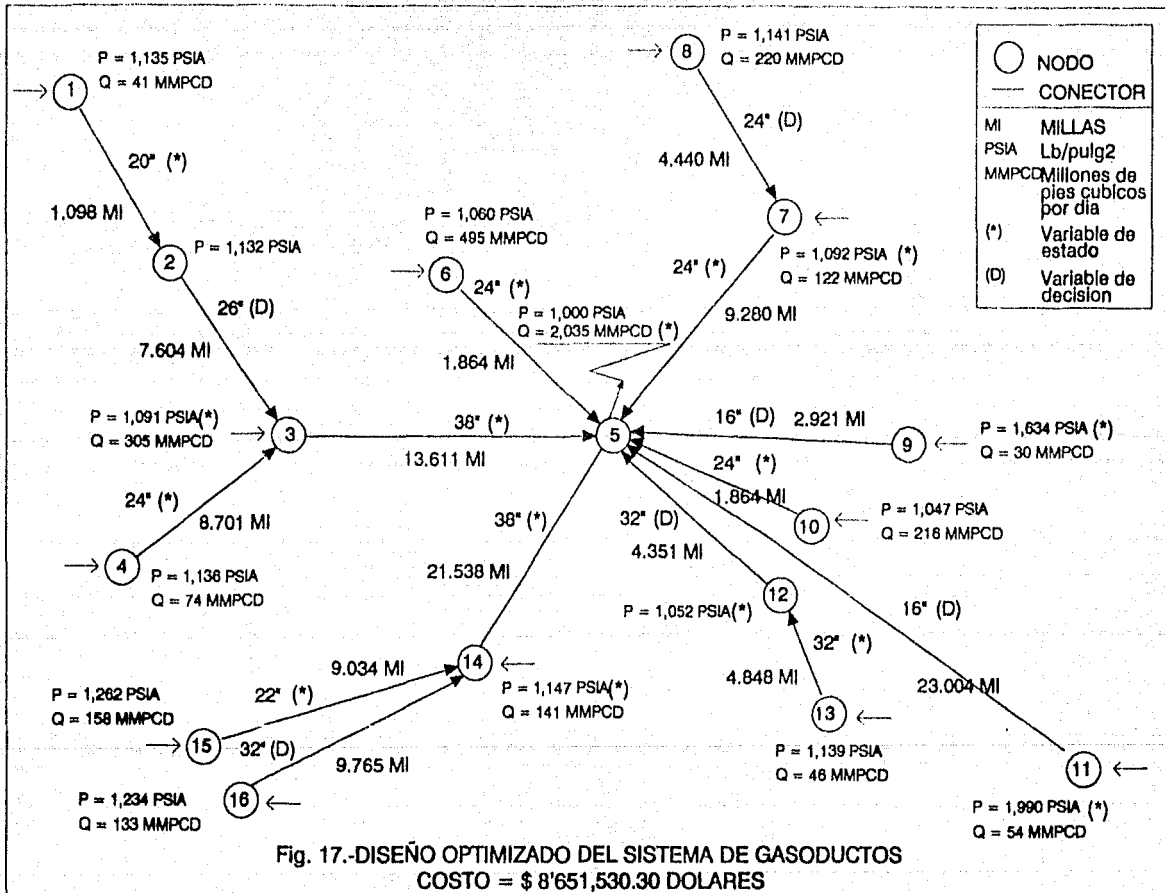
NUM	NODO (INI)	NODO (FIN)	ELEMENTO	D.I. (Pg)	LONGITUD (MILLAS)	EFICIENCIA (%)
I	1	2	Tubería	18.869 *	1.098	22.0
II	2	3	Tubería	23.974 (D)	7.604	7.0
III	4	3	Tubería	23.198 *	8.701	15.0
IV	3	5	Tubería	37.125 *	13.611	22.5
V	6	5	Tubería	22.999 *	1.864	40.0
VI	7	5	Tubería	23.290 *	9.280	50.0
VII	8	7	Tubería	22.458 (D)	4.440	32.0
VIII	9	5	Tubería	14.470 (D)	2.921	2.5
IX	10	5	Tubería	23.000 *	1.864	20.0
X	11	5	Tubería	13.990 (D)	23.004	10.0
XI	12	5	Tubería	29.602 (D)	4.351	3.0
XII	13	12	Tubería	30.714 *	4.848	2.3
XIII	14	5	Tubería	36.266 *	21.338	23.0
XIV	15	14	Tubería	21.392 *	9.034	23.0
XV	16	14	Tubería	30.957 (D)	9.765	9.0

Costo del sistema final optimizado = \$ 8'554,599.95 [Dolares]

\* : Variable de Estado (Incógnita).

D : Variable de Decisión.





# TABLA VII

## COMPARACION DE LOS SISTEMAS INICIAL Y OPTIMIZADO

(GAS)

### DATOS DE LOS NODOS

NUM	PRESION (PSIA)		GASTO (MMPCD)	
	INICIAL	OPTIMIZADA	INICIAL	OPTIMIZADO
1	1139.48	1135.10	- 41	- 41
2	1137.00	1132.50	0	0
3	1129.41	1091.00	- 305	- 305
4	1135.95	1135.50	- 74	- 74
5	1000.00	1000.00	2035	2035
6	1060.44	1060.40	- 495	- 495
7	1098.16	1092.20	- 122	- 122
8	1142.12	1141.30	- 220	- 220
9	1088.07	1633.90	- 30	- 30
10	1047.30	1047.30	- 216	- 216
11	1053.34	1990.40	- 54	- 54
12	1029.34	1051.50	0	0
13	1148.33	1138.60	- 46	- 46
14	1191.69	1146.90	- 141	- 141
15	1271.73	1262.50	- 158	- 158
16	1234.29	1234.40	- 133	- 133

El gasto negativo significa volumen que se adiciona al sistema.

## TABLA VIII

### COMPARACION DE LOS SISTEMAS INICIAL Y OPTIMIZADO

(GAS)

#### DATOS DE LOS CONECTORES

NUM	NODO	NODO	O. D. (Pg)		LONGITUD (MILLAS)	
	(INI)	(FIN)	INIC AL	OPTIMIZADO	INICIAL	OPTIMIZADA
I	1	2	20	20	1.098	1.098
II	2	3	36	26	7.604	7.604
III	4	3	36	24	8.701	8.701
IV	3	5	36	38	13.611	13.611
V	6	5	24	24	1.864	1.864
VI	7	5	24	24	9.280	9.280
VII	8	7	24	24	4.440	4.440
VIII	9	5	24	16	2.921	2.921
IX	10	5	24	24	1.864	1.864
X	11	5	30	16	23.004	23.004
XI	12	5	36	32	4.351	4.351
XII	13	12	30	32	4.848	4.848
XIII	14	5	36	38	21.338	21.338
XIV	15	14	24	22	9.034	9.034
XV	16	14	36	32	9.765	9.765

Costo del sistema original balanceado = \$ 10'449,918.50 [Dolares]

Costo del sistema final optimizado = \$ 8'651,530.30 [Dolares]

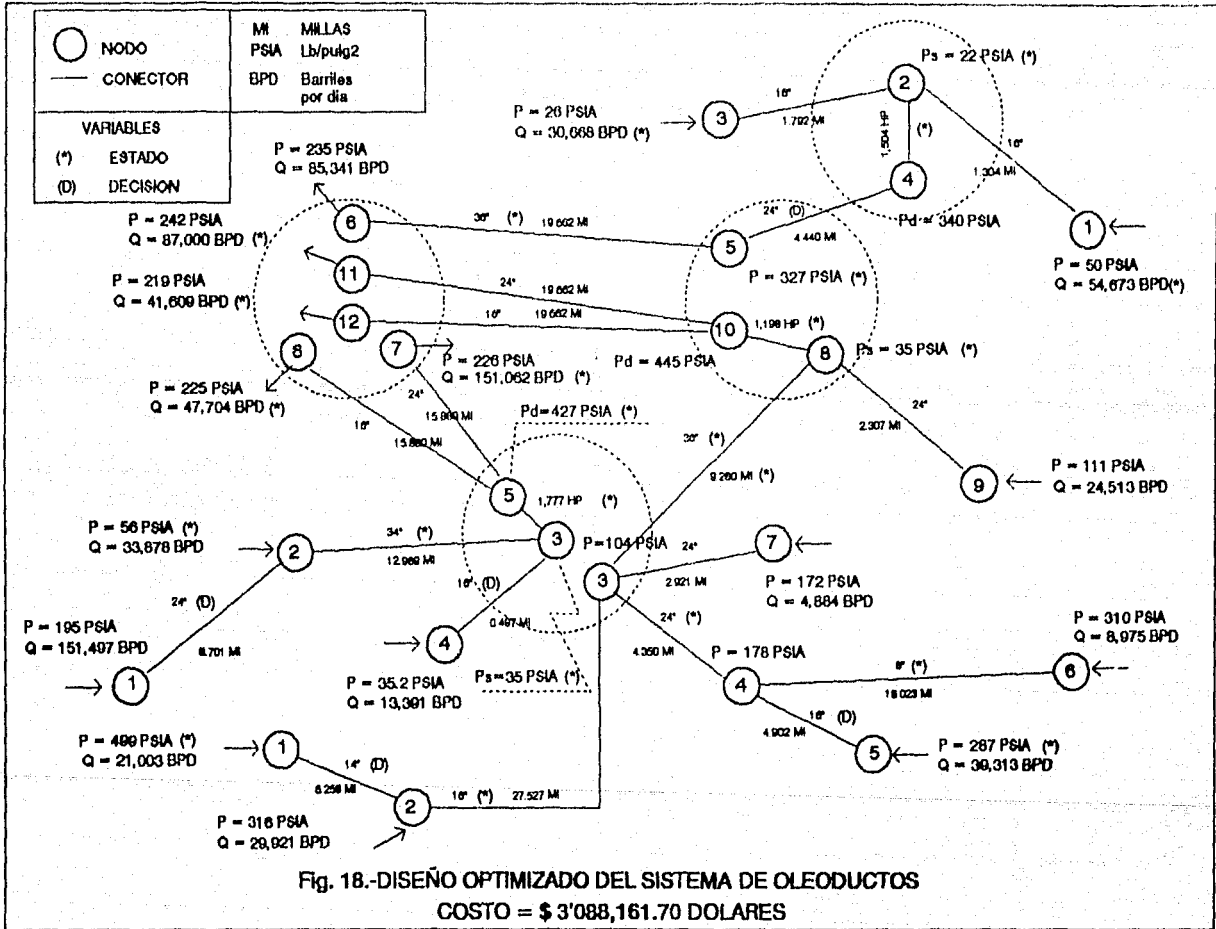


Fig. 18.-DISEÑO OPTIMIZADO DEL SISTEMA DE OLEODUCTOS  
 COSTO = \$ 3'088,161.70 DOLARES

# TABLA IX

## COMPARACION DE LOS SISTEMAS INICIAL Y OPTIMIZADO

(ACRITIC)

### DATOS DE LOS NODOS

NUM	PRESION (PSIA)		GASTO (BPD)	
	INICIAL	OPTIMIZADA	INICIAL	OPTIMIZADO
(Red num 1)				
1	195.2	194.6	- 151497	- 151497
2	144.4	56.4	- 33878	- 33878
3	30.0	35.0	0	0
4	35.2	35.2	- 13391	- 13391
5	427.0	427.0	0	0
6	224.6	224.6	47704	47703
7	225.5	225.5	151062	151063

(Red num 2)

1	386.7	499.1	- 21003	- 21003
2	316.5	316.5	- 29921	- 29921
3	103.5	103.5	0	0
4	178.1	178.1	0	0
5	189.8	287.0	- 39313	- 39313
6	310.1	310.1	- 8975	- 8975
7	172.2	172.2	- 4884	- 4884
8	34.6	34.6	0	0
9	111.0	111.0	- 24513	- 24513
10	444.9	444.9	0	0

T A B L A I X (CONTINUACION)

11	242.0	242.0	87000	87000
12	219.0	219.0	41609	41609

(Red num 3)

1	50.0	50.0	- 54673	- 54673
2	22.1	22.1	0	0
3	26.0	26.0	- 30668	- 30668
4	340.0	340.0	0	0
5	327.3	324.7	0	0
6	235.0	235.0	85341	85341

El gasto negativo significa volumen que se adiciona al sistema.

# TABLA X

## COMPARACION DE LOS SISTEMAS INICIAL Y OPTIMIZADO (LIQUIDO)

### DATOS DE LOS CONECTORES

NUM	NODO		O. D. (Pg)		POTENCIA (HP)	LONGITUD (MILLAS)	
	(INI)	(FIN)	INICIAL	OPTIMIZADO		INICIAL	OPTIMIZADA
(Red num 1)							
I	1	2	24	20		8.701	8.701
II	2	3	24	34		12.989	12.989
III	4	3	16	32		0.497	0.497
IV	3	5			1800 1777		
V	5	6	16	16		15.880	15.880
VI	5	7	24	24		15.880	15.880
(Red num 2)							
I	1	2	16	14		6.258	6.358
II	2	3	16	16		27.527	27.527
III	4	3	24	24		4.350	4.350
IV	5	4	24	16		4.902	4.902
V	6	4	8	8		18.023	18.023
VI	7	3	24	24		2.921	2.921
VII	3	8	36	36		9.280	9.280
VIII	9	8	24	24		2.307	2.307
IX	8	10			1200 1198		
X	10	11	24	24		19.662	19.662
XI	10	12	16	16		19.662	19.662

**T A B L A X (CONTINUACION)**

(Red num 3)

I	1	2	16	16		1.304	1.304
II	3	2	16	16		1.792	1.792
III	2	4			1500 1504		
IV	4	5	24	24		4.440	4.440
V	5	6	36	36		19.662	19.662

**Costo del sistema original balanceado = \$ 3'149,318.85 [Dolares]**

**Costo del sistema final optimizado = \$ 3'088,161.70 [Dolares]**



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo desarrollado permite efectuar la evaluación económica de redes de tuberías que transportan gas o líquido, y al mismo tiempo realizar la ingeniería básica de diseño y analizar la eficiencia con que están operando redes ya instaladas.

Para la aplicación del modelo, se requiere la selección de variables de estado y de decisión, sin embargo, debido a la flexibilidad que se tiene al establecer estas variables, se debe tener cuidado en su selección ya que se puede estar obligando al programa a que calcule sistemas irreales.

Al optimizar un sistema se recomienda seleccionar como variables de decisión los diámetros de las tuberías cuya eficiencia de transporte requieran una mayor corrección y como incógnitas se pueden fijar un conjunto de variables dentro de las cuales se puedan escoger presiones, gastos, diámetros, longitudes y potencias sin olvidar siempre que el número de incógnitas sea igual al número de nodos del sistema.

Es posible en algunas ocasiones que al fijar como incógnitas las presiones en los nodos de un conector y su diámetro como variable de decisión, el proceso de optimización se detenga por tratar de obtener un factor de desviación del gas "z" irreal (extrapolado), como consecuencia de una caída de presión muy alta al disminuir el diámetro del conector. Cuando esto suceda, se recomienda fijar como dato la presión en uno de los nodos y seleccionar otra nueva incógnita.

Durante el proceso de optimización suele suceder que alguna de las incógnitas adquiera un valor negativo. Si este es el caso, se recomienda tomar como variable de decisión esta incógnita y como variable de estado la variable de decisión que necesite la menor corrección.

Cuando una tubería de gas maneja pequeñas cantidades de líquidos, se puede hacer el análisis de ésta como si fuera una tubería de gas seco, en cuyo caso los líquidos se consideran únicamente como una reducción en el área de flujo, los cuales disminuyen la eficiencia de flujo de gas; sin embargo, para hacer un análisis más estricto de tuberías de gas con algunas cantidades de líquido, debe considerarse el aspecto dinámico del líquido interrelacionado con el gas.

Como se menciona en la teoría, las compresoras y bombas se presentan por una ecuación de flujo que relaciona el gasto con las presiones, que para aspectos prácticos de cálculo es suficiente, pero no simula realmente las condiciones de operación de una compresora o bomba, por lo que al proporcionar este dato al programa, se tiene que considerar que es potencia efectiva sobre el fluido y no potencia nominal.

Un punto necesario y tal vez el más importante es obtener los parámetros reales que intervienen en la *función costo*, ya que de ellos dependerá la veracidad de los resultados en la optimización de la red desde el punto de vista económico.

Cuando todas las *derivadas restringidas* están dentro de la tolerancia señalada con la excepción de una o dos, es conveniente detener el proceso de optimización en este punto y tomar como resultado final los cálculos hasta aquí obtenidos con el fin de ahorrar tiempo de cómputo, ya que el porcentaje de error entre estos resultados y los que se obtendrían al cumplirse la tolerancia para todas las derivadas restringidas no es significativo.

Al terminar el procedimiento de optimización es recomendable seleccionar un nuevo conjunto tanto de variables de estado como de variables de decisión para ver si se puede mejorar el óptimo obtenido. Se dió el caso en algunas ocasiones, al aplicar lo anterior, que el valor de la función costo disminuye hasta en un 10%.

El tiempo de convergencia del método es función directa del número de variables de decisión. Es decir, entre más variables de decisión se seleccionen el tiempo de cómputo será mayor.

Para la utilización del modelo en una microcomputadora PC se requieren 280 K de memoria por lo tanto, se recomienda verificar si se dispone de esa capacidad en la máquina antes de iniciar la optimización.

El modelo descrito es susceptible de aplicarse para:

- a) Analizar sistemas de recolección o distribución de gas o líquido existentes con el fin de establecer las condiciones óptimas de operación.
- b) Cuantificar económicamente el efecto de cambios de un sistema o cambios en sus condiciones de operación.
- c) Diseñar sistemas de recolección o distribución de gas o líquido con las características de mínimos costos y condiciones de operación deseables.

Se recomienda seguir trabajando con el modelo en más sistemas de redes para establecer su rango de aplicación.

Uno de los principales inconvenientes en la aplicación de este modelo es el tiempo de cómputo que se lleva a cabo en microcomputadoras (hasta hora y media) que sin embargo, se vio reducido infinitamente al hacer uso de una superminicomputadora (menos de 20 minutos).

Una manera de reducir el número de iteraciones en el modelo y por lo tanto el tiempo de cómputo en una microcomputadora, sería tratar de plantear los dos sistemas formados (de incógnitas y de decisión) en uno solo, lo que traería como consecuencia la no separación de variables (estado y decisión) y el planteamiento de un nuevo modelo.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) Flanigan, D. : "Constrained Derivatives in Natural Gas Pipeline System Optimization", Journal of Petroleum Technology, May 1972.
- (2) Martch, H. B. and Mc Call, N. J. : "Optimization of the Design and Operation of Natural Gas Pipeline System", SPE 4006, 1972.
- (3) Graham, G. E. , Maxwell, D. A. and Vallone, A. : "How to Optimize Gas Pipeline Networks", Pipeline Industry, Jun 1971.
- (4) Office of Emergency Preparedness of U.S.A. : "Design of Economical Offshore Natural Gas", Pipeline Systems, Report R-1 Prepared for FPC, Nov 1968.
- (5) Westman, D. A., Hellums, L. J., Everett, D. D. and Foster, J. R. : "Phillips Devises Computer Program to Design Gas-Gathering Systems", Oil and Gas Journal, Feb 1969.
- (6) Stoner, M. A. : "A New Way to Design Natural Gas Systems", Pipeline Industry , Feb 1970.
- (7) Stoner, M. A. : "Sensitivity Analysis Applied to a Steady-State Model of Natural Gas Transportation Systems", Society of Petroleum Engineers Journal, Apr 1972.
- (8) Limón H. T. : "Transporte de Gas en Régimen Permanente ", Instituto Mexicano del Petroleo, Publicación No 74BH/164, Jul 1974.
- (9) Carnahan, B., Luther, H. A. and Wilkes, J. O. : "Applied Numerical Methods", John Wiley and Sons, Inc. 1969.

- (10) Ortega, J. M. and Rheinboldt, W. C.: "Iterative Solutions of Nonlinear Equations in Several Variables", Academic Press, 1970.
- (11) Himmelblau, D. M.: "Applied Nonlinear Programming", Mc Graw-Hill, Book Co.
- (12) Chang, A.: "Application of Sparse Matrix in Electric Power System Analysis", Proceedings of Sparse Matrix Symposium, York Town Heights, New York, Sep 1968.
- (13) Wilde, D. J.: "Jacobians in Constrained Nonlinear Optimization", Operation Research 13, Sep 1965.
- (14) Wilde, D. J. and Beightler, C. S.: "Foundation of Optimization", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. 1967.
- (15) Beightler, C. S., Phillips, D. T. and Wilde, D. J.: "Foundations of Optimization", Second Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. 1979.
- (16) Solorzano, L. N.: "Diseño Económico de Líneas de Conducción de Gas Natural", Congreso Panamericano de Ingeniería del Petróleo, Mar 1979.
- (17) Brill, J. P. and Beggs, H. D.: "Two-Phase Flow in Pipes", University of Tulsa 1978, p 4-58.
- (18) Campbell, J. M.: "Gas Conditioning and Processing", Vol 2, Campbell Petroleum Series, Inc., Jun 1981.
- (19) Nippon Steel Corporation: "Nippon Steel Line Pipe". Nissho-Iwai Mexicana, S.A. Oct 1975.

## APENDICE A

## PLANTEAMIENTO DEL METODO DE STONER<sup>9</sup>

En un sistema de tuberías de recolección o distribución de gas o líquido, con flujo en régimen permanente en una sola fase, se debe satisfacer la ley de conservación de la masa en cada uno de sus nodos, la cual establece que la suma algebraica de los gastos que entran o salen de un nodo a través de los conectores, más el gasto que se proporciona o extrae del sistema a través de ese nodo, debe ser cero, es decir:

$$F_i = \sum_{j \in C} S_{ij} q_{ij} + Q_i = 0 \quad i \in N \quad (A-1)$$

en donde:  $S_{ij}$  es una variable que indica el sentido de flujo --por convención  $S_{ij} = 1$  cuando el flujo es del nodo  $i$  al nodo  $j$  y  $S_{ij} = -1$  en caso contrario-- ;  $q_{ij}$  es el gasto de gas o líquido que pasa a través del conector de los nodos  $i, j$ ;  $Q_i$  es un término que indica la adición o extracción de masa al sistema a través del nodo  $i$  y la notación  $j \in C$  representa a todos los conectores relacionados con el nodo  $i$ . Estas ecuaciones establecen simplemente que la masa que entra al nodo es igual a la que sale, (por esta razón, algunas veces se les llama ecuaciones de balance en los nodos) y describen convenientemente la interacción de los diferentes elementos del sistema.

Para cada tipo de conectores, pueden asociarse ecuaciones que relacionen el gasto ( $q_{ij}$ ) con la presión del fluido en sus extremos (nodos  $i, j$ ). Las tablas A-I y A-II muestran estas ecuaciones reducidas algebraicamente en forma general para los sistemas de gas y líquido respectivamente.

Al substituir las ecuaciones presentadas en las tablas A-I y A-II

## TABLA A-I

(GAS)

**TIPO DE CONECTOR**

**ECUACION**

*TUBERIA*

$$q_{ij} = \zeta_{ij} \left[ \frac{P_i^2}{Z_i} - e^a \frac{P_j^2}{Z_j} \right]^n$$

**Donde:**

$\zeta_{ij}$  : Coeficiente de transmisión de la tubería que depende de la geometría del tubo, de las condiciones de flujo y de la composición del gas.

$P_i$  : Presión del fluido en el nodo i.

$P_j$  : Presión del fluido en el nodo j.

$Z$  : Factor de compresibilidad del gas.

$e^a$  : Caída de presión por elevación.

$n$  : Exponente que depende de la ecuación a utilizar.

*COMPRESORA*

$$q_{ij} = \frac{HP}{\left[ K_1 \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} - K_3 \right]}$$

**Donde:**

**HP** : Potencia de la compresora.

**$P_i$**  : Presión de descarga.

**$P_j$**  : Presión de succión.

**$K_1, K_2, K_3$**  : Constantes que dependen del tipo de compresora y de las características del gas.



## T A B L A A-II

(LIQUIDO)

**TIPO DE CONECTOR**

**ECUACION**

*TUBERIA*

$$q_{ij} = \zeta_{ij} \left[ \frac{(P_i - P_j) - \Delta P_{eij}}{f} \right]$$

**Donde:**

- $\zeta_{ij}$  : Coeficiente de transmisión de la tubería.
- $P_i$  : Presión del fluido en el nodo i.
- $P_j$  : Presión del fluido en el nodo j.
- $\Delta P_{eij}$  : Caída de presión por elevación entre los nodos ij.
- $f$  : Factor de fricción.

*BOMBA*

$$q_{ij} = \frac{K_i \text{ HP}}{(P_i - P_j)}$$

**Donde:**

- HP : Potencia de la bomba.
- $P_i$  : Presión de descarga.
- $P_j$  : Presión de succión.
- $K_i$  : Constante que depende del tipo de bomba.

en la Ec. A-1 dependiendo del tipo de conector y del sistema que se tenga, se obtienen las ecuaciones de balance en los nodos en términos de la presión del fluido, de los gastos externos al sistema y del coeficiente de transmisión del conector.

Cuando el sistema esté balanceado,  $F_i$  será cero y los gastos externos  $Q_i$ , también estarán balanceados, así:

$$\sum_{i \in N} Q_i = 0 \quad (A-2)$$

El problema consiste ahora en determinar un conjunto de valores  $Q_i$  y  $P_i$  para toda  $i$  en  $N$  y un conjunto de  $D_{ij}$ ,  $L_{ij}$  y  $HP_{ij}$  para todo  $(i,j)$  en  $C$  que satisfagan las ecuaciones nodales de balance.

Bajo ciertas condiciones, es posible resolver un sistema de  $N$  ecuaciones para  $N$  incógnitas. En este caso se tienen  $N$  ecuaciones con  $M$  incógnitas ( $N < M$ ), por lo que se requiere asignar valores a  $P$  variables ( $P = M - N$ ), quedando  $N$  variables como incógnitas. La asignación de valores debe hacerse de tal modo que las ecuaciones resultantes sean linealmente independientes. Como la suma algebraica de los gastos exteriores debe ser igual a cero, si se desean fijar los gastos, estos deben cumplir lo anterior, en caso contrario al menos un gasto debe quedar como incógnita en cuyo caso el modelo balancea los gastos externos, ya que la Ec. A-2 es linealmente dependiente de las  $N$  ecuaciones generadas por la Ec. A-1.

## SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES

Las ecuaciones resultantes de aplicar la Ec. A-1 a cada uno de los nodos, nos proporciona un sistema de ecuaciones simultaneas no lineales. Uno de los mejores métodos para resolver este tipo de

sistemas es el procedimiento iterativo de Newton\_Raphson. Debido a que es un método iterativo, es necesario proporcionar valores iniciales supuestos a las incógnitas. Usando estos valores como base, el método proporciona un conjunto de correcciones que, sumadas a los valores anteriores, harán que éstos se acerquen a la solución del sistema. Las iteraciones se continúan hasta que los valores calculados de las incógnitas satisfagan el conjunto de ecuaciones no lineales dentro de cierta tolerancia.

Considerese a manera de explicación un sistema de N ecuaciones no lineales del tipo  $F_i(X_1, X_2, \dots, X_N) = 0$  para  $i = 1, 2, \dots, N$ , con incógnitas  $X_1, X_2, \dots, X_N$ . El valor de las incógnitas al nivel de iteración  $k+1$ , está dado por:

$$\vec{X}_i^{k+1} = \vec{X}_i^k + \Delta X_i^{k+1} \quad i \leq N \quad (A-3)$$

En donde el vector de corrección  $\Delta X_i^{k+1}$  se obtiene mediante la solución del sistema de ecuaciones no lineales siguiente:

$$\sum_{j=1}^N \left[ \frac{\partial F_i}{\partial X_j} \Delta X_j^{k+1} \right] = -F_i^k(X_1^k, X_2^k, \dots, X_N^k) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (A-4)$$

El cual se puede expresar en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_1} & \frac{\partial F_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial X_N} \\ \frac{\partial F_2}{\partial X_1} & \frac{\partial F_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial X_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial X_1} & \frac{\partial F_N}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial X_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1^{k+1} \\ \Delta X_2^{k+1} \\ \vdots \\ \Delta X_N^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ -F_2 \\ \vdots \\ -F_N \end{bmatrix} \quad (A-5)$$

Las derivadas parciales, cuando los conectores son tuberías, bombas o compresoras dependiendo del sistema en estudio, se dan en las tablas A-III y A-IV.

Se observa por lo tanto que el método de Newton-Raphson reduce un problema no lineal a un procedimiento iterativo que involucra, en cada iteración, la solución de un sistema lineal. Sin embargo, como sucede en cualquier procedimiento iterativo, la convergencia del método está supeditada a la selección inicial de los valores de las incógnitas, entre mejor sea esta selección el método convergerá a la solución en forma más rápida.

Existen en la literatura esquemas para evitar la divergencia y acelerar la convergencia del método.<sup>11, 12</sup> El esquema propuesto por Stoner<sup>6</sup> se encontró efectivo en la mayoría de los casos. Sin embargo en las últimas etapas del proceso iterativo, disminuye el ritmo de convergencia. Este método consiste en multiplicar el término de corrección  $\Delta X_i^{k+1}$  por un factor de aceleración  $\alpha$ , por lo que la Ec. A-3 se modifica en la siguiente forma:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + \alpha \Delta X_i^{k+1} \quad (A-6)$$

Se ha observado que una modificación al esquema puede mejorar el ritmo de convergencia en sistemas de gas,<sup>6</sup> esta modificación resulta

## TABLA A-III

### D E R I V A D A S   P A R C I A L E S (GAS)

TIPO DE CONECTOR:

#### T U B E R I A

$$\frac{\partial F_L}{\partial P_i} = A C_{ij} e^a d_{ij}^c \frac{P_i}{Z_i} \left[ \frac{1}{L_{ij}} \right]^n \left[ \frac{P_i^2}{Z_i^2} - e^a \frac{P_j^2}{Z_j^2} \right]^{B-1}$$

$$\frac{\partial F_L}{\partial P_j} = - A C_{ij} e^a d_{ij}^c \frac{P_j}{Z_j} \left[ \frac{1}{L_{ij}} \right]^n \left[ \frac{P_i^2}{Z_i^2} - e^a \frac{P_j^2}{Z_j^2} \right]^{B-1}$$

$$\frac{\partial F_L}{\partial d_{ij}} = c C_{ij} d_{ij}^{c-1} \left[ \frac{1}{L_{ij}} \right]^n \left[ \frac{P_i^2}{Z_i^2} - e^a \frac{P_j^2}{Z_j^2} \right]^B$$

$$\frac{\partial F_L}{\partial L_{ij}} = - B C_{ij} d_{ij}^c \left[ \frac{1}{L_{ij}} \right]^{2+n} \left[ \frac{P_i^2}{Z_i^2} - e^a \frac{P_j^2}{Z_j^2} \right]^B$$

#### C O M P R E S O R

$$\frac{\partial F_L}{\partial P_i} = \frac{K_2 HP \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} \frac{1}{P_i}}{K_1 \left[ \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} - K_3 \right]^2}$$

T A B L A A-III (CONTINUACION)

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = \frac{K_2 \text{ HP} \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} \frac{1}{P_j}}{K_4 \left[ \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} - K_5 \right]^2}$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial \text{HP}_{ij}} = \frac{1}{K_4 \left[ \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} - K_5 \right]}$$

Donde:

$C_{ij}$  : Constante de la tubería que multiplicada por  $d_{ij}^c$  y

$\left( \frac{l}{L_{ij}} \right)^b$  nos da el coeficiente de transmisión de la misma.

a,b,c : Exponentes que dependen del método seleccionado.

\* Las otros términos se definieron previamente en la tabla A-I \*

En el nodo la derivada con respecto al gasto es :

$$\frac{\partial F_i}{\partial Q_i} = 1 \quad ; \quad \frac{\partial F_i}{\partial Q_j} = 0$$

## TABLA A-IV

### DERIVADAS PARCIALES (LIQUIDO)

#### TIPO DE CONECTOR : TUBERIA

##### TIPO DE FLUJO : LAMINAR

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_i} = \frac{C_{ij} d_{ij}^4}{L_{ij}}$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = - \frac{C_{ij} d_{ij}^4}{L_{ij}}$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial d_{ij}} = 4 C_{ij} d_{ij}^3 \frac{[(P_i - P_j) - \Delta P_{eij}]}{L_{ij}}$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial L_{ij}} = - C_{ij} d_{ij}^4 \frac{[(P_i - P_j) - \Delta P_{eij}]}{L_{ij}^2}$$

##### TURBULENTO

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_i} = 0.5 C_{ij} \left\{ \frac{d_{ij}^5 [(P_i - P_j) - \Delta P_{eij}]}{f L_{ij}} \right\}^{-0.5} \frac{d_{ij}^5}{f L_{ij}}$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = -0.5 C_{ij} \left\{ \frac{d_{ij}^5 [(P_i - P_j) - \Delta P_{eij}]}{f L_{ij}} \right\}^{-0.5} \frac{d_{ij}^5}{f L_{ij}}$$

T A B L A A-IV (CONTINUACION)

$$\frac{\partial F_i}{\partial L_{ij}} = -0.5 C_{ij} \left\{ \frac{d_{ij}^5 [(P_i - P_j) - \Delta P_{eij}]}{f L_{ij}} \right\}^{0.5} \frac{1}{L_{ij}}$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial d_{ij}} = 0.5 C_{ij} \left\{ \frac{d_{ij}^5 [(P_i - P_j) - \Delta P_{eij}]}{f L_{ij}} \right\}^{-0.5} *$$

$$\left[ \left\{ \frac{d_{ij}^5 [(P_i - P_j) - \Delta P_{eij}]}{f L_{ij}} \right\} f \frac{\partial}{\partial d_{ij}} \left( \frac{1}{f} \right) + \frac{5}{d_{ij}} \left\{ \frac{d_{ij}^5 [(P_i - P_j) - \Delta P_{eij}]}{f L_{ij}} \right\} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial d_{ij}} \left( \frac{1}{f} \right) = 1.7372 \left\{ 1.14 - 2 \log [ \epsilon/d_{ij} + 21.25/NRe^{0.9} ] \right\} *$$

$$\frac{[ \epsilon/d_{ij} + 19.125/NRe^{0.9} ]}{[ \epsilon/d_{ij} + 21.25/NRe^{0.9} ]}$$

TIPO DE CONECTOR : B O H B A

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_i} = \frac{K_i HP}{P_i^2}$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = \frac{K_i HP}{P_j^2}$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial HP_{ij}} = \frac{K_i}{(P_i - P_j)}$$

Donde:

$C_{ij}$  es una constante que depende del tipo de flujo.

Las notaciones finales de la tabla A-III son válidas también para esta tabla.



de asignar al factor de aceleración  $\alpha$ , valores cíclicos generales para todas las correcciones, estos valores son: 0.5 para la primera iteración, 0.707 para la segunda y 1 en la tercera, continuando cíclicamente con estos mismos valores en las siguientes iteraciones.

Para el caso de sistemas que manejan líquidos se observó que es conveniente dejar actuar libremente el método, debido principalmente al carácter fuertemente iterativo que se tiene al formar el sistema de ecuaciones resultante de aplicar la Ec. A-1 a cada uno de los nodos.

Con el uso de estos esquemas generalmente se obtiene la convergencia en un tiempo adecuado y la mayoría de los casos de divergencia son ocasionados por tratar de simular casos irreales de sistemas de recolección o distribución. Sin embargo, si el sistema en estudio no presenta casos como el anterior y se llegará a tener algún problema de convergencia con este método, puede probarse el esquema propuesto por Stoner.<sup>6</sup>

De acuerdo con el procedimiento, se nota que en cada iteración se tiene que resolver un sistema de  $N$  ecuaciones, lo cual limita su aplicación manual a sistemas menores de 7 nodos. Para sistemas mayores la solución se debe obtener con el auxilio de una computadora, pero además se puede requerir mucho tiempo de máquina si la inversión de la matriz jacobiana ( $J$ ) se lleva a cabo aplicando métodos convencionales debido a que la matriz resultante es una matriz dispersa y su estructura no varía durante el proceso iterativo.

Estas observaciones fueron contempladas por Stoner,<sup>7</sup> que para evitar dicha limitación, propuso usar el concepto de almacenamiento compacto de los elementos de la matriz presentado por Chang,<sup>11</sup> mediante el cual sólo los elementos diferentes de cero se almacenan en forma vectorial y utiliza estos vectores para aplicar el método de eliminación Gaussiana.

## APENDICE B

Unit CAPTURA DE DATOS;

INTERFACE

USES Crt,Colores,Calculos,Stoner,Flanigan,Printer;

PROCEDURE Modelo\_Matematico;

IMPLEMENTATION

PROCEDURE Graba(NombArch:Cadena);

Var

  Archivo1 : File Of Registro;  
  Archivo2 : File Of Registro\_Nodo;  
  Archivo3 : File Of Registro3;  
  I : Byte;

Begin

  Assign(Archivo1,NombArch+'.NOD');  
  Rewrite(Archivo1);  
  Assign(Archivo2,NombArch+'.ND1');  
  Rewrite(Archivo2);  
  Assign(Archivo3,NombArch+'.ND2');  
  Rewrite(Archivo3);  
  Write(Archivo3.DatosGral);  
  Close(Archivo3);  
  For i:= 1 To DatosGral.Nodos DD  
    Write(Archivo2,Matriz\_Nodos[i]);  
  Close(Archivo2);  
  For I:= 1 To DatosGral.Nconectores Do  
    Write(Archivo1,Matriz\_Conector[I]);  
  Close(Archivo1);

End;

PROCEDURE Modelo\_Matematico;

Var

  Det\_Am,Comp,U : Real;  
  Bandera\_Eta,Bandera\_Converge,Bandera\_Stop,Bandera : Boolean;

Begin

  Gas\_Liq:=DatosGral.Gas;  
  Bandera\_Eta:=True;  
  If Eta\_Opt = 0.0 Then Bandera\_Eta:=False;  
  Bandera\_Stop:=False;  
  Costo\_Inicial:=Funcion\_Costo(Matriz\_Conector,Matriz\_Nodos);  
  Fillchar(Vector\_Z,SizeOf(Vector\_Z),0);  
  For I:= 1 To DatosGral.Nodos Do  
    Begin  
      Bandera:=False;

```

For J:= 1 To Num_Var_Decision Do
  If (Decision[J].Variable=4) AND (Decision[J].Nodo=I) Then
    Bandera:=True;

For J:= 1 To DatosGral.Nodos Do
  If (Incognitas[J].Variable=4) AND (Incognitas[J].Nodo=I) Then
    Bandera:=True;

If Not Bandera Then Factor_Compre(DatosGral.Temp_Media,
                                  Matriz_Nodos[I].Presion,
                                  DatosGral.Densidad_Rel,
                                  Vector_Z[I].Comp,U);

End;
Iteraciones:=0;
Window(1,1,80,25);
TextBackGround(0);
TextColor(Yellow);
ClrScr;
Repeat
  Inc(Iteraciones);
  With DatosGral Do
    Begin
      Proc_Stoner (Am,Nodos,NConectores,Temp_Media,Densidad_Rel,
                  Tolerancia,Densidad_Rel,Viscosidad,Det_Am,Gas_Liq,
                  Bandera_Stop);
      If ( Not Bandera_Stop ) And ( Num_Var_Decision > 0 ) Then
        Proc_Flanigan(Am,Det_Am,Nodos,NConectores,Temp_Media,
                     Densidad_Rel,Tolerancia,Densidad_Rel,Viscosidad,
                     Costo_Inicial,Bandera_Eta,
                     Bandera_Converge,Gas_Liq)
      Else Bandera_Converge:=True;
    End;
  Until ( Bandera_Converge ) Or ( Iteraciones > 150 ) Or (Bandera_Stop);
  Costo_Final:=Funcion_Costo(Matriz_Conector,Matriz_Nodos);
  Visualiza;
End;

End.

```

Unit STONER;

INTERFACE

```
USES Crt,Colores,Calculos,Printer;
PROCEDURE Proc_Stoner(Var Am           :Mat;
                      NNodos,NConectores :Byte;
                      Temp,Sg,Tol,Ro,Mu :Real;
                      Var Det_Am        :Real;
                      Gas_Liq           :Boolean;
                      Var Bandera_Stop   :Boolean);
```

IMPLEMENTATION

PROCEDURE Proc\_Stoner;

```
Var
  Iter,M,J,I,K,KJ,Kn,KnKn,Mkn,kJJ      : Integer;
  K_1,K_2,Rc,Z,Zm,Zk,Expos,Constante,FMax,Fact,DeltaP.
  Gasto_Conec,Aux,Cons1,Cons2,DeltaP_Elev,Nre,Fac_Fric,Qc: Real;
  Signo                                  : Integer;
  Tubo_Compresor,Bandera                 : Boolean;
  Resp  : Char;
  Xapunt : Apuntador;
Begin
  Mark(Xapunt);
  New(Xapunt);
  Move(Dir_Screen^,XApunt^,4000);
  Window( 27,4,55,22);
  TextBackGround(0);
  TextColor(Yellow);
  ClrScr;
  Window(1,1,80,25);
  Cuadro(26,3,56,23);
  Window( 27,4,55,22);
  Bandera:=True;
  Iter:=0;
  Repeat
    Writeln(' Iteracion No: ',Iter+1:3);
    FillChar(Am,SizeOf(Am),0);
    For M:=1 to NNodos Do
      Begin
        F[M]:=0;
        For J:=1 to NConectores Do
          With Matriz_Conector[J] Do
            Begin
              If Not ((Nodo_Ini <> M) and (Nodo_Fin <> M)) Then
                Begin
                  K:=0;
                  Kn:=0;
```

```

Repeat
  INC(K);
  Presiono_Tecla;
  If Nodo_Ini = M then
    Begin
      If Nodo_Fin = K Then Kn:=K
      End
    Else If Nodo_Ini = K Then Kn:=K
  Until Kn = K;
  DeltaP:=Matriz_Nodos[M].Presion-Matriz_Nodos[Kn].Presion;
  Signo:=Round(DeltaP/Abs(DeltaP));
  KnKn:=-Kn;
  MKn:=-M;
  For KJJ:= 1 To Nodos
  Begin
    Presiono_Tecla;
    If Incognitas[KJJ].Variable =4 Then
      Begin
        If Incognitas[KJJ].Nodo = Kn Then KnKn:=Kn;
        If Incognitas[KJJ].Nodo = M Then MKn:=M
      End
    End;
  If Not Tipo_Conector Then (* Compresor o Bomba *)
  Begin
    Cons_Comp_Bomb(Temp,Eficien/100,Matriz_Nodos[M].
      Presion,Matriz_Nodos[Kn].Presion,Sg,
      K_2,K_1,Rc,Z,Signo,MKn,KnKn);
    If Z = 0 Then
      Begin
        Move(XApunt^,Dir_Screen^,4000);
        Release(Xapunt);
        Bandera_Stop:=True;
        Exit;
      End;
    Gasto_Conec:=Calc_Gasto_Comp_Bomb(DeltaP,Hp,K_1,K_2,
      Rc,Signo);
    Tubo_Compresor:=False
  End
  Else
  Begin
    Cons_Tuberia(H1,H2,Matriz_Nodos[M].Presion,
      Matriz_Nodos[Kn].Presion,Sg,Temp,Ro,Mu,
      Eficien/100,Expos,Constante,Cons1,Cons2,
      DeltaP,DeltaP_Elev,Zm,Zk,Signo,MKn,KnKn);
    If ( Zm = 0 ) Or ( Zk = 0 ) Then
      Begin
        Move(XApunt^,Dir_Screen^,4000);
        Release(Xapunt);
        Bandera_Stop:=True;
        Exit;
      End;
  End;

```

```

Calc_Gasto_Tuberia(Constante,DeltaP,DeltaP_Elev,
Diametro,Longitud,Ro,Mu,Rug,Nre,
Fac_Fric,Qc);
Gasto_Conec:=Signo*Qc;
Tubo_Compresor:=True
End;
F[M]:=F[M]+Gasto_Conec;
For KJ:=1 to NNodos Do
Begin
Aux:=0;
Presiono_Tecla;
If Incognitas[KJ].Conecto = J Then
Case Incognitas[KJ].Variable Of
1: Aux:=Derivada_Diametro(Signo,Diametro,DeltaP,Rug,
DeltaP_Elev,Nre,Fac_Fric,
Longitud,Cons1,Cons2,
Constante);
2: Aux:=Derivada_Longitud(Signo,Diametro,DeltaP,
DeltaP_Elev,Nre,Fac_Fric,
Longitud,Cons1,Cons2,
Constante);
3: Begin
Aux:=Derivada_HP(Signo,Rc,K_1,K_2,DeltaP);
End;
End;
End;
Case Incognitas[KJ].Variable Of
4: Begin
If Incognitas[KJ].Nodo = Kn Then
Begin
If Matriz_Nodos[Kn].Presion >
Matriz_Nodos[M].Presion
Then Signo:=-Signo;
Aux:=Derivada_Presion(Constante,Cons1,Cons2,
DeltaP,Expos,
Matriz_Nodos[Kn].
Presion,Zk,Diametro,
Longitud,K_1,K_2,Rc,
Hp,Nre,Fac_Fric,
DeltaP_Elev,
Tubo_Compresor,Signo);
End;
If Incognitas[KJ].Nodo = M Then
Begin
If Matriz_Nodos[M].Presion >
Matriz_Nodos[Kn].Presion
Then Signo:=-Signo;

```

```

Aux:=Derivada_Presion(Constante,Cons1,Cons2,
                      DeltaF,Expos,
                      Matriz_Nodos[M],
                      Presion,Zm,Diametro,
                      Longitud,K_1,K_2,Rc,Hp,
                      Nre,Fac_Fric,
                      DeltaP_Elev,
                      Tubo_Compresor,Signo);

End;
End;
5: Begin
  If Incognitas[KJJ.Nodo = M Then
    Am[M,KJJ]:=Derivada_Gasto(Matriz_Nodos[M].Gasto);
  End;
End;
Am[M,KJJ]:=Am[M,KJJ]+Aux
End;
End;
End;
F[M]:=-F[M]-Matriz_Nodos[M].Gasto;
Writeln(' F[' ,M, ' ] = ',F[M]);
End;
FMax:=0;
For I:=1 to NNodes Do
  If Abs(F[I]) > FMax Then FMax:=Abs(F[I]);
  Solucion_Sist(AM,NNodos,F,Det_Am,Bandera,Bandera_Stop);
  If Bandera_Stop Then
    Begin
      Move(XApunt^,Dir_Screen^,4000);
      Release(Xapunt);
      Exit
    End;
  If Fmax > Tol Then
    Begin
      INC(Iter);
      For I:= 1 to Nnodes Do
        Begin
          X[I]:=F[I];
        End;
      If Gas_Liq Then
        Begin
          Case Iter mod 3 Of
            0: Fact:=1;
            1: Fact:=0.5;
            2: Fact:=0.707;
          End;
        End
      Else
    End

```



```

Begin
  Case Iter mod 3 Of
    0: Fact:=1;
    1: Fact:=1;
    2: Fact:=1;
  End;
End;
For I:=1 to NNodos Do
Begin
  J:=Incognitas[I].Conector;
  If J > 0 Then
    With Matriz_Conector[J] Do
      Case Incognitas[I].Variable Of
        1: Begin
          Diametro:=Diametro+Fact*X[I];
          If Diametro < 1.5 Then
            Begin
              Bandera_Stop:=True;
              Writeln('    DIAMETRO NEGATIVO ');
              Writeln(' Presiona Cualquier Tecla');
              Move(XApunt^,Dir_Screen^,4000);
              Release(Xapunt);
              Resp:=ReadKey;
              Exit
            End
          End;
        2: Begin
          Longitud:=Longitud+Fact*X[I];
          If Longitud < 0 then
            Begin
              Bandera_Stop:=True;
              Writeln('    LONGITUD NEGATIVA ');
              Writeln(' Presiona Cualquier Tecla');
              Resp:=ReadKey;
              Move(XApunt^,Dir_Screen^,4000);
              Release(Xapunt);
              Exit
            End;
          End;
        3: Begin
          Hp:=Hp+Fact*X[I];
          If Hp < 0 Then
            Begin
              Bandera_Stop:=True;
              Writeln('    POTENCIA NEGATIVA ');
              Writeln(' Presiona Cualquier Tecla');
              Resp:=ReadKey;
              Move(XApunt^,Dir_Screen^,4000);
              Release(Xapunt);
              Exit
            End
          End
        End
      End
    End
  End
End
End

```

```

Else
  Begin
    J:=Incognitas[I].Nodo;
    Kn:= Incognitas[I].Variable;
    With Matriz_Nodos[J] Do
      Case Kn Of
        4: Begin
          Presion:=Presion+Fact*X[I];
          If Presion < 0 Then
            Begin
              Bandera_Stop:=True;
              Writeln('  PRESION NEGATIVA ');
              Writeln(' Presiona Cualquier Tecla');
              Resp:=ReadKey;
              Move(XApunt^,Dir_Screen^,4000);
              Release(Xapunt);
              Exit;
            End
          End;
        5: Begin
          Gasto:=(Abs(Gasto)+Fact*X[I])*Derivada_Gasto
            (Gasto);
          End;
        End
      End
    End
  End;
Until (Iter > 25) or (Fmax < tol);
Move(XApunt^,Dir_Screen^,4000);
Release(Xapunt);
End;

End.

```

Unit FLANIGAN;

INTERFACE

USES Crt,Colores,Calculos,Stoner,Printer;

```
PROCEDURE Proc_Flanigan(Am           : Mat;
                        Det_Am       : Real;
                        Nnodos,Nconectores : Byte;
                        Temp,Sg,Tol,Ro,Mu,
                        Costo_Inicial  : Real;
                        Var Bandera_Eta : Boolean;
                        Var Bandera_Converge,
                        Gas_Liq        : Boolean);
```

IMPLEMENTATION

```
FUNCTION Der_Costo_Diam(L,Diam,P1,Tasa_Int,Esf_Rup,Fac_Const,Fac_Uni;
                        Real;Num_Ano:Integer):Real;
```

```
Const
  Cos_Tub      = 440;
  Cos_Coloc    = 360;
  Pend_Cos_Tub = 4.583;
  Pend_Cos_Coloc = 3.75;
```

```
Var
  A,B,Fac_Rec_Cap,SFET      : Real;
```

Begin

```
A:=Cos_Tub + Cos_Coloc;
B:=Pend_Cos_Tub + Pend_Cos_Coloc;
Fac_Rec_Cap:=Tasa_Int/100*Exp (Num_Ano*Ln(1+Tasa_Int/100))/
  (Exp (Num_Ano*Ln(1+Tasa_Int/100)) -1);
SFET:=Esf_Rup*Fac_Const*Fac_Uni;
Der_Costo_Diam:=28.2*Fac_Rec_Cap*L*( P1/(2*(SFET-P1)) +
  Sqr(P1)/(4*Sqr(SFET-P1)) )*( 2*A*Diam + 3*B*
  Sqr(Diam) )
```

End;

```
FUNCTION Der_Costo_Long(Diam,P1,Tasa_Int,Esf_Rup,Fac_Const,Fac_Uni,
                        Cos_Opn:Real;Num_Ano:Integer):Real;
```

```
Const
  Cos_Tub      = 440;
  Cos_Coloc    = 360;
  Pend_Cos_Tub = 4.583;
  Pend_Cos_Coloc = 3.75;
```

```
Var
  A,B,Fac_Rec_Cap,SFET      : Real;
```

```

Begin
  A:=Cos_Tub + Cos_Coloc;
  B:=Pend_Cos_Tub + Pend_Cos_Coloc;
  Fac_Rec_Cap:=Tasa_Int/100*Exp (Num_Ano*Ln(1+Tasa_Int/100))/
    (Exp (Num_Ano*Ln(1+Tasa_Int/100)) -1);
  SFET:=Esf_Rup*Fac_Const*Fac_Uni;
  Der_Costo_Long:=28.2*Fac_Rec_Cap*( F1/(2*(SFET-P1)) +
    Sqr(P1)/(4*Sqr(SFET-P1)) )*( A*Sqr(Diam) +
    B*Sqr(Diam)*Diam ) + Cos_Opn
End;

FUNCTION Der_Costo_Hp(Tasa_Int,Cos_Mtto:Real;Num_Ano:Integer):Real;

Const
  Cos_Comp = 960;
  Valor_Gas = 1.0;
Var
  Fac_Rec_Cap      : Real;

Begin
  Fac_Rec_Cap:=Tasa_Int/100*Exp (Num_Ano*Ln(1+Tasa_Int/100))/
    (Exp (Num_Ano*Ln(1+Tasa_Int/100)) -1);
  Der_Costo_Hp:=Fac_Rec_Cap*Cos_Comp + 87.6*Valor_Gas + Cos_Mtto
End;

FUNCTION Der_Costo_Presion(L,Diam,P1,Tasa_Int,Esf_Rup,Fac_Const,
  Fac_Uni:Real;Num_Ano:Integer):Real;

Const
  Cos_Tub      = 440;
  Cos_Coloc    = 360;
  Pend_Cos_Tub = 4.583;
  Pend_Cos_Coloc = 3.75;
Var
  A,B,Fac_Rec_Cap,SFET      : Real;

Begin
  A:=Cos_Tub + Cos_Coloc;
  B:=Pend_Cos_Tub + Pend_Cos_Coloc;
  Fac_Rec_Cap:=Tasa_Int/100*Exp (Num_Ano*Ln(1+Tasa_Int/100))/
    (Exp (Num_Ano*Ln(1+Tasa_Int/100)) -1);
  SFET:=Esf_Rup*Fac_Const*Fac_Uni;
  Der_Costo_Presion:=28.2*Fac_Rec_Cap*L*( SFET/(2*Sqr(SFET-P1)) +
    SFET*P1/(2*Sqr(SFET-P1)*(SFET-P1)) )*
    ( A*Sqr(Diam) + B*Sqr(Diam)*Diam )
End;

```

```
FUNCTION Interpol_Lagrange(Xeta,Y:Vec_4;X:Real):Real;
```

```
Var  
  Sum          : Real;  
  I,K          : Integer;  
  L            : Vec_4;
```

```
Begin  
  Sum:=0;  
  For K:=1 To 4 Do  
  Begin  
    L[K]:=1;  
    For I:= 1 To 4 Do  
      If I<>K Then  
        L[K]:=L[K]*(X-Xeta[I])/(Xeta[K]-Xeta[I])  
    End;  
    For I:= 1 To 4 Do  
      Sum:=Sum+Y[I]*L[I];  
      Interpol_Lagrange:=Sum  
    End;  
  End;  
End;
```

```
FUNCTION Calc_Eta_Opt(Xeta,Y:Vec_4):Real;
```

```
Var  
  X,Delta_X,Ymin,Ymax,Eta : Real;  
  I                        : Integer;
```

```
Begin  
  Ymin:=1E09;  
  X:=0;  
  Delta_X:=Xeta[4]/30;  
  For I:= 1 To 30 Do  
  Begin  
    X:=X+Delta_X;  
    Ymax:=Interpol_Lagrange(Xeta,Y,X);  
    If Ymax < Ymin Then  
      Begin  
        Ymin:=Ymax;  
        Eta:=X  
      End  
    End;  
  End;  
  Calc_Eta_Opt:=Eta  
End;
```

```
PROCEDURE Proc_Flanigan;
```

```
Const  
  Delta_Decision : Array[1..5] Of Real = ( (D)0.5 , (L)1 , (HP)500 ,  
                                             (P)50 , (Q)20 );
```

```

Var
  JJ, I, J, K, Kn, KJ, M, KJ_Des, KnKn, MKn, KJJ           : Integer;
  Aux, MAXDR, K_1, K_2, Rc, Z, Zm, Zk, Expos, Constante, P1,
  DeltaP, ETA, Delta_ETA, Delta_N, Det_Bm, Correccion1,
  Deltap_elev, Cons1, Cons2, Nre, Fac_fric, Qc, Correccion : Real;
  Signo                                                    : Integer;
  Tubo_Compresor, Bandera                                : Boolean;
  Der_Restrng                                             : Array[1..50] Of Real;
  Xeta, Y                                                 : Vec_4;
  Bm                                                       : Mat;
  Xdummy                                                  : Vec;
  Matriz_Conector_Aux                                    : Vec_Conj;
  Matriz_Nodos_Aux                                       : Vec_Nod;
  Jvec, JV                                               : Array[1..50] Of Byte;
  BAndera_Stop : Boolean;
Begin

```

```

( Evaluacion de las derivadas de la funcion COSTO respecto a
  las Incognitas.... )

```

```

  Bandera:=False;
  Bandera_Converge:=True;
  FillChar(Bm, SizeOf(Bm), 0);
  For I:=1 to NConectores Do
  With Matriz_Conector[I] Do
  Begin
    P1:=Matriz_Nodos[Nodo_Ini].Presion;
    If Matriz_Nodos[Nodo_Fin].Presion > P1 Then
      P1:= Matriz_Nodos[Nodo_Fin].Presion;
    Aux:=0;
    Kn:=0;
    For J:=1 to NNodos do
      If Incognitas[J].Conecto = I Then Kn:=J;
      If Kn > 0 Then
        Begin
          Case Incognitas[Kn].Variable Of
            1: Aux:=Der_Costo_Diam(Longitud, Diametro, P1, DatosGral.
              Tasa1, Esfuerzos[Round(Cedencia)],
              Construccion[Round(Construc)],
              Longitudinal[Round(Union)],
              DatosGral.Vida_Eco1);
            2: Aux:=Der_Costo_Long(Diametro, P1, DatosGral.Tasa1,
              Esfuerzos[Round(Cedencia)],
              Construccion[Round(Construc)],
              Longitudinal[Round(Union)],
              DatosGral.Costo_Opni, DatosGral.
              Vida_Eco1);
            3: Aux:=Der_Costo_HP(DatosGral.Tasa2, DatosGral.Costo_Opn2,
              DatosGral.Vida_Eco2);
          End;
        End;
      End;
    End;
  End;

```

```

        Bm[1,1+Kn]:=Aux
    End
End;
For I:=1 to NNodos Do
Begin
    Presiono_Tecla;
    Aux:=0;
    Kn:=0;
    For J:= 1 To NNodos Do If Incognitas[J].Nodo = I Then Kn:=J;
    If Kn > 0 Then
        Case Incognitas[Kn].Variable Of
        4: Begin
            Jj:=0;
            For J:= 1 To NConectores Do
            If ( I In[Matriz_Conector[J].Nodo_Ini,
                Matriz_Conector[J].Nodo_Fin] ) Then
                Begin
                    Inc(Jj);
                    Jv[Jj]:=J;
                    If I = Matriz_Conector[J].Nodo_Ini Then
                        Jvec[Jj]:= Matriz_Conector[J].Nodo_Fin
                    Else
                        Jvec[Jj]:= Matriz_Conector[J].Nodo_Ini;
                End;
            J:=1;
            While J <= Jj Do
            Begin
                Presiono_Tecla;
                If ( Matriz_Nodos[I].Presion > Matriz_Nodos[Jvec[Jj]].
                    Presion )
                    AND Matriz_Conector[ Jv[Jj] ].Tipo_Conector Then
                    With Matriz_Conector[ Jv[Jj] ] Do
                        Aux:=Aux+Der_Costo_Presion(Longitud,Diametro,
                            Matriz_Nodos[I].Presion,
                            DatosGral.Tasal,
                            Esfuerzos[Round(Cedencia)],
                            Construccion[Round(Construc)],
                            Longitudinal[Round(Union)],
                            DatosGral.Vida_Ecol);
                Inc(J);
            End;
        5: Aux:=0;
        End;
    Bm[1,1+Kn]:=Aux
End;

```

```

For I:=1 to NNodes do
  For J:=1 to Nnodes do
    Bm[I+I,1+J]:=Am[I,J];

```

( ----- )

```

MaxDr:=0;
For KJ:=1 to Num_Var_Decision Do
Begin
  Presiono_Tecla;
  For I:= 1 To Nnodes DO Bm[I+I,1]:=0;
  If Decision[KJ].Conecto < 0 Then
  Begin
    Presiono_Tecla;
    P1:=Matriz_Nodos[Matriz_Conector[Decision[KJ].Conecto].
      Nodo_Ini].Presion;
    If Matriz_Nodos[Matriz_Conector[Decision[KJ].Conecto].
      Nodo_Fin].Presion > P1 Then
      P1:= Matriz_Nodos[Matriz_Conector[Decision[KJ].Conecto].
        Nodo_Fin].Presion
  End
Else
  Begin
    I:=Decision[KJ].Nodo;
    P1:=Matriz_Nodos[ I ].Presion;
  End;
  With Matriz_Conector[Decision[KJ].Conecto] Do
  Case Decision[KJ].Variable Of
    1: Aux:=Der_Costo_Diam(Longitud,Diametro,P1,DatosGral.Tasa1,
      Esfuerzos[Round(Cedencia)],
      Construccion[Round(Construc)],
      Longitudinal[Round(Union)],DatosGral.
      Vida_Eco1);
    2: Aux:=Der_Costo_Long(Diametro,P1,DatosGral.Tasa1,
      Esfuerzos[Round(Cedencia)],
      Construccion[Round(Construc)],
      Longitudinal[Round(Union)],
      DatosGral.Costo_Opn1,DatosGral.Vida_Eco1);
    3: Aux:=Der_Costo_HP(DatosGral.Tasa2,DatosGral.Costo_Opn2,
      DatosGral.Vida_Eco2);

    4: Begin
      JJ:=0;
      For J:= 1 To Nconectores Do
        If ( I In[Matriz_Conector[J].Nodo_Ini,
          Matriz_Conector[J].Nodo_Fin] ) Then

```



```

Begin
  Inc(JJ);
  Presiono_Tecla;
  Jv[JJ]:=J;
  If I = Matriz_Conector[J].Nodo_Ini Then
    Jvec[JJ]:= Matriz_Conector[J].Nodo_Fin
  Else
    Jvec[JJ]:= Matriz_Conector[J].Nodo_Ini;
  End;
  J:=1;
  While J <= JJ Do
  Begin
    If ( Matriz_Nodos[I].Presion > Matriz_Nodos[Jvec[JJ]].
      Presion )
      AND Matriz_Conector[ Jv[JJ] ].Tipo_Conector Then
      With Matriz_Conector[Jv[JJ] ]Do
      Aux:=Aux+Der_Costo_Presion(Longitud,Diametro,F1,
        DatosGral.Tasal,
        Esfuerzos[Round(Cedencia)],
        Construccion[Round(Construc)],
        Longitudinal[Round(Union)],
        DatosGral.Vida_Ecol);
      Inc(J);
    End
  End;
  Aux:=0
End;
Bm[1,1]:=Aux;

```

```

-----
)

For M:=1 to Nodos Do
Begin
  For J:=1 to NConectores Do
  With Matriz_Conector[J] Do
  Begin
    Presiono_Tecla;
    Aux:=0;
    If Not ((Nodo_Ini <> M) and (Nodo_Fin <> M)) Then
      Begin
        K:=0;
        Kn:=0;
        Repeat
          INC(K);
          Presiono_Tecla;
          If Nodo_Ini = M then
            Begin
              If Nodo_Fin = K Then Kn:=K
            End

```

```

Else If Nodo_Ini = K Then Kn:=K
Until Kn = K;
DeltaP:=Matriz_Nodos[M].Presion-Matriz_Nodos[Kn].Presion;
Signo:=Round(DeltaP/Abs(DeltaP));
KnKn:=-Kn;
MKn:=-M;
For KJJ:= 1 To Num_Var_Decision Do
Begin
Presiono_Tecla;
If Decision[KJJ].Variable = 4 Then
Begin
If Decision[KJJ].Nodo = Kn Then KnKn:=Kn;
If Decision[KJJ].Nodo = M Then MKn:=M
End
End;
For KJJ:= 1 To Nodos Do
Begin
Presiono_Tecla;
If Incognitas[KJJ].Variable = 4 Then
Begin
If Incognitas[KJJ].Nodo = Kn Then KnKn:=Kn;
If Incognitas[KJJ].Nodo = M Then MKn:=M
End
End;
If Not Tipo_Conector Then
Begin
Cons_Comp_Bomb(Temp,Eficien/100,Matriz_Nodos[M].
Presion,Matriz_Nodos[Kn].Presion,Sg,
K_2,K_1,Rc,Z, Signo,MKn,KnKn);
If Z = 0 Then
Begin
Bandera_Converge:=True;
Exit;
End;
Tubo_Compresor:=False
End
Else
Begin
Cons_Tuberia(H1,H2,Matriz_Nodos[M].Presion,
Matriz_Nodos[Kn].Presion,Sg,Temp,Ro,Mu,
Eficien/100,Expos,Constante,Cons1,Cons2,
DeltaP,DeltaP_Elev,Zm,Zk,Signo,MKn,KnKn);
If ( Zm = 0 ) Or ( Zk = 0 ) Then
Begin
Bandera_Converge:=True;
Exit;
End;
If ( Diametro > 0 ) And ( Longitud > 0 ) Then

```

```

Begin
  If Not Gas_Liq Then
    Rate(Constante,Abs(DeltaP)-DeltaP_Elev,Diametro,
      Longitud,Ro,Mu,Rug,Nre,Fac_Fric,Qc);
  End;
  Tubo_Compresor:=True
End;
Aux:=0;
If Decision[KJ].Conecto = J Then
  Case Decision[KJ].Variable of
    1: Aux:=Derivada_Diametro(Signo,Diametro,DeltaP,Rug,
      DeltaP_Elev,Nre,Fac_Fric,
      Longitud,Consl,Cons2,
      Constante);
    2: Aux:=Derivada_Longitud(Signo,Diametro,DeltaP,
      DeltaP_Elev,Nre,Fac_Fric,
      Longitud,Consl,Cons2,
      Constante);
    3: Aux:=Derivada_HP(Signo,Rc,K_1,K_2,DeltaP);
  End;
  Case Decision[KJ].Variable of
    4: Begin
      If Decision[KJ].Nodo = Kn Then
        Begin
          If Matriz_Nodos[M].Presion >
            Matriz_Nodos[Kn].Presion
            Then Signo:=-Signo;
          Aux:=Derivada_Presion(Constante,Consl,Cons2,
            DeltaP,Expos,
            Matriz_Nodos[Kn].
            Presion,Zk,Diametro,
            Longitud,K_1,K_2,Rc,
            Hp,Nre,Fac_Fric,
            DeltaP_Elev,
            Tubo_Compresor,Signo);
        End;
      If Decision[KJ].Nodo = M Then
        Begin
          If Matriz_Nodos[Kn].Presion >
            Matriz_Nodos[M].Presion
            Then Signo:=-Signo;
          Aux:=Derivada_Presion(Constante,Consl,Cons2,
            DeltaP,Expos,
            Matriz_Nodos[M].
            Presion,Zm,Diametro,
            Longitud,K_1,K_2,Rc,
            Hp,Nre,Fac_Fric,
            DeltaP_Elev,
            Tubo_Compresor,Signo);
        End;
      End;
    End;
  End;

```

```

5: Aux:=Derivada_Gasto(Matriz_Nodos[Decision[KJ].
Nodo].Gasto);
End;
Bm[1+M,1]:=Bm[1+M,1]+Aux;
End;
End;
End;
( Calculo del determinante de Bm )

```

```

Solucion_Sist(BM,Nnodos+1,Xdummy,Det_Bm,Bandera,Bandera_stop);
If Bandera_Stop Then Exit;

```

```

( ----- )

```

```

Der_Restring[KJ]:= Det_Bm/Det_Am;
Presiono_Tecla;
If MAXDR < ABS(Der_Restring[KJ]) Then
Begin
MAXDR:=ABS(Der_Restring[KJ]);
KJ_Des:= KJ
End;
End;
Cuadros_Restringe;
Gotoxy(5,2);Write('Iter= ',Iteraciones:2);
For J:= 1 To Num_Var_Decision Do
Begin
Gotoxy(2,J+2);
Write(' ',J,' ',DER_REstring[J]:10:1);
End;
If MAXDR > 10 {Tol} Then Bandera_Converge:=False;

```

```

( ----- )

```

```

If Not Bandera_Converge Then
Begin
If Not Bandera_Eta Then
Begin
Move( Matriz_Conector , Matriz_Conector_aux,SizeOf
(Matriz_Conector ) );
Move( Matriz_Nodos , Matriz_Nodos_aux , SizeOf(Matriz_Nodos) );
Bandera_Eta:=True;
ETA:=Delta_Decision[ Decision[KJ_Des].Variable]/MAXDR;
Delta_ETA:=ETA/3;
XETA[1]:=0;

```

```

Y[I]:=Costo_Inicial;
Delta_N:=0;
For I:=1 to 3 do
Begin
  Presiono_Tecla;
  Delta_N:=Delta_N + Delta_ETA;
  For J:=1 to Num_Var_Decision do
  Begin
    K:=Decision[J].Conecto;
    With Matriz_Conector_Aux[K] do
    Begin
      Correccion:=Delta_N*Der_Restring[J];
      Case Decision[J].Variable Of
        1: Diametro:=Matriz_Conector[K].Diametro-Correccion;
        2: Longitud:=Matriz_Conector[K].Longitud-Correccion;
        3: HP:=Matriz_Conector[K].HP-Correccion;
      Else
        Begin
          K:=Decision[J].Nodo;
          With Matriz_Nodos_Aux[K] do
            Case Decision[J].Variable Of
              4: Presion:=Matriz_Nodos[K].
                Presion-Correccion;
              5: Gasto:=Matriz_Nodos[K].Gasto-Correccion;
            End
          End
        End
      End
    End
  End
End;
End;
Y[I+1]:=Funcion_Costo(Matriz_Conector_Aux,Matriz_Nodos_Aux);
XETA[I+1]:=Delta_N;
End;
Eta_Opt:=Calc_Eta_Opt(Xeta,Y);
End;
For J:=1 to Num_Var_Decision do
Begin
  Presiono_Tecla;
  K:=Decision[J].Conecto;
  With Matriz_Conector[K] do
  Begin
    Correccion:=Eta_Opt*Der_Restring[J];
    Case Decision[J].Variable Of
      1: Begin
          Diametro:=Diametro-Correccion;
          If Diametro < 1.5 then
            Begin
              Diametro:=0;
              Longitud:=0;
            End
          End;
        End;
    End;
  End;
End;

```

```

2: Begin
    Longitud:=Longitud-Correccion;
    If Longitud < 0 Then
    Begin
        Longitud:=0;
        Diametro:=0
    End
    End;
3: Begin
    HP:=HP-Correccion;
    If HP < 0 Then HP:=0
    End;
Else
Begin
    K:=Decision[J].Nodo;
    With Matriz_Nodos[K] do
    Begin
        Case Decision[J].Variable Of
        4: Begin
            Presion:=Presion-Correccion;
            If Presion < 0 Then Presion:=0
            End;
        5: Gasto:=Gasto-Correccion;
        End
        End
        End
        End
    End;
End;
End;
End;
End;
End.

```

Unit CALCULOS;

INTERFACE

Uses Crt,Colores;

Const

Potencia : Array[1..3,1..5] Of Real=((0.00043349 ,1,0.5,0.5,2.6667),  
(0.00043587,1.0788,0.5394,0.4606,  
2.6182),(0.000737,1.02,0.51,0.4901,  
2.53) );

Type

VectorI = Array[1..100] of Integer;  
Mat = Array[1..50,1..50] of Real;  
Vec = Array[1..100] of Real;  
Vec\_4 = Array[1..4] Of Real;  
Arreglo\_Buffer = Array[1..4000] Of Byte;  
Apuntador = ^Arreglo\_Buffer;

Var

Resp : Char;  
Ro,Mu : Real;  
X,F : Vec;  
Am : Mat;  
I,J,K,Tipo : Byte;  
SINO : String[2];  
Apunt : Apuntador;  
Gas\_Liq : Boolean;  
Vector\_Z : Array[1..50] Of Real;

FUNCTION Calc\_Ks(Sg:Real):Real;

PROCEDURE Factor\_Compre(T,P,Sg:Real; Var Z,Comp,U:Real);

PROCEDURE Cons\_Comp\_Bomb(Temp,Efi,Presion\_Suc,Presion\_Desc,Sg:Real;  
Var K\_E,K\_1,Rc,Z:Real;Signo,Isuc,Ides:  
Integer);

PROCEDURE Cons\_Tuberia(Hini,Hfin,PresionM,PresionK,Sg,Temp,Ro,Mu,Efi:  
Real;Var Expos,Constante,Cons1,Cons2,DeltaP,  
DeltaP\_Elev,ZM,ZK:Real;Signo,M,K:Integer);

FUNCTION Calc\_Gasto\_Comp\_Bomb(DeltaP,Hp,K1,K2,Rc:Real; Signo:Integer):  
Real;

PROCEDURE Rate(Consta,DeltaP\_Fric,Diam,Long,Ro,Mu,Rug:Real;Var Nre,  
Fac\_Fric,Qc:Real);

PROCEDURE Calc\_Gasto\_Tuberia(Constante,DeltaP,DeltaP\_Elev,Diam,Long,  
Ro,Mu,Rug:Real;Var Nre,Fac\_Fric,Qc:Real);

FUNCTION Derivada\_Diametro(Signo:Integer;Diam,DeltaP,Rug,DeltaP\_elev,  
Nre,Fac\_Fric,Long,Cons1,Cons2,Constante:  
Real):Real;

```

FUNCTION Derivada_Longitud(Signo: Integer; Diam, DeltaP, DeltaP_Elev, Nre,
    Fac_Fric, Long, Cons1, Cons2, Constante: Real);
    Real;
FUNCTION Derivada_HP(Signo: Integer; Rc, K_1, K_2, DeltaP: Real): Real;
FUNCTION Derivada_Presion( Constante, Cons1, Cons2, DeltaP, Expos, Presion,
    Factor_Z, Diam, Long, K_1, K_2, Rc, Hp, Nre,
    Fac_Fric, DeltaP_Elev: Real; Tubo_Compresor:
    Boolean; Signo: Integer): Real;
FUNCTION Derivada_Gasto(Gasto: Real): Real;
FUNCTION Funcion_Costo(Matriz_1: Vec_Con; Matriz_2: Vec_Nod): Real;
PROCEDURE DecomP(N: Byte; Var A: Mat; Var Ips: VectorI; Var Deter: Real);
PROCEDURE Solucion_Sist(A: Mat; N: Byte; Var X: Vec; Var Deter: Real;
    Bandera: Boolean; Var Bandera_Stop: Boolean);

```

#### IMPLEMENTATION

```

FUNCTION Funcion_Costo;
Const
    Cos_Tub = 440;
    Cos_Coloc = 360;
    Pend_Cos_Tub = 4.583;
    Pend_Cos_Coloc = 3.75;
    Cos_Comp = 960;
    Valor_Gas = 1;
Var
    Suma, Fac_Rec_Cap, A, B, SFET, P1 : Real;
    I : Byte;
Begin
    Suma:=0;
    For I:= 1 to DatosGral.NConectores Do
        With Matriz_1[I] Do
            Begin
                If Not Tipo_Conector Then
                    Begin
                        Fac_Rec_Cap:=DatosGral.Tasa2/100*Exp (DatosGral.Vida_Eco2*
                            Ln(1+DatosGral.Tasa2/100))/(Exp (DatosGral.
                                Vida_Eco2*Ln(1+DatosGral.Tasa2/100)) -1);
                        Suma:= Suma + ( Fac_Rec_Cap*Cos_Comp + 87.6*Valor_Gas +
                            DatosGral.Costo_Opn2*1000 ) * Hp;
                    End
                Else
                    Begin
                        Fac_Rec_Cap:=DatosGral.Tasa1/100*Exp(DatosGral.Vida_Eco1*
                            Ln(1+DatosGral.Tasa1/100))/( Exp(DatosGral.
                                Vida_Eco1*Ln(1+DatosGral.Tasa1/100) ) - 1);
                        A:=Cos_Tub + Cos_Coloc;
                        B:=Pend_Cos_Tub + Pend_Cos_Coloc;
                        SFET:= Esfuerzos(Round(Cedencia))*
                            Construccion[Round(Construc)]*
                            Longitudinal[Round(Union)];
                    End
                End
            End
        End
    End

```



```

P1:=Matriz_2[Nodo_Ini].Presion;
If Matriz_2[Nodo_Fin].Presion > P1 Then
P1:= Matriz_2[Nodo_Fin].Presion;

Suma:= Suma + 28.2*Fac_Rec_Cap*Longitud*( P1/(2*(SFET-P1)) +
Sqr(P1)/(4*Sqr(SFET-P1)) ) * ( A*Sqr(Diametro)+B*
Sqr(Diametro)*Diametro ) + DatosGral.Costo_Opni*
Longitud*1000;

End
End;

Funcion_Costo:=Suma;

End;

FUNCTION Calc_Ks;

Var
Densg : Real;

Begin
Densg:=28.97*Sg;
Calc_Ks:=(1545.31-SQR(2387982.99-(2328.4*(1041.31-Densg))))/1164.2
End;

PROCEDURE Factor_Compre;

Const
A:Array[1..8] Of Real = (0.31506237,-1.0467099,-0.57832729,0.53530771,
-0.61232032,-0.10488813,0.68157001,
0.63446549);

Var
Ie,Iter : Integer;
Temp,Pre,Tr,Pcri,Pr,
T1,T2,T3,T4,T5,Dr,Dr2,
Dr3,Dr4,Dr5,Dp,Dr1,Cr,
H,Y,Rj,R,Dz : Real;
Band : Boolean;

Begin
Z:=1;
U:=1;
Ie:=0;
Temp:=492.0+T*1.8;
Pre:=P;
Tr:=Temp/(170.491+307.344*Sg);
Pcri:=709.604 - 58.718*Sg;
Pr:=Pre/Pcri;
If ((Tr < 1.05) or (Tr > 3)) or ((Pr < 0) or (Pr > 15)) Then

```

```

Begin
  Ie:=1;
  Writeln('Z .. fuera de rango ');
  Writeln('Presiona Cualquier Tecla');
  Resp:=ReadKey;
  Z:=0;
  Exit
End
Else
Begin
  T1:=A[1]*Tr+A[2]+A[3]/Sqr(Tr);
  T2:=A[4]*Tr+A[5];
  T3:=A[5]*A[6];
  T4:=A[7]/Sqr(Tr);
  T5:=A[8];
  Dr:=1.0;
  Iter:=1;
  Band:=True;
  While (Iter <= 10) and (Band) Do
  Begin
    Presione_Tecla;
    Dr2:=Sqr(Dr);
    Dr3:=Dr2*Dr;
    Dr4:=Sqr(Dr2);
    Dr5:=Dr3*Dr2;
    P:=(Tr+T1*Dr+T2*Dr2+T3*Dr5)*Dr+T4*Dr3*(1+T5*Dr2)*Exp(-T5*Dr2);
    Dp:=(Tr+2.0*T1*Dr+3.0*T2*Dr2+6.0*T3*Dr5+T4*Dr2*Exp(-T5*Dr2)*
      (3.0+3.0*T5*Dr2-2.0*Sqr(T5)*Dr4));
    Dr1:=(Dr-(P-0.27*Pr)/Dp);
    If (Dr1 <= 0) Then Dr1:=0.5*Dr;
    If (Dr1 >= 2.2) Then Dr1:=Dr+0.9*(2.2-Dr);
    If (Abs(Dr-Dr1) < 0.00001) Then Band:=False
    Else Dr:=Dr1;
    Iter:=SUCC(Iter)
  End; (* End While *)
  Z:=0.27*Pr/(Dr1*Tr);
  Dz:=T1/Tr+2.0*T2/Tr*Dr+5.0*T3*Dr4/Tr+(1.0+T5*Dr2-Sqr(T5)*Dr4)*
    2.0*T4/Tr*Dr1*Exp(-T5*Dr2);
  Cr:=1.0/Pr-0.27*Dz/(Sqr(Z)*Tr*(1.0+Dr1/Z*Dz));
  Comp:=Cr/Pr*1
End;
H:=3.5+986.0/Temp+0.29*8g;
Y:=2.4-0.2*H;
Rj:=(9.4+0.58*8g)*Exp(1.5*Ln(Temp))/(209.0+550.0*8g+Temp);
R:=8g*Pre/(23.0*Z*Temp);
U:=0.0001*Rj*Exp(H*Exp(Y*Ln(R)))
End;

PROCEDURE Cons_Comp_Bomb;
Var
  U,Comp,Ks: Real;

```

```

Begin
  If Gas_Liq Then
    Begin
      Ks:=Calc_Ks(Sg);
      K_1:=3.027*DatosGral.Presion_Base/(( DatosGral.Temp_Base + 460 )*(
        (Temp+460)*(Ks/(Ks-1)))/Efi);
      If Signo < 0 Then
        Begin
          If Isuc < 0 Then Z:= Vector_Z[Abs(Isuc)]
          Else Factor_Compre(Temp,Presion_Suc,Sg,Z,Comp,U);
          If Z = 0 Then Exit;
          Rc:=Presion_Desc/Presion_Suc;
        End
      Else
        Begin
          If Ides < 0 Then Z:=Vector_Z[Abs(Ides)]
          Else Factor_Compre(Temp,Presion_Desc,Sg,Z,Comp,U);
          If Z = 0 Then Exit;
          Rc:=Presion_Suc/Presion_Desc
        End;
      K_2:=Z*(Ks-1)/Ks
    End
  Else
    K_1:=Efi/1.692E-05
  End;
End;

```

```

PROCEDURE Cons_Tuberia;
Var
  Js,X,Za,SS,Comp,U : Real;

```

```

Begin
  If Gas_Liq Then
    Begin
      If M < 0 Then Zm:= Vector_Z[Abs(M)]
      Else Factor_Compre(Temp,PresionM,Sg,ZM,Comp,U);
      If ZM = 0 Then Exit;
      If K < 0 Then ZK:= Vector_Z[Abs(K)]
      Else Factor_Compre(Temp,PresionK,Sg,ZK,Comp,U);
      If ZK = 0 Then Exit;
      If HIni <> HFin Then
        Begin
          X:= HFin - HIni;
          If Signo < 0 Then X:=HIni - HFin;
          Za:=(ZM+ZK)/2.0;
          SS:=0.0375*Sg*X/(Temp+460)/Za;
          Expos:=Exp(SS);
          Js:=(Expos - 1 )/SS;
        End
      End
    End
  End

```

```

Else
  Begin
    Expos:=1;
    Js:=1
  End;
  Constante:=PotencialMetodo,1]*Exp(PotencialMetodo,2]*Ln
  (( DatosGral.Temp_Base +460 )/DatosGral.
  Presion_Base ))*Exp( Potencial[Metodo,3]*Ln
  ( 1/((Temp+460)*Js) ) ))*Exp( Potencial[Metodo,4]*
  Ln(1/Sg) ))*Efi;
  DeltaP:=Sqr(PresionM)/ZM-Expos*Sqr(PresionK)/ZK
End
Else
  Begin
    If HIni <> HFin Then
      Begin
        X:=HFin-Hini;
        If Signo < 0 Then X:=Hini-HFin;
        DeltaP_Elev:=0.433*Ro*X
      End
    Else
      DeltaP_Elev:=0;
      Constante:=Efi/SQRT(0.06056*Ro);
      Cons1:=Efi/(0.04204*Mu);
      Cons2:=Efi/Exp(0.595*Ln(0.00811*Exp(0.6808*Ln(Ro))*Exp(0.3192*
      Ln(Mu))))
    End
  End;
End;

FUNCTION Calc_Gasto_Comp_Bomb;
Begin
  If Gas_Liq Then Calc_Gasto_Comp_Bomb:=-Signo*Hp/(K1*(Exp(K2*
  Ln(Rc))-1))
  Else Calc_Gasto_Comp_Bomb:=-Signo*K1*Hp/ABS(DeltaP)
End;

PROCEDURE Rate;
Var
  A,B,C,Qs      : Real;
  Itera         : Byte;
  Bandera       : Boolean;
Begin
  Itera:=0;
  Bandera:=False;
  Qs:=( 3.28*Ln( 2249.831/Mu*Sqrt(Diam*Ro*DeltaP_Fric/Long))/
  2.302586+ 1)/( 0.492*Sqrt(Ro*Long/( Exp( 5*Ln(Diam) ) *
  DeltaP_Fric ) ) );
  Repeat
    Nre:=92.2*Qs*Ro/( Diam*Mu );
    If Nre <= 2300 Then Fac_Fric:= 64/Nre;
    If Nre > 2300 Then

```

```

Begin
  A:=-2.0 * Ln( Rug/3.7 + 12/Nre )/2.302586;
  B:=-2.0 * Ln( Rug/3.7 + 2.51*A/Nre )/2.302586;
  C:=-2.0 * Ln( Rug/3.7 + 2.51*B/Nre )/2.302586;
  Fac_Fric:= Exp( -2.0* Ln ( ( A -(B-A)*(B-A)/
    (C-2*B+A) ) ) );
End;
Qc:=Consta*sqrt( Exp(5*Ln(Diam))*DeltaP_Fric/(Fac_Fric*Long) );
If ABS(Qc-Qs) < 0.1 Then Bandera:=True
Else Qs:=Qc;
Inc(Itera);
Until (Itera > 10 ) Or Bandera;
End;

PROCEDURE Calc_Gasto_Tuberia;
Begin
  Qc:=0;
  If ( Diam > 0 ) And ( Long > 0 ) Then
    Begin
      If Gas_Liq Then Qc:=Constante*Exp(Potencia[Metodo,3]*
        Ln(Abs(DeltaP)))*Exp(Potencia[Metodo,5]*
        Ln(Diam))/Exp(Potencia[Metodo,3]*Ln(Long))
      Else Rate(Constante,Abs(DeltaP)-DeltaP_Elev,Diam,Long,Re,Mu,Rug,
        Nre,Fac_Fric,Qc);
    End
  End;
End;

FUNCTION Derivada_Diametro;
Var
  DeltaP_Fric,Termino1,Termino2      t Real;
Begin
  Derivada_Diametro:=0;
  If Diam > 0 Then
    Begin
      If Gas_Liq Then
        Derivada_Diametro:=Signo*Potencia[Metodo,5]*Constante*Exp
          ((Potencia[Metodo,5]-1)*Ln(Diam))*
          Exp( Potencia[Metodo,3]*Ln(Abs( DeltaP )) ) /
          Exp( Potencia[Metodo,3]*Ln(Long) )
      Else
        Begin
          DeltaP_Fric:=Abs(DeltaP)-DeltaP_Elev;
          If Nre <= 2300 Then Derivada_Diametro:=Signo*4*Const1*Exp(3*
            Ln(Diam))*DeltaP_Fric/
            Long;
          If Nre > 2300 Then
            Begin
              Termino1:=Exp(5*Ln(Diam))*DeltaP_Fric/(Fac_Fric*Long);
              Termino2:=Rug/Diam+21.25/Exp(0.9*Ln(Nre));
            End
          End
        End
      End
    End
  End;

```

```

Derivada_Diametro:=Signo*0.5*Constante*(Termino1*Fac_Fric*
1.7372*(1.14-2*Ln(Termino2)/2.302586)
*(Rug/Diam+19.125/Exp(0.9*Ln(Nre)))/
(Diam*Termino2)+5*Termino1/Diam)/
Sqrt(Termino1);

End
End
End;

FUNCTION Derivada_Longitud;
Var
DeltaP_Fric :Real;
Begin
Derivada_Longitud:=0;
If Long > 0 Then
Begin
If Gas_Liq Then
Derivada_Longitud:=-Signo*Potencia[Metodo,3]*Constante*Exp(Potencia
[Metodo,5]*Ln(Diam))*Exp(Potencia[Metodo,3]*
Ln(Abs(DeltaP)))/Exp((Potencia[Metodo,3]+2)*
Ln(Long))
Else
Begin
DeltaP_Fric:=Abs(DeltaP)-DeltaP_Elev;
If Nre <= 2300 Then Derivada_Longitud:=-Signo*Const1*Exp(4*
Ln(Diam))*DeltaP_Fric/
Sqr(Long);
If Nre > 2300 Then Derivada_Longitud:=-Signo*0.5*Constante*
Exp(-0.5*Ln(Exp(5*Ln
(Diam))*DeltaP_Fric/
(Fac_Fric*Long)))*Exp
(5*Ln(Diam))*DeltaP_Fric/
(Fac_Fric*Sqr(Long))
End
End
End;

FUNCTION Derivada_HP;
Begin
If Gas_Liq Then
Derivada_HP:=-Signo/(K_1*(Exp(K_2*Ln(Rc))-1.0))
Else Derivada_HP:=-Signo*K_1/ Abs(DeltaP)
End;

FUNCTION Derivada_Presion;
Var
DeltaP_Fric : Real;
Begin
If Gas_Liq Then

```

```

Begin
  Derivada_Presion:=0;
  If Tubo_Compresor Then
    Begin
      If ( Diam > 0 ) And ( Long > 0 ) Then
        Derivada_Presion:=-Signo*Potencia[Metodo,2]*Constante*Exp
          (-Potencia[Metodo,4]*Ln(Abs(DeltaF)))*Exp(
            Presion/Factor_2*Exp(Potencia[Metodo,5]*Ln
              (Diam)))/Exp(Potencia[Metodo,3]*Ln(Long));
      End
    Else
      Derivada_Presion:=-Signo*K_2*HP*Exp(K_2*Ln(Rc))/Presion/
        (K_1*Sqr( Exp(K_2*Ln(Rc))-1.0 ));
    End
  Else
    Begin
      Derivada_Presion:=0;
      If Tubo_Compresor Then
        Begin
          If ( Diam > 0 ) And ( Long > 0 ) Then
            Begin
              DeltaP_Fric:=Abs(DeltaF)-DeltaP_Elev;
              If Nre <= 2300 Then Derivada_Presion:=-Signo*Const1*Exp(
                4*Ln(Diam))/Long;
              If Nre > 2300 Then
                Derivada_Presion:=-0.5*Signo*Constante*Exp(-0.5*Ln(Exp
                  (5*Ln(Diam))*DeltaP_Fric/(Fac_Fric*
                    Long)))*Exp(5*Ln(Diam))/(Fac_Fric*
                    Long);
              End
            End
          Else Derivada_Presion:=-Signo*K_1*HP/Sqr(Presion);
        End
      End
    End;
  End;

FUNCTION Derivada_Gasto;
Begin
  If Gasto < 0 Then Derivada_Gasto:= -1
  Else Derivada_Gasto:=1
  End;
End;

```

```
PROCEDURE DecomP;
```

```

Var
  I,J,K,Kp1,Nm1,M : Byte;
  P,T : Real;
Begin
  Deter:=1.0;
  Ips[N]:=1;
  Nm1:=N - 1;

```

```

For K:= 1 To Nm1 Do
Begin
  Kp1:= K+1;
  M:=K;
  For I:= Kp1 To N Do
  If Abs(A[I,K]) > Abs( A[M,K] ) Then M:=I;
  Ips[K]:=M;
  If M <> K Then Ips[N]:=-Ips[N];
  P:=A[M,K];
  A[M,K]:=A[K,K];
  A[K,K]:=P;
  Deter:=Deter*P;
  If P <> 0.0 Then
  Begin
    For I:= Kp1 To N Do A[I,K]:=-A[I,K]/P;
    For J:= Kp1 To N Do
      Begin
        T:=A[M,J];
        A[M,J]:=A[K,J];
        A[K,J]:=T;
        If T <> 0.0 Then
          For I:= Kp1 To N Do A[I,J]:=A[I,J]+A[I,K]*T;
      End
    End
  End
  Deter:= Deter*A[N,N]*Ips[N]
End;

```

```

Procedure Ssolve(Var N:Byte;A:Mat;Ips:VectorI;Var X:Vec);

```

```

Var
  I,J,K : Byte;
  S: Real;
Begin
  For K:= 1 To N - 1 Do
  Begin
    J:=Ips[K];
    S:=X[J];
    X[J]:=~X[K];
    X[K]:=S;
    For I:= K+1 To N Do X[I]:=X[I]+A[I,K]*S;
  End;
  For K:= 1 To N -1 Do
  Begin
    J:= N - K + 1;
    If A[J,J] = 0.0 Then
      Begin
        Writeln('EL SISTEMA NO TIENE SOLUCION');
        Writeln(' Presiona Cualquier Tecla');
        Resp:=ReadKey;
        N:=0;
        Exit
      End;
  End;

```



```
    X[J]:= X[J]/A[J,J];
    S:= -X[J];
    For I:= 1 To N - K Do X[I]:=X[I]+A[I,J]*S
End;
X[1]:=X[1]/A[1,1]
End;
```

```
PROCEDURE Solucion_Sist;
```

```
Var
```

```
  Ips : VectorI;
```

```
  Ierr : Byte;
```

```
Begin
```

```
  FillChar(Ips,SizeOf(Ips),0);
```

```
  Decomp(N,A,Ips,Deter);
```

```
  Bandera_Stop:= N = 0;
```

```
  If Bandera Then
```

```
    Ssolve(N,A,Ips,X);
```

```
End;
```

```
End.
```